

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS**

DANIELE BACH

**QUALIDADE TECNOLÓGICA DE GRÃOS E FARINHAS DE TRIGO (*Triticum
aestivum* L.) OBTIDOS DE DIFERENTES REGIÕES DO ESTADO DO PARANÁ
DURANTE TRÊS SAFRAS CONSECUTIVAS**

**PONTA GROSSA
2026**

DANIELE BACH

QUALIDADE TECNOLÓGICA DE GRÃOS E FARINHAS DE TRIGO (*Triticum aestivum* L.) OBTIDOS DE DIFERENTES REGIÕES DO ESTADO DO PARANÁ DURANTE TRÊS SAFRAS CONSECUTIVAS

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Ivo Mottin Demiate

**PONTA GROSSA
2026**

B117 Bach, Daniele
Qualidade tecnológica de grãos e farinhas de trigo (*Triticum aestivum* L.) obtidos de diferentes regiões do estado do Paraná durante três safras consecutivas. / Daniele Bach. Ponta Grossa, 2026.
209 f.

Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos - Área de Concentração: Ciências e Tecnologia de Alimentos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Ivo Mottin Demiate.

1. Trigo. 2. Amido de trigo. 3. Farinha de trigo. 4. Panificação. 5. Qualidade tecnológica. I. Demiate, Ivo Mottin. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ciências e Tecnologia de Alimentos. III.T.

CDD: 664.2

TERMO DE APROVAÇÃO

DANIELE BACH

“Qualidade tecnológica de grãos e farinhas de trigo (*Triticum aestivum* L.) obtidos de diferentes regiões do Estado do Paraná durante três safras consecutivas”

Tese aprovada como requisito para obtenção do grau de Doutor(a) no Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

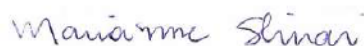
Orientador: Prof. Dr. Ivo Mottin Demiate – UEPG - PR



Prof. Dr. Ivo Mottin Demiate – UEPG - PR - Presidente



Prof. Antonio Roberto Giriboni Monteiro – UEM - PR – Membro Titular Externo



Profa. Dra. Marianne Ayumi Shirai - UTFPR-PR - Membro Titular Externo



Profa. Dra. Renata Dinnies Santos Salem – UEPG - PR - Membro Titular Interno



Prof. Dr. Luiz Gustavo Lacerda - UEPG-PR- Membro Titular Interno

Ponta Grossa, 11 de março de 2026.

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, por me guiar e me iluminar sempre.

Aos meus pais, por sempre estarem ao meu lado, por me incentivarem desde pequena a buscar conhecimento, a sempre querer aprender mais, pelo apoio incondicional. A toda minha família, pelo carinho e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ivo Mottin Demiate, pela oportunidade, por todo aprendizado, incentivo, ajuda e apoio durante o trabalho, foi fundamental para minha formação.

Ao Prof. Dr. Luiz Gustavo Lacerda e Dra. Renata Dinnies Santos Salem, pelas valiosas sugestões e correções com a escrita científica.

Aos profissionais de cooperativas, aos produtores rurais e empresas que tão gentilmente me cederam as amostras para realização do meu trabalho.

À Denise Mendes, sempre disposta a ajudar nas atividades de laboratório.

Aos meus colegas e amigos que fiz durante toda esta caminhada, muito obrigada pelo apoio nas análises, nos estudos e nos cafés!

À CAPES e a UEPG, pela oportunidade e estrutura fornecida.

À todos que de alguma forma contribuíram para a execução deste trabalho.

RESUMO

A indústria de alimentos demanda matérias-primas com qualidade tecnológica estável, elevada funcionalidade e previsibilidade de desempenho industrial, especialmente no setor moageiro e de panificação. Nesse contexto, o trigo (*Triticum aestivum* L.) destaca-se como uma das principais fontes alimentares, cuja qualidade resulta da interação entre fatores genéticos, ambientais e tecnológicos. A composição do grão, a organização estrutural de seus constituintes e as condições edafoclimáticas às quais a cultura é submetida ao longo do ciclo produtivo influenciam diretamente a qualidade da farinha e o comportamento funcional de seus componentes, com destaque para o amido, principal fração quantitativa e elemento-chave na formação da estrutura do pão, na textura do miolo e na estabilidade do produto final. Diante da elevada variabilidade climática característica das regiões produtoras do estado do Paraná, torna-se fundamental compreender de forma integrada os efeitos da interação genótipo x ambiente sobre a qualidade tecnológica do trigo, da farinha e do amido ao longo de diferentes safras. Assim, o objetivo desta tese foi avaliar, de maneira integrada, a qualidade tecnológica de grãos, farinhas e amidos de trigo produzidos em diferentes regiões do estado do Paraná ao longo de três safras consecutivas, considerando parâmetros composicionais, reológicos, térmicos e tecnológicos. Inicialmente, o trabalho apresenta uma revisão bibliográfica crítica e integrada abordando o trigo, a farinha de trigo e o amido de trigo, contemplando aspectos históricos, produtivos e tecnológicos, bem como a estrutura do grão, a composição química de seus principais constituintes e suas propriedades físico-químicas, reológicas e funcionais. Essa abordagem teórica fornece a base conceitual necessária para a compreensão dos fatores que governam a qualidade tecnológica e para a interpretação dos resultados experimentais discutidos ao longo da tese. Na etapa experimental subsequente, são avaliados grãos e farinhas de trigo provenientes de diferentes regiões do estado do Paraná, cultivados ao longo de três safras consecutivas, com o objetivo de caracterizar a qualidade tecnológica e identificar padrões regionais de desempenho industrial. Foram realizadas análises físico-químicas, colorimétricas, reológicas e tecnológicas, integradas por meio de abordagens estatísticas, permitindo compreender as interações entre composição química, proteínas do glúten e propriedades funcionais da farinha. Os resultados evidenciaram relações entre parâmetros clássicos de qualidade, bem como a influência das condições ambientais sobre atributos como hidratação, resistência da massa e perfil colorimétrico, sem comprometer a robustez estrutural das interações entre os componentes do trigo. Na sequência, a tese apresenta a análise da fração amilácea por meio da extração e caracterização do amido de trigo da cultivar Audaz, obtido em diferentes regiões do estado do Paraná ao longo de três safras consecutivas. O amido foi caracterizado quanto ao teor de amilose, propriedades de pasta, transições térmicas, retrogradação, morfologia e desempenho tecnológico na panificação. As variações observadas na organização estrutural e térmica do amido refletiram-se no comportamento viscoamilográfico e em atributos tecnológicos do pão, como volume, cor e textura, evidenciando que diferenças sutis na estrutura do amido podem modular de forma integrada a funcionalidade da farinha e a qualidade do produto final. De forma geral, os resultados obtidos demonstram que a qualidade tecnológica do trigo emerge da interação dinâmica entre grão, farinha e amido, sob influência direta do ambiente e do material genético. A abordagem integrada adotada nesta tese fornece

subsídios científicos relevantes para a seleção de cultivares, o planejamento agrícola e a otimização do uso industrial do trigo produzido no estado do Paraná, especialmente em cenários de variabilidade ambiente.

Palavras-chave: trigo; qualidade tecnológica; farinha; amido; panificação.

ABSTRACT

The food industry demands raw materials with stable technological quality, high functionality, and predictable industrial performance, particularly in the milling and breadmaking sectors. In this context, wheat (*Triticum aestivum* L.) stands out as one of the main food sources, whose quality results from the interaction among genetic, environmental, and technological factors. Grain composition, the structural organization of its constituents, and the edaphoclimatic conditions to which the crop is subjected throughout the production cycle directly influence flour quality and the functional behavior of its components, with starch standing out as the main quantitative fraction and a key element in bread structure formation, crumb texture, and final product stability. Given the high climatic variability characteristic of the wheat-producing regions of the state of Paraná, an integrated understanding of the effects of genotype x environment interaction on the technological quality of wheat, flour, and starch across different growing seasons is essential. Accordingly, the aim of this thesis was to evaluate, in an integrated manner, the technological quality of wheat grains, flours, and starches produced in different regions of the state of Paraná over three consecutive growing seasons, considering compositional, rheological, thermal, and technological parameters. Initially, the study presents a critical and integrated literature review addressing wheat, wheat flour, and wheat starch, encompassing historical, productive, and technological aspects, as well as grain structure, chemical composition of the main constituents, and their physicochemical, rheological, and functional properties. This theoretical approach provides the conceptual basis necessary for understanding the factors governing technological quality and for interpreting the experimental results discussed throughout the thesis. In the subsequent experimental stage, wheat grains and flours from different regions of the state of Paraná, cultivated over three consecutive growing seasons, were evaluated with the aim of characterizing technological quality and identifying regional patterns of industrial performance. Physicochemical, colorimetric, rheological, and technological analyses were conducted and integrated using statistical approaches, allowing the interactions among chemical composition, gluten proteins, and flour functional properties to be elucidated. The results revealed relationships among classical quality parameters, as well as the influence of environmental conditions on attributes such as hydration, dough strength, and color profile, without compromising the structural robustness of the interactions among wheat components. Subsequently, the thesis addresses the analysis of the starch fraction through the extraction and characterization of wheat starch from the Audaz cultivar, obtained from different regions of the state of Paraná over three consecutive growing seasons. Starch was characterized in terms of amylose content, pasting properties, thermal transitions, retrogradation, morphology, and technological performance in breadmaking. Variations observed in the structural and thermal organization of starch were reflected in viscoamylographic behavior and in technological attributes of bread, such as volume, color, and texture, demonstrating that subtle differences in starch structure can integratively modulate flour functionality and final product quality. Overall, the results demonstrate that wheat technological quality emerges from the dynamic interaction among grain, flour, and starch, under the direct influence of environmental conditions and genetic background. The integrated approach adopted in this thesis provides relevant scientific support for cultivar selection, agricultural planning, and optimization of industrial wheat utilization in the state of Paraná, particularly under scenarios of environmental variability.

Keywords: wheat; technological quality; flour; starch; breadmaking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Divisão das três partes do grão de trigo	25
Figura 2 - Fluxograma de moagem do trigo.....	30
Figura 3 - Espaço cor a^* b^* L^*	35
Figura 4 - Farinograma.....	36
Figura 5 - Alveograma	37
Figura 6 - Precipitação - safra 1 (2022/2023)	69
Figura 7 - Precipitação - safra 2 (2023/2024)	71
Figura 8 - Precipitação - safra 3 (2024/2025)	72
Figura 9 - Imagens microscópicas de amostras de amido de trigo.....	170
Figura 10- Pães elaborados com farinha de trigo	180

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características farinográficas e alveográficas - farinha de trigo x aplicações	40
Tabela 2 - Nomenclatura das variedades e região de cultivo	58
Tabela 3 - Resultados do Peso Hectolítrico	67
Tabela 4 - Resultados da análise de PMG	73
Tabela 5 - Resultados do rendimento de extração da farinha	77
Tabela 6 - Resultados da análise de umidade, cinzas e proteína - safra 1 (2022/2023)	81
Tabela 7 - Resultados da análise de umidade, cinzas e proteína - safra 2 (2023/2024)	83
Tabela 8 - Resultados da análise de umidade, cinzas e proteínas - safra 3 (2024/2025)	84
Tabela 9 - Resultados da análise de granulometria das farinhas	87
Tabela 10 - Resultados da análise de cor das farinhas - safra 1 (2022/2023)	90
Tabela 11 - Resultados da análise de cor das farinhas - safra 2 (2023/2024)	91
Tabela 12 - Resultados da análise de cor das farinhas - safra 3 (2024/2025)	93
Tabela 13 - Resultados da análise do teor de glúten úmido	97
Tabela 14 - Resultados da análise de amido danificado - safra 1 (2022/2023)	104
Tabela 15 - Resultados da análise de amido danificado - safra 2 (2023/2024)	106
Tabela 16 - Resultados da análise de amido danificado - safra 3 (2024/2025)	108
Tabela 17 - Resultados do Falling Number e Stirring Number das farinhas - safra 1 (2022/2023)	111
Tabela 18 - Resultados do Falling Number e Stirring Number das farinhas - safra 2 (2023/2024)	112
Tabela 19 - Resultados do Falling Number e Stirring Number das farinhas - safra 3 (2024/2025)	114
Tabela 20 - Resultados da análise de alveografia - safra 1 (2022/2023)	116
Tabela 21 - Resultados da análise de alveografia - safra 2 (2023/2024)	118
Tabela 22 - Resultados da análise de alveografia - safra 3 (2024/2025)	121
Tabela 23 - Resultados da análise de farinografia - safra 1 (2022/2023)	124
Tabela 24 - Resultados da análise de farinografia - safra 2 (2023/2024)	126
Tabela 25 - Resultados da análise de farinografia - safra 3 (2024/2025)	128
Tabela 26 - Resultados das curvas viscoamilográficas - safra 1 (2022/2023)	131
Tabela 27 - Resultados das curvas viscoamilográficas - safra 2 (2023/2024)	132
Tabela 28 - Resultados das curvas viscoamilográficas - safra 3 (2024/2025)	134
Tabela 29 - Correlação de Pearson - safra 1 (2022/2023)	138
Tabela 30 - Correlação de Pearson - safra 2 (2023/2024)	141
Tabela 31- Correlação de Pearson - safra 3 (2024/2025)	142
Tabela 32 - Teor de amilose dos amidos de trigo	160
Tabela 33 - Resultados da análise viscoamilográfica dos amidos de trigo	163
Tabela 34 - Calorimetria exploratória diferencial (DSC) de amidos de trigo	166
Tabela 35 - Parâmetros térmicos de dissociação de complexos amilose-lípido dos amidos de trigo	168

Tabela 36 - Peso inicial e final dos pães produzidos.....	174
Tabela 37 - Volume final dos pães	174
Tabela 38 - Valores da análise de cor da casca dos pães.....	175
Tabela 39 - Valores da análise de cor do miolo dos pães	178
Tabela 40 - Valores da análise de dureza do miolo e da casca dos pães	183

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO 1 – QUALIDADE TECNOLÓGICA DE GRÃOS E FARINHAS DE TRIGO (<i>Triticum aestivum</i> L.) OBTIDOS DE DIFERENTES REGIÕES DO ESTADO DO PARANÁ DURANTE TRÊS SAFRAS CONSECUTIVAS e estudo do amido do trigo: Revisão Bibliográfica	17
1.1 INTRODUÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	20
1.3 REVISÃO DA LITERATURA.....	20
1.3.1 Trigo	20
1.3.2 História do Trigo	20
1.3.3 Produção Mundial e Nacional de trigo.....	22
1.3.4 Estrutura e Composição Nutricional do Grão	24
1.3.5 Classificação do Grão de Trigo	28
1.3.6 Processamento do Grão de Trigo.....	29
1.4 FARINHA DE TRIGO.....	31
1.4.1 Qualidade da Farinha de Trigo	32
1.4.2 Análise de Qualidade da Farinha de Trigo.....	34
1.4.3 Parâmetros de Qualidade da Farinha de Trigo.....	38
1.4.4 Qualidade do Trigo no Brasil e no Paraná.....	40
1.5 AMIDO de trigo.....	42
1.5.1 Composição Química do Amido de Trigo	43
1.5.2 Organização Estrutural e Cristalinidade do Amido de Trigo	45
1.5.3 Distribuição do Tamanho dos Grânulos de Amido de Trigo	46
1.5.4 Papel do Amido e dos Grânulos na Reologia da Massa e na Panificação	47
1.5.5 Gelatinização, Empastamento e Retrogradação do Amido de Trigo	48
1.5.6 Extração do Amido	49
1.5.7 Influência do Genótipo e do Ambiente nas Características do Amido	51
1.5.8 Estresse Hídrico e Efeitos sobre a Biossíntese e a Estrutura do Amido	52
1.6 CONCLUSÃO.....	53
CAPÍTULO 2 – QUALIDADE TECNOLÓGICA DE GRÃOS E FARINHAS DE TRIGO (<i>Triticum aestivum</i> L.) OBTIDOS DE DIFERENTES REGIÕES DO ESTADO DO PARANÁ DURANTE TRÊS SAFRAS CONSECUTIVAS	55
2.1 INTRODUÇÃO	56
2.2 OBJETIVOS	57

2.2.1 Objetivo Geral	57
2.2.2 Objetivos Específicos	57
2.3 MATERIAIS E MÉTODOS	58
2.3.1 Materiais.....	58
2.3.2 Métodos.....	58
2.3.2.1 Nomenclatura das amostras.....	58
2.3.2.2 Peso hectolítrico (PH).....	60
2.3.2.3 Peso de mil grãos.....	60
2.3.2.4 Extração da farinha de trigo	61
2.3.2.5 Determinação da umidade	61
2.3.2.6 Determinação de cinzas	61
2.3.2.7 Determinação de proteínas	62
2.3.2.8 Granulometria da farinha de trigo.....	62
2.3.2.9 Determinação da cor instrumental.....	63
2.3.2.10 Determinação do teor de glúten	63
2.3.2.11 Determinação de amido danificado	64
2.3.2.12 <i>Falling Number</i>	64
2.3.2.13 <i>Stirring Number</i>	65
2.3.2.14 Alveografia.....	65
2.3.2.15 Farinografia	66
2.3.2.16 Propriedade de pasta	66
2.3.2.17 Análise Estatística	66
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
2.4.1 Peso Hectolítrico (PH).....	67
2.4.2 Peso de Mil Grãos.....	72
2.4.3 Rendimento	76
2.4.4 Análise de Umidade, Cinzas e Proteínas das Farinhas.....	81
2.4.5 Granulometria.....	86
2.4.6 Cor Instrumental.....	90
2.4.7 Glúten Úmido	97
2.4.8 Amido Danificado	104
2.4.9 <i>Falling Number</i> e <i>Stirring Number</i>	110
2.4.10 Alveografia.....	115
2.4.11 Farinografia	124
2.4.12 Propriedade de Pasta.....	130

2.4.13 Características Gerais das Farinhas de Trigo	136
2.4.13.1 Safra 1 (2022/2023).....	136
2.4.13.2 Safra 2 (2023/2024).....	139
2.4.13.2 Safra 3 (2024/2025).....	143
2.4.14 Avaliação conjunta do desempenho tecnológico nas três safras	144
2.4.14.1 Safra 1 (2022/2023).....	144
2.4.14.2 Safra 2 (2023/2024).....	146
2.4.14.3 Safra 3 (2024/2025).....	147
2.5 CONCLUSÃO.....	150
CAPÍTULO 3 – EXTRAÇÃO E ANÁLISE DO AMIDO DE TRIGO (<i>Triticum aestivum</i> L.).....	153
3.1 INTRODUÇÃO	154
3.2 OBJETIVOS	155
3.2.1 Objetivo Geral	155
3.2.2 Objetivos Específicos	155
3.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	156
3.3.1 Materiais.....	156
3.3.2 Métodos.....	156
3.3.2.1 Extração do amido	156
3.3.2.2 Teor de amilose	157
3.3.2.3 Propriedade de pasta	158
3.3.2.4 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)	158
3.3.2.5 Microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV).....	158
3.3.2.6 Elaboração dos pães.....	159
3.3.2.7 Determinação da cor instrumental.....	159
3.3.2.8 Análise de textura	159
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	160
3.4.1 Teor de Amilose	160
3.4.2 Propriedade de Pasta.....	163
3.4.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	166
3.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura com Emissão de Campo (MEV).....	169
3.4.5 Elaboração dos Pães	173
3.4.5.1 Análise de Cor	175
3.4.5.2 Análise de Textura	183
3.4.5.3 Avaliação Conjunta do Desempenho dos Amidos e as Características da Farinha de Trigo	186

3.5 CONCLUSÃO.....	190
REFERÊNCIAS.....	193

1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) ocupa posição estratégica nos sistemas agroalimentares globais, constituindo uma das principais fontes de energia e proteínas na dieta humana. No Brasil, apesar das limitações impostas por condições edafoclimáticas diversas, o cultivo do trigo apresenta relevância crescente, especialmente nas regiões Sul e Sudeste, onde a adaptação de cultivares e o manejo agrônomo têm permitido avanços significativos em produtividade e qualidade. Nesse contexto, a qualidade tecnológica do trigo e de seus derivados assume papel central, uma vez que determina tanto o rendimento industrial quanto o desempenho funcional da farinha nos diferentes processos de transformação, em especial na panificação.

A qualidade da farinha de trigo resulta da interação complexa entre a composição química do grão, a organização estrutural de seus constituintes e as condições ambientais às quais a cultura é submetida ao longo do ciclo produtivo. Proteínas, amido, lipídios e componentes da parede celular interagem de forma dinâmica durante as etapas de moagem, mistura, fermentação e forneamento, influenciando propriedades reológicas, térmicas e sensoriais dos produtos finais. Entre esses constituintes, o amido destaca-se não apenas por representar a fração majoritária do grão, mas também por exercer influência decisiva sobre o comportamento da massa, a textura do miolo e a estabilidade do pão ao longo do armazenamento.

Variações genéticas entre cultivares, aliadas às flutuações ambientais entre safras, especialmente relacionadas à disponibilidade hídrica e à temperatura durante o enchimento dos grãos, podem promover alterações significativas na composição e na organização estrutural do amido e das proteínas. Essas modificações refletem-se em parâmetros clássicos de qualidade de grãos e farinhas, bem como em propriedades funcionais mais específicas, como gelatinização, empastamento e retrogradação do amido. Assim, compreender de forma integrada os fatores que governam a qualidade do trigo, da farinha e do amido torna-se essencial para o avanço científico e para a aplicação tecnológica no setor moageiro e panificador.

Diante desse cenário, a presente tese foi estruturada em três capítulos complementares, organizados de modo a construir uma base conceitual sólida e avançar progressivamente da fundamentação teórica para a avaliação experimental da qualidade do trigo e de seus principais constituintes.

No Capítulo 1, foi desenvolvida uma revisão crítica e integrada da literatura científica, abordando aspectos históricos, produtivos e tecnológicos do trigo, da farinha de trigo e do amido de trigo. Esse capítulo discute a estrutura do grão, a composição química dos principais constituintes e suas propriedades físico-químicas e funcionais, estabelecendo os fundamentos necessários para a interpretação dos resultados experimentais apresentados nos capítulos subsequentes.

O Capítulo 2 dedica-se à avaliação da qualidade de grãos e farinhas de trigo provenientes de diferentes cultivares, cultivadas ao longo de três safras consecutivas. Nesse capítulo, são discutidos parâmetros físico-químicos e tecnológicos relacionados à classificação do trigo e da farinha, com ênfase nos efeitos do genótipo, do ambiente e da interação genótipo $\times$ ambiente sobre a qualidade básica e o potencial de uso industrial das farinhas.

No Capítulo 3, o foco concentra-se no amido de trigo, abordando sua extração e caracterização estrutural, térmica e funcional. São analisados parâmetros como teor de amilose, comportamento viscoamilográfico, propriedades térmicas determinadas por calorimetria diferencial de varredura e aspectos relacionados à retrogradação, buscando estabelecer relações entre a organização estrutural do amido e o desempenho tecnológico observado.

De forma integrada, os três capítulos contribuem para uma compreensão abrangente da qualidade do trigo, desde a estrutura e composição do grão até o comportamento funcional da farinha e do amido, oferecendo subsídios científicos relevantes para o aprimoramento da cadeia produtiva e para o desenvolvimento de estratégias voltadas à obtenção de matérias-primas com maior estabilidade e desempenho tecnológico.

CAPÍTULO 1 – QUALIDADE TECNOLÓGICA DE GRÃOS E FARINHAS DE TRIGO (*Triticum aestivum* L.) OBTIDOS DE DIFERENTES REGIÕES DO ESTADO DO PARANÁ DURANTE TRÊS SAFRAS CONSECUTIVAS E ESTUDO DO AMIDO DO TRIGO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

RESUMO

O trigo constitui uma das principais matérias-primas da indústria de alimentos, em especial da panificação, em função de suas propriedades tecnológicas e da versatilidade das farinhas obtidas a partir de seu processamento. A qualidade da farinha de trigo resulta de um conjunto integrado de fatores que envolve a estrutura e a composição do grão, a interação entre genótipo e ambiente, as condições de cultivo e as etapas de processamento industrial. Nesse contexto, análises físico-químicas, reológicas e enzimáticas têm sido amplamente empregadas como ferramentas para estimar o potencial tecnológico das farinhas e direcionar sua aplicação industrial. Entre os constituintes da farinha, o amido destaca-se como o principal componente quantitativo e funcional, exercendo papel ativo no comportamento da massa e no desempenho da panificação, desde a fermentação até a formação e estabilização da estrutura do pão durante o assamento. As propriedades do amido de trigo, incluindo sua composição química e organização estrutural, influenciam diretamente parâmetros reológicos e térmicos, contribuindo para as diferenças observadas entre cultivares, regiões de cultivo e safras. Diante da variabilidade climática e edafoclimática característica das regiões produtoras, o estudo integrado da qualidade do trigo, da farinha e do amido torna-se particularmente relevante, sobretudo em cenários de produção agrícola como o do estado do Paraná. A avaliação comparativa de cultivares ao longo de diferentes safras permite compreender os efeitos da variabilidade ambiental sobre a funcionalidade da farinha e de seus constituintes, fornecendo subsídios para a seleção de matérias-primas e a otimização de seu uso industrial. Assim, o objetivo deste capítulo é apresentar os principais conceitos relacionados ao trigo, à farinha de trigo e ao amido de trigo, estabelecendo a base teórica para a análise da qualidade tecnológica de cultivares produzidas em três safras consecutivas no estado do Paraná, desenvolvida nos capítulos subsequentes.

Palavras-chave: alveografia, amilose, farinografia, gelatinização

ABSTRACT

Wheat represents one of the main raw materials of the food industry, particularly in baking applications, due to its technological properties and the versatility of the flours obtained through its processing. The quality of wheat flour results from an integrated set of factors involving grain structure and composition, genotype × environment interactions, cultivation conditions, and industrial processing steps. In this context, physicochemical, rheological, and enzymatic analyses have been widely employed as tools to estimate the technological potential of flours and to guide their industrial applications. Among the flour constituents, starch stands out as the major quantitative and functional component, playing an active role in dough behavior and baking

performance, from fermentation to the formation and stabilization of bread structure during baking. The properties of wheat starch, including its chemical composition and structural organization, directly influence rheological and thermal parameters, thereby contributing to the differences observed among cultivars, growing regions, and crop seasons. Given the climatic and edaphoclimatic variability characteristic of producing regions, an integrated evaluation of wheat, flour, and starch quality becomes particularly relevant, especially in agricultural production scenarios such as those of the state of Paraná, Brazil. Comparative assessment of cultivars across different crop seasons allows for a better understanding of the effects of environmental variability on flour functionality and its constituents, providing support for raw material selection and optimization of industrial use. Thus, the aim of this chapter is to present the main concepts related to wheat, wheat flour, and wheat starch, establishing the theoretical basis for the analysis of the technological quality of cultivars produced over three consecutive crop seasons in the state of Paraná, as developed in the subsequent chapters.

Keywords: alveography, amylose, farinography, gelatinization

1.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, até o final da década de 1980, o comércio de trigo era controlado pelo governo federal, e as indústrias moageiras operavam sob um sistema de cotas, no qual a matéria-prima não era selecionada nem especificada pelas próprias empresas. Nesse contexto, a diferenciação comercial das farinhas de trigo baseava-se, essencialmente, no teor de cinzas após a moagem, parâmetro diretamente associado ao grau de extração e à presença de frações periféricas do grão.

Com a abertura do mercado e a intensificação da concorrência, observou-se a modernização das indústrias do setor, acompanhada por uma crescente exigência quanto à qualidade da farinha de trigo. A qualidade passou, então, a ser compreendida de forma mais abrangente, como a capacidade de produzir, de maneira uniforme, um produto final tecnicamente adequado, atrativo ao consumidor e economicamente competitivo. Essa mudança conceitual impulsionou a segmentação das farinhas conforme sua aplicação tecnológica, direcionando-as para panificação, massas alimentícias, biscoitos e uso doméstico, cada qual demandando propriedades funcionais específicas.

As farinhas destinadas à panificação, em particular, demandam atenção especial em função da complexidade de seu comportamento durante o processamento. Aspectos relacionados ao manuseio da massa, à estabilidade durante a fermentação e ao desempenho no forneamento refletem a ocorrência de

transformações físico-químicas e bioquímicas ao longo das etapas de mistura, fermentação e cocção. Esses fenômenos influenciam diretamente a eficiência dos processos industriais e a qualidade final dos produtos panificados.

Nesse cenário, embora as proteínas formadoras de glúten desempenhem papel central na estruturação da rede viscoelástica da massa, tornou-se cada vez mais evidente a relevância do amido, constituinte da farinha de trigo, respondendo por aproximadamente 70 a 75% de sua composição. O amido de trigo exerce influência direta sobre propriedades fundamentais da massa e do pão, como absorção de água, viscosidade, gelatinização, retrogradação e textura do miolo, além de atuar como substrato para a atividade enzimática durante a fermentação.

O comportamento tecnológico do amido de trigo está intimamente relacionado à sua organização estrutural, à proporção entre amilose e amilopectina e à distribuição dos grânulos do tipo A e B, características que variam em função do genótipo, das condições ambientais de cultivo e das práticas agronômicas. Essas variações estruturais refletem-se diretamente nas respostas obtidas em análises viscoamilográficas, térmicas e reológicas, impactando o desempenho da farinha nos diferentes processos industriais.

Com o avanço do conhecimento científico, produtores e indústrias passaram a direcionar esforços para a compreensão integrada das variedades de trigo e das farinhas obtidas, utilizando análises químicas, físicas e reológicas como ferramentas para estimar o potencial tecnológico desses materiais. Nesse contexto, o estudo do amido de trigo consolidou-se também como elemento estratégico para a compreensão da qualidade da farinha, permitindo não apenas a otimização dos processos industriais, mas também o desenvolvimento de produtos mais consistentes e adaptados às demandas do mercado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Apresentar, por meio de revisão de literatura, os principais conceitos relacionados ao trigo, à farinha de trigo e ao amido de trigo, abordando sua estrutura, composição e propriedades tecnológicas, de modo a estabelecer a base conceitual

para a análise comparativa da qualidade tecnológica de cultivares produzidas em três safras consecutivas no estado do Paraná.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Revisar os principais conceitos relacionados ao trigo, com ênfase em sua estrutura, composição e importância tecnológica;
- Descrever a estrutura morfológica e a composição do grão de trigo, destacando o papel de suas diferentes frações na qualidade da farinha;
- Revisar os conceitos de qualidade da farinha de trigo, considerando a influência da interação entre genótipo, ambiente e processamento;
- Identificar os principais parâmetros físico-químicos e reológicos empregados na avaliação da qualidade tecnológica da farinha de trigo;
- Revisar as características estruturais e funcionais do amido de trigo, com ênfase em sua composição química, organização estrutural e distribuição do tamanho dos grânulos;
- Evidenciar a contribuição do amido de trigo para o comportamento reológico da massa e o desempenho tecnológico na panificação.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

1.3.1 Trigo

Conforme estabelecido pela Instrução Normativa nº 38, de 30 de novembro de 2010, o termo “trigo” refere-se especificamente aos grãos oriundos das espécies *Triticum aestivum* L. e *Triticum durum* L., as quais se consolidaram como as mais relevantes para a alimentação humana e a indústria de panificação e massas (Brasil, 2010).

1.3.2 História do Trigo

Entre os cereais que moldaram a história da alimentação humana, poucos exerceram papel tão determinante quanto o trigo, cultivado desde aproximadamente 9000 a.C., cuja domesticação viabilizou a transição de comunidades nômades para sociedades sedentárias, criando as bases para o florescimento da agricultura e para

o surgimento das primeiras civilizações organizadas; pertencente à família das gramíneas (*Poaceae*), trata-se de uma planta herbácea de ciclo anual ou bienal que se consolidou como um dos alimentos básicos mais difundidos do mundo, assumindo posição central na evolução cultural e socioeconômica da humanidade (Gobetti *et al.*, 2018; Vianna, 2018).

O grão, ao ser processado, origina produtos centrais na dieta global, pães, massas, biscoitos, e insumos para bebidas fermentadas e destilados. Tal versatilidade, somada ao elevado valor nutricional, favoreceu sua disseminação ao longo dos séculos, a ponto de ocupar hoje a segunda posição em produção mundial, liderando ainda em volume de comércio internacional (Jia *et al.*, 2025).

As evidências arqueobotânicas situam sua origem no Crescente Fértil, região entre os rios Tigre e Eufrates, onde gramíneas selvagens como o *Triticum dicoccum* (Emmer) foram domesticadas. O Einkorn (diploide, genoma AA) e o próprio Emmer (tetraploide, genoma AABB), ambos provenientes do sudeste da atual Turquia, figuram entre as primeiras espécies cultivadas. A expansão agrícola subsequente no Oriente Próximo resultou no aparecimento do genótipo hexaploide (*Triticum aestivum*), atualmente conhecido como trigo pão, que se consolidou como a variedade predominante no cultivo global (Khalid *et al.*, 2023). Na América, o cereal foi introduzido no período colonial, inicialmente no território correspondente ao atual México e regiões do sul dos Estados Unidos. No Brasil, chegou em 1534 pela expedição de Martim Afonso de Souza, com destinação prioritária à exportação para Portugal. Contudo, a inadequação às condições tropicais restringiu seu cultivo, o que levou ao progressivo deslocamento da produção para as regiões Sul e Sudeste, onde o ambiente se mostrou mais propício e permitiu ganhos expressivos de produtividade (Ambrosi *et al.*, 2000; Val-Moraes, 2017).

Em áreas como a Ásia Ocidental, a África e a Europa, firmou-se como base da segurança alimentar e da identidade cultural, projetando-se como insumo vital para a autonomia de Estados e para a estabilidade das sociedades humanas (Vianna, 2018).

A importância histórica do grão também se revela em sua própria denominação. O termo latino *Triticum*, que significa “triturado”, remete à ancestralidade do processo de moagem, no qual o endosperma era separado das estruturas externas do grão. Essa prática não apenas ilustra sua centralidade na alimentação, como também reflete a evolução tecnológica ao longo dos séculos, impulsionada pela busca por maior eficiência no beneficiamento. Tais avanços não só viabilizaram o consumo

direto, mas também ampliaram as aplicações industriais, consolidando a cultura como um dos pilares da agroindústria moderna (Leon, 2007).

A longevidade e a expansão desse cultivo explicam-se, em grande medida, por sua notável capacidade de adaptação a diferentes tipos de solo e a variadas condições climáticas, associada ao elevado potencial produtivo. Ainda assim, o diferencial mais relevante reside nas propriedades viscoelásticas do glúten, responsáveis por conferir características únicas às farinhas derivadas. Esse conjunto de atributos tornou possível sua consolidação como o principal cereal de clima temperado e matéria-prima indispensável para a elaboração de uma ampla gama de alimentos — desde preparações simples, como pães e massas, até formulações processadas de maior sofisticação tecnológica, como cereais matinais extrusados (Harknese *et al.*, 2020; Papadimitriou *et al.*, 2019).

Embora sua preferência histórica recaia sobre ambientes de clima ameno e seco, avanços no manejo agrônomo, como a correção de solos, o incremento da disponibilidade hídrica e a modernização tecnológica, têm possibilitado sua produção em regiões mais quentes. Esses progressos evidenciam os resultados da pesquisa científica voltada para a expansão sustentável do cultivo, reforçando sua relevância estratégica na agricultura contemporânea e na segurança alimentar mundial (Madeira, 2014).

1.3.3 Produção Mundial e Nacional de Trigo

O rendimento e a qualidade da safra de trigo são resultados de uma interação complexa entre fatores agrônômicos e ambientais. Dentre os elementos que mais influenciam esse desempenho, destacam-se a escolha adequada da cultivar, as características físico-químicas do solo e as condições climáticas que prevalecem durante o ciclo de desenvolvimento da planta. Esses fatores, quando bem manejados, contribuem significativamente para o potencial produtivo e a obtenção de grãos com qualidade tecnológica superior (Aktar-Uz-Zaman *et al.*, 2017, Vianna, 2018).

Essa relação entre práticas agrônômicas e desempenho produtivo ajuda a explicar por que o trigo se destaca no contexto agrícola mundial não apenas por sua ampla adaptabilidade, mas também por seu papel fundamental na segurança alimentar global. Em 2023, a cultura foi cultivada em uma área estimada de 222 milhões de hectares, refletindo sua relevância entre os principais sistemas de

produção. Embora não lidere o volume total de produção, figura entre os cereais mais expressivos, com colheitas que superaram 788 milhões de toneladas nesse mesmo ano. Ao lado do milho e do arroz, o trigo forma a base que sustenta a maior parte da produção mundial de cereais, respondendo por cerca de 90% desse total (FAOSTAT, 2024; ABITRIGO, 2025).

Entre os maiores produtores mundiais de trigo, destacam-se a China, com 136,9 milhões de toneladas, e a Índia, com 110,6 milhões, seguidas pela Rússia, que alcançou 91,5 milhões de toneladas, e pelos Estados Unidos, com 49,3 milhões. Juntas, essas quatro nações concentram uma parcela expressiva da oferta global do cereal, respondendo por mais de 42% da produção total em 2023 (FAOSTAT, 2024).

O Brasil ocupa a 15ª posição no *ranking* global de produção de trigo, com um volume estimado em 10,8 milhões de toneladas na safra de 2023. Embora essa participação ainda seja considerada modesta no cenário internacional, o país apresenta um potencial expressivo de expansão, sobretudo com o fortalecimento de investimentos em tecnologia, aprimoramento das práticas de manejo e maior adequação às condições edafoclimáticas das regiões produtoras (FAOSTAT, 2024; Brasil, 2024; ABITRIGO, 2025).

No Brasil, a produção de trigo está fortemente concentrada na Região Sul, que responde por aproximadamente 90 % do volume nacional. Os destaques ficam por conta do Paraná, com cerca de 3,7 milhões de toneladas, seguido pelo Rio Grande do Sul, com 2,9 milhões, e Santa Catarina, com 360 mil toneladas, totalizando cerca de 6,9 milhões de toneladas em 2023. Essa expressiva concentração geográfica reflete não apenas as condições climáticas mais favoráveis à cultura, mas também a tradição agrícola consolidada desses estados na triticultura (Brasil, 2024; ABITRIGO, 2025).

Para atender à demanda interna, o Brasil importou, em 2023, aproximadamente 5,15 milhões de toneladas de trigo. Deste total, cerca de 77 % tiveram origem na Argentina, 12,8 % no Uruguai e 10,1 % no Paraguai. Esses dados evidenciam a dependência do país em relação ao mercado externo, especialmente dos países do Mercosul, para complementar sua oferta interna e garantir o abastecimento da cadeia produtiva nacional (Brasil, 2024).

Em constante desenvolvimento, o trigo atualmente apresenta grandes avanços genéticos, químicos e tecnológicos, afetando diretamente na sua qualidade e

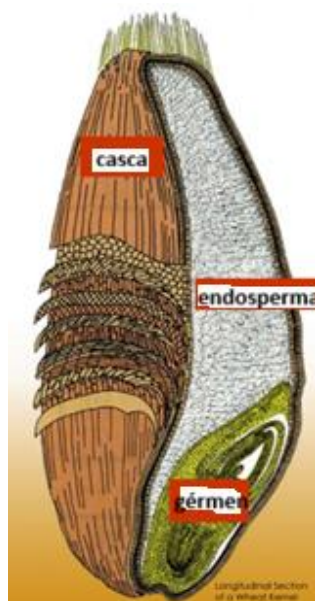
consequentemente na valorização da característica final do produto para o consumidor cada vez mais exigente (Kiszonas *et al.*, 2018).

1.3.4 Estrutura e Composição Nutricional do Grão

A forma e a composição do grão de trigo podem variar bastante, dependendo tanto da variedade cultivada quanto das condições em que a planta se desenvolve. Por isso, não é raro encontrar diferenças entre os dados apresentados em estudos científicos. Cada grão possui, em média, cerca de 30 mil células, e o conteúdo de cada uma delas muda conforme a posição que ocupam dentro da estrutura do grão (Posner, 2000; Solah *et al.*, 2016; Sharma *et al.*, 2020; Jia *et al.*, 2025).

O grão de trigo classifica-se como uma cariopse, de cores e tamanhos variados dependendo da espécie, apresenta formato oval com extremidades arredondadas, medindo entre 4 e 8 mm de comprimento e peso médio de 35 mg. Estruturalmente, divide-se em três regiões principais: o pericarpo (ou casca), o endosperma e o embrião (ou gérmen), como ilustra a figura 1. Essas partes possuem composições e funções distintas, o que influencia diretamente o comportamento do grão durante o processamento industrial (Scheuer, 2011; Solah *et al.*, 2016; Sharma *et al.*, 2020).

Figura 1 - Divisão das três partes do grão de trigo



Fonte: Google Imagens

O trigo é uma fonte de energia para a alimentação humana, e a composição nutricional do grão varia de acordo com o clima e solo, sendo que em média possui 12 % de água, 70 % de carboidratos, 12 % de proteína, 2 % de gordura, 1,8 % de minerais e 2,2 % de fibras brutas. O principal componente do grão de trigo é o amido, variando de 60-75 % no grão e 70-80 % na farinha, dependendo da variedade. É o principal carboidrato de reserva, contribuindo para o suprimento energético e importante fonte de ingestão calórica (Hoseney, 1991, Solah *et al.*, 2016, Valková, *et al.*, 2019).

O gérmen do trigo encontra-se na região basal do grão, representando aproximadamente 2 a 4 % de sua massa total. Essa estrutura concentra elementos essenciais ao processo de germinação, incluindo o embrião, que contém as primeiras formações de raízes e brotos, e o escutelo, responsável pela condução de nutrientes ao embrião durante o início do desenvolvimento. No polo oposto à base do grão, observa-se a presença de tricomas curtos e delicados, com espessura entre 10 e 15 μm e comprimento em torno de 0,5 mm. A maturidade fisiológica do gérmen está intimamente associada à intensidade da atividade enzimática do grão, refletindo sua composição altamente nutritiva, rica em carboidratos simples, lipídios, vitaminas e enzimas funcionais (Kaur *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2020).

Embora represente apenas uma pequena fração da massa total do grão, o gérmen de trigo concentra elevada densidade nutricional, o que lhe confere expressivo

valor do ponto de vista alimentar e tecnológico. Sua composição lipídica situa-se entre 10 % e 15 %, com predominância de ácido linoleico, classificado como essencial, e presença relevante de ácido linolênico, ambos reconhecidos por seus benefícios à saúde, mas também por sua elevada susceptibilidade à oxidação, fator que pode comprometer a estabilidade do produto (Xiong, 2025; Sharma *et al.*, 2020).

A fração proteica do gérmen é constituída por albuminas, globulinas, gluteninas e gliadinas, resultando em um perfil aminoacídico completo, com 17 aminoácidos distintos, incluindo oito essenciais, entre os quais se destacam lisina, metionina e treonina, cujas concentrações podem superar em até duas vezes aquelas observadas na farinha convencional. Estudos têm destacado o gérmen de trigo como uma das fontes mais promissoras de proteína de origem vegetal, em razão de seu perfil aminoacídico balanceado e do elevado teor de compostos com potencial bioativo, apresentando aproximadamente 30 % de proteínas, 18,4 % de fibras alimentares, 10-15 % de lipídios, 4,2 % de cinzas, cerca de 15,8 mg de vitamina E por 100 g de produto e umidade próxima de 11,4 % (Xiong, 2025; Sharma *et al.*, 2020; Chai, 2025; Pomeranz, 1988).

O endosperma corresponde à maior fração do grão de trigo, representando entre 80 e 85 % de sua massa total. Sua função central consiste em armazenar nutrientes que sustentam o embrião durante a germinação. Histologicamente, é formado por células poliédricas de paredes finas, ricas em proteínas de reserva (gluteninas e gliadinas) e com teores consideráveis de vitaminas do complexo B, minerais e lipídios em menor proporção (Glenn; Saunders, 1990; Shewry *et al.*, 2022; Shewry, 2015; Pomeranz, 1988).

Nesse tecido, o amido ocupa posição de destaque como principal forma de reserva, desempenhando papel crucial tanto para a nutrição humana quanto para a funcionalidade tecnológica das farinhas. Na panificação, sua presença influencia diretamente a textura, o volume e a estrutura dos produtos assados, o que o torna um dos constituintes mais valorizados (Solah *et al.*, 2016; Scheuer, 2011; Valková *et al.*, 2019).

Além dos polissacarídeos, encontra-se uma fração lipídica composta por fosfolipídios, glicolipídios e pequenas quantidades de triglicerídeos. Embora modestos em quantidade, esses compostos exercem funções estruturais essenciais, como a formação de membranas celulares e a interação com proteínas durante o aquecimento. González-Thuillier *et al.* (2015) ressaltam que sua distribuição não é

homogênea: as regiões periféricas concentram maior proporção de fosfolipídios, enquanto o centro contém lipídios mais neutros. Essa heterogeneidade repercute diretamente na funcionalidade da farinha, influenciando parâmetros como absorção de água, coesão do glúten e formação da crosta.

Dentre os constituintes, as proteínas de armazenamento exercem papel determinante na qualidade tecnológica do cereal. As gliadinas conferem extensibilidade e viscosidade às massas, enquanto as gluteninas contribuem com elasticidade e resistência. O equilíbrio entre essas frações origina a rede de glúten, cuja viscoelasticidade e capacidade de retenção de gás asseguram a produção de pães e derivados com volume e textura característicos (Zhang *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2022; Ooms *et al.*, 2019).

As porções externas do grão, por sua vez, compõem o farelo, que representa de 15 a 20 % da massa total e constitui o principal subproduto do processo de moagem. Essa fração tem despertado grande interesse devido à qualidade nutricional, caracterizada por elevados teores de fibras alimentares (40–50%), proteínas (14–20%), compostos fenólicos, vitaminas e minerais (Eliasdottir *et al.*, 2025; Brouns *et al.*, 2012). Estruturalmente, o farelo é formado por várias camadas sobrepostas que atuam tanto na proteção quanto na nutrição da semente, entre as quais se destacam o pericarpo externo, o pericarpo interno, a testa (ou tegumento), a camada hialina e a aleurona (Brouns *et al.*, 2012; Hemery *et al.*, 2007).

O pericarpo, responsável por cerca de 15 % do peso total do cereal, funciona como invólucro protetor, sendo rico em celulose e minerais. Suas subdivisões incluem, no pericarpo externo, epiderme, hipoderme e células de parede fina, enquanto o pericarpo interno apresenta células intermediárias, camadas transversais e células tubulares. Camadas internas subsequentes, como a testa e a epiderme nucelar (camada hialina), também participam da composição estrutural do farelo, agregando valor nutricional e tecnológico, sobretudo em formulações integrais (Shevkani *et al.*, 2016; Hosney, 1991).

Entre as camadas, a aleurona tem recebido destaque particular. Localizada imediatamente abaixo da casca, corresponde a uma fina faixa celular que representa de 1 a 3 % da massa do grão. Estudos recentes apontam seu potencial na recuperação de proteínas com elevada funcionalidade, bem como sua influência sobre os teores de fitato e a biodisponibilidade de minerais (Eliasdottir *et al.*, 2025).

Trata-se de uma região formada por células vivas e metabolicamente ativas, com paredes mais espessas e composição distinta em relação ao endosperma. Essa estrutura concentra proteínas solúveis — em torno de 15 % do total do grão —, sobretudo albuminas e globulinas, além de minerais, vitaminas do complexo B e enzimas, como fosfatases e proteases, que participam da mobilização de nutrientes durante a germinação. Dessa forma, a aleurona cumpre papel essencial na regulação metabólica do grão e contribui de maneira significativa para o valor nutricional e funcional dos produtos moageiros (Shewry *et al.*, 2022; Brouns *et al.*, 2012).

Assim, cada fração do grão, seja o endosperma com suas reservas amiláceas e proteicas, o farelo com suas camadas protetoras e fibrosas ou a aleurona com seu conteúdo bioativo, desempenha funções complementares que determinam tanto a viabilidade da semente quanto a qualidade nutricional e tecnológica dos derivados. Esse panorama integrado permite compreender a singularidade do trigo como matéria-prima, oferecendo base sólida para discussões posteriores sobre suas aplicações industriais e impactos na saúde humana.

1.3.5 Classificação do Grão de Trigo

A classificação botânica do trigo baseia-se em um sistema taxonômico amplamente consolidado na literatura científica internacional, estruturado a partir de critérios morfológicos, citogenéticos e evolutivos. Esse cereal enquadra-se no Reino Plantae, Divisão Tracheophyta, Classe Magnoliopsida, Ordem Poales, Família Poaceae, Subfamília Pooideae, Tribo Triticeae, Subtribo Triticinae e Gênero Triticum. A espécie predominante, *Triticum aestivum* L., conhecida popularmente como trigo comum ou de panificação, apresenta genoma hexaplóide (BBAADD), com $2n = 6x = 42$ cromossomos. Esse arranjo resulta de eventos de hibridização natural entre ancestrais tetraploides, como *Triticum turgidum*, e espécies diploides, como *Aegilops tauschii*, processo ocorrido há cerca de 8.000 a 9.000 anos na região do Crescente Fértil (Sharma *et al.*, 2020 Aktar-uz-Zaman *et al.*, 2017).

Entre as variedades botânicas, destacam-se principalmente o *Triticum vulgare* e o *Triticum durum*. O primeiro abrange o *Triticum aestivum*, destinado sobretudo à panificação e amplamente cultivado no Brasil e no mundo, além do *Triticum compactum*, tradicionalmente empregado na elaboração de bolos e biscoitos. Já o *Triticum durum*, espécie que não apresenta cultivo significativo no Brasil, é

amplamente valorizado para a produção de massas alimentícias, especialmente macarrão (Kiszonas *et al.*, 2018; ABITRIGO, 2021).

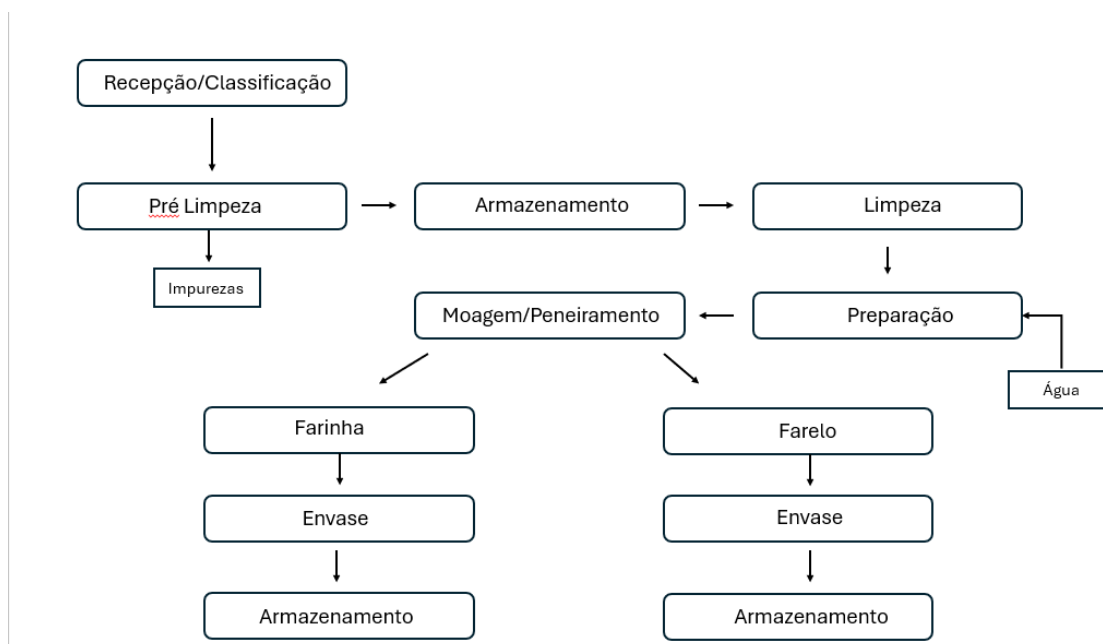
No âmbito comercial, a classificação segue parâmetros associados à composição do grão e ao uso industrial. Os trigos durum, caracterizados por elevado teor proteico, são voltados para massas alimentícias; os trigos duros (*hard*) apresentam excelente desempenho para panificação; os semi-duros, resultantes de mutações ou híbridos, possuem características intermediárias e exigem ajustes tecnológicos; por fim, os trigos moles (*soft*) são ideais para a produção de bolos, biscoitos e demais produtos de confeitaria (Brasil, 2023; ABITRIGO, 2021).

Assim, a classificação botânica e comercial do trigo reflete não apenas sua origem evolutiva e diversidade genética, mas também sua relevância prática frente às demandas da indústria alimentícia. A compreensão desses aspectos fornece a base necessária para discutir, de maneira aprofundada, as propriedades físico-químicas e tecnológicas do grão, que determinam seu desempenho na panificação e em outros segmentos de processamento.

1.3.6 Processamento do Grão de Trigo

A moagem do trigo tem como finalidade central a extração do endosperma amiláceo, que representa a principal fração do grão destinada à produção de farinha. A figura 2 ilustra um fluxograma de moagem. Esse processo envolve sucessivas etapas de fragmentação e separação mecânica, realizadas por meio de moinhos de rolos e peneiras, em um sistema conhecido como redução gradual, que assegura a obtenção de partículas com diferentes graus de pureza e granulometria (Kaliniewicz *et al.*, 2023). A partir desse procedimento, obtêm-se três produtos principais: o gérmen, rico em lipídios e vitaminas; o farelo, constituído pelas camadas externas do grão, de elevado teor de fibras e compostos bioativos; e a farinha, formada predominantemente pelo endosperma, utilizada amplamente na indústria alimentícia (Hourston *et al.*, 2017).

Figura 2 - Fluxograma de moagem do trigo



Fonte: a autora.

A separação eficiente dessas estruturas durante a moagem é um desafio técnico importante. Um fator que intensifica essa dificuldade é a presença da fissura (ou sulco), responsável por aproximadamente 25 % da superfície do grão e que se estende quase até o centro. Essa característica anatômica exige cuidados específicos durante a trituração para preservar a integridade dos constituintes e evitar contaminações cruzadas (Posner, 2000).

Entre as propriedades físicas da farinha, a granulometria desempenha papel essencial, uma vez que influencia diretamente o escoamento, a absorção de água e a formação da massa. Farinhas com partículas muito finas tendem a apresentar maior coesividade, o que pode comprometer o processamento tecnológico e alterar as características sensoriais e estruturais do produto final. Além disso, mesmo sob condições padronizadas de moagem, diferentes cultivares de trigo apresentam variações na distribuição do tamanho de partículas, refletindo-se em diferenças de qualidade tecnológica da farinha (Kaliniewicz *et al.*, 2023; Sarkar *et al.*, 2022).

O processamento da farinha inicia-se pela etapa de limpeza, destinada à remoção de impurezas provenientes do campo. Na sequência, procede-se à umidificação do grão (condicionamento), que geralmente atinge valores entre 14 e 16 % de umidade, de acordo com sua classificação. Essa etapa é estratégica, pois a correta hidratação favorece o amolecimento das camadas externas e a consequente

separação entre endosperma e farelo, aumentando a eficiência da extração e o rendimento global do processo (Benassi; Watabe, 1997; Wang *et al.*, 2017; Capelli *et al.*, 2020).

Segundo Benassi e Watabe (1997), a moagem propriamente dita ocorre em três etapas sequenciais: trituração, compressão e redução. Na fase inicial, os grãos passam por cilindros que giram em sentidos opostos, promovendo a ruptura do grão e a separação parcial das frações. O material resultante segue para os *plansifters*, que realizam a classificação em farinha acabada, partículas de endosperma e farelo, sendo estas últimas redirecionadas ao sistema para nova extração. As frações mais grossas de sêmola são encaminhadas aos sassores, onde passam por peneiramento e classificação, e posteriormente destinadas aos rolos de compressão. Na etapa final de redução, a farinha é refinada em cilindros específicos e novamente peneirada, antes de receber a fortificação com ferro e ácido fólico, conforme exigência legal, sendo posteriormente homogeneizada e armazenada em silos até o envase e a comercialização.

O rigor no controle da granulometria e na eficiência de cada etapa da moagem torna-se determinante para a qualidade tecnológica da farinha, especialmente em sua aplicação na panificação. Farinhas de moagem mais uniforme favorecem o desenvolvimento adequado da rede de glúten, melhorando a retenção de gases, o volume e a textura do pão, enquanto partículas irregulares ou excessivamente finas podem comprometer a reologia da massa e a qualidade sensorial do produto final (Cauvain; Young, 2015).

1.4 FARINHA DE TRIGO

A farinha de trigo constitui a principal matéria-prima utilizada na formulação de alimentos básicos e panificados, desempenhando papel estratégico na indústria de alimentos em virtude de suas propriedades funcionais e nutricionais (Barros, 2018). No Brasil, sua definição e padrões de identidade e qualidade são regulamentados pela Instrução Normativa nº 8 de 2 de junho de 2005, a qual a caracteriza como o produto obtido a partir de grãos de *Triticum aestivum* L., de outras espécies do gênero *Triticum* ou ainda de combinações destes, mediante processos de trituração, moagem ou outras tecnologias compatíveis (Brasil, 2005).

De acordo com a referida normativa, a farinha proveniente da moagem de grãos de trigo limpos deve apresentar textura fina e suave ao tato, cor natural característica, ausência de sabores estranhos como ranço, mofo, amargor, acidez excessiva ou dulçor atípico. Além disso, deve possuir aspecto uniforme, sem pontos escuros ou manchas, e estar isenta de defeitos, insetos vivos ou mortos, matérias estranhas e odores anormais, garantindo a segurança e a aceitação do produto pelo consumidor (Brasil, 2005).

No contexto normativo mais amplo, a farinha de trigo também está sujeita às exigências de fortificação obrigatória estabelecidas pela Resolução RDC nº 604/2022 da ANVISA, que determina a adição de ferro e ácido fólico como medida de saúde pública voltada à prevenção de anemias nutricionais e defeitos do tubo neural em recém-nascidos (Brasil, 2022). Além disso, a legislação brasileira prevê limites máximos de umidade (15%), cinzas (até 0,80% para farinha tipo 1) e impurezas, parâmetros que asseguram a estabilidade físico-química e a qualidade tecnológica do produto (Brasil, 2005).

Em perspectiva comparada, tais regulamentações dialogam com diretrizes internacionais do *Codex Alimentarius* e com recomendações da FAO/OMS, que reforçam a importância de padrões rígidos de identidade e qualidade para produtos derivados do trigo, dado seu impacto direto na segurança alimentar e nutricional (FAO/WHO, 2019). Estudos recentes destacam, ainda, que a qualidade da farinha, medida por parâmetros físico-químicos e reológicos, influencia diretamente o desempenho tecnológico na panificação, como absorção de água, desenvolvimento da rede de glúten e características sensoriais do produto final (Cauvain; Young, 2015; Shevkani *et al.*, 2016).

1.4.1 Qualidade da Farinha de Trigo

A valorização comercial da farinha depende, em grande parte, de seu desempenho tecnológico, especialmente no setor de panificação, que absorve cerca de 55% da produção nacional. Os usos restantes destinam-se ao consumo doméstico (17%), à fabricação de massas (15%), biscoitos (11%) e confeitaria (2%) (ABITRIGO, 2021; Dube *et al.*, 2020; Johansson *et al.*, 2020).

A qualidade final do cereal decorre da interação entre genótipo e ambiente. Aspectos morfológicos, como peso, forma e tamanho, influenciam diretamente

parâmetros como rendimento de moagem, peneiramento e peso hectolítrico. Sementes com maior proporção de endosperma em relação ao farelo apresentam desempenho superior nesses processos (Hammermeister, 2008).

Ainda que a base genética seja relevante, estudos demonstram que as condições de cultivo exercem impacto cinco a seis vezes maior sobre as propriedades do grão (Fowler *et al.*, 1990). Entre os elementos ambientais, a temperatura tem papel central: embora seja uma cultura de inverno, o cereal mostra alta sensibilidade a estresses térmicos. Exposição a baixas temperaturas pode comprometer a síntese de amido, reduzir peso e diâmetro dos grãos, limitar a formação de estruturas e dificultar o transporte de açúcares e proteínas do caule para a semente (Liu *et al.*, 2019).

Ensaio de campo realizados por Liu *et al.* (2019) evidenciaram que temperaturas muito baixas, embora tenham elevado a concentração proteica e favorecido o desempenho no processamento, reduziram a deposição de amido, comprometendo a aparência e a composição final da colheita. Esses resultados reforçam a importância das fases de florescência e formação, consideradas etapas críticas, nas quais a manutenção de condições hídricas adequadas e de temperaturas favoráveis define tanto a eficiência da moagem quanto o rendimento industrial (Guttieri *et al.*, 2001).

Do ponto de vista tecnológico, o teor e a qualidade das proteínas representam os principais determinantes do comportamento reológico, influenciando resistência, tempo de desenvolvimento, extensibilidade, estabilidade e volume final do pão. Alterações na composição proteica afetam desde a absorção de água até a estrutura do produto assado, condicionando sua aceitação pelo consumidor e sua aplicabilidade industrial (Nuttall *et al.*, 2017; Ooms *et al.*, 2019; Geisslitz *et al.*, 2019).

Além das condições de cultivo e do material genético, o desempenho da farinha pode ser modulado por variáveis relacionadas ao processamento. Johansson *et al.* (2020) e Aktar-Uz-Zaman *et al.* (2017) destacam a influência de práticas como moagem, mescla de cultivares, maturação, condicionamento, emprego de aditivos e uso de frações específicas do grão. Kiszonas *et al.* (2018) acrescentam que, quando controlados de maneira adequada, esses fatores possibilitam ajustar o insumo às demandas industriais, assegurando padrões consistentes para aplicações específicas.

Em síntese, o desempenho tecnológico da farinha resulta da convergência entre características genéticas, condições ambientais e intervenções de

processamento. A compreensão aprofundada dessas interações permite maior precisão na escolha de cultivares e no planejamento industrial, assegurando não apenas eficiência produtiva, mas também alimentos com qualidade nutricional e tecnológica diferenciada.

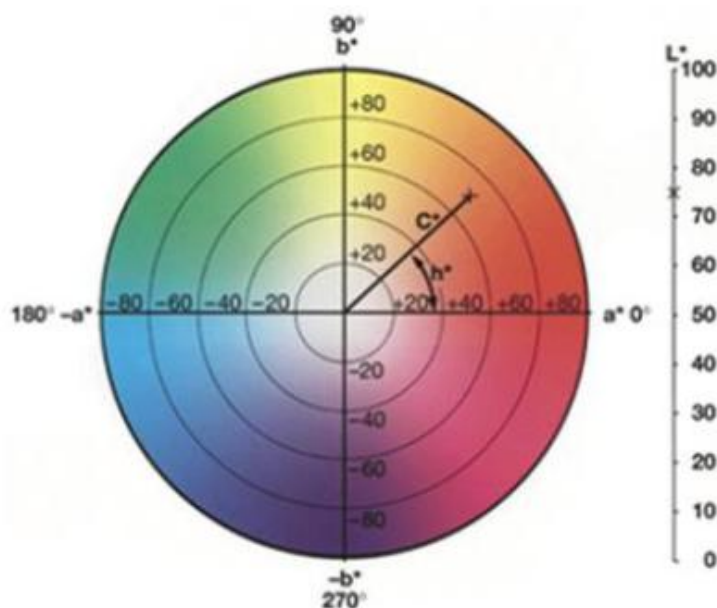
1.4.2 Análise de Qualidade da Farinha de Trigo

As análises físico-químicas fornecem informações fundamentais sobre a identidade e o desempenho do grão e da farinha, sendo ainda utilizadas como critério oficial de classificação segundo a Instrução Normativa nº 38/2010 (BRASIL, 2010). Entre os parâmetros mais relevantes estão o peso hectolitro (PH), o teor de cinzas, a umidade e o conteúdo de proteína.

O peso hectolitro é tradicionalmente empregado como indicador do rendimento de moagem e, conseqüentemente, do valor comercial do grão. A classificação oficial estabelece três categorias: Tipo 1 ($\text{PH} \geq 78$), Tipo 2 ($\text{PH} \geq 75$) e Tipo 3 ($\text{PH} \geq 72$). Cultivares com maior PH apresentam maior proporção de endosperma, resultando em maior eficiência na extração de farinha e melhor remuneração ao produtor (Brasil, 2010; Clarke *et al.*, 2018; Martin *et al.*, 2022). Entretanto, esse índice sofre influência de variáveis como estresse hídrico, ocorrência de doenças, acamamento ou mesmo antecipação da colheita.

Outro parâmetro relevante é o teor de cinzas, que expressa a fração mineral presente no grão ou na farinha. Valores mais elevados ($>2,9\%$) indicam menor grau de purificação, maior presença de partículas de farelo e coloração mais escura, o que pode limitar o uso em determinadas formulações (Sezer *et al.*, 2017; Czaja; Sobota; Szostak, 2020; Wang *et al.*, 2020; Nuttall *et al.*, 2017).

A cor, por sua vez, representa um atributo de grande importância para a aceitação industrial e do consumidor. Avaliações baseadas nos parâmetros L^* , a^* e b^* , bem como em derivados como C^* e Hue, permitem quantificar luminosidade, saturação e tonalidade, fornecendo subsídios para diferenciar lotes e prever a qualidade visual de farinhas e produtos. A Figura 3 ilustra o diagrama de cor, as variáveis L^* , a^* , b^* , C^* e $^{\circ}\text{H}$ (Ferreira; Spricigo, 2017; Siah; Quail, 2018).

Figura 3 - Espaço cor $a^* b^* L^*$ 

Fonte: Ferreira; Spricigo, 2017

A umidade também é determinante, pois se relaciona inversamente ao conteúdo de matéria seca. Níveis fora do ideal comprometem a conservação do grão e da farinha, além de interferirem na estabilidade do armazenamento e na eficiência do processo de moagem (Scariot *et al.*, 2018).

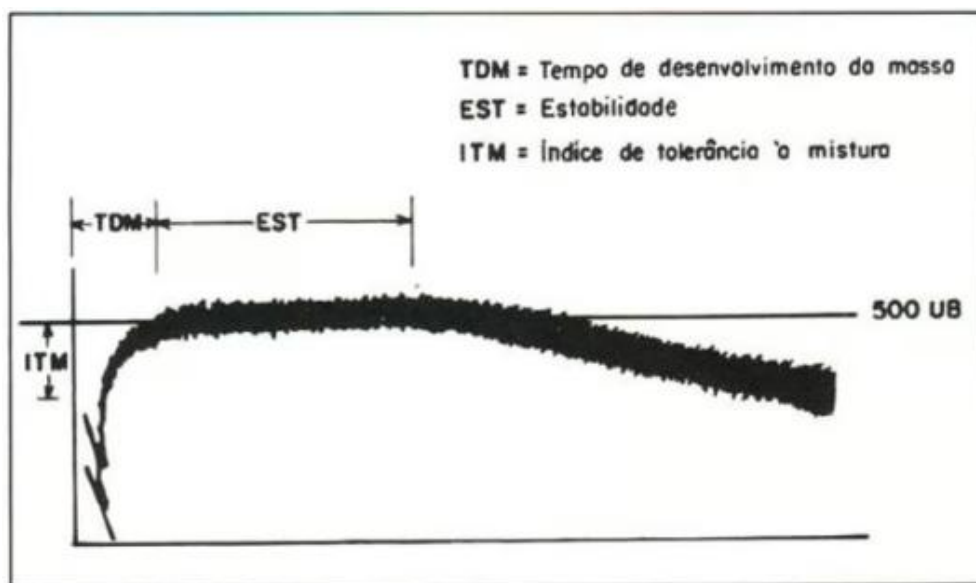
O teor de proteínas é considerado o parâmetro central de avaliação de qualidade. A composição proteica, especialmente a relação entre gliadinas e gluteninas, define a força do glúten e, portanto, a aptidão da farinha para diferentes aplicações industriais. O manejo agrícola, particularmente a adubação nitrogenada, exerce influência direta sobre quantidade e qualidade das proteínas (Xue *et al.*, 2020; Xue *et al.*, 2019). Farinhas com alto teor de glúten e boa qualidade funcional favorecem a retenção de CO_2 durante a fermentação, resultando em pães de maior volume e melhor textura (Smídívá; Rysová, 2022).

Os ensaios reológicos complementam os dados físico-químicos, fornecendo informações sobre o comportamento da massa sob condições controladas e permitindo prever seu desempenho industrial (Yousaf *et al.*, 2019).

A farinografia é uma das técnicas mais difundidas para a caracterização reológica da farinha, pois mede a resistência da massa durante a mistura e permite avaliar seu comportamento frente à adição de água. Entre os principais parâmetros, a

absorção de água indica a quantidade necessária para formar uma massa de consistência padrão, estando diretamente relacionada ao teor de proteínas e à qualidade do glúten. O tempo de desenvolvimento corresponde ao período até que a massa atinja sua máxima consistência, refletindo a força da farinha e a capacidade de formação da rede de glúten (Aydogan *et al.*, 2015; Munteanu *et al.*, 2015; Alaru *et al.*, 2024). A figura 4 ilustra o modelo de um farinograma.

Figura 4 - Farinograma



Fonte: Google Imagens

A estabilidade expressa o período no qual a massa mantém sua consistência máxima sem enfraquecer, sendo um indicativo de tolerância ao processo de mistura e, portanto, de grande importância para a panificação industrial. Já o índice de tolerância à mistura ou enfraquecimento da massa reflete a perda de consistência após o ponto máximo, servindo como parâmetro da resistência da massa ao processamento prolongado (Diósi; Móré; Sipos, 2015; Aydogan *et al.*, 2015).

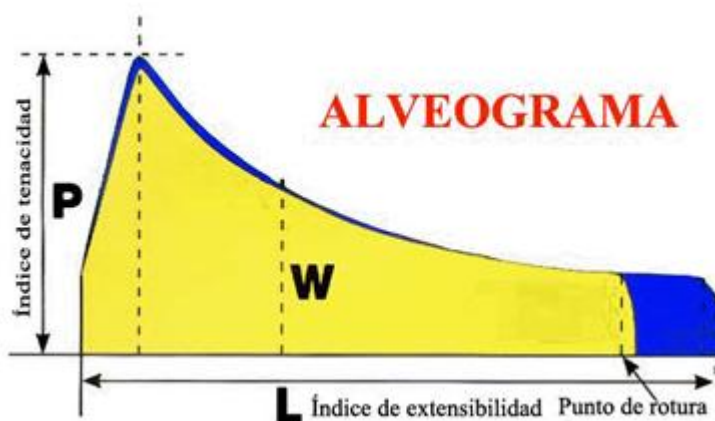
Esses resultados auxiliam na classificação da farinha segundo seu uso tecnológico, direcionando-a para produtos como pães, massas ou biscoitos, além de indicar eventuais ajustes de formulação no processo industrial. Estudos apontam correlações significativas entre parâmetros farinográficos e qualidade de produtos finais, sobretudo no volume de pães, que se relaciona ao teor de proteínas, à capacidade de absorção de água e à estabilidade da massa (Munteanu *et al.*, 2015; Diósi; Móré; Sipos, 2015; Aydogan *et al.*, 2015).

Além disso, pesquisas recentes destacam que farinhas com maior estabilidade e menor enfraquecimento tendem a gerar massas mais tolerantes ao processamento mecânico, favorecendo a padronização da qualidade dos produtos panificados (Rosell *et al.*, 2007).

A alveografia constitui um dos métodos clássicos para avaliar o comportamento reológico da massa sob condições de extensão, simulando a capacidade da rede de glúten em reter gases durante o processo de fermentação e forneamento. O ensaio resulta no chamado alveograma, a partir do qual se obtêm parâmetros fundamentais, como ilustra a figura 5 (Nyembwe *et al.*, 2018; Yousaf *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2021).

A tenacidade (P) expressa a resistência da massa à deformação inicial, estando associada à força de ligação da rede proteica. O índice de extensibilidade (L) mede a capacidade da massa de se alongar antes da ruptura, refletindo sua elasticidade. A força geral da massa (W) corresponde à energia necessária para inflar a bolha até o rompimento, sendo considerada um dos melhores indicadores do potencial de panificação, pois integra tenacidade e extensibilidade. Já a relação P/L é utilizada para caracterizar o equilíbrio entre resistência e alongamento, auxiliando na classificação do trigo quanto ao uso tecnológico: valores altos de P/L indicam massas mais resistentes, adequadas para massas alimentícias, enquanto valores mais baixos refletem maior extensibilidade, favorecendo a produção de pães volumosos (Diósi; Móré; Sipos, 2015; Pomeranz, 1998).

Figura 5 - Alveograma



Fonte: Google Imagens

Aliada às informações farinográficas, a alveografia possibilita prever o comportamento da massa em todas as etapas do processamento, da fermentação ao forneamento (Popa *et al.*, 2010; Dufour *et al.*, 2024). Além disso, estudos recentes reforçam que a combinação entre força de glúten e extensibilidade constitui um fator decisivo na padronização industrial, especialmente em regiões com elevada variabilidade edafoclimática, como as produtoras de trigo no Brasil (Oliveira *et al.*, 2021; Popa *et al.*, 2010; Dufour *et al.*, 2024).

Já o Falling Number (FN) avalia a atividade da enzima α -amilase. Valores baixos indicam elevada atividade enzimática, o que gera massas instáveis e com baixa capacidade de retenção de CO₂ durante a fermentação (He *et al.*, 2019; Shao *et al.*, 2019). Ensaio complementares, como o Stirring Number e a análise de viscosidade em RVA (Rapid Visco Analyzer), fornecem informações adicionais sobre gelatinização do amido, degradação enzimática e proporções relativas de amilose e amilopectina (Hu *et al.*, 2022; Baik; Donelson, 2022; Jukic *et al.*, 2023).

1.4.3 Parâmetros de Qualidade da Farinha de Trigo

O segmento industrial vem exigindo características específicas dessa matéria-prima, associadas sobretudo ao comportamento reológico da massa, avaliado por ensaios como a farinografia e a alveografia e, em determinados casos, também a atributos sensoriais, como cor e textura, que influenciam a percepção e a aceitação do consumidor final (Lanzarani *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Nuttall *et al.*, 2017).

No setor de panificação, a utilização de farinhas consideradas "fortes" é essencial, uma vez que o desenvolvimento adequado da rede de glúten durante o amassamento, a fermentação e o forneamento garante maior capacidade de retenção de gases, sustentação do volume do pão e textura uniforme do miolo. Essas características favorecem produtos de maior qualidade, com expansão adequada e vida útil estendida (Lanzarani *et al.*, 2020; Shevkani *et al.*, 2016).

Estudos recentes apontam ainda que farinhas de força elevada apresentam maior estabilidade frente a variações no processo de fermentação, o que se traduz em maior padronização industrial (Geisslitz *et al.*, 2019; Martin *et al.*, 2022).

Em contrapartida, no segmento de bolos e confeitaria, a exigência por farinhas de alta força não é a mesma que na panificação. Como o processo de produção envolve menor esforço mecânico e não demanda pleno desenvolvimento do glúten,

farinhas mais "fracas" são preferidas, resultando em produtos macios, com textura leve e qualidade sensorial superior (Lanzarani *et al.*, 2020; Smídivá; Rysová, 2022). Neste caso, a menor elasticidade da massa favorece o crescimento uniforme e evita o endurecimento excessivo da estrutura interna.

Na produção de massas alimentícias, por sua vez, além da performance reológica, a cor é um parâmetro crítico para a comercialização. A intensidade do amarelo (b^*) e a luminosidade (L^*) são diretamente associadas à qualidade percebida pelo consumidor, sendo determinantes na escolha do produto em prateleiras (Silva, 2022; Siah; Quail, 2018). Adicionalmente, estudos demonstram que a pigmentação natural, associada a carotenoides, exerce papel central na preferência do consumidor e pode variar entre cultivares e processos de moagem (Rosell; Collar; Haros, 2007; Xue *et al.*, 2020).

As análises reológicas, especialmente farinografia e alveografia, permanecem como ferramentas fundamentais para prever o comportamento da massa frente às diferentes aplicações industriais. Esses ensaios permitem classificar lotes de farinha de acordo com sua aptidão tecnológica, orientando sua destinação para panificação, massas, biscoitos ou confeitaria (Aydogan *et al.*, 2015; Yousaf *et al.*, 2019; Dufour *et al.*, 2024). É relevante destacar, entretanto, que cada indústria apresenta peculiaridades em sua linha de produção, de modo que a especificação considerada ideal para uma fábrica pode não atender às exigências de outra. Nesse sentido, a realização de testes aplicados em escala industrial constitui etapa indispensável para adequar o insumo às condições particulares de cada processo (Popa *et al.*, 2010; Smídivá; Rysová, 2022).

Diante do exposto, torna-se evidente que a definição das características ideais da farinha depende diretamente de sua aplicação industrial. Parâmetros físico-químicos, reológicos e sensoriais, quando avaliados em conjunto, permitem direcionar o cereal de forma mais precisa para diferentes segmentos do mercado. Essa abordagem integrada não apenas contribui para a valorização comercial do produto, mas também garante a obtenção de alimentos com qualidade tecnológica e nutricional superior. A consolidação desse conhecimento, apoiada em análises técnicas confiáveis, constitui um dos pilares para o avanço da indústria de alimentos e para o desenvolvimento de farinhas adaptadas às demandas específicas de cada aplicação (Johansson *et al.*, 2020; Aktar-Uz-Zaman *et al.*, 2017; Kiszonas *et al.*, 2018). Na tabela

1 estão apresentadas as principais características para cada segmento de aplicação da farinha de trigo.

Tabela 1- Características farinográficas e alveográficas - farinha de trigo x aplicações

Características	Massas	Pães	Bolos	Biscoitos fermentados	Biscoitos doces
Equilíbrio da curva (P/L)	> 1,5	0,6 – 1,5	–	0,5 – 0,9	0,2 – 0,5
Energia de deformação da massa (W) (10^{-4} J)	> 280	180 – 275	< 100	150 – 200	< 100
Absorção de água (%)	60 – 64	> 55	–	< 55	< 55
Desenvolvimento (min)	8 – 13	4 – 9	1 – 2	3 – 6	1 – 3
Estabilidade (min)	> 15	12 – 18	2 – 4	6 – 12	2 – 4

Fonte: Thys e Nitzke, 2010

1.4.4 Qualidade do Trigo no Brasil e no Paraná

A triticultura brasileira possui expressiva relevância socioeconômica, mas enfrenta desafios estruturais relacionados à dependência de importações. O consumo anual de trigo no país é estimado em aproximadamente 12 milhões de toneladas, ao passo que a produção nacional atende pouco mais da metade dessa demanda. A maior parte da colheita concentra-se no Sul do Brasil, com destaque para Paraná e Rio Grande do Sul, que juntos respondem por mais de 90% da produção (Broca *et al.*, 2021; Franceschi *et al.*, 2009). Essa discrepância entre oferta e demanda interna justifica os esforços contínuos da pesquisa científica e do setor produtivo para expandir a produção e, sobretudo, aprimorar a qualidade tecnológica do cereal.

Do ponto de vista qualitativo, a farinha é avaliada por parâmetros como a força do glúten, a estabilidade farinográfica, o perfil alveográfico e a atividade enzimática, além de atributos sensoriais como cor e luminosidade. Esses indicadores resultam da interação entre fatores genéticos, ambientais e de manejo, que em conjunto determinam a aptidão industrial dos grãos (Shevkani *et al.*, 2016). Evidências científicas mostram que temperaturas elevadas durante a formação dos grãos reduzem a polimerização das gluteninas e comprometem a panificação, enquanto condições climáticas mais amenas favorecem a obtenção de farinhas fortes, aptas à

produção de pães de longa fermentação (Franceschi *et al.*, 2009; Krenchinski *et al.*, 2017).

No estado do Paraná, as condições edafoclimáticas conferem vantagens competitivas à triticultura. O clima subtropical, caracterizado por invernos frios e disponibilidade hídrica relativamente estável, aliado a solos naturalmente férteis, cria um ambiente propício para o cultivo de genótipos de alto desempenho. Estudos conduzidos em regiões como Londrina e Ponta Grossa demonstram que o manejo equilibrado de nitrogênio afeta não apenas a produtividade, mas também a qualidade fisiológica das sementes e a força de glúten, aspectos considerados fundamentais pela indústria moageira e panificadora (Faria *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2011, Silva *et al.*, 2014).

Apesar dessas condições favoráveis, a variabilidade climática permanece como um obstáculo recorrente. Safras marcadas por estresse térmico ou hídrico tendem a gerar grãos de qualidade inferior, com menor estabilidade farinográfica e força alveográfica reduzida, inadequados à panificação de alta exigência. Por outro lado, anos com condições climáticas adequadas permitem alcançar cultivares com força de glúten superior, refletida em valores de W acima de 300×10^{-4} J, capazes de originar pães de volume elevado e miolo uniforme (Guarienti *et al.*, 1996). Esses contrastes ressaltam a importância do zoneamento agrícola e da seleção de genótipos adaptados a cada microrregião produtiva.

Outro aspecto central para o desempenho do Paraná refere-se ao manejo do solo. A adoção do sistema de plantio direto, amplamente consolidado no estado, promove a conservação da água, melhora a ciclagem de nutrientes e reduz a erosão, assegurando a sustentabilidade da produtividade e a manutenção da qualidade ao longo do tempo (Faria *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2011, Silva *et al.*, 2014). Além disso, pesquisas recentes indicam que práticas agrícolas sustentáveis, como rotação de culturas e otimização do uso de insumos, contribuem para a redução da pegada de carbono da triticultura, conciliando eficiência produtiva e responsabilidade ambiental (Franceschi *et al.*, 2009; Krenchinski *et al.*, 2017).

Em síntese, a qualidade do trigo no Brasil, e particularmente no Paraná, resulta da interação complexa entre genética, ambiente e manejo agrícola. O país avança na obtenção de cultivares mais adaptadas e na adoção de práticas sustentáveis, embora ainda enfrente o desafio de equilibrar produção e demanda, especialmente no que se refere à oferta de farinhas fortes voltadas à panificação. No Paraná, a combinação de

solos férteis, clima favorável e tradição agrícola sustenta a produção de grãos de qualidade superior, consolidando o estado como protagonista na busca pela autossuficiência e pela competitividade da triticultura nacional.

1.5 AMIDO DE TRIGO

O amido constitui a principal reserva energética dos grãos de cereais e representa, de modo geral, entre 60 e 75% do peso seco do grão, sendo responsável por aproximadamente 70 a 80% das calorias consumidas na alimentação humana (Kökşel, 2023).

Além de sua relevância nutricional, o amido apresenta ampla aplicabilidade industrial. Amidos naturais e modificados, obtidos de cereais como trigo, milho e arroz, bem como de tuberosas e raízes como batata, mandioca e batata-doce, são empregados como agentes gelificantes, espessantes, estabilizantes, adesivos, retentores de umidade e modificadores de textura. Essas funções tornam o amido um ingrediente estratégico não apenas na indústria de alimentos, mas também em setores como o têxtil e o papelero (Dominguez-Ayala *et al.*, 2022, Singh *et al.*, 2007).

As propriedades químicas e físicas do amido distinguem esse polímero de outros carboidratos, especialmente devido à sua organização granular, à presença de regiões cristalinas e amorfas e à sua capacidade de sofrer transformações estruturais quando submetido à hidratação e ao aquecimento. Essas transformações estão diretamente relacionadas à funcionalidade do amido nos sistemas alimentares e à sua interação com outros componentes da matriz alimentar (Kökşel, 2023; Dominguez-Ayala *et al.*, 2022, Singh *et al.*, 2007, Tester *et al.*, 2004).

Entre os amidos de origem vegetal, o amido de trigo apresenta características singulares que o tornam insubstituível na fabricação de produtos de panificação e massas alimentícias. Embora amidos de milho, arroz, aveia ou outras fontes vegetais compartilhem algumas semelhanças estruturais, nenhum deles reproduz de forma satisfatória o desempenho tecnológico do amido de trigo quando combinado com a matriz proteica do glúten (Song *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2023).

No trigo, o amido representa aproximadamente dois terços a três quartos do peso seco do grão e constitui o principal componente da farinha. Sua funcionalidade está intimamente associada à capacidade de formar, juntamente com o glúten, uma estrutura viscoelástica capaz de reter gases, permitir a expansão da massa durante a

fermentação e o assamento e conferir estabilidade estrutural ao produto final após o resfriamento (Tao *et al.*, 2021; Corrado *et al.*, 2023).

Durante a panificação, o amido de trigo desempenha papel funcional central ao modular a concentração efetiva de glúten, fornecer açúcares fermentescíveis por ação das amilases e participar ativamente da expansão e da estabilização da estrutura do pão durante o assamento, por meio da gelatinização parcial e da formação do miolo. Dessa forma, variações em suas propriedades físico-químicas contribuem de maneira decisiva para as diferenças observadas no desempenho de panificação entre cultivares, evidenciando que o amido atua como um componente ativo e determinante da qualidade tecnológica dos produtos derivados do trigo (Corrado *et al.*, 2023; Van Rooyen *et al.*, 2023).

1.5.1 Composição Química do Amido de Trigo

Os grânulos de amido de trigo são compostos predominantemente por dois polissacarídeos: amilose e amilopectina, que juntos correspondem a cerca de 98–99% do peso seco do amido. A proporção entre esses dois componentes varia conforme a origem botânica, o genótipo e a classe do trigo, sendo um fator decisivo para as propriedades físico-químicas e funcionais do amido (Eliasson *et al.*, 2006; Tao *et al.*, 2025).

A amilose é uma α -glucana essencialmente linear, formada majoritariamente por ligações α -(1 $\rightarrow$ 4), com poucas ramificações. Em solução, as moléculas de amilose podem adotar conformação helicoidal e apresentar afinidade por diversas moléculas hidrofóbicas, como ácidos graxos, álcoois e, de forma particularmente relevante, lipídeos. A formação desses complexos ocorre quando uma cadeia de ácido graxo saturado ocupa o interior da hélice da amilose, fenômeno que influencia diretamente a gelatinização, o poder de inchamento e a retrogradação do amido. A capacidade da amilose de complexar-se com o iodo, resultando na coloração azul característica, também decorre dessa conformação helicoidal (Copeland *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2023).

A amilopectina, por sua vez, é um polímero de maior massa molar e altamente ramificado, constituído por cadeias de glicose ligadas por ligações α -(1 $\rightarrow$ 4) e α -(1 $\rightarrow$ 6). Sua estrutura ramificada promove a organização semicristalina do grânulo de amido, sendo a principal responsável pela cristalinidade, pela espessura lamelar e pela

estabilidade estrutural do grânulo. A organização fina das cadeias da amilopectina exerce efeitos marcantes sobre a capacidade de inchamento, a temperatura de gelatinização, a digestibilidade e o comportamento de retrogradação do amido (Huang *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2024).

De modo geral, maiores proporções de amilopectina estão associadas a maior capacidade de inchamento, maior estabilidade de pasta, menor tendência à retrogradação e melhor estabilidade em ciclos de congelamento e descongelamento. Em contrapartida, teores mais elevados de amilose tendem a resultar em maior retrogradação, especialmente em curto prazo, devido à sua estrutura linear, que favorece a reorganização molecular durante o resfriamento e o armazenamento (Zhai *et al.*, 2025; Tester *et al.*, 2004; Shevkani *et al.*, 2017)

A proporção amilose e amilopectina normalmente encontrada no amido de trigo é considerada adequada para a produção de pão, uma vez que permite equilíbrio entre viscosidade de pasta, capacidade de expansão e estabilidade estrutural do produto final. Alterações nessa proporção, decorrentes de diferenças genéticas entre cultivares, refletem-se diretamente nas propriedades reológicas e no desempenho tecnológico da farinha (Van Rooyen *et al.*, 2023; Shevkani *et al.*, 2017).

O amido de trigo, além dos polissacarídeos, contém pequenas quantidades de lipídeos, entre 0,7 e 1,4%, distribuídos na superfície e no interior dos grânulos, os quais, apesar da baixa concentração, exercem papel central no comportamento funcional do amido (Zhao *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2023).

Em amidos de cereais, esses lipídeos são predominantemente lisofosfolipídeos intimamente associados ao teor de amilose e localizados na superfície granular, em canais internos e em regiões específicas do interior do grânulo, contribuindo para a integridade estrutural e a estabilização das superfícies e canais (Zhao *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2020).

Durante o aquecimento, participam da formação de complexos amilose–lipídeo, os quais limitam o inchamento granular, reduzem a solubilização da amilose e modulam a viscosidade das pastas, além de influenciar a temperatura de gelatinização, a estabilidade térmica e os processos de retrogradação em curto e longo prazo. A remoção desses lipídeos por desengorduramento pode comprometer a região amorfa e a integridade dos grânulos, alterando a taxa e a extensão da hidrólise enzimática, bem como favorecer a recristalização da pasta, a migração de

água e o rearranjo molecular durante ciclos de aquecimento e resfriamento, acelerando a retrogradação (Zhao *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2023).

Variações genéticas e ambientais entre cultivares afetam o teor e a composição dos lipídeos associados, impactando a formação de complexos amilose–lipídeo e, conseqüentemente, o desempenho do amido em sistemas alimentares, especialmente na panificação. Evidências recentes reforçam que esses lipídeos atuam como moduladores-chave da estabilidade estrutural, funcionalidade, retrogradação em longo prazo e digestibilidade do amido de trigo (Tao *et al.*, 2025; Zhao *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2020).

1.5.2 Organização Estrutural e Cristalinidade do Amido de Trigo

O amido de trigo organiza-se em grânulos semicristalinos localizados nos amiloplastos do endosperma, apresentando uma estrutura interna hierárquica composta por regiões cristalinas e amorfas distribuídas gradualmente ao longo do grânulo, a qual fundamenta seu comportamento físico-químico e sua resposta a operações tecnológicas como hidratação, aquecimento, cisalhamento mecânico e resfriamento (Tester *et al.*, 2004; Copeland *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2022).

As regiões cristalinas são formadas majoritariamente por amilopectina, cujas cadeias ramificadas se organizam em duplas hélices altamente ordenadas, conferindo estabilidade estrutural ao grânulo e originando a birrefringência observada sob luz polarizada, conhecida como “cruz de Malta”, a qual desaparece durante a gelatinização em função da desorganização das regiões cristalinas (Tester; Morrison, 1990; Eliasson; Gudmundsson, 2006; Copeland *et al.*, 2009).

A cristalinidade do amido de trigo varia, em geral, entre 15 e 45%, em função do genótipo, do tamanho dos grânulos e das condições ambientais durante o enchimento do grão, apresentando predominantemente padrão cristalino do tipo A, típico de cereais, caracterizado pelo empacotamento compacto das duplas hélices da amilopectina, em contraste com o padrão tipo B observado em amidos de tuberosas (Shevkani *et al.*, 2017; Zhu, 2017; Huang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2024).

Além da amilopectina, componentes minoritários exercem influência relevante na organização estrutural do grânulo, destacando-se os lipídeos associados, especialmente os lisofosfolipídeos, que formam complexos com a amilose e modulam a estabilidade estrutural e as transições térmicas do amido; adicionalmente, o fósforo

no amido de trigo encontra-se majoritariamente na forma de fosfolipídeos, diferindo de amidos de raízes e tubérculos, nos quais predominam monoésteres fosfato ligados à amilopectina (Eliasson; Gudmundsson, 2006; Huang *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2022; Tao *et al.*, 2025).

A organização estrutural do amido de trigo também se evidencia por técnicas microscópicas, especialmente pela microscopia eletrônica de varredura, que permite observar a coexistência de grânulos grandes, de formato lenticular, e grânulos pequenos, de formato esférico ou poligonal, diferenças associadas à composição química e à organização interna dos grânulos, refletindo diretamente em suas propriedades funcionais (Yonemoto *et al.*, 2007; Shevkani *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2024).

1.5.3 Distribuição do Tamanho dos Grânulos de Amido de Trigo

O amido de trigo caracteriza-se por uma distribuição heterogênea do tamanho de seus grânulos, classicamente descrita como bimodal, composta por grânulos dos tipos A e B, embora alguns autores relatem uma distribuição trimodal com a inclusão de grânulos muito pequenos, denominados tipo C. Os grânulos do tipo A apresentam formato lenticular ou discoidal, diâmetro superior a 10 μm e contribuem com a maior fração da massa total do amido, enquanto os grânulos do tipo B, menores que 10 μm e de formato esférico ou poligonal, predominam em número, mas com menor contribuição em peso (Shevkani *et al.*, 2017; Yonemoto *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2022).

A formação desses grânulos ocorre em momentos distintos durante o desenvolvimento do grão: os grânulos do tipo A iniciam sua formação poucos dias após a antese e crescem até a maturação, enquanto os grânulos do tipo B se formam mais tardiamente, aumentando principalmente em número durante o enchimento do grão. Além das diferenças dimensionais, grânulos dos tipos A e B apresentam distinções marcantes na morfologia superficial, na organização estrutural interna e no comportamento digestivo, com grânulos do tipo A geralmente associados a maior teor de amilose e maior organização estrutural, e grânulos do tipo B apresentando cristalinidade distinta, canais internos mais desenvolvidos e maior acessibilidade enzimática (Zhang *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2022).

A proporção, o tamanho e o número de grânulos de amido são fortemente influenciados por fatores genéticos associados à biogênese dos amiloplastos, bem como por condições ambientais durante o enchimento dos grãos, especialmente temperatura e disponibilidade hídrica. Alterações nesses fatores podem modificar significativamente a distribuição granular, impactando diretamente a qualidade estrutural e funcional do amido de trigo (Wen *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2023).

A distribuição do tamanho dos grânulos exerce influência direta sobre as propriedades físico-químicas e funcionais do amido, refletindo-se em diferenças no teor de amilose, no conteúdo de lipídeos associados, na cristalinidade relativa, no poder de inchamento, na temperatura de gelatinização e nas propriedades de pasta. De modo geral, grânulos menores tendem a apresentar maior área superficial, maior suscetibilidade à hidrólise ácida e enzimática e mecanismos de digestão distintos quando comparados aos grânulos maiores, cujas diferenças estruturais influenciam a viscosidade de pasta, a estabilidade térmica e a retrogradação (Teste *et al.*, 1990; Eliasson *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2024).

Essas evidências demonstram que o comportamento funcional e digestivo do amido de trigo não depende exclusivamente do tamanho dos grânulos, mas resulta da interação entre distribuição granulométrica, composição química, organização estrutural multiescalar e presença de componentes associados, reforçando a complexidade do sistema amiláceo e sua relevância para o desempenho tecnológico e nutricional em sistemas alimentares (Shevkani *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2022).

1.5.4 Papel do Amido e dos Grânulos na Reologia da Massa e na Panificação

As propriedades reológicas da massa de trigo resultam, em grande medida, das interações entre os grânulos de amido e a matriz proteica do glúten, sendo a distribuição do tamanho dos grânulos um fator determinante para a hidratação da farinha, a formação da rede de glúten e o comportamento viscoelástico da massa ao longo das etapas de mistura, fermentação e assamento. Diferentes populações de grânulos exercem efeitos distintos sobre a reologia da massa: grânulos de tamanho intermediário tendem a favorecer o desenvolvimento e a estabilidade da massa, enquanto elevadas proporções de grânulos muito pequenos podem resultar em massas mais frágeis e menores valores de resistência à extensão, ao passo que maiores proporções de grânulos grandes estão associadas ao aumento da rigidez da massa (Shevkani *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2004).

A influência da distribuição granulométrica também se reflete nos parâmetros obtidos por instrumentos reológicos, como farinógrafo, extensógrafo e amilógrafo, afetando resistência à extensão, extensibilidade, estabilidade e tempo de desenvolvimento da massa, bem como a viscosidade da pasta. Esses efeitos estão diretamente relacionados à forma como a água é distribuída entre os constituintes da massa, considerando que o amido representa a principal fração responsável pela absorção hídrica durante a mistura (Eliasson; Gudmundsson, 2006; Oro *et al.*, 2013).

Durante a fermentação, a capacidade dos grânulos de amido de ligar e reter água influencia as propriedades viscoelásticas da massa e a retenção de gases, impactando o volume e a estrutura do pão. No assamento, a gelatinização parcial do amido contribui para a fixação da estrutura do miolo, enquanto a interação entre o amido gelatinizado e o glúten desnaturado define a textura final do produto. Entretanto, a literatura apresenta resultados não consensuais quanto ao efeito direto da distribuição do tamanho dos grânulos sobre parâmetros finais de panificação, como volume do pão, peso específico e características da crosta, evidenciando a complexidade do sistema formado por farinha, glúten, água e amido, e a necessidade de abordagens integradas (Shevkani *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2022).

Evidências recentes indicam que modificações estruturais do amido induzidas por processamento, como a gelatinização parcial, intensificam as interações entre a fase amilácea e a rede de glúten, promovendo maior continuidade estrutural da matriz e melhorias significativas no comportamento reológico e na estabilidade da massa durante o processamento (Xu *et al.*, 2026). De forma complementar, abordagens modernas de processamento demonstram que a organização estrutural da rede glúten-amido pode ser intencionalmente modulada para controlar propriedades mecânicas e funcionais de sistemas amiláceos, reforçando o papel central dessas interações na definição da funcionalidade de produtos à base de trigo (Yu *et al.*, 2026).

1.5.5 Gelatinização, Empastamento e Retrogradação do Amido de Trigo

Quando o amido de trigo é aquecido em suspensão aquosa, ocorrem transformações físico-químicas sequenciais — gelatinização, empastamento e retrogradação — fundamentais para sua funcionalidade em sistemas alimentares, especialmente na panificação, as quais estão diretamente associadas à organização

estrutural dos grânulos e às interações entre amilose, amilopectina, lipídeos e água (Tester; Morrison, 1990; Eliasson; Gudmundsson, 2006; Huang *et al.*, 2022).

A gelatinização caracteriza-se pela absorção progressiva de água, inchamento dos grânulos, desorganização das regiões cristalinas da amilopectina e perda da birrefringência, acompanhada pela lixiviação parcial da amilose para a fase contínua. Em sistemas típicos de panificação, nos quais a disponibilidade de água é limitada, esse processo ocorre de forma parcial e apresenta comportamento térmico complexo, refletindo a heterogeneidade estrutural do amido de trigo (Copeland *et al.*, 2009; Shevkani *et al.*, 2017).

O empastamento corresponde às variações de viscosidade associadas ao inchamento granular, à exsudação dos componentes do grânulo e, em alguns casos, à ruptura parcial da estrutura, sendo fortemente influenciado pela proporção amilose/amilopectina, pelo teor de lipídeos associados e pela distribuição do tamanho dos grânulos. Essas características determinam a textura, a consistência e a estabilidade de produtos à base de trigo (Shevkani *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2022).

Durante o resfriamento, a reassociação molecular das cadeias poliméricas, inicialmente da amilose e posteriormente da amilopectina, conduz à retrogradação do amido, fenômeno relacionado à formação de géis, ao aumento da firmeza do miolo e à perda de maciez durante o armazenamento (Eliasson; Gudmundsson, 2006; Wan *et al.*, 2023).

As propriedades térmicas associadas à gelatinização e à retrogradação, expressas por parâmetros como temperaturas de transição e entalpia, refletem a estabilidade estrutural do amido e sua resposta às condições de processamento, exercendo impacto direto sobre o desempenho tecnológico e a vida de prateleira de produtos elaborados com farinha de trigo (Tester *et al.*, 2004; Huang *et al.*, 2022).

1.5.6 Extração do Amido

O isolamento do amido pode ser realizado por diferentes abordagens metodológicas, cuja escolha depende da origem botânica da matéria-prima, do objetivo analítico ou tecnológico e do grau de preservação das características físico-químicas, estruturais e funcionais do amido nativo. Métodos que evitam o uso de reagentes agressivos tendem a resultar em maiores rendimentos e qualidade superior, além de atender a critérios relacionados à segurança, impacto ambiental e viabilidade

econômica. Etapas subsequentes, como o método de secagem empregado, também podem promover alterações relevantes nas propriedades do amido obtido (Villarreal *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2016).

O isolamento do amido pode ser conduzido por técnicas físicas, como sedimentação, centrifugação, filtração e peneiramento, geralmente associadas à lavagem da farinha com água para a separação das frações solúveis e insolúveis. A repetição dessas etapas contribui para o aumento do rendimento e da pureza do amido, embora o uso intensivo de centrifugação possa ocasionar fragmentação de carboidratos solúveis e separação diferencial de proteínas ao longo da suspensão amilácea (Baldwin, 2001; Pérez; Bertoft, 2010; Sit *et al.*, 2014; Fu *et al.*, 2004).

No caso específico do trigo, a lavagem de massa, ou processo Martin, destaca-se como um dos métodos mais tradicionais, baseando-se na formação da rede de glúten para liberação dos grânulos de amido por sucessivas lavagens com água. Essa abordagem permanece amplamente empregada em escala laboratorial e industrial, especialmente quando se busca a coprodução de amido e glúten vital. Variações desse método incluem sistemas de separação úmida em suspensão, nos quais a relação água e farinha, o tempo de maturação da massa e a intensidade de agitação influenciam diretamente a eficiência da separação e o rendimento das frações obtidas (Shevkani *et al.*, 2017; Witt, 2017; Dik *et al.*, 2002).

Em escala industrial, a moagem úmida associada ao refino por hidrociclones constitui uma rota eficiente para obtenção de amido com elevado grau de pureza, embora envolva maior complexidade operacional. Métodos químicos brandos, como a extração alcalina com hidróxido de sódio (NaOH), também são empregados para reduzir a contaminação proteica, exigindo, entretanto, controle rigoroso das condições de processo para evitar alterações estruturais do polímero. Adicionalmente, o uso de metabissulfito de sódio em baixa concentração tem sido descrito como estratégia para minimizar reações de escurecimento sem comprometer a estrutura do amido, enquanto componentes da matriz do trigo, como pentosanas, podem interferir na eficiência da separação amido–glúten (Matsunaga *et al.*, 1997; Baldwin, 2001; Wang *et al.*, 2004).

De modo geral, a extração do amido de trigo pode ser realizada por métodos físicos, físico-mecânicos ou químicos brandos, devendo-se buscar o equilíbrio entre rendimento, pureza e preservação das características estruturais do amido, considerando as particularidades da matriz do trigo e a finalidade tecnológica ou

analítica do material obtido (Dik *et al.*, 2002; Matsunaga *et al.*, 1997; Shevkani *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2004).

1.5.7 Influência do Genótipo e do Ambiente nas Características do Amido

As características do amido de trigo resultam de uma interação complexa entre fatores genéticos e ambientais. Embora muitas propriedades do amido isolado apresentem relativa estabilidade entre cultivares sob condições normais de cultivo, diferenças relevantes podem emergir em função do genótipo, da safra e das condições edafoclimáticas. O genótipo exerce papel central na determinação da proporção entre amilose e amilopectina, da distribuição do tamanho dos grânulos e da composição química do amido, incluindo o teor de lipídeos associados, influenciando diretamente processos de gelatinização, empastamento, retrogradação e digestibilidade, com reflexos no desempenho tecnológico da farinha (Shevkani *et al.*, 2017; Zhai *et al.*, 2025; Huang *et al.*, 2022).

As condições ambientais de cultivo afetam o desenvolvimento do grão e a biossíntese do amido, sendo a temperatura e a disponibilidade hídrica fatores particularmente relevantes para o acúmulo de amido, o número e o tamanho dos grânulos e a organização estrutural do polímero. Em ambientes sem estresse, as variações atribuídas ao local e ao ano tendem a ser moderadas; entretanto, sob condições adversas, como estresse térmico ou hídrico durante o enchimento do grão, podem ocorrer alterações expressivas nas propriedades estruturais e funcionais do amido (Wen *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2023).

A interação genótipo $\times$ ambiente assume, portanto, elevada relevância tecnológica, uma vez que variações na qualidade do trigo decorrentes dessa interação podem comprometer a padronização dos processos industriais e a consistência dos produtos finais. Parâmetros como *falling number*, peso hectolítrico e presença de micotoxinas representam critérios decisórios na aceitação ou rejeição de lotes de trigo pela indústria, estando fortemente associados tanto às características genéticas das cultivares quanto às condições ambientais e ao manejo durante o ciclo de cultivo e o período pré-colheita. Alterações nesses parâmetros podem inviabilizar o uso tecnológico do trigo independentemente do seu potencial panificável ou reológico, reforçando que a qualidade do grão resulta de um conjunto integrado de fatores. Nesse contexto, a compreensão dos efeitos combinados do genótipo e do ambiente

sobre as propriedades do amido, da farinha e do grão constitui base essencial para a seleção de cultivares e para a otimização de sistemas de produção orientados à qualidade tecnológica e à segurança do produto. (Zhang *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2022).

1.5.8 Estresse Hídrico e Efeitos sobre a Biossíntese e a Estrutura do Amido

Entre os fatores ambientais que influenciam o desenvolvimento do amido de trigo, o estresse hídrico destaca-se como um dos mais críticos, uma vez que a disponibilidade de água durante o enchimento dos grãos afeta diretamente a atividade das enzimas envolvidas na biossíntese do amido, a conversão de sacarose em polímeros de reserva e o acúmulo final de amido no grão. O déficit hídrico nessa fase pode resultar em redução do teor total de amido, em alterações na proporção entre amilose e amilopectina e em modificações na distribuição do tamanho dos grânulos, comprometendo a iniciação e o desenvolvimento dos grânulos dos tipos A e B e, conseqüentemente, a organização estrutural e as propriedades físico-químicas do amido (Shevkani *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2022).

Evidências indicam que a resposta do trigo ao estresse hídrico depende da intensidade e da dinâmica do déficit de água. Condições de estresse moderado, especialmente quando seguidas por reidratação adequada, podem estimular a atividade das enzimas relacionadas à biossíntese do amido durante o enchimento dos grãos, promovendo maior acúmulo de amido, ajustes na distribuição do tamanho dos grânulos e alterações favoráveis nas propriedades físico-químicas. Esse comportamento sugere a ocorrência de mecanismos fisiológicos compensatórios capazes de atenuar os efeitos negativos do déficit hídrico moderado sobre a qualidade do amido de trigo (Wen *et al.*, 2018).

Em contraste, estresses hídricos mais severos tendem a provocar alterações na cristalinidade relativa do amido, aumento da energia necessária para a gelatinização e elevação das temperaturas de transição térmica, mudanças associadas à deterioração da qualidade tecnológica do trigo, refletindo-se em prejuízos ao comportamento reológico da massa, ao rendimento industrial e à qualidade dos produtos derivados (Tester *et al.*, 2004; Eliasson; Gudmundsson, 2006; Huang *et al.*, 2022).

De modo geral, os efeitos do estresse hídrico sobre o amido de trigo constituem uma das principais causas da redução da produtividade e da variabilidade da qualidade em sistemas agrícolas sujeitos à instabilidade climática. Assim, a compreensão integrada desses efeitos fornece base essencial para a interpretação das variações observadas nas propriedades do amido e para o desenvolvimento de estratégias de manejo agrônomo e melhoramento genético voltadas à estabilidade e à qualidade tecnológica do trigo (Shevkani *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2024).

1.6 CONCLUSÃO

A revisão da literatura apresentada neste capítulo evidencia a complexidade do trigo enquanto matéria-prima agrícola e industrial, resultante da interação entre sua evolução histórica, diversidade genética, condições ambientais de cultivo e intervenções tecnológicas ao longo da cadeia produtiva. Desde sua domesticação até os sistemas modernos de produção e processamento, o trigo consolidou-se como cereal estratégico para a segurança alimentar, assumindo papel central na obtenção de farinhas destinadas à panificação e a outros segmentos da indústria de alimentos.

A análise da estrutura e da composição do grão demonstra que suas diferentes frações — endosperma, farelo, aleurona e gérmen — exercem funções complementares que influenciam tanto o valor nutricional quanto o desempenho tecnológico dos derivados. Nesse contexto, a qualidade da farinha de trigo emerge como um atributo multifatorial, condicionado pela interação entre genótipo, ambiente e práticas de manejo e processamento, refletindo-se diretamente em parâmetros físico-químicos, reológicos e enzimáticos utilizados para sua classificação e aplicação industrial.

Dentre os constituintes da farinha, o amido destaca-se como o principal componente quantitativo e funcional, desempenhando papel ativo na formação da estrutura da massa, na dinâmica da fermentação e na estabilização do produto durante o assamento. A organização estrutural do amido de trigo, sua composição química, a distribuição do tamanho dos grânulos e as interações estabelecidas com a matriz proteica do glúten configuram um sistema integrado, responsável por grande parte das variações observadas no desempenho tecnológico entre cultivares e ambientes de produção.

Assim, o conjunto de conhecimentos discutido neste capítulo fornece a base teórica necessária para a interpretação dos resultados obtidos no estudo da qualidade tecnológica de cultivares de trigo produzidas em três safras consecutivas no estado do Paraná, permitindo analisar, de forma comparativa, os efeitos da variabilidade ambiental sobre as propriedades da farinha e do amido e subsidiar discussões voltadas à seleção de cultivares e à otimização do uso industrial do trigo paranaense.

CAPÍTULO 2 – QUALIDADE TECNOLÓGICA DE GRÃOS E FARINHAS DE TRIGO (*Triticum aestivum* L.) OBTIDOS DE DIFERENTES REGIÕES DO ESTADO DO PARANÁ DURANTE TRÊS SAFRAS CONSECUTIVAS

RESUMO

O trigo constitui uma das principais fontes alimentares da humanidade e desempenha papel estratégico na economia global. No Brasil, o estado do Paraná se destaca como o maior produtor nacional, havendo cultivo de diferentes cultivares em virtude das variações climáticas e edafoclimáticas regionais. Essa heterogeneidade influencia diretamente a qualidade tecnológica do grão e da farinha, aspectos determinantes para o aproveitamento industrial, em especial na panificação. O presente estudo teve como objetivo caracterizar e analisar a qualidade tecnológica de grãos e farinhas de trigo oriundos de diferentes regiões do Paraná, ao longo de três safras consecutivas, a fim de estabelecer um perfil regional e identificar o desempenho mais adequado para diferentes destinações industriais. Para tanto, foram conduzidas análises físico-químicas, reológicas e tecnológicas, integradas a partir de correlações estatísticas, possibilitando a interpretação ampla das interações entre composição química, proteínas do glúten e propriedades do amido. Os resultados evidenciaram padrões consistentes e recorrentes, como a correlação negativa entre teor de cinzas e luminosidade (L^*), confirmando que farinhas de maior extração apresentam coloração mais escura, e a associação positiva entre glúten úmido e força alveográfica (W), que reforça o papel central das proteínas na aptidão panificável. Na farinografia, verificou-se o antagonismo entre estabilidade e índice de tolerância à mistura (ITM), enquanto nos parâmetros alveográficos se destacou a oposição entre tenacidade (P) e extensibilidade (L). No comportamento da fração amilácea, a viscosidade final mostrou correlação positiva com a viscosidade *setback*, reafirmando sua relação com a retrogradação do amido. Apesar da estabilidade dos padrões gerais, as diferenças entre as safras revelaram a influência marcante dos fatores ambientais, modulando a intensidade das correlações e impactando atributos como hidratação, resistência da massa e perfil colorimétrico. Esses achados demonstram que, embora cada ciclo agrícola apresente particularidades, a rede de interações entre componentes químicos e funcionais do trigo mantém-se estruturalmente robusta, fornecendo subsídios para a interpretação da qualidade tecnológica e para a orientação estratégica da cadeia produtiva.

Palavras-chave: alveografia, farinografia, *Falling Number*, *Stirring Number*

ABSTRACT

Wheat stands out as one of the most important food sources for humanity and plays a strategic role in the global economy. In Brazil, the state of Paraná is recognized as the leading national producer, encompassing a wide diversity of cultivars due to regional climatic and edaphoclimatic variations. This heterogeneity directly affects the technological quality of both grain and flour, which are crucial factors for industrial applications, particularly in breadmaking. The aim of this study was to characterize and evaluate the technological quality of wheat grains and flours from different regions of

Paraná over three consecutive harvests, to establish a regional profile and identify the most suitable performance for specific industrial purposes. To this end, physicochemical, rheological, and technological analyses were performed and integrated through statistical correlations, enabling a comprehensive interpretation of the interactions among chemical composition, gluten proteins, and starch properties. The results revealed consistent and recurrent patterns, such as the negative correlation between ash content and luminosity (L^*), confirming that higher-extraction flours exhibit darker coloration, and the positive association between wet gluten and alveograph strength (W), underscoring the central role of gluten proteins in baking performance. Farinograph analysis highlighted the antagonism between dough stability and mixing tolerance index (MTI), whereas alveograph parameters showed the opposition between tenacity (P) and extensibility (L). Regarding starch behavior, final viscosity correlated positively with setback, reaffirming its link with starch retrogradation. Although general patterns remained stable, differences between harvests demonstrated the strong influence of environmental factors, modulating the intensity of correlations and affecting attributes such as water absorption, dough resistance, and flour color profile. These findings indicate that, despite the particularities of each agricultural cycle, the network of interactions among wheat's chemical and functional components remains structurally robust, providing valuable insights for interpreting technological quality and guiding strategic decisions across the production chain.

Keywords: alveograph, thermal analysis, farinograph, Stirring Number

2.1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) constitui um dos cereais mais importantes da alimentação humana, ocupando posição estratégica nos sistemas agroalimentares globais em função de sua ampla adaptabilidade, elevado valor energético e versatilidade tecnológica. A farinha obtida a partir do seu endosperma representa a principal matéria-prima da indústria de panificação, massas e biscoitos, sendo responsável por atributos essenciais como volume, textura e estrutura dos produtos finais. Essas características decorrem da composição e da organização estrutural do grão, especialmente da interação entre proteínas formadoras de glúten e amido, cuja expressão varia conforme o material genético e as condições ambientais de cultivo (Shewry, 2015; Shewry *et al.*, 2022; Cauvain; Young, 2015).

A qualidade tecnológica da farinha de trigo não permanece constante entre ciclos produtivos, uma vez que o desenvolvimento do grão é altamente sensível às condições climáticas predominantes durante o enchimento e a maturação. Variações interanuais de temperatura e precipitação afetam diretamente a deposição de amido, a síntese e a polimerização das proteínas de reserva, bem como a atividade

enzimática associada ao metabolismo do grão, refletindo-se em alterações nos parâmetros físico-químicos e reológicos da farinha. Estudos têm demonstrado que essas flutuações ambientais podem provocar diferenças significativas no teor de proteínas, na força do glúten, na absorção de água e na estabilidade da massa, mesmo quando se avaliam as mesmas cultivares em safras consecutivas (Johansson *et al.*, 2020; Aktar-Uz-Zaman *et al.*, 2017; Geisslitz *et al.*, 2019).

No Brasil, e particularmente nas regiões produtoras do Sul do país, a variabilidade climática entre safras assume papel determinante na consistência da qualidade industrial do trigo. Oscilações nas condições climáticas entre anos agrícolas sucessivos podem resultar em farinhas com comportamentos tecnológicos distintos, impactando diretamente sua aptidão para diferentes aplicações industriais. Nesse contexto, a análise comparativa de farinhas provenientes de três safras consecutivas permite compreender de forma mais robusta como a variabilidade ambiental se traduz em alterações nos parâmetros de qualidade, contribuindo para a interpretação integrada do desempenho tecnológico do trigo em condições reais de produção (Franceschi *et al.*, 2009; Shevkani *et al.*, 2016; Kiszonas *et al.*, 2018).

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo Geral

Avaliar os parâmetros físicos, físico-químicos e reológicos dos grãos e das farinhas de trigo obtidas a partir de cultivares de trigo de diferentes regiões do estado do Paraná em três safras consecutivas (22/23, 23/24, 24/25).

2.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar as características físicas e físico-químicas das cultivares de grãos de trigo;
- Extrair a farinha de trigo em moinho experimental;
- Determinar as características físico-químicas e reológicas das farinhas de trigo;
- Analisar o comportamento reológico e caracterizar físico-quimicamente as variedades de trigo do Paraná por safras consecutivas.

2.3 MATERIAIS E MÉTODOS

2.3.1 Materiais

As amostras de trigo utilizadas neste estudo foram gentilmente cedidas por produtores rurais, moinhos e cooperativas do estado do Paraná, diferenciando-se entre si quanto às variedades, aos locais de cultivo e às três safras analisadas, 1 (2022/2023), 2 (2023/2024) e 3 (2024/2025), totalizando um conjunto de 60 amostras (n= 60).

Todos os reagentes utilizados apresentaram grau analítico, atendendo às exigências necessárias para a realização das análises propostas. As enzimas puras foram fornecidas pela Megazyme (Wicklow, Irlanda). Os equipamentos utilizados estavam disponíveis na Universidade Estadual de Ponta Grossa, campus sede, nas dependências do Departamento de Engenharia de Alimentos, Laboratório Multiusuário (C-LABMU) e CTAGRO.

2.3.2 Métodos

2.3.2.1 Nomenclatura das amostras

Na tabela 2 estão demonstradas as nomenclaturas das safras deste estudo, 2022/2023, 2023/2024 e 2024/2025, respectivamente.

Tabela 2 - Nomenclatura das variedades e região de cultivo	
Safra 1 (2022/2023) (n=13)	
Código	Região
Audaz PG	Ponta Grossa – PR
Audaz AP	Arapoti – PR
Calibre AP	Arapoti – PR
Ello AP	Arapoti – PR
Feroz AP	Arapoti – PR
ORS 1405 AP	Arapoti – PR
Madre Pérola AP	Arapoti – PR
Ágile PF	Paulo Frontin – PR
Audaz PF	Paulo Frontin – PR
Bela Jóia PF	Paulo Frontin – PR
Destaque PF	Paulo Frontin – PR
Sena PF	Paulo Frontin – PR
Sonic PF	Paulo Frontin – PR
Safra 2 (2023/2024) (n=25)	
Audaz PG	Ponta Grossa – PR
Audaz AP	Arapoti – PR

Sena AP	Arapoti – PR
Selvagem AP	Arapoti – PR
Feroz AP	Arapoti – PR
ORS 1405 AP	Arapoti – PR
Audaz IR	Irati – PR
Feroz IR	Irati – PR
Calibre IR	Irati – PR
Reporte GP	Guarapuava – PR
Sonic GP	Guarapuava – PR
Calibre GP	Guarapuava – PR
Referência GP	Guarapuava – PR
Sena GP	Guarapuava – PR
Feroz GP	Guarapuava – PR
Audaz GP	Guarapuava – PR
Toruk GP	Guarapuava – PR
Oro GP	Guarapuava – PR
Triunfo GP	Guarapuava – PR
Ello Cascavel	Cascavel – PR
Calibre Cascavel	Cascavel – PR
Audaz Cascavel	Cascavel – PR
Audaz Mga	Maringá - PR
Feroz Mga	Maringá - PR
Madre Perola Mga	Maringá – PR
Safrá 3 (2024/2025) (n=22)	
Audaz PG	Ponta Grossa – PR
Calibre TS	Teixeira Soares – PR
Audaz AP	Arapoti – PR
Sena AP	Arapoti – PR
Selvagem AP	Arapoti – PR
Feroz AP	Arapoti – PR
ORS Turbo AP	Arapoti – PR
Motriz AP	Arapoti – PR
Audaz IR	Irati – PR
Feroz IR	Irati – PR
Calibre IR	Irati – PR
Calibre GP	Guarapuava – PR
Sena GP	Guarapuava – PR
Feroz GP	Guarapuava – PR
Toruk GP	Guarapuava – PR
Oro GP	Guarapuava – PR
Ello Cascavel	Cascavel – PR
Calibre Cascavel	Cascavel – PR
Motriz Cascavel	Cascavel – PR
Ello Mga	Maringá - PR
Feroz Mga	Maringá - PR
Calibre Mga	Maringá - PR

Fonte: a autora.

Os grãos de trigo foram caracterizados quanto ao peso hectolítrico e peso de mil grãos. As farinhas, por sua vez, foram caracterizadas quanto a umidade, cinzas, proteínas, granulometria, cor instrumental, teor de glúten, amido danificado,

Falling Number, *Stirring Number*, alveografia, farinografia e propriedade de pasta (RVA).

O processo de amostragem foi realizado separadamente para cada variedade de trigo avaliada. Cada variedade, em cada local de cultivo e safra, foi considerada uma unidade amostral independente, de modo a preservar as diferenças genotípicas e permitir a análise adequada da interação genótipo × ambiente. Para cada variedade, as amostras foram homogeneizadas e submetidas ao quarteamento sucessivo até a obtenção da quantidade necessária para as análises.

As análises de qualidade de grãos e de farinha foram realizadas exclusivamente a partir dessas amostras individualizadas, não havendo mistura entre variedades em nenhuma etapa do processo. Esse procedimento assegurou que os resultados obtidos refletissem as características intrínsecas de cada variedade, evitando vieses associados à heterogeneidade genética.

2.3.2.2 Peso hectolítrico (PH)

O peso do hectolitro (PH) foi determinado conforme as metodologias estabelecidas pelo Ministério da Agricultura, descritas nas Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009). As medições foram realizadas utilizando balança da marca DalleMolle, com os resultados expressos em kg hL⁻¹. Para a conversão dos valores, empregou-se a tabela de equivalência de PH conforme disponibilizada no Sistema Ocepar (2024).

2.3.2.3 Peso de mil grãos

O peso de mil grãos foi determinado a partir da contagem de sementes em grupos de 100, até totalizar 1000 sementes, que posteriormente foram pesadas, conforme metodologia descrita nas Regras de Análise de Sementes (Brasil, 2009). O peso foi calculado pela Equação 1:

$$\text{Peso de mil grãos} = (P/N) \times 1000 \quad (1)$$

Onde: P = peso da amostra parcial; N = número de grãos contados.

2.3.2.4 Extração da farinha de trigo

As farinhas de trigo foram obtidas em moinho de laboratório Chopin CD1 (Chopin, França), conforme o método AACC 26-10. Para a moagem, a umidade dos grãos foi previamente ajustada para a faixa de 12 a 14%, conforme Equação (2), de modo a garantir condições padronizadas no processo. Após o término da extração de cada cultivar, o rendimento foi determinado pela relação entre a massa de farinha obtida e o peso inicial dos grãos utilizados, conforme estabelecido na Equação (3).

$$\text{Correção de umidade} = ((U_f - U_i) / (100 - U_f)) \times \text{peso da amostra} \times 100 \quad (2)$$

Onde: U_f : umidade final; U_i : umidade inicial.

$$\% \text{ Rendimento} = (\text{Farinha extraída} / \text{Massa de grãos}) \times 100 \quad (3)$$

2.3.2.5 Determinação da umidade

Para a determinação do teor de umidade, as amostras foram pesadas em cadinhos de porcelana previamente tarados. As amostras foram aquecidas a 105 °C até que apresentassem peso constante e em seguida, resfriadas em dessecador até temperatura ambiente e novamente pesadas. O processo de aquecimento/resfriamento foi repetido até atingir peso constante, segundo metodologia do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). O teor de umidade foi calculado pela Equação 4:

$$\% \text{ Umidade} = 100 \times (N/P) \quad (4)$$

Onde: N = perda de massa em g; P = massa inicial da amostra em g.

2.3.2.6 Determinação de cinzas

A determinação do teor de cinzas foi realizada segundo o método do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). Foram pesados 5 g de cada amostra de farinha de trigo, as quais foram submetidas à incineração em mufla a 550 °C até apresentarem coloração

branca ou levemente acinzentada, com tempo médio de 5 h. Após esse período, as amostras foram retiradas, resfriadas em dessecador e novamente pesadas até atingir peso constante. O teor de cinzas foi então calculado conforme a Equação (5).

$$\% \text{ Cinzas} = 100 \times (N/P) \quad (5)$$

Onde: N = massa de cinzas; P = massa da amostra.

2.3.2.7 Determinação de proteínas

O teor de proteína foi determinado pelo método de Kjeldahl, conforme descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). Para cada análise, 0,5 g de farinha de trigo foram pesados em tubos de Kjeldahl, aos quais se adicionaram 0,5 g de mistura catalítica e 6 mL de ácido sulfúrico concentrado. As amostras foram submetidas à digestão em bloco de aquecimento a 350 °C até obtenção de solução azul-esverdeada, livre de material não digerido, permanecendo por mais 1 h nesse sistema. Após o resfriamento, realizou-se a destilação, coletando o nitrogênio liberado em frasco Erlenmeyer contendo 10 mL de ácido bórico e indicadores, até atingir volume aproximado de 100 mL. A quantificação do nitrogênio foi feita por titulação com solução de HCl 0,1 M. O cálculo do teor de proteína foi realizado por meio da Equação (6). Para se obter a quantidade de proteína na amostra o resultado da porcentagem de nitrogênio foi multiplicado pelo fator de conversão de 5,83. O resultado foi expresso em gramas de proteína por cem gramas de amostra em peso seco.

$$\% \text{ Nitrogênio} = (V \cdot 0,14 \cdot f) / P \quad (6)$$

Onde: V : volume de ácido clorídrico gasto na titulação; P : n° de gramas de amostra; f : fator de correção da solução de ácido clorídrico.

2.3.2.8 Granulometria da farinha de trigo

A granulometria foi determinada após a moagem dos grãos de trigo. Para cada análise, 50 g de farinha foram peneirados em malha com abertura de 250 µm. Em seguida, foram pesados separadamente o material retido e o material que passou pela peneira (AOAC, 2016). A porcentagem de farinha passante foi calculada de acordo

com a Equação (7). Os resultados de granulometria foram expressos como a porcentagem de farinha que atravessou a peneira de 250 μm .

$$\% \text{ peneirada} = (P \text{ am peneirada} / P \text{ am inicial}) * 100 \quad (7)$$

Onde: P am peneirada: Peso de amostra após peneiramento da farinha de trigo;
P am inicial: Peso de amostra pesada inicialmente para o ensaio.

2.3.2.9 Determinação da cor instrumental

A cor das amostras foi avaliada em colorímetro portátil Mini Scan EZ (Hunter Lab, Reston, VA, EUA), utilizando o sistema CIEL*a*b*. Foram determinados os parâmetros L* (luminosidade), a* e b*, além da cromaticidade (croma), calculada segundo a Equação (8), e do ângulo de tonalidade ($^{\circ}\text{H}$), conforme a Equação (9) (Hunterlab, 2008; Macdougall, 2002).

$$\text{Cromaticidade (C)} = [a^2 + b^2]^{1/2} \quad (8)$$

$$^{\circ}\text{H} = \tan^{-1}[b/a] \quad (9)$$

2.3.2.10 Determinação do teor de glúten

A determinação do teor de glúten manual foi realizada segundo a metodologia descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). Para cada ensaio, foram pesados 20 g de farinha de trigo, aos quais foram adicionados 10 mL de solução salina a 2,0 % (m/m). A mistura permaneceu em repouso por 30 min na solução preparada e, em seguida, foi lavada em água corrente sobre peneira de malha 200 mesh, até que a água se apresentasse límpida e não adquirisse coloração azul após adição de solução de iodo saturada. O glúten retido na peneira foi reunido e pesado como glúten úmido. Posteriormente, o material foi seco em estufa a 105 $^{\circ}\text{C}$, resfriado em dessecador e novamente pesado. A porcentagem de glúten seco foi calculada conforme a Equação 10.

$$\text{Glúten úmido (base 14 \% de umidade): } 100 \times (\text{N/P}) \quad (10)$$

Onde: N= número de gramas de glúten seco e P= número em gramas da amostra

2.3.2.11 Determinação de amido danificado

O teor de amido danificado foi determinado segundo a metodologia descrita por Boyaci, Williams e Koksel (2004), com modificações, e por Farrand (2000). O procedimento consistiu na hidratação das amostras de farinha de trigo, seguida de hidrólise enzimática com α -amilase fúngica. Para cada ensaio, foram pesados 7 g de farinha, adicionados a 45 mL de tampão acetato (pH 4,6–4,8) e acrescidos de 50 mg de enzima α -amilase fúngica. As amostras foram incubadas a 30 °C, sob agitação, por 15 min. Em seguida, foram adicionados 3 mL de solução de H₂SO₄ a 10 % e 2 mL de solução de tungstato de sódio 0,1 N. Após essa etapa, o material foi filtrado em papel de filtro, e o filtrado teve o °Brix determinado em refratômetro. O mesmo procedimento foi conduzido para o branco, preparado sem a adição de farinha de trigo. O cálculo do teor de amido danificado foi realizado conforme a Equação (11). Os resultados foram expressos em gramas de amido danificado por 100 g de farinha de trigo.

$$\text{Amido danificado} = ((B2-B1) * V/M) * F \quad (11)$$

Onde: B1: °Brix do branco; B2: °Brix da amostra; V: volume total (50 mL); M: massa de farinha de trigo inicialmente pesada (g); F: fator de conversão: 1,64.

2.3.2.12 *Falling Number*

A determinação do *Falling Number* (número de queda), indicador da atividade da α -amilase em suspensão de farinha e água, foi realizada em equipamento Perten *Falling Number* 1000. Para cada ensaio, foram pesados 7 g de farinha de trigo (base 14 % de umidade), transferidos para tubo viscosimétrico seco com auxílio de funil, e adicionados 25 mL de água destilada. O tubo foi imediatamente fechado com rolha e agitado vigorosamente até completa homogeneização. Em seguida, o agitador viscosimétrico foi inserido no tubo e este colocado no equipamento para execução da análise, conforme metodologia da AACCC (1999). Os resultados foram expressos em segundos

2.3.2.13 *Stirring Number*

O *Stirring Number*, utilizado para medir a atividade da α -amilase em suspensão de farinha e água, foi determinado em equipamento *Rapid Visco Analyzer* (RVA-4, Newport Scientific, Austrália). Para cada análise, as amostras de farinha foram suspensas em água destilada a 10 % (m/m), em base seca, totalizando 28 g de suspensão. As amostras foram submetidas a aquecimento contínuo sob agitação até 95 °C, durante 3 min, conforme metodologia da ICC (1996). Os resultados foram expressos em centipoise (cP).

2.3.2.14 Alveografia

As amostras de farinha de trigo foram submetidas à análise de alveografia no equipamento Chopin Alveolab, de acordo com o método AACC 54-30, para obtenção dos parâmetros de força de deformação da massa ($W - 10^{-4}$ J), tenacidade ($P - \text{mmH}_2\text{O}$), extensibilidade ($L - \text{mm}$) e índice de configuração da curva (P/L). O equipamento foi previamente calibrado conforme o método oficial. Para cada ensaio, foram pesados 250 g de farinha de trigo e transferidos para o misturador mantido a 24 °C. O equipamento foi acionado e, em 20 s, foi adicionada solução salina a 2,5 %, ajustada de acordo com a umidade da amostra. A mistura prosseguiu por 1 min, seguida de raspagem das laterais do misturador com espátula, totalizando 2 min. Em seguida, a mistura foi retomada até completar 8 min de processo.

Concluído o tempo de mistura, o motor foi parado e a rotação da pá foi invertida para extrusão da massa. Foram descartados os 2 cm iniciais, e a porção subsequente foi dividida em cinco pedaços. Cada pedaço foi laminado com rolo (12 passagens), cortado em formato de disco e transferido para a câmara de descanso do alveógrafo, a 25 °C. Após 28 min do início da mistura, o primeiro disco foi posicionado no centro da placa do alveógrafo previamente untada com vaselina. O braço do equipamento foi então recolhido e o ar insuflado até a ruptura da bolha formada. O procedimento foi repetido para os quatro discos restantes.

2.3.2.15 Farinografia

A análise farinográfica foi conduzida no equipamento DoughLAB 2500, conforme os métodos AACC 54-21 e AACC 54-70, com o objetivo de determinar a absorção de água (%) necessária para atingir a consistência de 500 ± 20 UF, o tempo de desenvolvimento da massa (min), a estabilidade (min) e o grau de enfraquecimento (UF). O equipamento foi previamente calibrado e a quantidade de amostra pesada de acordo com a umidade de cada farinha. Após a configuração para a absorção prevista pelo equipamento, conforme os parâmetros de umidade solicitados pelo mesmo, as amostras foram transferidas para o misturador, no qual a água foi adicionada no volume correspondente ao valor calculado para cada caso. Durante a formação da massa, as paredes do misturador foram raspadas com espátula, e o compartimento foi tampado para minimizar perdas por evaporação. O ensaio teve duração total de 20 min, resultando no registro do farinograma.

2.3.2.16 Propriedade de pasta

As propriedades viscoamilográficas da farinha de trigo foram determinadas em analisador rápido de viscosidade, *Rapid Visco Analyzer* – RVA (modelo RVA-4, *Newport Scientific*, Austrália), utilizando a programação STD-2 do *software Thermocline for Windows*. Para cada ensaio, as amostras foram suspensas em água destilada a 10 % (m/m) em base seca, totalizando 28 g de suspensão. As amostras foram aquecidas de 50 °C a 95 °C a uma taxa de 6 °C min⁻¹, seguidas de resfriamento até o término da análise, com tempo total de 23 min, conforme metodologia da ICC (1996) e Bet *et al.* (2018).

2.3.2.17 Análise estatística

Antes da aplicação dos testes estatísticos inferenciais, os dados foram previamente avaliados quanto à normalidade, a fim de verificar a adequação aos pressupostos dos testes paramétricos empregados. Em seguida, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey para comparação de médias, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Posteriormente, análises de correlação de Pearson foram realizadas para investigar associações lineares entre

os parâmetros avaliados. As análises estatísticas foram conduzidas com o auxílio do software Statistica, versão 13.3 (Tibco, Estados Unidos).

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para as análises das safras são apresentados e discutidos a seguir.

2.4.1 Peso Hectolítrico (PH)

O peso hectolítrico (PH), expresso em quilogramas por hectolitro (kg hL^{-1}), constitui um dos principais indicadores da qualidade física do trigo, pois reflete atributos como formação e uniformidade dos grãos, vitreosidade, dureza e presença de impurezas (Guarienti, 2005). Além de seu uso consolidado no comércio, esse parâmetro apresenta correlação direta com a eficiência de moagem e o rendimento industrial (Dunăreanu; Bonea, 2022).

No Brasil, a Instrução Normativa nº 38/2010 do MAPA estabelece a tipificação em quatro categorias: Tipo I ($\geq 78 \text{ kg hL}^{-1}$), Tipo II ($\geq 75 \text{ kg hL}^{-1}$), Tipo III ($\geq 72 \text{ kg hL}^{-1}$) e “fora de tipo” ($< 72 \text{ kg hL}^{-1}$) (Brasil, 2010).

Na tabela 3 estão demonstrados os valores de PH das variedades e safras estudadas.

Tabela 3 - Resultados do Peso Hectolítrico	
Safr 1 (2022/2023)	
Variedade	Peso hectolítrico (kg HI^{-1})
Audaz PG	79,25
Audaz AP	83,55
Calibre AP	83,55
Ello AP	82,40
Feroz AP	81,50
ORS 1405 AP	79,45
Madre Pérola AP	81,70
Ágile PF	76,35
Audaz PF	77,90
Bela Jóia PF	79,25
Destaque PF	79,70
Sena PF	71,40
Sonic PF	76,35
Safr 2 (2023/2024)	
Audaz PG	78,48
Audaz AP	79,05
Sena AP	72,31
Selvagem AP	77,17

Feroz AP	78,80
ORS 1405 AP	79,36
Audaz IR	79,12
Feroz IR	81,29
Calibre IR	81,06
Reporte GP	77,17
Sonic GP	77,64
Calibre GP	80,19
Referência GP	81,06
Sena GP	76,69
Feroz GP	80,50
Audaz GP	79,27
Toruk GP	79,96
Oro GP	76,14
Triunfo GP	78,17
Ello Cascavel	78,98
Calibre Cascavel	79,03
Audaz Cascavel	80,09
Audaz Mga	81,50
Feroz Mga	80,40
Madre Pérola Mga	79,73
Safr 3 (2024/2025)	
Audaz PG	83,57
Calibre TS	76,68
Audaz AP	80,26
Sena AP	80,23
Selvagem AP	76,19
Feroz AP	79,14
ORS Turbo AP	78,63
Motriz AP	80,26
Audaz IR	81,70
Feroz IR	81,63
Calibre IR	80,19
Calibre GP	80,26
Sena GP	79,84
Feroz GP	79,36
Toruk GP	82,61
Oro GP	79,12
Ello Cascavel	79,45
Calibre Cascavel	81,59
Motriz Cascavel	79,31
Ello Mga	79,24
Feroz Mga	81,52
Calibre Mga	83,71

Fonte: a autora

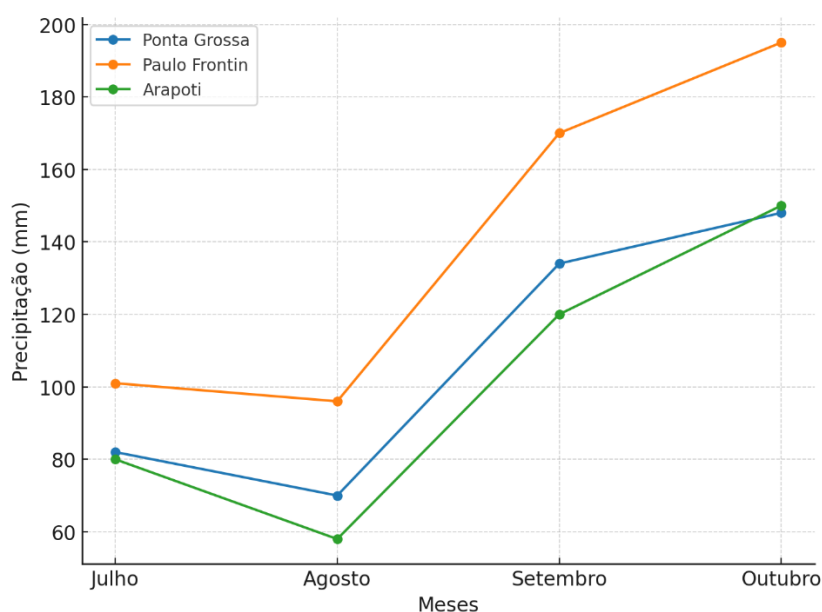
Os resultados da safra 1 (2022/2023) revelaram ampla variação nos valores de PH entre as cultivares avaliadas. A variedade Sena PF apresentou os menores valores, enquanto Audaz AP e Calibre AP se destacaram positivamente. De acordo com os critérios oficiais, Bela Jóia PF, Destaque PF, Audaz PG, Audaz AP, Calibre AP, Ello AP, Feroz AP, ORS 1405 AP e Madre Pérola AP enquadraram-se como Tipo I,

indicando maior aptidão para moagem. Por outro lado, Ágile PF, Audaz PF e Sonic PF foram classificados como Tipo II, e Sena PF enquadrou-se como “fora de tipo”, por não atingir o limite mínimo de 72 kg hL⁻¹ (Brasil, 2010).

Esses resultados evidenciam que o PH, além de direcionar a classificação comercial, constitui um importante indicativo do potencial tecnológico do trigo. Valores elevados estão associados a grãos bem formados, maior densidade e maior eficiência na extração de farinha ou sêmola. No entanto, esse parâmetro deve ser interpretado de forma integrada com outras propriedades físicas e reológicas, uma vez que, isoladamente, não assegura desempenho tecnológico superior (Guarienti, 2005; Greffeuille et al., 2007; Dunăreanu; Bonea, 2022; Seidel et al., 2022).

Do ponto de vista fisiológico, o PH relaciona-se diretamente ao processo de formação dos grãos, altamente sensível a estresses térmicos e hídricos. Evidências recentes indicam que temperaturas elevadas durante o enchimento dos grãos podem elevar o teor proteico, mas reduzem o peso de mil grãos e, conseqüentemente, o PH, com reflexos negativos sobre a qualidade tecnológica (Mahdavi et al., 2022; Fernández-Padilla et al., 2023). No presente estudo, a distribuição pluviométrica da safra 1 (2022/2023) (Figura 6) mostrou aumento expressivo das chuvas a partir de agosto (2022), coincidindo com a fase final do desenvolvimento da planta em algumas regiões e contribuindo para a redução do PH em determinadas localidades.

Figura 6 - Precipitação - safra 1 (2022/2023)



Fonte: a autora.

As diferenças regionais mostraram-se determinantes nessa safra. Em Arapoti, município localizado mais ao norte do Paraná, os maiores valores médios de PH foram atribuídos ao calendário de semeadura, que reduziu a exposição das plantas ao excesso de chuvas durante a formação do grão. Em Paulo Frontin, no sul do Estado, a concentração de volumes elevados de precipitação em curto período próximo à colheita comprometeu a qualidade dos grãos, resultando em redução do PH. Em Ponta Grossa, situada em posição intermediária, a distribuição mais equilibrada das precipitações refletiu-se em desempenho igualmente intermediário, reforçando o papel do ambiente e do manejo na estabilidade desse parâmetro.

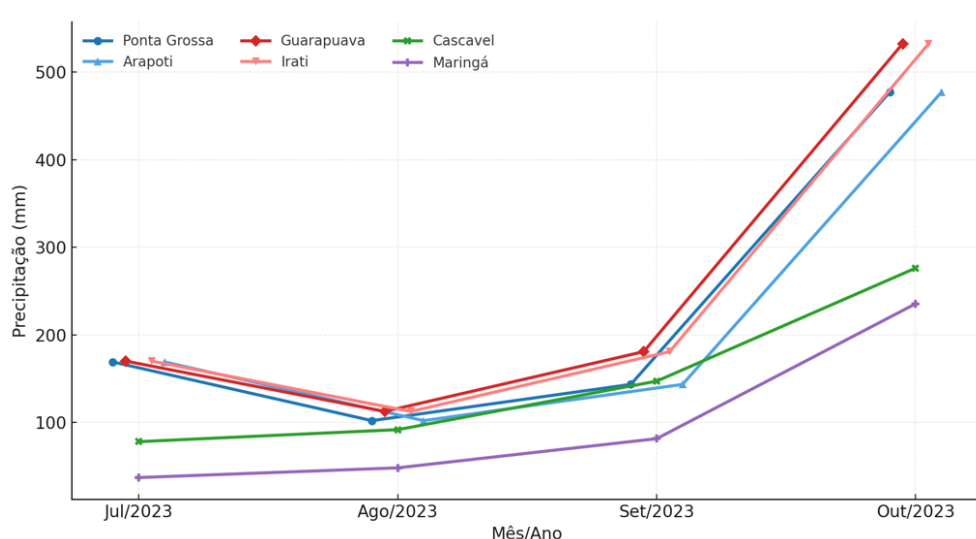
Na safra 2 (2023/2024), novamente observou-se ampla variação entre as cultivares. Genótipos como Feroz IR, Calibre IR, Referência GP e Madre Pérola Mga apresentaram valores superiores a 80 kg hL^{-1} , sendo classificados como Tipo I, indicativos de grãos densos e elevado potencial de rendimento industrial. Em contrapartida, Sena AP e Sena GP situaram-se nos limites inferiores, classificados como Tipo III e Tipo II, respectivamente. Esses resultados refletem a influência combinada das condições ambientais e da adaptação varietal, em consonância com Franceschi et al. (2009), que destacam o impacto das oscilações de temperatura e do déficit hídrico no Paraná sobre a densidade dos grãos.

Estudos clássicos reforçam essa interpretação. Guarienti et al. (2005) demonstraram correlação significativa entre PH e qualidade de panificação, indicando que trigos de maior densidade tendem a apresentar maior extração de farinha e melhor desempenho reológico. Assim, valores acima de 78 kg hL^{-1} , como os observados na maior parte das amostras da safra 2 (2023/2024), constituem um indicativo positivo para a indústria, enquanto materiais com valores limítrofes demandam maior cautela quanto à sua destinação tecnológica.

A influência climática ficou evidente ao se analisar a distribuição das chuvas nessa safra (Figura 7). Ponta Grossa e Arapoti (892 mm) e Irati e Guarapuava (996 mm) apresentaram ampla variação de PH entre cultivares, com algumas mantendo classificação Tipo I e outras, como Sena AP, apresentando reduções expressivas, evidenciando a importância da interação genótipo $\times$ ambiente. Em contraste, Cascavel (593 mm) e Maringá (402 mm), regiões com menor volume de chuvas, apresentaram valores mais estáveis ($78,98\text{--}81,50 \text{ kg hL}^{-1}$), com predominância de cultivares Tipo I,

sugerindo que precipitações mais restritas durante a maturação favorecem grãos mais densos.

Figura 7 - Precipitação - safra 2 (2023/2024)



Fonte: a autora.

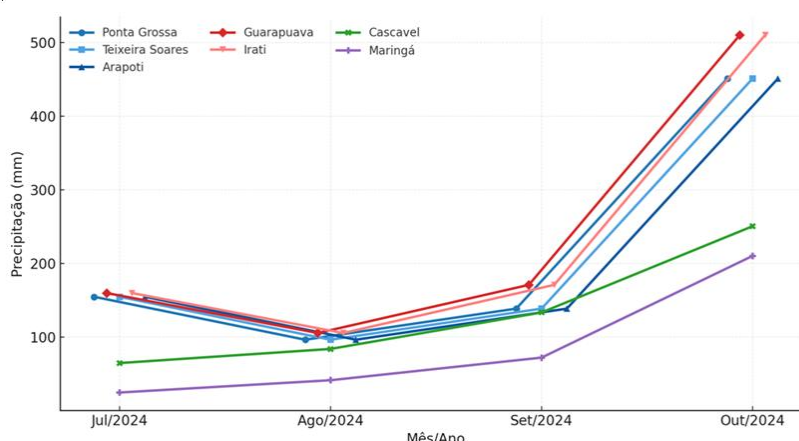
Na safra 3 (2024/2025), os resultados indicaram que a maioria das cultivares atingiu valores compatíveis com o Tipo I, evidenciando elevado potencial de aproveitamento industrial. Audaz PG ($83,57 \text{ kg hL}^{-1}$), Toruk GP ($82,61 \text{ kg hL}^{-1}$) e Calibre Mga ($83,71 \text{ kg hL}^{-1}$) destacaram-se pelo alto desempenho, enquanto Selvagem AP ($76,19 \text{ kg hL}^{-1}$) e Calibre TS ($76,68 \text{ kg hL}^{-1}$) enquadraram-se no Tipo II, demonstrando maior sensibilidade às variações ambientais. Esses achados corroboram Vancini et al. (2019) e Oliveira et al. (2021), que associam valores elevados de PH a maior rendimento de farinha e melhor desempenho industrial.

A análise regional da safra 3 (2024/2025) (Figura 8) evidenciou respostas contrastantes mesmo sob condições pluviométricas semelhantes. Em Ponta Grossa (892 mm), a cultivar Audaz manteve valores elevados de PH, demonstrando boa capacidade de formação sob regime hídrico intenso. Em Teixeira Soares, município vizinho, a cultivar Calibre apresentou apenas $76,68 \text{ kg hL}^{-1}$, próximo ao limite do Tipo II, reforçando a relevância da interação genótipo $\times$ ambiente. Em Arapoti (892 mm), os valores oscilaram entre $76,19$ e $80,26 \text{ kg hL}^{-1}$, com Audaz e Motriz mantendo desempenho satisfatório e Selvagem apresentando valores reduzidos.

De forma complementar, Irati e Guarapuava (996 mm) apresentaram valores entre $79,36$ e $82,61 \text{ kg hL}^{-1}$, sugerindo boa adaptação varietal apesar do elevado

volume de chuvas. Em Cascavel (533 mm), a menor precipitação contribuiu para maior uniformidade (79,12–81,59 kg hL⁻¹), enquanto Maringá (350 mm) apresentou os maiores valores da safra (79,24–83,71 kg hL⁻¹), com destaque para a cultivar Calibre. Esses resultados reforçam a relação inversa entre excesso de chuvas e densidade do grão, evidenciando a importância do balanço hídrico para a manutenção da qualidade industrial.

Figura 8 - Precipitação - safra 3 (2024/2025)



Fonte: a autora.

De maneira integrada, a avaliação do PH ao longo das três safras evidenciou ampla variação entre cultivares e localidades, com predominância de materiais classificados como Tipo I (≥ 78 kg hL⁻¹). Cultivares como Audaz, Calibre e Toruk apresentaram maior estabilidade e desempenho superior, sobretudo em regiões de menor precipitação, como Cascavel e Maringá. Em contrapartida, Sena, Selvagem e Calibre TS demonstraram maior sensibilidade às condições ambientais, especialmente em regiões com excesso de chuvas, como Paulo Frontin, Arapoti, Irati e Guarapuava. Esses achados confirmam que, embora o PH seja um parâmetro-chave para a classificação comercial e o desempenho tecnológico do trigo, sua estabilidade depende fortemente da interação genótipo $\times$ ambiente (Guarienti et al., 2005; Dunăreanu; Bonea, 2022; Mahdavi et al., 2022; Fernández-Padilla et al., 2023)

2.4.2 Peso de Mil Grãos

O peso de mil grãos (PMG) constitui um parâmetro essencial na avaliação da qualidade física do trigo, pois está diretamente relacionado a formação e ao tamanho dos grãos, impactando tanto o rendimento de moagem quanto o aproveitamento

industrial. Por essa razão, o PMG é amplamente empregado como critério de classificação, sendo proporcional ao tamanho dos grãos e permitindo sua categorização em cinco classes: muito pequenos (15 – 25 g), pequenos (26 – 35 g), médios (36 – 45 g), grandes (46 – 54 g) e muito grandes (≥ 55 g) (Guarienti, 1996; Brasil, 2009).

Essa classificação auxilia não apenas na caracterização física, mas também no direcionamento industrial, visto que grãos muito pequenos podem escapar durante a limpeza, reduzindo o rendimento, enquanto grãos muito grandes podem comprometer a eficiência dos equipamentos. Nesse contexto, a indústria moageira costuma valorizar grãos de tamanho intermediário, especialmente das classes pequena e média, por garantirem maior uniformidade e estabilidade no processamento (Guarienti, 1996).

Na tabela 4 são mostrados os resultados de PMG das três safras estudadas.

Tabela 4 - Resultados da análise de PMG

Safra 1 (2022/2023)	
Variedade	Peso de mil grãos (g)
Audaz PG	34,00 ^g $\pm$ 0,35
Audaz AP	36,45 ^d $\pm$ 0,20
Calibre AP	39,04 ^c $\pm$ 0,64
Ello AP	35,14 ^{ef} $\pm$ 0,87
Feroz AP	38,54 ^c $\pm$ 0,13
ORS 1405 AP	34,72 ^{fg} $\pm$ 0,22
Madre Pérola AP	35,83 ^{de} $\pm$ 0,28
Ágile PF	30,08 ^h $\pm$ 0,38
Audaz PF	30,75 ^h $\pm$ 0,25
Bela Jóia PF	27,87 ⁱ $\pm$ 0,31
Destaque PF	26,61 ^j $\pm$ 0,07
Sena PF	44,45 ^a $\pm$ 0,20
Sonic PF	40,86 ^b $\pm$ 0,10
Safra 2 (2023/2024)	
Audaz PG	35,21 ^{ef} $\pm$ 0,19
Audaz AP	33,76 ^f $\pm$ 0,18
Sena AP	43,10 ^a $\pm$ 0,09
Selvagem AP	40,14 ^{bc} $\pm$ 0,03
Feroz AP	38,15 ^d $\pm$ 0,05
ORS 1405 AP	34,26 ^f $\pm$ 0,05
Audaz IR	34,00 ^f $\pm$ 0,03
Feroz IR	39,11 ^{cd} $\pm$ 0,03
Calibre IR	39,02 ^{cd} $\pm$ 0,06
Reporte GP	39,15 ^{cd} $\pm$ 0,04
Sonic GP	40,08 ^{bc} $\pm$ 0,13
Calibre GP	39,43 ^{cd} $\pm$ 0,32
Referência GP	41,15 ^b $\pm$ 1,49
Sena GP	44,01 ^a $\pm$ 0,12
Feroz GP	39,07 ^{cd} $\pm$ 0,05
Audaz GP	35,39 ^e $\pm$ 0,15

Toruk G	39,71 ^c ± 0,09
Oro GP	38,84 ^{cd} ± 0,18
Triunfo GP	39,15 ^{cd} ± 0,10
Ello Cascavel	38,41 ^d ± 0,27
Calibre Cascavel	39,42 ^{cd} ± 0,17
Audaz Cascavel	39,48 ^{cd} ± 0,15
Audaz Mga	44,16 ^a ± 0,09
Feroz Mga	39,27 ^{cd} ± 0,14
Madre Pérola Mga	40,10 ^{bc} ± 0,51
Safr 3 (2024/2025)	
Audaz PG	39,41 ^c ± 0,39
Calibre TS	44,13 ^a ± 0,44
Audaz AP	39,12 ^c ± 0,37
Sena AP	39,79 ^c ± 0,18
Selvagem AP	38,91 ^c ± 0,14
Feroz AP	38,47 ^d ± 0,09
ORS Turbo AP	39,56 ^c ± 0,16
Motriz AP	39,41 ^c ± 0,41
Audaz IR	44,23 ^a ± 0,18
Feroz IR	39,17 ^c ± 0,08
Calibre IR	40,68 ^b ± 0,21
Calibre GP	39,12 ^c ± 0,19
Sena GP	35,46 ^e ± 0,11
Feroz GP	35,08 ^e ± 0,28
Toruk GP	33,64 ^f ± 0,14
Oro GP	43,19 ^a ± 0,12
Ello Cascavel	40,16 ^b ± 0,51
Calibre Cascavel	38,16 ^d ± 0,11
Motriz Cascavel	34,21 ^f ± 0,09
Ello Mga	34,02 ^f ± 0,06
Feroz Mga	39,14 ^c ± 0,14
Calibre Mga	38,96 ^c ± 0,34

Fonte: a autora.

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna por safra, indicam que houve diferença significativa ao nível de 95% ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Na safra 1 (2022/2023) (Tabela 4), a maioria das cultivares foi classificada nas categorias de grãos pequenos e médios. Entre elas, Sena PF (44,45 g) e Sonic PF (40,86 g) apresentaram valores próximos ao limite superior da classe média. De acordo com a classificação da Guarienti (1996), tais valores podem representar um desafio para a moagem devido ao maior desgaste dos equipamentos, embora indiquem grãos mais bem formados e, portanto, com maior potencial de rendimento em farinha.

A importância do PMG como indicador agrônomo e tecnológico tem sido amplamente confirmada. Entretanto, esse parâmetro é altamente influenciado por fatores ambientais. Em condições de estresse térmico e hídrico, a formação inadequada do grão resulta em grãos chochos e menos densos, reduzindo o PMG e comprometendo a qualidade industrial. Estudos conduzidos no Sul do Brasil

evidenciam essa variabilidade, destacando que a disponibilidade hídrica e as temperaturas durante a formação determinam fortemente o valor obtido (Guarienti, 1996; Franceschi *et al.*, 2009).

Complementarmente, relatórios da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) reforçam que, no Paraná, a variação anual do PMG está diretamente associada ao regime de chuvas entre julho e outubro, período crítico para a formação dos grãos. A Associação Brasileira da Indústria do Trigo (ABITRIGO) também destaca que a uniformidade no tamanho dos grãos representa um dos principais fatores de interesse para a indústria, por influenciar diretamente o rendimento em farinha e a qualidade dos produtos finais (CONAB, 2023; ABITRIGO, 2025).

Na safra 2 (2023/2024), os valores de PMG oscilaram entre 33,76 g (Audaz AP) e 44,16 g (Sena Mga), demonstrando ampla variação entre cultivares e regiões de cultivo. As variedades Sena GP (44,01 g) e Sena Mga (44,16 g) apresentaram os maiores valores, refletindo grãos mais bem formados e de maior potencial tecnológico, enquanto Audaz AP (33,76 g) e ORS 1405 AP (34,26 g) ficaram entre os menores. Essa diferença possivelmente decorre de estresses ambientais no período de formação, visto que condições de déficit hídrico ou temperaturas elevadas reduzem significativamente o PMG e, conseqüentemente, a qualidade industrial (Guarienti, 1996; Guarienti *et al.*, 2005).

Um estudo conduzido no Paraná por Franceschi *et al.* (2009) e Germani *et al.* (1999), avaliando a adaptabilidade e estabilidade de 17 cultivares sob diferentes ambientes, demonstrou que a interação genótipo $\times$ ambiente exerce papel decisivo na estabilidade de caracteres produtivos, incluindo o PMG. Nesse sentido, cultivares como Sena GP e Sena Mga, que apresentaram valores elevados, podem ser considerados mais adaptáveis e estáveis frente à variabilidade ambiental do estado, reforçando seu potencial para o melhoramento genético e aproveitamento industrial.

Resultados semelhantes foram observados na safra 3 (2024/2025), (tabela 9), em que os valores variaram de 33,64 g (Toruk GP) a 44,23 g (Audaz IR). As cultivares Audaz IR (44,23 g) e Calibre TS (44,13 g) destacaram-se pelos maiores valores, refletindo grãos densos e bem formados, com elevado potencial de rendimento. Em contrapartida, Toruk GP (33,64 g), Ello Mga (34,21 g) e Feroz GP (35,08 g) apresentaram os menores resultados, sugerindo maior susceptibilidade a condições adversas durante a formação. Esses achados estão em consonância com Guarienti *et al.* (2005), que evidenciaram a forte influência das condições edafoclimáticas na

determinação do PMG. O estudo de Franceschi *et al.* (2009), também conduzido no Paraná, reforça essa interpretação ao demonstrar que cultivares com maior estabilidade genética, tendem a manter PMG elevado mesmo em ambientes adversos, enquanto materiais como Toruk GP e Ello Mga revelam maior sensibilidade.

A análise conjunta das três safras evidencia a amplitude do PMG, que variou de 26,61 g (Destaque PF, safra 1 (2022/2023)) a 44,45 g (Sena PF, safra 1 (2022/2023)), com registros igualmente elevados em Sena GP e Sena Mga (safra 2 (2023/2024)) e em Audaz IR e Calibre TS (safra 3 (2024/2025)), todos próximos de 44 g. Esse comportamento confirma a natureza do PMG como parâmetro altamente dependente da interação genótipo $\times$ ambiente. Cultivares como Sena destacaram-se pela consistência em diferentes safras, reforçando sua adaptabilidade e estabilidade, em consonância com Franceschi *et al.* (2009). Por outro lado, materiais como Destaque PF e Bela Jóia PF (safra 1 (2022/2023)) ou Toruk GP e Ello Mga (safra 3 (2024/2025)) apresentaram maior susceptibilidade às variações ambientais, revelando limitações sob estresses climáticos. Assim, ainda que o PMG esteja diretamente associado ao rendimento industrial, como previsto pela Instrução Normativa nº 38/2010 do MAPA, sua interpretação deve ser integrada a outros parâmetros de qualidade, como peso hectolítrico, teor de proteínas e propriedades reológicas, de modo a oferecer uma visão abrangente do potencial tecnológico do trigo (Brasil, 2010).

2.4.3 Rendimento

O rendimento de farinha configura-se como um dos principais parâmetros tecnológicos de interesse para a indústria moageira, pois expressa a eficiência de extração e a proporção de farinha obtida em relação ao peso total do grão processado. Rendimentos elevados estão associados a grãos mais densos, com endosperma bem desenvolvido e menor proporção de farelo, o que favorece a padronização e a qualidade tecnológica dos produtos finais (Kalitsis *et al.*; Posner; Hibbs, 2005; ABITRIGO, 2022).

Na tabela 5 estão descritos os rendimentos de farinha resultantes da moagem em moinho de laboratório.

Tabela 5 - Resultados do rendimento de extração da farinha

Safr 1 (2022/2023)	
Variedade	Rendimento (%)
Audaz PG	83,18
Audaz AP	70,95
Calibre AP	72,77
Ello AP	70,26
Feroz AP	65,00
ORS 1405 AP	66,51
Madre Pérola AP	66,83
Ágile PF	62,01
Audaz PF	62,44
Bela Jóia PF	62,01
Destaque PF	62,03
Sena PF	54,05
Sonic PF	61,89
Safr 2 (2023/2024)	
Audaz PG	83,19
Audaz AP	74,17
Sena AP	70,96
Selvagem AP	69,12
Feroz AP	65,81
ORS 1405 AP	67,61
Audaz IR	70,10
Feroz IR	72,64
Calibre IR	71,03
Reporte GP	69,94
Sonic GP	69,15
Calibre GP	67,30
Referência GP	68,41
Sena GP	69,21
Feroz GP	70,36
Audaz GP	70,41
Toruk GP	69,46
Oro GP	63,19
Triunfo GP	69,99
Ello Cascavel	70,16
Calibre Cascavel	70,96
Audaz Cascavel	69,18
Audaz Mga	68,60
Feroz Mga	68,94
Madre Perola Mga	70,83
Safr 3 (2024/2025)	
Audaz PG	77,30
Calibre TS	69,21
Audaz AP	70,36
Sena AP	69,46
Selvagem AP	63,19
Feroz AP	70,16
ORS Turbo AP	70,96
Motriz AP	69,18
Audaz IR	68,60
Feroz IR	68,95

Calibre IR	70,83
Calibre GP	70,36
Sena GP	70,41
Feroz GP	83,19
Toruk GP	74,17
Oro GP	70,96
Ello Cascavel	69,12
Calibre Cascavel	65,81
Motriz Cascavel	67,61
Ello Mga	70,10
Feroz Mga	72,64
Calibre Mg	71,03

Fonte: a autora.

Na primeira safra, os valores oscilaram entre 54,05 % (Sena PF) e 83,18 % (Audaz PG), revelando amplitude de quase 30 pontos percentuais entre as cultivares. A variedade Audaz PG destacou-se, com rendimento superior a 80 %, configurando-se como excelente para aproveitamento industrial. Esse comportamento confirma o reportado pela literatura, que associa maiores valores de PH e PMG à maximização do rendimento em farinha (Franceschi *et al.*, 2009).

As cultivares do grupo AP (Audaz, Calibre, Ello e Feroz) apresentaram desempenho intermediário, com rendimentos entre 65,00 % e 72,77 %. Embora inferiores aos da Audaz PG, esses valores permanecem aceitáveis para a indústria, especialmente considerando a influência de fatores ambientais, como disponibilidade hídrica e temperatura durante a formação de grãos, que afetam diretamente a eficiência de moagem. Por outro lado, variedades como ORS 1405 AP e Madre Pérola AP, ambas próximas de 66 %, apresentaram maior proporção de farelo, reduzindo a eficiência da extração (CONAB, 2023; Guarienti, 1996; Guarienti *et al.*, 2005).

As cultivares do grupo PF exibiram, em geral, os menores rendimentos, com destaque negativo para Sena PF (54,05 %), classificada como a menos favorável para moagem. Valores abaixo de 60 % comprometem a viabilidade econômica, uma vez que limitam a extração de farinha branca em proporções adequadas. Guarienti *et al.* (2005) relatam resultados semelhantes, ressaltando que cultivares com baixo rendimento tendem a apresentar grãos pequenos, duros e com maior proporção de farelo, o que reduz significativamente a eficiência industrial.

Comparando os extremos, a diferença de extração entre Audaz PG e Sena PF foi de 64,98 %, evidenciando forte variabilidade genética. Embora o rendimento esteja relacionado ao PH, já que trigos mais densos concentram maior proporção de

endosperma, a associação não se mostra linear. A cultivar Sena PF, por exemplo, apresentou simultaneamente o menor PH e o menor rendimento, enquanto Audaz PG, embora de maior rendimento, não registrou o maior PH. Esse comportamento demonstra que fatores adicionais, como estrutura do endosperma e composição do grão, também influenciam a eficiência de extração. A título de exemplo, Audaz AP e Calibre AP exibiram PH de 83,55 kg hL⁻¹, mas rendimentos de 70,95 % e 72,77 %, respectivamente, reforçando a complexidade da relação entre parâmetros físicos e tecnológicos.

De acordo com a classificação industrial, trigos podem ser agrupados em cultivares de bom rendimento (66–68 %), baixo potencial (63–65 %) e muito baixo potencial (<62 %). Nesse cenário, apenas Sena PF enquadrou-se na categoria de muito baixo potencial, corroborando também sua classificação prévia como “fora de tipo” com base no PH. Essa consistência entre indicadores confirma sua limitação tecnológica. Assim, a integração entre PH, PMG e rendimento mostra-se essencial para compreender o desempenho industrial de cada cultivar (ABITRIGO, 2022; CONAB, 2023; Guarienti, 1996).

Em síntese, a primeira safra evidenciou ampla variabilidade entre cultivares, destacando a importância do material genético aliado às condições ambientais de cultivo. Enquanto cultivares como Audaz PG apresentam vantagens competitivas claras, variedades como Sena PF demandam cautela, pois baixos rendimentos comprometem tanto a eficiência do processo quanto a rentabilidade da cadeia tritícola.

Na segunda safra (2023/2024), o rendimento de moagem manteve-se como um parâmetro central para avaliação tecnológica, refletindo diretamente no valor econômico do grão. Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre cultivares, com destaque novamente para Audaz PG (83,19 %), cujo desempenho confirmou elevado aproveitamento do endosperma e consistência em relação à safra anterior. Tal comportamento pode estar relacionado a características intrínsecas como PH elevado e menor proporção de frações fibrosas, determinantes para o rendimento industrial (Posner; Hibbs, 2005).

Por outro lado, cultivares como Feroz AP (65,81 %) e ORS 1405 AP (67,61 %) registraram os menores valores, sugerindo influência tanto genética quanto ambiental sobre dureza e composição do grão. Grãos mais duros exigem maior energia para moagem, resultando em maior quebra do amido e, conseqüentemente, em redução no rendimento de farinha branca (Pomeranz, 1988; Cauvain; Young, 2015). Esses

achados reforçam que o rendimento não depende apenas da fração endospermica, mas também da integridade estrutural do grão.

Além disso, Franceschi *et al.* (2009) destacam que a instabilidade climática no Sul do Brasil, especialmente durante a fase de formação, pode comprometer a densidade do grão e aumentar a proporção de cinzas, reduzindo a extração de farinha tipo I. Isso explica, em parte, os menores valores observados em cultivares cultivados sob ambientes menos favoráveis.

Assim, os resultados da safra 2 (2023/2024) demonstram que o rendimento de moagem é resultado da interação entre genótipo, manejo e condições ambientais. Para a indústria, a estabilidade desses valores ao longo de diferentes safras torna-se mais relevante do que rendimentos pontuais, orientando a seleção de cultivares que conciliem eficiência industrial e previsibilidade tecnológica.

Na terceira safra (2024/2025), a amplitude de variação do rendimento foi novamente marcante, com valores entre 63,19 % (Selvagem AP) e 83,19 % (Feroz GP). O destaque foi para Feroz GP, que atingiu índices próximos aos ideais para a indústria, sugerindo elevada proporção de endosperma disponível e adequada separação das camadas externas. Esse perfil confirma a associação descrita por Posner; Hibbs (2005), que relacionam maiores rendimentos à presença de endosperma vítreo bem estruturado e grãos de alta densidade.

No extremo oposto, Selvagem AP apresentou forte limitação industrial com rendimento de 63,19 %, possivelmente em razão de maior espessura da camada de farelo e grãos menos densos, fatores que elevam a proporção de cinzas e reduzem a farinha branca obtida. Pomeranz (1988) já havia destacado que essas características comprometem tanto a eficiência quanto a qualidade do produto final.

Cultivares intermediárias, como ORS Turbo AP (70,96 %), Calibre IR (70,83 %) e Sena GP (70,41 %), evidenciam que a variabilidade genética, somada às condições de cultivo, molda diretamente o rendimento. No Sul do Brasil, a oscilação térmica e a disponibilidade hídrica durante a formação do grão impactam a compactação do amido e a formação do endosperma, refletindo nos resultados observados (Franceschi *et al.*, 2009).

Quando comparadas as três safras, observa-se que Audaz PG manteve desempenho elevado em todas, com rendimentos acima de 77 %, embora tenha apresentado queda na terceira safra em relação às anteriores. Esse decréscimo possivelmente se relaciona às variações climáticas durante o ciclo agrícola. Já Feroz

GP emergiu como destaque específico da safra 3 (2024/2025), confirmando que certas cultivares podem alcançar desempenho elevado em condições particulares, mas sem garantia de estabilidade.

Portanto, o rendimento de moagem confirma-se como um parâmetro multifatorial, influenciado por genótipo, ambiente e qualidade física do grão (PH, dureza e teor de cinzas). A estabilidade de cultivares como Audaz PG confere maior previsibilidade à indústria moageira, enquanto desempenhos variáveis, como o de Feroz GP, ilustram a necessidade de avaliar cultivares não apenas em uma safra, mas ao longo de diferentes condições de cultivo.

2.4.4 Análise de Umidade, Cinzas e Proteínas das Farinhas

Nas tabelas 6, 7 e 8 estão apresentados os resultados das análises de umidade, cinzas e proteínas das farinhas obtidas a partir dos trigos das safras 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 6 - Resultados da análise de umidade, cinzas e proteína - safra 1 (2022/2023)

Variedade	Umidade (g 100 g ⁻¹)	Cinzas (g 100 g ⁻¹)	Proteína (g 100 g ⁻¹)
Audaz PG	12,11 ^{cde} ± 0,03	0,96 ^{ab} ± 0,16	14,57 ^{ab} ± 0,25
Audaz AP	12,47 ^c ± 0,20	0,94 ^{ab} ± 0,16	12,54 ^{de} ± 0,21
Calibre AP	13,08 ^b ± 0,20	0,74 ^b ± 0,02	12,32 ^e ± 0,05
Ello AP	13,93 ^a ± 0,23	0,70 ^b ± 0,01	13,3 ^{cd} ± 0,01
Feroz AP	12,27 ^{cd} ± 0,13	0,60 ^b ± 0,04	12,50 ^{de} ± 0,13
ORS 1405 AP	12,42 ^c ± 0,13	0,52 ^b ± 0,09	10,99 ^{fg} ± 0,10
Madre Pérola AP	12,48 ^c ± 0,03	0,60 ^b ± 0,05	10,50 ^g ± 0,42
Ágile PF	11,72 ^{ef} ± 0,24	0,9 ^{ab} ± 0,00	13,82 ^{bc} ± 0,14
Audaz PF	12,37 ^c ± 0,14	0,78 ^b ± 0,01	12,35 ^{de} ± 0,16
Bela Jóia PF	11,83 ^{def} ± 0,08	1,07 ^a ± 0,01	14,36 ^{abc} ± 0,65
Destaque PF	11,12 ^g ± 0,07	1,03 ^a ± 0,28	13,77 ^{bc} ± 0,05
Sena PF	10,39 ^h ± 0,16	1,02 ^a ± 0,02	14,98 ^a ± 0,03
Sonic PF	11,50 ^{fg} ± 0,16	0,78 ^b ± 0,20	11,74 ^{ef} ± 1,02

Fonte: a autora.

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95% (p<0,05) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas. Os resultados de cinzas e proteína foram expressos em base seca.

O teor de umidade constitui um parâmetro decisivo tanto para a conservação quanto para a utilização industrial do trigo. A legislação brasileira estabelece 15 % como limite máximo aceitável para o armazenamento, conforme o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2005). Acima desse valor, aumenta-se o risco de deterioração microbiológica e perdas qualitativas (Lancelot *et al.*, 2021).

Na safra 1 (2022/2023), os valores oscilaram entre 10,39 % (Sena PF) e 13,93 % (Ello AP), evidenciando variação significativa entre as cultivares. Teores mais baixos favorecem a conservação durante o armazenamento, em contrapartida, níveis

mais elevados podem induzir reações químicas e enzimáticas indesejáveis, como oxidação lipídica, degradação sensorial e formação de micotoxinas em condições inadequadas de estocagem (Carini *et al.*, 2014; Lancelot *et al.*, 2021; Czaja *et al.*, 2020; Lebert *et al.*, 2022).

Todas as cultivares permaneceram dentro do limite legal, embora Ello AP, por apresentar valor próximo ao máximo, demande monitoramento rigoroso (Brasil, 2005).

O teor de cinzas, indicador da fração mineral proveniente principalmente das camadas externas do grão, influencia diretamente na cor da farinha e sua adequação tecnológica, sobretudo em produtos que exigem brancura e refinamento (Czaja *et al.*, 2020; Memon *et al.*, 2020).

A Instrução Normativa nº 8/2005 do MAPA define que farinhas (base seca) com até 0,80 % de cinzas são classificadas como Tipo I; entre 0,81 % e 1,40 % como Tipo II; e de 1,41 % a 2,50 % como integrais. Quanto ao teor de proteínas, os limites mínimos são de 7,5 % para Tipo I e 8,0 % para Tipo II e integral (Brasil, 2005).

O teor de proteínas, por sua vez, representa um dos principais determinantes da qualidade tecnológica da farinha, sendo influenciado por fatores genéticos, ambientais, impacta tanto no valor nutricional quanto na funcionalidade tecnológica (Wieser, 2002; Li *et al.* 2018).

Na safra 1 (2022/2023), todas as cultivares atenderam ao critério proteico, variando de 10,50 g 100 g⁻¹ (Madre Pérola AP) a 14,98 g 100 g⁻¹ (Sena PF). O teor de cinzas, entretanto, apresentou maior amplitude (0,52 a 1,07 g 100 g⁻¹), refletindo no enquadramento tipológico. Assim, Madre Pérola AP, ORS 1405 AP, Feroz AP, Ello AP, Calibre AP, Sonic PF e Audaz PF foram classificadas como Tipo I; Audaz AP, Audaz PG, Sena PF, Destaque PF e Ágile PF como Tipo II. Estas últimas sugerem maior presença de pericarpo e aleurona, aumentando o valor nutricional, mas com limitação para panificação que exige farinhas mais claras (Ficco *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020). Por outro lado, cultivares como ORS 1405 AP e Feroz AP, com baixos teores de cinzas, alinham-se à produção de farinhas refinadas. Já materiais com valores intermediários, como Audaz PG, Audaz AP e Ágile PF, apresentam equilíbrio entre densidade mineral e desempenho tecnológico, favorecendo sua aplicação em panificação tradicional (Kang *et al.*, 2019; Xiong *et al.*, 2021).

Tabela 7 - Resultados da análise de umidade, cinzas e proteína - safra 2 (2023/2024)

Variedade	Umidade (g 100 g ⁻¹)	Cinzas (g 100 g ⁻¹)	Proteína (g 100 g ⁻¹)
Audaz PG	12,10 ^o ± 0,01	0,73 ^e ± 0,05	10,63 ^r ± 0,05
Audaz AP	14,04 ^d ± 0,01	0,56 ^{gh} ± 0,03	12,70 ^k ± 0,01
Sena AP	13,91 ^f ± 0,02	0,52 ^h ± 0,01	13,80 ^e ± 0,01
Selvagem AP	13,73 ^g ± 0,01	0,66 ^f ± 0,02	12,30 ^m ± 0,01
Feroz AP	13,98 ^e ± 0,05	0,64 ^{fg} ± 0,02	12,10 ⁿ ± 0,02
ORS 1405 AP	12,16 ⁿ ± 0,02	0,52 ^h ± 0,01	11,81 ^p ± 0,02
Audaz IR	13,12 ⁱ ± 0,04	0,71 ^e ± 0,05	15,40 ^a ± 0,02
Feroz IR	13,90 ^f ± 0,01	0,89 ^c ± 0,03	11,41 ^q ± 0,03
Calibre IR	13,41 ^h ± 0,03	0,76 ^{de} ± 0,06	14,39 ^b ± 0,03
Reporte GP	12,94 ^k ± 0,01	1,07 ^a ± 0,01	13,39 ^h ± 0,02
Sonic GP	13,02 ^j ± 0,02	0,92 ^{bc} ± 0,00	13,58 ^g ± 0,07
Calibre GP	12,67 ^m ± 0,04	0,94 ^{bc} ± 0,01	13,40 ^h ± 0,02
Referência GP	14,30 ^a ± 0,03	0,63 ^{fg} ± 0,01	12,39 ⁱ ± 0,04
Sena GP	14,20 ^b ± 0,03	0,91 ^c ± 0,03	12,02 ⁿ ± 0,04
Feroz GP	14,10 ^c ± 0,01	0,78 ^d ± 0,02	12,10 ⁿ ± 0,01
Audaz GP	14,10 ^c ± 0,03	0,97 ^b ± 0,05	13,50 ^g ± 0,01
Toruk GP	14,30 ^a ± 0,05	1,03 ^a ± 0,03	13,80 ^e ± 0,02
Oro GP	14,00 ^{de} ± 0,02	1,03 ^a ± 0,03	14,22 ^c ± 0,03
Triunfo GP	13,97 ^e ± 0,04	0,78 ^d ± 0,02	13,0 ⁱ ± 0,03
Ello Cascavel	12,64 ^m ± 0,02	0,94 ^{bc} ± 0,05	11,90 ^o ± 0,01
Calibre Cascavel	12,20 ⁿ ± 0,02	0,74 ^{de} ± 0,03	13,71 ^f ± 0,02
Audaz Cascavel	12,94 ^k ± 0,03	0,70 ^{ef} ± 0,02	12,91 ^j ± 0,03
Audaz Mga	12,99 ^{jk} ± 0,05	0,60 ^g ± 0,02	14,19 ^c ± 0,02
Feroz Mga	12,87 ^l ± 0,04	0,52 ^h ± 0,01	13,91 ^d ± 0,03
Madre Perola Mga	11,72 ^p ± 0,01	0,60 ^g ± 0,03	13,89 ^{de} ± 0,02

Fonte: a autora.

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95 % ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas. Os resultados de cinzas e proteína foram expressos em base seca.

Na safra 2 (2023/2024), os teores de umidade variaram de 11,72 g 100g⁻¹ (Madre Pérola) a 14,30 g 100 g⁻¹ (Referência GP), permanecendo dentro do limite máximo de 15 % definido pelo MAPA (Brasil, 2005). Contudo, cultivares com valores elevados, como Referência GP (14,30%) e Sena GP (14,20 %), demandam maior atenção no armazenamento, devido à maior suscetibilidade à oxidação lipídica e à formação de micotoxinas (Carini *et al.*, 2014; Lancelot *et al.*, 2021).

Em contraste, valores mais baixos, como em ORS 1405 AP (12,16 %) e Calibre Cascavel (12,20 %), apareceram com mais estabilidade.

O teor de cinzas variou entre 0,52 g 100 g⁻¹ (ORS 1405 AP e Ello Mga) e 1,07 g 100 g⁻¹ (Reporte GP). De acordo com a legislação, a maioria das cultivares enquadraram-se como Tipo I, incluindo Audaz AP (0,56 g 100 g⁻¹) e Sena AP (0,52 g 100 g⁻¹). Já Sonic GP (0,92 g 100 g⁻¹), Calibre GP (0,94 g 100 g⁻¹), Toruk GP (0,97 g 100 g⁻¹) e Reporte GP (1,07 g 100 g⁻¹) foram classificadas como Tipo II, refletindo maior

incorporação de camadas externas do grão, o que amplia o valor nutricional, mas pode comprometer a coloração clara da farinha (Memon *et al.*, 2020).

Os teores de proteína oscilaram de 10,63 g 100g⁻¹ (Audaz PG) a 15,40 g 100 g⁻¹ (Audaz IR), todos acima do mínimo exigido (BRASIL, 2005). Destacaram-se Audaz IR (15,40 g 100 g⁻¹) e Calibre IR (14,39 g 100 g⁻¹), com maior potencial tecnológico para panificação de pães de grande volume. Por outro lado, cultivares como Feroz IR (11,41 g 100 g⁻¹) e ORS 1405 AP (11,81 g 100 g⁻¹) aproximaram-se do limite inferior, sugerindo menor estabilidade em processos industriais mais exigentes.

De forma geral, a safra 2 (2023/2024) evidenciou cultivares de alta qualidade para Tipo I, como Audaz AP e Sena AP, e outras classificadas como Tipo II, como Reporte GP, refletindo a forte influência genética e ambiental na composição do grão.

Tabela 8 - Resultados da análise de umidade, cinzas e proteínas - safra 3 (2024/2025)

Variedade	Umidade (g 100 g ⁻¹)	Cinzas (g 100 g ⁻¹)	Proteína (g 100 g ⁻¹)
Audaz PG	12,69 ^h ± 0,04	0,95 ^{bc} ± 0,05	15,61 ^{bc} ± 0,02
Calibre TS	14,22 ^{ab} ± 0,03	0,93 ^{bc} ± 0,05	13,62 ^{jk} ± 0,04
Audaz AP	14,11 ^b ± 0,05	0,79 ^{de} ± 0,02	13,81 ^{hj} ± 0,03
Sena AP	14,31 ^a ± 0,03	1,04 ^a ± 0,04	12,91 ^{no} ± 0,03
Selvagem AP	14,02 ^{bc} ± 0,04	1,01 ^{ab} ± 0,02	12,10 ^{tu} ± 0,04
Feroz AP	12,65 ^h ± 0,04	0,96 ^{bc} ± 0,04	15,52 ^{cd} ± 0,07
ORS Turbo AP	12,20 ⁱ ± 0,03	0,75 ^{ef} ± 0,05	13,61 ^{kl} ± 0,03
Motriz AP	12,96 ^g ± 0,03	0,71 ^{fg} ± 0,03	12,21 ^t ± 0,03
Audaz IR	13,00 ^g ± 0,04	0,62 ^{gh} ± 0,06	12,42 ^q ± 0,07
Feroz IR	12,89 ^g ± 0,05	0,53 ⁱ ± 0,02	12,71 ^p ± 0,02
Calibre IR	11,73 ^j ± 0,03	0,61 ^{gh} ± 0,05	15,71 ^b ± 0,03
Calibre GP	14,12 ^b ± 0,03	0,80 ^{de} ± 0,04	13,01 ⁿ ± 0,05
Sena GP	14,12 ^b ± 0,02	1,00 ^{ab} ± 0,04	15,20 ^e ± 0,05
Feroz GP	12,15 ⁱ ± 0,03	0,74 ^{fg} ± 0,06	13,70 ^{ij} ± 0,03
Toruk GP	14,07 ^{bc} ± 0,03	0,57 ^{hj} ± 0,05	15,91 ^a ± 0,06
Oro GP	13,93 ^c ± 0,03	0,53 ⁱ ± 0,05	13,91 ^h ± 0,05
Ello Cascavel	13,74 ^d ± 0,04	0,78 ^{de} ± 0,01	12,41 ^{qr} ± 0,03
Calibre Cascavel	13,99 ^{bc} ± 0,03	0,65 ^{gh} ± 0,06	11,82 ^v ± 0,04
Motriz Cascavel	12,16 ⁱ ± 0,02	0,53 ⁱ ± 0,03	13,22 ^m ± 0,06
Ello Mga	13,14 ^f ± 0,05	0,72 ^{fg} ± 0,05	15,01 ^{fg} ± 0,06
Feroz Mga	13,92 ^c ± 0,06	0,90 ^{cd} ± 0,03	15,11 ^{ef} ± 0,03
Calibre Mga	13,43 ^e ± 0,06	0,77 ^{ef} ± 0,02	12,41 ^{qrs} ± 0,03

Fonte: a autora.

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95 % ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas. Os resultados de cinzas e proteína foram expressos em base seca.

Na safra 3 (2024/2025), tabela 8, os valores de umidade variaram entre 11,73 g 100 g⁻¹ (Calibre IR) e 14,31 g 100 g⁻¹ (Sena AP), mantendo-se dentro do limite máximo (Brasil, 2005). Cultivares como Sena AP (14,31 %) e Calibre TS (14,22 %)

exigem maior rigor no pós-colheita, dada a proximidade com o limite, enquanto valores mais baixos, como em Calibre IR (11,73 %) e Feroz GP (12,11 %), favorecem maior estabilidade, embora possam comprometer o rendimento de moagem.

O teor de cinzas oscilou entre 0,53 g 100 g⁻¹ (Feroz IR, Oro GP e Motriz Cascavel) e 1,04 g 100 g⁻¹ (Sena AP). Cultivares como Audaz IR (0,62 g 100 g⁻¹) e Calibre IR (0,61 g 100 g⁻¹) foram classificadas como Tipo I, enquanto Sena AP (1,04 g 100 g⁻¹), Selvagem AP (1,01 g 100 g⁻¹) e Sena GP (1,00 g 100 g⁻¹) enquadraram-se como Tipo II, refletindo maior presença de minerais e fibras, característica que pode beneficiar o valor nutricional, mas limitar a aceitação em farinhas destinadas a panificação refinada (Wieser, 2002; Li *et al.* 2018).

Quanto ao teor proteico, os valores variaram de 11,82 g 100 g⁻¹ (Calibre Cascavel) a 15,91 g 100 g⁻¹ (Toruk GP). Cultivares como Toruk GP (15,91 %), Calibre IR (15,71 %) e Audaz PG (15,61 %) apresentaram destaque pelo elevado teor, atribuindo-lhes maior potencial para panificação com maior volume e melhor estrutura de glúten. Em contrapartida, Motriz Cascavel (11,82 g 100 g⁻¹) e Feroz IR (12,71 g 100 g⁻¹), embora dentro dos limites legais, possuem menor potencial tecnológico.

De modo geral, a safra 3 (2024/2025) evidenciou o equilíbrio de algumas cultivares, como Audaz IR e Calibre IR, que combinaram baixos teores de cinzas com alto valor proteico, em contraste com cultivares como Sena AP e Selvagem AP, caracterizadas por maiores teores minerais e proteínas intermediárias. Esses resultados reforçam a importância da seleção varietal direcionada para diferentes usos industriais (Lebert *et al.*, 2022).

A análise comparativa evidencia que, embora todas as safras tenham atendido aos critérios normativos de qualidade, o comportamento dos parâmetros variou de forma relevante entre cultivares e condições sazonais. A safra 1 (2022/2023) apresentou equilíbrio entre umidade e proteína, mas com destaque para cultivares de maior teor de cinzas. A safra 2 (2023/2024) revelou maior número de amostras próximos ao limite máximo de umidade, exigindo atenção ao armazenamento, enquanto a safra 3 (2024/2025) concentrou as cultivares de maior teor proteico, potencializando seu uso em panificação de maior exigência tecnológica.

Na perspectiva tecnológica, cada parâmetro exerce papel decisivo. A umidade assegura a estabilidade e a segurança microbiológica, mas também repercute na maciez e na vida útil do pão, influenciando a retrogradação do amido e, consequentemente, o endurecimento do miolo (Meom *et al.*, 2020).

O teor de cinzas, por refletir a presença de minerais e fibras, modula a cor da farinha e do produto final, sendo que níveis elevados podem interferir na estrutura do glúten e reduzir o volume de pão (Li *et al.*, 2018; Ficco *et al.*, 2020). Os teores de proteína, por sua vez, representam o eixo central da funcionalidade tecnológica: o equilíbrio entre gliadinas e gluteninas determina a força, a elasticidade e a extensibilidade da massa, atributos diretamente associados ao volume específico e à textura do pão (Lebert *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2020).

Esses atributos, entretanto, não devem ser avaliados de forma isolada, uma vez que sofrem influência direta da genética, das condições edafoclimáticas e do grau de extração na moagem. Esses fatores atuam em conjunto, afetando simultaneamente a composição química e o desempenho tecnológico da farinha, o que explica a variabilidade observada entre cultivares e safras. Essa plasticidade do trigo frente ao ambiente também representa uma oportunidade de direcionar variedades a segmentos específicos da indústria, desde farinhas brancas e leves, destinadas à produção de pães de grande volume, até farinhas de maior densidade mineral, adequadas para panificação artesanal e formulações integrais (Li *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2020; Ficco *et al.*, 2020).

Conclui-se, portanto, que o monitoramento conjunto de umidade, cinzas e proteínas constitui um eixo central na avaliação da qualidade tecnológica do trigo. Esse tripé assegura não apenas conformidade normativa e estabilidade durante a estocagem, mas também desempenho diferenciado nos diversos perfis de panificação. A integração dessas análises com critérios industriais reforça a necessidade de estratégias de melhoramento e manejo direcionadas, permitindo alinhar variabilidade genética e demandas do mercado.

2.4.5 Granulometria

A granulometria da farinha de trigo exerce papel central nas características funcionais durante o processamento, pois afeta diretamente a absorção de água, o desenvolvimento da rede de glúten, as propriedades reológicas da massa e a textura dos produtos finais. A redução do tamanho das partículas, embora favoreça maior absorção de água e fortalecimento da estrutura de glúten, também pode aumentar o teor de amido danificado e reduzir o volume específico em alguns produtos, como pães a vapor (Pang *et al.*, 2021). Dessa forma, o controle rigoroso do tamanho de

partícula é apontado como fundamental para equilibrar funcionalidade tecnológica, valor nutricional e qualidade sensorial (Dziki; Krajewska; Findura, 2024).

Segundo a Instrução Normativa nº 8/2005 do MAPA, a granulometria da farinha de trigo corresponde à distribuição dimensional das partículas, sendo exigido que, para classificação como farinha Tipo I, II ou Integral, no mínimo 95 % do material passe em peneira de 250 µm.

A tabela 9 apresenta o resultado da análise de granulometria das farinhas obtidas.

Tabela 9 - Resultados da análise de granulometria das farinhas	
Safrá 1 (2022/2023)	
Variedade	% Peneirada
Audaz PG	99,92 ^a ± 0,12
Audaz AP	99,93 ^a ± 0,05
Calibre AP	99,79 ^a ± 0,05
Ello AP	99,84 ^a ± 0,07
Feroz AP	99,95 ^a ± 0,04
ORS 1405 AP	99,80 ^a ± 0,03
Madre Pérola AP	99,78 ^a ± 0,61
Ágile PF	99,86 ^a ± 0,04
Audaz PF	99,71 ^a ± 0,09
Bela Jóia PF	99,88 ^a ± 0,04
Destaque PF	99,59 ^a ± 0,47
Sena PF	99,89 ^a ± 0,05
Sonic PF	99,90 ^a ± 0,11
Safrá 2 (2023/2024)	
Audaz PG	99,87 ^a ± 0,01
Audaz AP	99,76 ^a ± 0,03
Sena AP	99,84 ^a ± 0,00
Selvagem AP	99,79 ^a ± 0,01
Feroz AP	99,94 ^a ± 0,01
ORS 1405 AP	99,81 ^a ± 0,02
Audaz IR	99,93 ^a ± 0,00
Feroz IR	99,87 ^a ± 0,00
Calibre IR	99,91 ^a ± 0,01
Reporte GP	99,96 ^a ± 0,04
Sonic GP	99,96 ^a ± 0,03
Calibre GP	99,93 ^a ± 0,02
Referência GP	99,84 ^a ± 0,00
Sena GP	99,89 ^a ± 0,01
Feroz GP	99,92 ^a ± 0,03
Audaz GP	99,88 ^a ± 0,05
Toruk G	99,95 ^a ± 0,01
Oro GP	99,98 ^a ± 0,01
Triunfo GP	99,97 ^a ± 0,03
Ello Cascavel	99,97 ^a ± 0,02
Calibre Cascavel	99,98 ^a ± 0,02
Audaz Cascavel	99,95 ^a ± 0,00
Audaz Mga	99,76 ^a ± 0,01
Feroz Mga	99,87 ^a ± 0,02

Madre Pérola Mga	99,94 ^a ± 0,01
Safra 3 (2024/2025)	
Audaz PG	99,93 ^a ± 0,01
Calibre TS	99,89 ^a ± 0,02
Audaz AP	99,92 ^a ± 0,01
Sena AP	99,95 ^a ± 0,00
Selvagem AP	99,98 ^a ± 0,01
Feroz AP	99,97 ^a ± 0,03
ORS Turbo AP	99,98 ^a ± 0,01
Motriz AP	99,95 ^a ± 0,02
Audaz IR	99,76 ^a ± 0,05
Feroz IR	99,87 ^a ± 0,02
Calibre IR	99,94 ^a ± 0,02
Calibre GP	99,92 ^a ± 0,01
Sena GP	99,88 ^a ± 0,03
Feroz GP	99,87 ^a ± 0,02
Toruk GP	99,76 ^a ± 0,05
Oro GP	99,84 ^a ± 0,03
Ello Cascavel	99,79 ^a ± 0,06
Calibre Cascavel	99,94 ^a ± 0,00
Motriz Cascavel	99,81 ^a ± 0,01
Ello Mga	99,93 ^a ± 0,01
Feroz Mga	99,87 ^a ± 0,02
Calibre Mga	99,91 ^a ± 0,01

Fonte: a autora.

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna por safra, indicam que houve diferença significativa ao nível de 95 % ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Na safra 1 (2022/2023), todas as cultivares analisadas apresentaram valores de 99,59 % a 99,95 % de material peneirado, cumprindo integralmente a legislação, sem diferenças estatísticas entre elas. Resultados semelhantes foram reportados por Pinheiro *et al.* (2020), que analisaram três cultivares de trigo comercializados em Belém/PA, embora, nesse caso, uma amostra não tenha atendido à norma, fato atribuído à alta variação observada no desvio padrão.

A literatura mostra que condições distintas de moagem podem resultar em farinhas com propriedades físicas diferenciadas, impactando a qualidade final dos produtos de panificação (Protonotariou, Ritzoulis; Mandala, 2021).

Os resultados da safra 2 (2023/2024) confirmaram novamente o atendimento integral à legislação, com valores variando de 99,76 % a 99,98 %, e diferenças mínimas entre cultivares.

A homogeneidade também reflete positivamente no controle tecnológico, reduzindo possíveis variações no comportamento farinográfico e alveográfico. Estudos apontam que farinhas muito finas apresentam maior teor de amido danificado, o que eleva a absorção de água e melhora a retenção gasosa, desde que em níveis

moderados. Quando em excesso, porém, pode ocorrer pegajosidade da massa e redução de volume nos produtos finais (Barrera *et al.*, 2013; Ma *et al.*, 2019).

Além disso, granulações ultrafinas entre 50 e 80 μm tendem a gerar massas mais resistentes e menos extensíveis, enquanto partículas intermediárias favorecem melhor equilíbrio tecnológico (Pang *et al.*, 2021).

Assim, os resultados desta safra sugerem farinhas altamente refinadas, exigindo avaliação integrada com parâmetros reológicos.

Na safra 3 (2024/2025), os percentuais de peneiramento oscilaram entre 99,76% e 99,98%, confirmando, como nas anteriores, conformidade legal e alta uniformidade entre cultivares. A consistência observada reforça a robustez do processo de moagem, minimizando variações que poderiam comprometer a qualidade tecnológica.

Embora a literatura associe partículas mais grossas a menor luminosidade e maior valor de b^* (Hidalgo; Fongaro; Brandolini, 2014), não se verificou influência direta da granulometria na cor das amostras (tabelas 10, 11 e 12). A padronização observada nas safras, contribui para maior previsibilidade tecnológica na panificação. No entanto, o nível elevado de refinamento sugere maior fragmentação do endosperma e, conseqüentemente, risco de incremento no amido danificado, que pode tanto favorecer a retenção de gás quanto, em excesso, reduzir o volume específico dos pães (Barrera *et al.*, 2013; Ma *et al.*, 2016).

A análise conjunta evidencia que a granulometria se manteve elevada e homogênea em todas as safras, com variações mínimas entre cultivares (99,59 % a 99,98 %). Essa estabilidade reforça que o fator predominante é o controle industrial da moagem, mais do que variações ambientais entre anos ou locais de cultivo (Guarienti, 1996; Franceschi *et al.*, 2009).

Do ponto de vista tecnológico, a constância da granulometria confere previsibilidade no processamento industrial e estabilidade em parâmetros subsequentes, como absorção de água e comportamento reológico. Estudos destacam que níveis intermediários de granulação oferecem melhor balanço entre absorção, elasticidade e extensibilidade, favorecendo a qualidade de pães e massas fermentadas (Pang *et al.*, 2021).

2.4.6 Cor Instrumental

As tabelas 10, 11 e 12 ilustram os valores obtidos na análise colorimétrica de cada safra, apresentando os valores referentes à coloração das farinhas de trigo, incluindo os parâmetros básicos de luminosidade (L^*), coordenadas a^* e b^* , e os índices derivados Chroma* e ângulo de tonalidade ($^{\circ}H$). Esses indicadores são amplamente utilizados para estimar a qualidade tecnológica da farinha em diferentes aplicações e para monitorar a eficiência do processo de extração na moagem (Popovska, 2023).

Tabela 10 - Resultados da análise de cor das farinhas - safra 1 (2022/2023)

Variedade	L^*	a^*	b^*	Chroma*	$^{\circ}H$
Audaz PG	$91,53^{bc} \pm 0,37$	$0,87^b \pm 0,06$	$12,35^b \pm 0,13$	$12,38^b \pm 0,13$	$85,99^{bc} \pm 0,26$
Audaz AP	$92,27^{ab} \pm 0,18$	$0,95^b \pm 0,12$	$11,35^c \pm 0,31$	$11,39^c \pm 0,31$	$85,22^{cde} \pm 0,52$
Calibre AP	$91,45^{bc} \pm 0,56$	$0,92^b \pm 0,02$	$12,22^b \pm 0,20$	$12,25^b \pm 0,20$	$85,69^{bcd} \pm 0,04$
Ello AP	$91,53^{bc} \pm 0,37$	$0,87^b \pm 0,06$	$12,35^b \pm 0,13$	$12,38^b \pm 0,13$	$85,99^{bc} \pm 0,26$
Feroz AP	$92,61^{ab} \pm 0,42$	$0,64^c \pm 0,04$	$10,62^{de} \pm 0,04$	$10,64^d \pm 0,03$	$86,57^b \pm 0,23$
ORS1405 AP	$89,94^d \pm 0,63$	$0,97^b \pm 0,08$	$10,38^e \pm 0,25$	$10,43^d \pm 0,25$	$84,65^e \pm 0,40$
M Pérola AP	$93,80^a \pm 0,25$	$0,22^d \pm 0,08$	$7,40^f \pm 0,29$	$7,41^e \pm 0,29$	$88,31^a \pm 0,58$
Ágile PF	$88,74^d \pm 0,17$	$1,20^a \pm 0,04$	$12,59^{ab} \pm 0,10$	$12,64^{ab} \pm 0,10$	$84,54^e \pm 0,22$
Audaz PF	$89,76^d \pm 0,37$	$0,98^b \pm 0,04$	$13,15^a \pm 0,16$	$13,19^a \pm 0,16$	$85,74^{bcd} \pm 0,17$
Bela Jóia PF	$90,17^{cd} \pm 0,23$	$1,19^a \pm 0,09$	$13,19^a \pm 0,36$	$13,24^a \pm 0,37$	$84,86^{de} \pm 0,32$
Destaque PF	$86,38^e \pm 1,24$	$1,26^a \pm 0,05$	$12,99^a \pm 0,20$	$13,05^a \pm 0,20$	$84,45^e \pm 0,12$
Sena PF	$86,45^e \pm 0,50$	$1,37^a \pm 0,02$	$11,22^{cd} \pm 0,08$	$11,31^c \pm 0,08$	$83,04^f \pm 0,05$
Sonic PF	$90,20^{cd} \pm 0,58$	$0,91^b \pm 0,07$	$10,75^{cde} \pm 0,28$	$10,79^{cd} \pm 0,28$	$85,17^{cde} \pm 0,31$

Fonte: A autora.

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95 % ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Na tabela 10, os resultados evidenciaram contrastes significativos entre as cultivares. A luminosidade, que varia de 0 a 100 e reflete a intensidade de claridade da amostra, oscilou entre 86,38 (Destaque) e 93,80 (Madre Pérola). Nesse sentido, as farinhas oriundas de Arapoti – PR exibiram os maiores valores de L^* , seguidas por Ponta Grossa – PR, enquanto as provenientes de Paulo Frontin – PR mostraram tonalidades mais escuras, com L^* inferiores a 90,20. A cultivar Madre Pérola AP destacou-se pelo L^* mais elevado, acompanhado de baixos valores de a^* e b^* , característica esperada em genótipos que podem ser classificados como branqueadores (Mittelstadt, 2023).

Por outro lado, as cultivares Sena PF e Destaque PF resultaram nas farinhas mais escuras, com maiores valores de a^* , o que indica predominância de tons alaranjados. Já Audaz PF, Bela Jóia PF e Destaque PF apresentaram maiores valores

de b^* , caracterizando-se pela intensidade amarelada. O parâmetro $^{\circ}H$, embora tenha se mantido em faixa próxima entre as amostras (83,04 a 88,31), indicou tendência geral para tonalidades amareladas. O índice de saturação Chroma* também variou significativamente, de 7,41 (Madre Pérola AP) a 13,24 (Bela Jóia PF), confirmando a relação direta entre maiores valores de a^* e b^* e aumento da saturação, como já apontado por Cazzaniga, Brousse, Linares (2021).

Ao relacionar a cor com o teor de cinzas, verificou-se a já conhecida relação inversa: as cultivares de maior luminosidade, como as de Arapoti, apresentaram menor concentração mineral, resultado coerente com Cankurtaran, Ceylan, Bilgiçli (2020), que observaram valores de L^* próximos a 92,98 em farinhas com 0,68 % de cinzas. De modo semelhante, Wen *et al.* (2022) relataram efeito negativo do teor de cinzas sobre L^* . Contudo, a cultivar Bela Jóia PF apresentou comportamento atípico, combinando L^* elevado (90,17) com teor de cinzas de 1,07 g/100 g, possivelmente em razão da maior incorporação de partículas da camada de aleurona ao produto final. Essa hipótese é sustentada por Ji, Ma, Baik (2020), que descrevem a concentração de minerais justamente nas regiões de farelo e aleurona.

Estudos experimentais reforçam essa interpretação. Lopes *et al.* (2022), ao analisarem cultivares de trigo submetidas a moagem com polimento superficial — processo semelhante ao beneficiamento do arroz —, relataram valores de L^* superiores a 92,60 associados a baixos teores de cinzas (<0,66 g/100g). A remoção parcial das camadas externas do grão reduziu a contribuição mineral e promoveu maior claridade da farinha.

Tabela 11 - Resultados da análise de cor das farinhas - safra 2 (2023/2024)

Variedade	L^*	a^*	b^*	Chroma*	$^{\circ}H$
Audaz PG	90,08 ^a ± 0,98	1,27 ^a ± 0,05	9,86 ⁱ ± 0,08	9,94 ⁱ ± 0,08	82,66 ⁱ ± 0,23
Audaz AP	89,16 ^b ± 0,32	0,40 ^h ± 0,01	12,96 ^a ± 0,08	12,97 ^a ± 0,08	88,23 ^a ± 0,04
Sena AP	89,41 ^b ± 0,35	1,04 ^c ± 0,03	12,59 ^b ± 0,14	12,64 ^b ± 0,14	85,30 ^d ± 0,10
Selvagem AP	90,31 ^a ± 0,69	0,82 ^e ± 0,02	8,74 ^k ± 0,06	8,78 ^k ± 0,06	84,62 ^f ± 0,14
Feroz AP	89,99 ^b ± 0,36	0,72 ^f ± 0,03	8,05 ^m ± 0,06	8,08 ^m ± 0,05	84,91 ^e ± 0,21
RS 1405 AP	90,66 ^a ± 0,30	0,79 ^e ± 0,02	8,14 ^l ± 0,05	8,18 ^l ± 0,04	84,46 ^f ± 0,17
Audaz IR	89,09 ^b ± 1,50	0,38 ^h ± 0,02	10,94 ^f ± 0,09	10,95 ^f ± 0,09	88,03 ^a ± 0,07
Feroz IR	89,97 ^b ± 0,88	1,25 ^a ± 0,03	10,57 ^g ± 0,08	10,64 ^g ± 0,07	83,25 ^h ± 0,21
Calibre IR	89,62 ^b ± 0,34	1,06 ^c ± 0,03	12,99 ^a ± 0,09	13,04 ^a ± 0,09	85,34 ^d ± 0,10
Reporte GP	88,65 ^c ± 0,32	0,81 ^e ± 0,02	10,95 ^f ± 0,09	10,98 ^f ± 0,09	85,79 ^c ± 0,12
Sonic GP	91,08 ^a ± 0,71	1,13 ^b ± 0,03	12,34 ^b ± 0,11	12,39 ^b ± 0,11	84,78 ^f ± 0,07
Calibre GP	90,99 ^a ± 0,74	1,15 ^b ± 0,04	12,87 ^a ± 0,12	12,92 ^a ± 0,12	84,88 ^e ± 0,11
Referência GP	89,68 ^b ± 0,97	0,97 ^d ± 0,03	11,59 ^d ± 0,11	11,63 ^d ± 0,11	85,20 ^e ± 0,08
Sena GP	90,99 ^a ± 0,64	0,90 ^d ± 0,02	8,68 ^k ± 0,07	8,73 ^k ± 0,07	84,08 ^g ± 0,18
Feroz GP	90,71 ^a ± 0,17	1,04 ^c ± 0,03	11,05 ^e ± 0,07	11,10 ^e ± 0,07	84,62 ^f ± 0,13

Audaz GP	89,67 ^b ± 0,86	0,69 ^f ± 0,02	11,62 ^d ± 0,08	11,64 ^d ± 0,08	86,62 ^b ± 0,10
Toruk GP	90,75 ^a ± 2,06	1,02 ^c ± 0,03	12,39 ^b ± 0,07	12,43 ^b ± 0,07	85,29 ^d ± 0,12
Oro GP	89,25 ^b ± 0,23	0,87 ^e ± 0,03	12,50 ^b ± 0,10	12,53 ^b ± 0,10	86,00 ^c ± 0,09
Triunfo GP	90,24 ^a ± 0,53	1,06 ^c ± 0,03	11,27 ^e ± 0,07	11,32 ^e ± 0,07	84,63 ^f ± 0,12
Ello Cascavel	90,04 ^{ab} ± 0,65	1,06 ^c ± 0,03	9,41 ⁱ ± 0,08	9,47 ⁱ ± 0,08	83,59 ^h ± 0,10
Calibre Cascavel	89,45 ^b ± 0,32	0,90 ^d ± 0,03	11,91 ^c ± 0,09	11,95 ^c ± 0,09	85,68 ^d ± 0,11
Audaz Cascavel	89,44 ^b ± 0,29	0,62 ^g ± 0,02	8,37 ⁱ ± 0,06	8,39 ⁱ ± 0,06	85,79 ^c ± 0,07
Audaz Mga	90,22 ^a ± 0,70	0,86 ^e ± 0,03	10,18 ^h ± 0,08	10,22 ^h ± 0,08	85,17 ^e ± 0,14
Feroz Mga	89,74 ^b ± 0,32	0,73 ^f ± 0,02	10,85 ^f ± 0,08	10,88 ^g ± 0,08	86,17 ^c ± 0,05
Madre Perola Mg	89,97 ^b ± 0,27	1,06 ^c ± 0,03	11,93 ^c ± 0,07	11,98 ^c ± 0,07	84,92 ^e ± 0,12

Fonte: A autora.

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95 % ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Na safra 2 (2023/2024), tabela 11, os parâmetros de cor das farinhas de trigo apresentaram variações numéricas consistentes. Os valores de luminosidade (L^*) oscilaram de 88,65 (Reporte GP) a 91,08 (Sonic GP), indicando que a maioria das cultivares apresentou farinhas com tonalidade clara, em concordância com padrões relatados para trigos destinados à panificação. A cultivar Sonic GP destacou-se pela maior luminosidade, enquanto Reporte GP e Audaz AP exibiram os menores valores de L^* , sugerindo tendência a colorações mais escuras.

A análise da coordenada a^* revelou variação de 0,38 (Audaz IR) a 1,25 (Feroz IR), demonstrando que algumas cultivares apresentaram tendência ao vermelho mais acentuado, enquanto outras permaneceram próximas da neutralidade. Para o parâmetro b^* , relacionado à intensidade da cor amarela, os maiores valores foram observados em Calibre IR (12,99) e Audaz AP (12,96), enquanto Feroz AP (8,05) e ORS 1405 AP (8,14) exibiram menores valores, indicando predominância de tonalidade amarelada apenas em alguns grupos.

Os resultados de Chroma* seguiram a mesma tendência de b^* , com maior saturação em Calibre IR (13,04) e Audaz AP (12,97), contrastando com Selvagem AP (8,78) e Feroz AP (8,08), que apresentaram menor intensidade cromática. Para o ângulo de matiz (Hue), os valores permaneceram entre 82,66 (Audaz PG) e 88,23 (Audaz AP), posicionando as amostras na faixa entre o vermelho e o amarelo, com predominância de tonalidade amarelada, conforme já relatado em cultivares de trigo por Cazzaniga, Brousse, Linares (2021).

Esses resultados reforçam a relação entre a coloração da farinha e o teor de cinzas, uma vez que cultivares mais claras e de maior luminosidade tendem a apresentar menores concentrações de minerais. Estudos confirmam a correlação

inversa entre luminosidade e cinzas, como demonstrado por Cankurtaran, Ceylan, Bilgiçli (2020), que relataram L^* de 92,98 associado a teor mineral de 0,68 %, e por Wen *et al.* (2022), que evidenciaram efeito negativo do teor de cinzas sobre L^* em diferentes cultivares. Casos como o da cultivar Bela Jóia PF, já observada na safra anterior, reforçam que desvios desse padrão podem ocorrer devido à presença da camada de aleurona, rica em minerais, que pode se incorporar à farinha durante a moagem (Ji; Ma; Baik, 2020).

De forma geral, a safra 2 (2023/2024) manteve elevados valores de luminosidade e predominância de tonalidades amareladas. A consistência entre cultivares sugere homogeneidade no processo de moagem, ainda que diferenças sutis na saturação e tonalidade reforcem a importância de correlacionar cor e composição mineral no direcionamento tecnológico da farinha.

Tabela 12 - Resultados da análise de cor das farinhas - safra 3 (2024/2025)

Variedade	L^*	a^*	b^*	Chroma*	$^{\circ}H$
Audaz PG	89,31 ^c ±0,19	1,46 ^a ±0,08	7,96 ^{ab} ±0,42	8,10 ^a ±0,41	79,57 ^a ±0,92
Calibre TS	89,40 ^c ±0,17	1,36 ^a ±0,24	8,43 ^a ±0,64	8,54 ^a ±0,60	80,70 ^a ±2,15
Audaz AP	89,87 ^{bc} ±0,08	1,33 ^a ±0,09	7,53 ^b ±1,08	7,65 ^b ±1,06	79,83 ^a ±1,75
Sena AP	89,03 ^c ±0,14	1,28 ^a ±0,25	8,52 ^a ±0,53	8,62 ^a ±0,56	81,45 ^a ±1,29
SelvagemAP	88,46 ^d ±0,10	1,37 ^a ±0,10	8,79 ^a ±0,14	8,90 ^a ±0,15	81,12 ^a ±0,62
Feroz AP	89,28 ^c ±0,12	1,41 ^a ±0,20	7,02 ^b ±0,73	7,16 ^b ±0,68	78,40 ^a ±2,67
ORSTurboAP	89,99 ^b ±0,14	1,23 ^a ±0,28	7,63 ^b ±0,39	7,74 ^b ±0,34	80,75 ^a ±2,59
Motriz AP	90,11 ^b ±0,10	1,21 ^a ±0,13	7,99 ^{ab} ±0,52	8,08 ^a ±0,50	81,30 ^a ±1,49
Audaz IR	90,44 ^{ab} ±0,22	1,28 ^a ±0,26	7,64 ^b ±0,43	7,75 ^b ±0,46	80,48 ^a ±1,53
Feroz IR	90,74 ^a ±0,05	1,56 ^a ±0,38	7,12 ^b ±0,26	7,29 ^b ±0,26	77,63 ^b ±0,49
Calibre IR	90,43 ^{ab} ±0,22	1,21 ^a ±0,57	7,42 ^b ±0,96	7,52 ^b ±0,94	80,59 ^a ±1,57
Calibre GP	89,82 ^b ±0,12	1,25 ^a ±0,13	7,73 ^b ±0,59	7,84 ^{ab} ±0,59	80,79 ^a ±0,98
Sena GP	88,21 ^d ±0,18	1,31 ^a ±0,06	7,34 ^b ±0,96	7,46 ^b ±0,93	79,72 ^a ±1,69
Feroz GP	90,01 ^b ±0,18	1,23 ^a ±0,27	7,07 ^b ±0,20	7,18 ^b ±0,24	80,12 ^a ±1,90
Toruk GP	90,58 ^{ab} ±0,19	1,31 ^a ±0,08	6,61 ^c ±0,32	6,74 ^c ±0,33	78,78 ^a ±0,34
Oro GP	90,72 ^a ±0,19	1,30 ^a ±0,08	6,64 ^c ±0,30	6,77 ^c ±0,28	78,84 ^a ±0,34
Ello Cascavel	89,90 ^{bc} ±0,05	1,38 ^a ±0,32	7,30 ^b ±0,55	7,44 ^b ±0,53	79,19 ^a ±2,74
Calibre Casc	90,37 ^{ab} ±0,26	1,34 ^a ±0,11	7,85 ^b ±1,34	7,97 ^a ±1,30	79,96 ^a ±2,76
Motriz Cas	90,74 ^a ±0,08	1,18 ^a ±0,29	8,15 ^a ±0,29	8,24 ^a ±0,30	81,77 ^a ±1,98
Ello Mga	90,10 ^b ±0,17	1,37 ^a ±0,22	7,95 ^{ab} ±0,21	8,07 ^a ±0,21	80,20 ^a ±1,58
Feroz Mga	89,50 ^c ±0,11	1,17 ^a ±0,03	8,38 ^a ±0,22	8,47 ^a ±0,21	82,00 ^a ±0,34
Calibre Mga	89,91 ^{bc} ±0,09	1,37 ^a ±0,09	7,76 ^b ±0,19	7,88 ^{ab} ±0,20	79,99 ^a ±0,43

Fonte: A autora.

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95 % ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Na safra 3 (2024/2025), os parâmetros de cor das farinhas de trigo revelaram diferenças significativas entre as cultivares (Tabela 12). O valor de luminosidade (L^*) variou de 88,21 (Sena GP) a 90,74 (Feroz IR e Motriz Cascavel), confirmando maior clareza para algumas amostras e tonalidades mais escuras em outras. O

comportamento observado corrobora estudos que associam valores mais elevados de L^* a farinhas de melhor qualidade industrial, com maior aceitação na panificação (Wen *et al.*, 2023).

A coordenada a^* , que representa a intensidade do vermelho, variou de 1,17 (Feroz Mga) a 1,56 (Feroz IR), sendo que a maioria das amostras manteve valores próximos entre si, sem distinções marcantes no aspecto visual. Já a coordenada b^* , associada à tonalidade amarela, apresentou maior amplitude, com os menores valores em Oro GP (6,64) e Toruk GP (6,61) e os maiores em Selvagem AP (8,79) e Calibre TS (8,43). Esses resultados indicam predominância de coloração amarelada em algumas cultivares, característica geralmente associada à presença de pigmentos carotenoides (Ji; Ma; Baik, 2020).

Os valores de Chroma* acompanharam a tendência de b^* , variando de 6,74 (Toruk GP) a 8,90 (Selvagem AP), refletindo maior saturação de cor nas cultivares com maior intensidade de amarelo. Para o ângulo de matiz (Hue), os valores oscilaram entre 77,63 (Feroz IR) e 82,00 (Feroz Mga), situando as amostras na faixa entre o vermelho e o amarelo, mas com clara predominância para o tom amarelado, conforme já relatado por Cazzaniga, Brousse, Linares (2021).

A correlação entre coloração e teor de cinzas continua evidente nesta safra. Cultivares com maiores valores de L^* (mais claras) tendem a apresentar menores conteúdos minerais, enquanto valores reduzidos de luminosidade, como em Sena GP (88,21), podem estar relacionados à maior incorporação de cinzas durante a moagem. Esse comportamento concorda com os achados de Cankurtaran, Ceylan, Bilgiçli (2020), que observaram relação inversa entre luminosidade e conteúdo mineral, e de Wen *et al.* (2022), que demonstraram efeito negativo do teor de cinzas sobre o valor de L^* .

Por outro lado, algumas cultivares apresentaram comportamento atípico, como Feroz IR, que combinou alta luminosidade (90,74) com valores elevados de a^* (1,56), sugerindo maior influência da fração aleurona, camada rica em minerais e pigmentos que pode se desprender do farelo durante a moagem (Ji; Ma; Baik, 2020).

Esse mesmo efeito foi descrito por Lopes *et al.* (2022), que demonstraram que tratamentos de remoção das camadas externas do grão resultam em maiores valores de L^* e redução significativa do teor de cinzas.

De forma geral, a safra 3 (2024/2025) apresentou farinhas com luminosidade elevada e predominância de tonalidade amarelada, o que é considerado desejável

para produtos panificados. A presença de diferenças estatísticas entre cultivares indica a influência genética sobre os parâmetros de cor, ainda que os valores se mantenham dentro de faixas compatíveis com padrões industriais.

A análise comparativa das três safras revela que os parâmetros de cor das farinhas de trigo apresentaram variações relevantes entre cultivares e regiões de cultivo. No geral, a luminosidade (L^*) oscilou entre 86,38 (Destaque PF, safra 1 (2022/2023)) e 93,80 (Madre Pérola AP, safra 1 (2022/2023)), confirmando que cultivares classificadas como “branqueadoras” exibem farinhas mais claras, aspecto valorizado pela indústria panificadora. Nas safras 2 e 3, os valores de L^* também se mantiveram elevados, variando de 88,21 (Sena GP, safra 3 (2024/2025)) a 91,08 (Sonic GP, safra 2 (2023/2024)), evidenciando consistência entre anos, mas com leve tendência a farinhas mais claras em determinadas cultivares de safra 2 (2023/2024).

O parâmetro a^* apresentou menores amplitudes, variando de 0,38 (Audaz IR, safra 2 (2023/2024)) a 1,56 (Feroz IR, safra 3 (2024/2025)), indicando predominância de tonalidades pouco avermelhadas. Já o parâmetro b^* , associado à intensidade do amarelo, apresentou contrastes mais expressivos: em torno de 13,19 (Bela Jóia PF, safra 1 (2022/2023)) e 12,99 (Calibre IR, safra 2 (2023/2024)), em contraste com valores substancialmente mais baixos, próximos de 6,61 e 6,64, observados, respectivamente, nas cultivares Toruk GP e Oro GP na safra 3 (2024/2025), indicando menor intensidade de tonalidade amarela nessas amostras. Esses resultados evidenciam que, enquanto algumas cultivares tendem a apresentar farinhas amareladas, outras mantêm tonalidades mais neutras, refletindo diferenças genéticas e de composição em carotenoides.

Os valores de Chroma*, diretamente associados à saturação da cor, acompanharam o comportamento de b^* . Na safra 1 (2022/2023), cultivares como Bela Jóia PF e Destaque PF exibiram maior intensidade cromática, enquanto na safra 3 (2024/2025), Selvagem AP e Calibre TS foram as que apresentaram colorações mais intensas. Já o ângulo de matiz (Hue) variou entre 77,63 (Feroz IR, safra 3 (2024/2025)) e 88,31 (Madre Pérola AP, safra 1 (2022/2023)), situando as amostras no espectro entre vermelho e amarelo, mas com predominância da tonalidade amarela, característica comum em farinhas de trigo.

Um aspecto relevante nas três safras foi a relação entre cor e teor de cinzas. Valores mais elevados de L^* associaram-se, em geral, a menores teores de minerais, como observado em Madre Pérola AP (safra 1 (2022/2023)) e Sonic GP (safra 2

(2023/2024)). Em contrapartida, cultivares mais escuras, como Sena PF (safra 1 (2022/2023)) e Sena GP (safra 3 (2024/2025)), tendem a concentrar maiores níveis de cinzas. Esse padrão confirma a relação inversa entre L^* e cinzas descrita por Cankurtaran, Ceylan e Bilgiçli (2020) e Wen *et al.* (2022).

Entretanto, desvios também foram observados, como em Bela Jóia PF (safra 1 (2022/2023)), que apresentou luminosidade intermediária, mas um teor de cinzas intermediário, sugerindo influência da camada de aleurona no perfil mineral. Essa fração do grão, localizada entre o endosperma e o farelo, é rica em minerais e pigmentos e pode ser incorporada à farinha durante a moagem (Ji; Ma; Baik; 2020).

Sob a perspectiva tecnológica, a cor da farinha está diretamente associada à aceitação sensorial e ao desempenho em panificação. Farinhas mais claras e de tonalidade levemente amarelada são preferidas para pães, pois conferem maior volume específico e aparência mais uniforme após o assamento. No entanto, farinhas com coloração mais intensa, resultante do maior conteúdo de cinzas ou pigmentos, podem comprometer a rede de glúten, afetando a retenção de gases e reduzindo o volume final do pão (Bressiani *et al.*, 2017).

Em síntese, a análise integrada das três safras evidencia que, apesar da variação entre cultivares, a cor da farinha manteve-se dentro de padrões compatíveis com as exigências industriais. O fator determinante para as diferenças observadas não foi apenas a genética, mas também a influência do teor de cinzas e da presença da camada de aleurona. Essa constatação reforça que a avaliação da cor deve ser interpretada de forma conjunta com a granulometria, pois ambos os parâmetros se relacionam diretamente à quantidade de cinzas incorporada à farinha e, consequentemente, ao volume e à qualidade tecnológica dos produtos panificados.

A análise conjunta dos parâmetros de cor e granulometria evidencia a estreita relação entre a distribuição do tamanho de partículas da farinha, a incorporação de minerais durante a moagem e a aparência final do produto. Nas três safras avaliadas, a granulometria manteve-se homogênea e dentro do limite legal estabelecido pela Instrução Normativa nº 8/2005 do MAPA, com percentuais superiores a 99 % de passagem em peneira de 250 μm . Essa uniformidade reduziu a variabilidade atribuída ao processo industrial, permitindo observar com maior clareza a influência da composição química e da fração mineral sobre a cor das amostras.

2.4.7 Glúten Úmido

O glúten corresponde a um complexo proteico formado principalmente pelas frações gliadina e glutenina, que, em presença de água e durante o processo de mistura, interagem para formar uma rede tridimensional elástica e coesa. Essa estrutura é fundamental para a reologia da massa, pois confere extensibilidade, elasticidade e capacidade de retenção de gases, atributos diretamente relacionados à qualidade tecnológica da farinha e ao desempenho no processo de panificação. Além de determinar o volume e a textura do pão, o glúten influencia características sensoriais e a aceitação do produto final, sendo, portanto, um dos principais parâmetros de avaliação da qualidade do trigo (Wieser, 2022; Shewry; Halford, 2022).

A tabela 13 apresenta os resultados do teor de glúten úmido de cada amostra analisada.

Tabela 13 - Resultados da análise do teor de glúten úmido	
Safr 1 (2022/2023)	
Variedade	Glúten úmido (g 100 g ⁻¹)
Audaz PG	38,86 ^{bc} ±0,45
Audaz AP	30,98 ^{ef} ±0,22
Calibre AP	30,18 ^f ±2,10
Ello AP	31,44 ^{def} ±0,28
Feroz AP	33,93 ^{cde} ±1,23
ORS 1405 AP	30,18 ^f ±1,76
Madre Pérola AP	25,33 ^g ±0,42
Ágile PF	37,61 ^{bcd} ±1,03
Audaz PF	31,69 ^{def} ±1,01
Bela Jóia PF	37,61 ^b ±1,03
Destaque PF	36,14 ^{bc} ±0,30
Sena PF	43,62 ^a ±2,02
Sonic PF	34,13 ^{cde} ±1,92
Safr 2 (2023/2024)	
Audaz PG	36,77 ^e ± 1,19
Audaz AP	31,46 ^h ±0,16
Sena AP	39,55 ^c ± 0,27
Selvagem AP	38,34 ^d ± 0,36
Feroz AP	37,49 ^{de} ± 0,33
ORS 1405 AP	31,60 ^h ± 0,33
Audaz IR	35,28 ^f ± 0,17
Feroz IR	37,49 ^{de} ± 0,33
Calibre IR	45,87 ^a ± 0,09
Reporte GP	43,42 ^b ± 0,23
Sonic GP	37,14 ^{de} ± 0,15
Calibre GP	33,33 ^g ± 0,22
Referência GP	36,68 ^e ± 0,45
Sena GP	29,09 ⁱ ±0,29
Feroz GP	35,62 ^{ef} ± 0,40
Audaz GP	36,42 ^{ef} ± 0,49

Toruk GP	35,92 ^{ef} ± 0,06
Oro GP	33,52 ^g ± 0,27
Triunfo GP	31,64 ^g ± 0,31
Ello Cascavel	36,24 ^{ef} ± 0,21
Calibre Cascavel	34,37 ^{fg} ± 0,50
Audaz Cascavel	33,51 ^g ± 0,30
Audaz Mga	37,68 ^{de} ± 0,25
Feroz Mga	38,37 ^{cd} ± 0,33
Madre Perola Mga	37,31 ^{de} ± 0,23
Safr 3 (2024/2025)	
Audaz PG	33,85 ^c ± 0,18
Calibre TS	30,95 ^{de} ± 0,23
Audaz AP	31,54 ^d ± 0,24
Sena AP	27,97 ^{fg} ± 0,20
Selvagem AP	30,55 ^{de} ± 0,23
Feroz AP	33,10 ^c ± 0,33
ORS Turbo AP	30,65 ^{de} ± 0,23
Motriz AP	30,70 ^{de} ± 0,23
Audaz IR	31,10 ^{de} ± 0,31
Feroz IR	31,40 ^{de} ± 0,31
Calibre IR	36,70 ^a ± 0,37
Calibre GP	26,60 ^g ± 0,27
Sena GP	35,40 ^b ± 0,35
Feroz GP	32,20 ^{cd} ± 0,32
Toruk GP	34,70 ^{bc} ± 0,35
Oro GP	32,30 ^{cd} ± 0,32
Ello Cascavel	28,70 ^f ± 0,29
Calibre Cascavel	28,12 ^{fg} ± 0,28
Motriz Cascavel	28,00 ^g ± 0,32
Ello Mga	30,40 ^e ± 0,30
Feroz Mga	33,90 ^c ± 0,34
Calibre Mga	27,40 ^g ± 0,27

Fonte: a autora

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna por safra, indicam que houve diferença significativa ao nível de 95 % ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Na safra 1 (2022/2023), os resultados de glúten úmido revelaram ampla variação entre as cultivares, refletindo diferenças tanto no potencial tecnológico quanto na adaptação ambiental. O valor mais elevado foi registrado para Sena PF (43,62 g 100 g⁻¹), indicando elevada força de glúten e maior aptidão para panificação de produtos que requerem volume e estrutura de massa mais desenvolvidos.

O teor elevado de glúten úmido evidencia a presença significativa de proteínas formadoras de glúten, fator essencial para o desempenho reológico da massa. Entretanto, esse parâmetro não se relaciona diretamente ao rendimento de extração na moagem, que depende de características físicas do grão, como dureza, morfologia e proporção entre endosperma e camadas externas. Grãos mais duros, embora apresentem potencial para gerar farinhas de melhor qualidade tecnológica,

frequentemente resultam em menor rendimento de farinha, devido à maior dificuldade de separação do endosperma e à maior liberação de partículas de farelo durante a moagem. Dessa forma, observa-se que altos valores de glúten podem coexistir com baixos rendimentos industriais, uma vez que os dois parâmetros expressam dimensões distintas da qualidade do trigo: a primeira associada ao potencial panificável e a segunda à eficiência do processo de moagem (Posner; Hibbs, 2005; Wang *et al.*, 2020).

A cultivar Madre Pérola AP (25,33 g 100 g⁻¹) apresentou o menor teor, sugerindo desempenho tecnológico limitado e uso mais apropriado em produtos de menor exigência reológica. Entre as cultivares do grupo AP, destacaram-se Audaz AP (30,98 g 100 g⁻¹), Ello AP (31,44 g 100 g⁻¹) e Feroz AP (33,93 g 100 g⁻¹), com valores intermediários que permitem panificação básica, ainda que insuficientes para pães de maior volume e melhor textura. Situação semelhante foi observada para ORS 1405 AP (30,18 g 100 g⁻¹), confirmando a heterogeneidade desse grupo.

Os resultados da análise alveográfica (Tabela 20) da mesma safra reforçam esses contrastes. Apesar de Sena PF apresentar alto teor de glúten, exibiu valores intermediários para tenacidade ($P = 61 \text{ mm H}_2\text{O}$) e extensibilidade ($L = 87 \text{ mm}$), com energia alveográfica relativamente baixa ($W = 61 \times 10^{-4} \text{ J}$). Isso evidencia que altos teores de glúten nem sempre se traduzem em maior força geral, resultado atribuído à composição específica das subunidades de gluteninas, que modulam elasticidade e tenacidade (Gianibelli *et al.*, 2001).

Em contrapartida, cultivares com glúten intermediário, como Audaz AP (30,98 g 100 g⁻¹; $W = 366 \times 10^{-4} \text{ J}$) e Feroz AP (33,93 g 100 g⁻¹; $W = 273 \times 10^{-4} \text{ J}$), apresentaram massas mais fortes e equilibradas, confirmando que a relação entre glúten e alveografia é mais qualitativa que quantitativa.

Casos específicos reforçam essa interpretação. Sonic PF (34,13 g 100 g⁻¹; $P = 108 \text{ mmH}_2\text{O}$; $P/L = 2,30$) produziu massas excessivamente tenazes e pouco extensíveis, comprometendo a expansão mesmo com teor intermediário de glúten. Já Ello AP (31,44 g 100 g⁻¹; $P/L = 1,09$) e Ágile PF (37,61 g 100 g⁻¹; $P/L = 1,05$) demonstraram melhor equilíbrio entre tenacidade e extensibilidade, apresentando perfil mais favorável à panificação de pães de maior volume.

Esse comportamento está alinhado ao que descrevem Jodal e Larsen (2021), ao destacarem que o parâmetro W reflete a força do glúten, pois depende não apenas da quantidade, mas também da qualidade das proteínas.

Da mesma forma, Yousaf *et al.* (2019) encontraram correlação positiva entre teor de glúten e energia de deformação (W), mas com ressalvas quando a qualidade proteica não acompanha a quantidade. Isso explica por que, na safra 1 (2022/2023), cultivares de alto teor de glúten, como Sena PF, não apresentaram valores elevados de W, enquanto materiais de teor moderado, como Audaz AP, se destacaram em desempenho tecnológico. Além disso, estudos recentes confirmam que a qualidade do glúten é influenciada por fatores como a presença de farelo e conteúdo mineral associado, que podem aumentar o peso do glúten úmido durante a lavagem e impactar a extensibilidade da massa (Liu *et al.*, 2019; Schuster; Huen; Scherf, 2022; Mittelstadt *et al.*, 2023).

Por fim, a Madre Pérola AP, que apresentou o menor valor de glúten (25,33 g 100 g⁻¹) e baixa proteína, revelou desempenho intermediário para W quando comparada às demais cultivares.

Portanto, a safra 1 (2022/2023) confirma a necessidade de análise integrada entre glúten e parâmetros alveográficos. Enquanto cultivares de maior teor proteico não apresentaram proporcionalidade em força tecnológica, materiais com valores intermediários demonstraram melhor aproveitamento industrial. Esse cenário reforça o papel da interação entre quantidade e qualidade das proteínas como determinante para a performance em panificação (Wieser *et al.*, 2007; Shewry; Halford, 2019).

Na safra 2 (2023/2024), os resultados do glúten úmido mostraram ampla variação entre as cultivares, destacando materiais de alto desempenho e outros com limitações tecnológicas. O maior valor foi registrado para Calibre IR (45,87 g 100 g⁻¹), que se destacou pelo teor de glúten superior, associado à maior retenção de gases e formação de massas viscoelásticas mais consistentes. Valores elevados também foram observados em Reporte GP (43,42 g 100 g⁻¹), reforçando seu potencial para panificação de produtos fermentados. Em contrapartida, Sena GP (29,09 g 100 g⁻¹) apresentou o menor resultado, sugerindo menor força de glúten e adequação restrita a produtos de menor exigência reológica.

No grupo AP, cultivares como Audaz AP (31,46 g 100 g⁻¹) e ORS 1405 AP (31,60 g 100 g⁻¹) exibiram valores intermediários a baixos, com menor contribuição para a rede proteica, o que pode reduzir a estabilidade da massa durante a fermentação. Por outro lado, Selvagem AP (38,34 g 100 g⁻¹) e Sena AP (39,55 g 100 g⁻¹) apresentaram desempenho mais favorável dentro do grupo, aproximando-se dos padrões tecnológicos para panificação. De forma geral, os grupos IR e GP

concentraram os maiores valores de glúten, enquanto o grupo AP revelou maior heterogeneidade. Essa variabilidade confirma o papel combinado de fatores genéticos e ambientais na síntese proteica, como já apontado por Shewry; Halford (2019) e Gianibelli *et al.* (2001).

A análise alveográfica dessa safra complementa os achados (Tabela 21). Algumas cultivares se destacaram por associar teor de glúten elevado e energia alveográfica forte, como Audaz IR (glúten = 35,28 g 100 g⁻¹; W = 393 × 10⁻⁴ J; P/L = 0,68) e Calibre IR (glúten = 45,87 g 100 g⁻¹; W = 389 × 10⁻⁴ J; P/L = 0,57), que apresentaram massas equilibradas, adequadas para pães de maior volume. No grupo GP, Sonic GP (glúten = 37,14 g 100g⁻¹; W = 359 × 10⁻⁴ J; P/L = 0,80) confirmou esse mesmo perfil, ao passo que Audaz GP (glúten = 36,68 g 100g⁻¹; W = 383 × 10⁻⁴ J; P/L = 1,97) e Oro GP (glúten = 33,52 g 100g⁻¹; W = 332 × 10⁻⁴ J; P/L = 1,75) evidenciaram massas muito tenazes, pouco extensíveis e com menor capacidade de expansão no forno, apesar da força total elevada.

Outras cultivares, como Selvagem AP (glúten = 38,34 g 100 g⁻¹; W = 158 × 10⁻⁴ J; P/L = 0,22) e Feroz AP (glúten = 37,49 g 100 g⁻¹; W = 166 × 10⁻⁴ J; P/L = 0,17), apresentaram o comportamento oposto, com massas muito extensíveis, porém pouco tenazes, perfil inadequado para panificação tradicional, embora viável em produtos de fermentação rápida. Já Sena AP (glúten = 39,55 g 100 g⁻¹; W = 325 × 10⁻⁴ J; P/L = 2,30) mostrou massas excessivamente resistentes e pouco extensíveis, o que dificulta a expansão, mesmo em pães com longa fermentação.

Assim, a safra 2 (2023/2024) demonstrou que o teor de glúten isoladamente não é suficiente para prever a qualidade tecnológica. Cultivares como Calibre IR e Sonic GP confirmaram o potencial quando há equilíbrio entre resistência e extensibilidade, enquanto materiais como Sena AP e Audaz GP, apesar dos altos valores de glúten, apresentaram limitações pelo desbalanço do P/L. Essa observação está em consonância com a literatura, que enfatiza que a qualidade para panificação depende não apenas da quantidade de glúten, mas também da funcionalidade das subunidades de glutenina e gliadina, determinando elasticidade, extensibilidade e força global da massa (Gianibelli *et al.*, 2001; Shewry; Halford, 2019).

Além disso, estudos recentes reforçam que a correlação entre glúten e W nem sempre é linear. Jodal *et al.* (2021), Yousaf *et al.* (2019) e Schuster; Huen; Scherf (2022) destacam o papel de W como indicador de força, mas alertam que ele depende

da qualidade do glúten e que proteínas de baixa qualidade podem elevar o teor total sem garantir desempenho reológico.

Na safra 3 (2024/2025), os teores de glúten apresentaram ampla variação, refletindo tanto o efeito genético das cultivares quanto a influência das condições edafoclimáticas. O valor mais elevado foi registrado em Calibre IR (36,70 g 100 g⁻¹), seguido por Sena GP (35,40 g 100 g⁻¹) e Toruk GP (34,70 g 100g⁻¹), indicando potencial tecnológico para panificação de produtos que requerem maior volume e estabilidade de massa. Em contrapartida, os menores valores foram observados em Calibre GP (26,60 g 100 g⁻¹) e nas cultivares do grupo Mga e Cascavel, como Calibre Mga (27,40 g 100 g⁻¹), Ello Mga (28,00 g 100 g⁻¹) e Feroz Mga (28,12 g 100 g⁻¹), revelando desempenho mais limitado e maior sensibilidade ambiental.

No grupo AP, a maioria das cultivares apresentou resultados intermediários, com destaque para Feroz AP (33,10 g 100 g⁻¹) e Audaz AP (31,54 g 100 g⁻¹), que atingiram valores próximos ao mínimo adequado para panificação. Audaz PG (33,85 g 100 g⁻¹) manteve desempenho consistente em relação às safras anteriores, enquanto Sena AP (27,97 g 100 g⁻¹) apresentou um dos menores valores, sugerindo restrições na formação da rede de glúten.

De forma geral, a safra 3 (2024/2025) concentrou maior número de cultivares próximos como qualidade inferior quando comparada às safras 1 e 2, o que reforça a influência de estresses ambientais durante a formação dos grãos, capazes de reduzir a síntese de proteínas de reserva (Gianibelli *et al.*, 2001; Shewry; Halford, 2019).

A análise alveográfica (Tabela 22) confirmou a grande amplitude entre cultivares. Os maiores valores de energia (W) foram observados em Sena AP (W = 476 × 10⁻⁴ J; glúten = 27,97 g 100 g⁻¹), ORS Turbo AP (W = 441 × 10⁻⁴ J; glúten = 30,65 g 100 g⁻¹) e Feroz AP (W = 408 × 10⁻⁴ J; glúten = 33,10 g 100 g⁻¹). Esses resultados evidenciam que, mesmo com glúten intermediário, a composição de gluteninas pode conferir desempenho superior, destacando que a qualidade proteica é mais determinante do que a simples quantidade (Wieser *et al.*, 2022; Shewry; Halford, 2019).

Algumas cultivares apresentaram massas fortes, porém excessivamente tenazes, como Audaz AP (glúten = 31,54 g 100 g⁻¹; W = 346 × 10⁻⁴ J; P/L = 1,93) e ORS Turbo AP (P/L = 1,85), o que pode dificultar a expansão. Em contraste, materiais como Toruk GP (glúten = 34,70 g 100 g⁻¹; W = 398 × 10⁻⁴ J; P/L = 0,77) e Calibre TS

(glúten = 30,95 g 100 g⁻¹; W = 387 × 10⁻⁴ J; P/L = 0,80) apresentaram equilíbrio entre tenacidade e extensibilidade, perfil adequado para panificação de pães volumosos.

Em contrapartida, algumas cultivares revelaram baixo desempenho tecnológico, como Selvagem AP (glúten = 30,55 g 100 g⁻¹; W = 113 × 10⁻⁴ J; P/L = 0,29) e Motriz AP (glúten = 30,70 g 100 g⁻¹; W = 155 × 10⁻⁴ J; P/L = 0,17), com massas muito extensíveis e frágeis. Situação semelhante foi observada em Audaz IR (glúten = 31,10 g 100 g⁻¹; W = 135 × 10⁻⁴ J; P/L = 0,14) e Feroz IR (glúten = 31,40 g 100 g⁻¹; W = 142 × 10⁻⁴ J; P/L = 0,19), indicando baixa contribuição das gluteninas de alto peso molecular, já descrita por Gianibelli *et al.* (2001) como determinante para a força da rede proteica.

Assim, a safra 3 (2024/2025) reforça a discrepância entre teor de glúten e desempenho alveográfico. Cultivares como Toruk GP e Calibre TS alcançaram melhor desempenho mesmo com glúten intermediário, enquanto materiais de teor semelhante, mas com composição menos favorável, apresentaram massas fracas. Esse comportamento corrobora a literatura, que enfatiza a interação entre quantidade e qualidade das proteínas na definição da performance em panificação (Shewry; Halford, 2019; Gianibelli *et al.*, 2001).

De maneira crítica, os resultados obtidos nas três safras permitem direcionar de forma estratégica o uso industrial das cultivares. Materiais como Audaz AP (safra 1 (2022/2023)), Calibre IR e Sonic GP (safra 2 (2023/2024)) e Toruk GP e Calibre TS (safra 3 (2024/2025)) apresentaram melhor equilíbrio entre teor de glúten e parâmetros alveográficos, sendo recomendados para a panificação de pães de maior volume e qualidade superior, conforme destacado por Jodal e Larsen (2021) ao relacionarem o valor de W com a força tecnológica da massa.

Em contrapartida, cultivares que apresentaram massas excessivamente tenazes, como Sena AP e Audaz GP, alinham-se ao uso em massas alimentícias secas, uma vez que valores elevados de P/L indicam resistência ao alongamento e menor expansão durante a fermentação. Já materiais com massas muito extensíveis e de baixa força, como Selvagem AP, Motriz AP e Audaz IR, demonstram maior potencial para aplicações de menor exigência tecnológica, como bolos, biscoitos e massas moles, resultado que encontra respaldo nas observações de Bettge; Rubenthaler; Pomeranz (1989) sobre a aplicabilidade de trigos com baixa resistência.

Assim, a análise integrada de glúten e alveografia reforça a importância de classificar e direcionar as cultivares de acordo com seu perfil reológico e proteico,

otimizando sua aplicação para diferentes segmentos da indústria moageira e panificadora (Shewry; Halford, 2019; Schuster; Huen; Scherf, 2022).

2.4.8 Amido Danificado

O amido danificado constitui um parâmetro de grande relevância na avaliação tecnológica da farinha de trigo, pois resulta do processo de moagem e exerce influência direta sobre a absorção de água e a atividade enzimática durante a panificação. Esse tipo de amido é formado principalmente durante a moagem em moinhos de rolos, em decorrência do atrito mecânico entre eles, o que provoca ruptura parcial dos grânulos. O nível de dano está associado a diferentes fatores do processo, como a pressão e o tamanho da folga entre os rolos, o tempo de moagem, a dureza dos grãos e as características estruturais do endosperma (Jukic *et al.*, 2023).

Grãos submetidos a moagem mais intensa tendem a apresentar maior proporção de amido danificado, aumentando a disponibilidade de substrato para a ação da amilase e favorecendo a fermentação. Em consequência, a quantidade de amido danificado impacta a consistência da massa, o volume e a textura do pão, configurando-se como um indicador essencial para a indústria moageira e de panificação (Cauvain; Young, 2015; Delcour; Hosney, 2010).

A tabela 14 demonstra os resultados obtidos na safra 1 (2022/2023).

Tabela 14 - Resultados da análise de amido danificado - safra 1 (2022/2023)

Variedade	Amido danificado (g 100g ⁻¹)
Audaz PG	7,79 ^{cd} ±1,36
Audaz AP	2,34 ^{fg} ±0,00
Calibre AP	1,56 ^h ±0,67
Ello AP	5,45 ^{de} ±0,68
Feroz AP	4,68 ^{efg} ±1,17
ORS 1405 AP	1,17 ^h ±0,00
Madre Pérola AP	1,95 ^{gh} ±0,67
Ágile PF	10,89 ^b ±1,78
Audaz PF	4,67 ^{efg} ±1,16
Bela Jóia PF	9,72 ^{bc} ±1,34
Destaque PF	5,17 ^{def} ±0,68
Sena PF	15,94 ^a ±0,67
Sonic PF	12,08 ^b ±1,34

Fonte: a autora

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95 % (p<0,05) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Na safra 1 (2022/2023), os valores de amido danificado apresentaram ampla variação entre as cultivares, oscilando de 1,17 g 100 g⁻¹ (ORS 1405 AP) a 15,94 g 100

g⁻¹ (Sena PF), refletindo diferenças tanto na dureza do grão quanto na interação com o processo de moagem. Observou-se que cultivares como Sena PF (15,94 g 100 g⁻¹), Sonic PF (12,08 g 100 g⁻¹) e Ágile PF (10,89 g 100 g⁻¹) apresentaram níveis elevados de dano, valores que se aproximam dos reportados por Jukic *et al.* (2019), que destacam que farinhas provenientes de grãos mais duros tendem a concentrar maiores índices de amido danificado devido à maior resistência do endosperma à fragmentação. Esses teores elevados podem favorecer a absorção de água e a atividade enzimática, resultando em massas mais extensíveis, mas também suscetíveis a enfraquecimento durante a fermentação.

Por outro lado, cultivares como ORS 1405 AP (1,17 g 100 g⁻¹), Calibre AP (1,56 g 100 g⁻¹) e Madre Pérola AP (1,95 g 100 g⁻¹) apresentaram baixos níveis de amido danificado, valores compatíveis com farinhas obtidas a partir de grãos mais moles.

De acordo com Delcour e Hoseney (2010), farinhas com baixo índice de dano tendem a apresentar absorção de água mais limitada e menor disponibilidade de substrato para a ação da amilase, o que pode comprometer o volume de pães em sistemas fermentativos intensos. Valores intermediários, como os encontrados em Ello AP (5,45 g 100 g⁻¹) e Destaque PF (5,17 g 100 g⁻¹), situam-se em uma faixa considerada adequada pela indústria panificadora, uma vez que promovem equilíbrio entre absorção hídrica, desenvolvimento de massa e estabilidade do glúten, conforme apontado por Cauvain e Young (2015).

Portanto, os resultados da safra 1 (2022/2023) evidenciam que o comportamento do amido danificado varia amplamente entre as cultivares, influenciando de forma decisiva sua adequação tecnológica. Enquanto materiais com teores elevados, como Sena PF, podem ser direcionados para produtos que demandam maior absorção de água, como pães de forma, cultivares com baixos níveis, como ORS 1405 AP, mostram potencial para produtos que exigem massas mais firmes e com menor expansão volumétrica.

A tabela 15 demonstra os resultados obtidos na safra 2 (2023/2024).

Tabela 15 - Resultados da análise de amido danificado - safra 2 (2023/2024)

Variedade	Amido danificado (g 100 g ⁻¹)
Audaz - PG	10,48 ^d ±0,21
Audaz - AP	8,17 ^f ±0,16
Sena - AP	10,50 ^d ±0,31
Selvagem - AP	2,34 ^j ±0,07
Feroz - AP	2,34 ^j ±0,07
ORS 1405 AP	2,33 ^j ±0,07
Audaz IR	15,16 ^b ±0,31
Feroz IR	16,36 ^a ±0,33
Calibre IR	16,30 ^a ±0,33
Reporte GP	1,16 ^k ±0,02
Sonic GP	1,17 ^k ±0,02
Calibre GP	2,33 ^j ±0,07
Referência GP	9,35 ^e ±0,28
Sena - GP	12,84 ^c ±0,39
Feroz -GP	10,48 ^d ±0,31
Audaz - GP	4,68 ^h ±0,14
Toruk - GP	3,51 ⁱ ±0,11
Oro - GP	5,83 ^g ±0,18
Triunfo - GP	4,68 ^h ±0,14
Ello Cascavel	5,85 ^g ±0,18
Calibre Cascavel	1,18 ^k ±0,02
Audaz Cascavel	1,17 ^k ±0,02
Audaz Mga	1,15 ^k ±0,02
Feroz Mga	2,34 ^j ±0,07
Madre Perola Mga	2,33 ^j ±0,07

Fonte: a autora

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95 % ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Na safra 2 (2023/2024), os valores de amido danificado apresentaram grande amplitude, variando de 1,15 g 100 g⁻¹ (Audaz Mga) a 16,36 g 100 g⁻¹ (Feroz IR). Esse comportamento evidencia a interação entre as características intrínsecas das cultivares e a dureza do grão com as condições do processo de moagem. Os maiores teores foram observados em Feroz IR (16,36 g 100 g⁻¹), Calibre IR (16,30 g 100 g⁻¹) e Audaz IR (15,16 g 100 g⁻¹). Valores tão elevados podem potencializar a absorção de água e a degradação enzimática, favorecendo massas altamente fermentáveis, mas com risco de enfraquecimento estrutural e perda de volume durante o forneamento (Jukic *et al.*, 2023).

Por outro lado, cultivares como Reporte GP (1,16 g 100 g⁻¹), Sonic GP (1,17 g 100 g⁻¹) e Calibre Cascavel (1,18 g 100 g⁻¹) apresentaram baixos níveis de amido danificado, semelhantes aos relatados por Cauvain e Young (2015) para farinhas oriundas de grãos mais macios. Esses valores podem resultar em menor absorção de água e atividade enzimática restrita, características que limitam a expansão da massa,

mas que podem ser vantajosas em produtos que demandam maior firmeza, como biscoitos e massas alimentícias.

Em uma faixa intermediária, destacaram-se cultivares como Oro GP (5,83 g 100g⁻¹), Ello Cascavel (5,85 g 100 g⁻¹) e Triunfo GP (4,68 g 100 g⁻¹), cujos valores se alinham aos intervalos considerados tecnicamente adequados para panificação equilibrada. Nesses casos, observa-se um balanço favorável entre absorção de água, extensibilidade da massa e estabilidade do glúten, o que tende a resultar em pães com volume satisfatório e textura uniforme, corroborando as observações de Cauvain e Young (2015).

Assim, os resultados da safra 2 (2023/2024) confirmam que a variabilidade genética exerce papel central na determinação do dano ao amido, sendo amplificada pelas diferenças de dureza do grão e pela resposta de cada cultivar ao processo de moagem. Esse comportamento está em consonância com estudos prévios que destacam o amido danificado como um dos principais determinantes da qualidade tecnológica do trigo (Delcour; Hoseney, 2010; Jukic *et al.*, 2023).

A tabela 16 demonstra os resultados obtidos na safra 3 (2024/2025).

Tabela 16 - Resultados da análise de amido danificado - safra 3 (2024/2025)

Variedade	Amido danificado (g 100 g ⁻¹)
Audaz PG	2,33 ⁱ ± 0,01
Calibre TS	12,84 ^c ± 0,06
Audaz AP	10,48 ^d ± 0,05
Sena AP	3,51 ^h ± 0,02
Selvagem AP	5,83 ^f ± 0,03
Feroz AP	5,85 ^f ± 0,03
ORS Turbo AP	1,16 ^j ± 0,02
Motriz AP	1,17 ^j ± 0,01
Audaz IR	1,17 ^j ± 0,01
Feroz IR	2,33 ⁱ ± 0,01
Calibre IR	2,33 ⁱ ± 0,01
Calibre GP	10,48 ^d ± 0,05
Sena GP	4,68 ^g ± 0,02
Feroz GP	10,48 ^d ± 0,05
Toruk GP	8,17 ^e ± 0,04
Oro GP	10,50 ^d ± 0,05
Ello Cascavel	2,34 ⁱ ± 0,01
Calibre Cascavel	2,34 ⁱ ± 0,01
Motriz Cascavel	2,33 ⁱ ± 0,01
Ello Mga	15,16 ^b ± 0,08
Feroz Mga	16,34 ^a ± 0,06
Calibre Mga	16,30 ^a ± 0,08

Fonte: a autora

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95 % ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Na safra 3 (2024/2025), os valores de amido danificado variaram entre 1,16 g 100 g⁻¹ (ORS Turbo AP) e 16,34 g 100 g⁻¹ (Feroz Mga), evidenciando novamente forte heterogeneidade entre as cultivares. Os maiores teores foram observados em Feroz Mga (16,34 g 100 g⁻¹), Calibre Mga (16,30 g 100 g⁻¹) e Ello Mga (15,16 g 100 g⁻¹), valores que ultrapassam o limite superior considerado adequado pela indústria panificadora (6–12 g 100 g⁻¹), conforme descrito por Delcour e Hoskeney (2010). Esse comportamento tende a favorecer elevada absorção de água e maior degradação enzimática, aspectos que, embora possam aumentar a extensibilidade da massa e o aporte fermentativo, também elevam o risco de enfraquecimento da rede de glúten e perda de volume no forneamento, como já observado por Jukic *et al.* (2023).

Na faixa intermediária destacaram-se cultivares como Toruk GP (8,17 g 100 g⁻¹), Audaz AP (10,48 g 100 g⁻¹), Calibre GP (10,48 g 100 g⁻¹) e Feroz GP (10,48 g 100 g⁻¹), cujos valores se alinham ao intervalo ideal para panificação equilibrada. De acordo com Cauvain e Young (2015), esses níveis permitem um balanço adequado entre absorção hídrica, disponibilidade de substrato para a ação da amilase e

estabilidade da massa, favorecendo o desenvolvimento de pães de bom volume e textura uniforme.

Por outro lado, materiais como ORS Turbo AP (1,16 g 100 g⁻¹), Motriz AP (1,17 g 100 g⁻¹) e Audaz IR (1,17 g 100 g⁻¹) apresentaram baixos índices de amido danificado, semelhantes aos de farinhas oriundas de grãos mais macios. Nessas condições, a absorção de água é limitada e a fermentação menos intensa, o que pode restringir a expansão da massa, mas favorecer produtos que demandam maior firmeza, como biscoitos ou massas secas (Delcour; Hoskeney, 2010).

Em síntese, os resultados da safra 3 (2024/2025) reforçam o padrão observado nas safras anteriores: cultivares de maior dureza e com endosperma mais vítreo tendem a apresentar elevados teores de amido danificado, enquanto aquelas de textura mais macia resultam em baixos índices. Essa variabilidade confirma o papel decisivo da interação entre genética e processo de moagem na determinação da qualidade tecnológica da farinha, como enfatizado por estudos recentes (Jukic *et al.*, 2023).

A análise conjunta das três safras evidencia padrões consistentes quanto ao comportamento do amido danificado, ainda que com variações na magnitude entre os materiais. Em todas as safras observou-se ampla amplitude entre as cultivares, demonstrando a influência da genética e da dureza do grão sobre a intensidade de dano durante a moagem.

Enquanto algumas cultivares se destacaram por apresentar baixos teores, característicos de grãos mais macios e associados a menor absorção de água e limitada fermentação, outras mostraram níveis excessivamente elevados, típicos de grãos vítreos, com tendência a gerar massas pegajosas e instáveis. Entre esses extremos, um grupo intermediário manteve valores alinhados ao intervalo considerado ideal pela literatura, compatível com farinhas destinadas à panificação equilibrada (Cauvain; Young, 2015; Delcour; Hoskeney, 2010; Jukic *et al.*, 2023).

De forma geral, a recorrência de cultivares com baixos e altos teores em todas as safras reforça que a variabilidade genética se sobrepõe às variações sazonais, ainda que estas também exerçam influência na magnitude dos resultados. Além disso, confirma-se que o amido danificado pode ser desejável até certo ponto, já que favorece absorção de água, fermentação e produção de gás, mas quando presente em excesso compromete a estabilidade da massa e a qualidade do produto final, em

especial no caso de biscoitos e massas de maior firmeza (Barak; Mudgil; Khatkar, 2014).

A ocorrência de amido danificado durante a moagem está fortemente associada à dureza do grão e às características estruturais do endosperma. Grãos mais duros, com endosperma vítreo e compactado, apresentam maior resistência à fragmentação, exigindo maior energia de moagem. Esse processo intensifica a ruptura mecânica dos grânulos de amido, elevando os níveis de amido danificado na farinha. Por outro lado, grãos mais macios, caracterizados por endospermas farináceos e porosos, liberam os grânulos de forma menos agressiva, resultando em menores proporções de dano. Esse comportamento influencia diretamente a qualidade tecnológica da farinha: níveis moderados de amido danificado favorecem a absorção de água e a atividade fermentativa, contribuindo para o bom desempenho em panificação, enquanto valores excessivos podem comprometer a reologia da massa e a qualidade final de produtos como biscoitos e bolos (Jukic *et al.*, 2023; Delcour; Hoskeney, 2010).

Assim, a síntese das três safras ressalta a necessidade de equilibrar o teor de amido danificado para direcionar o uso tecnológico do trigo. Valores intermediários mostraram-se mais adequados para panificação, enquanto extremos, sejam baixos ou elevados, limitam o aproveitamento industrial, confirmando a importância do manejo integrado entre escolha de cultivares e processo de moagem.

2.4.9 *Falling Number* e *Stirring Number*

O *Falling Number* e o *Stirring Number* constituem parâmetros amplamente utilizados na avaliação tecnológica da farinha de trigo, por refletirem (in)diretamente a atividade da enzima α -amilase e, conseqüentemente, o grau de degradação do amido. Valores reduzidos de *Falling Number* estão associados a elevada atividade enzimática, frequentemente decorrente de germinação pré-colheita, o que compromete a estabilidade da massa e a qualidade final dos produtos panificados. Por outro lado, valores muito elevados indicam baixa atividade enzimática, podendo resultar em massas pouco fermentáveis e de menor volume específico. Já o *Stirring Number*, obtido por métodos viscoamilográficos, complementa essa análise ao fornecer informações adicionais sobre a viscosidade da pasta de amido e a intensidade da ação enzimática durante o aquecimento. Assim, ambos os parâmetros são fundamentais para o monitoramento da qualidade do trigo, permitindo identificar

lotes mais adequados às diferentes aplicações industriais e assegurar a padronização do processo de panificação (Delcour; Hoskeney, 2010; Ktenioudaki; Gallagher, 2012; Sissons, 2008).

A tabela 17 demonstra os resultados obtidos na safra 1(2022/2023).

Tabela 17 - Resultados do *Falling Number* e *Stirring Number* das farinhas - safra 1 (2022/2023)

Variedade	<i>Falling Number</i> (s)	<i>Stirring Number</i> (cP)
Audaz PG	329 ^a ±6,37	1345 ^{bc} ±45,96
Audaz AP	310 ^{ab} ±13,52	1323 ^c ±14,85
Calibre AP	327 ^a ±11,96	1633 ^{bc} ±3,54
Ello AP	288 ^b ±1,53	1372 ^{bc} ±16,26
Feroz AP	325 ^a ±15,13	1675 ^b ±309,01
ORS 1405 AP	327 ^a ±12,62	1377 ^{bc} ±118,09
Madre Pérola AP	333 ^a ±5,46	2144 ^a ±173,95
Ágile PF	253 ^c ±7,34	717 ^d ±9,90
Audaz PF	334 ^a ±11,93	1385 ^{bc} ±46,67
Bela Jóia PF	322 ^a ±2,52	1415 ^{bc} ±36,77
Destaque PF	239 ^c ±5,69	439 ^d ±19,80
Sena PF	62 ^d ±0,00	8 ^e ±1,41
Sonic PF	242 ^c ±5,97	459 ^d ±9,90

Nota: letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95% (p<0,05) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Na primeira safra, os valores de *Falling Number* (FN) variaram de forma bastante ampla entre as cultivares, refletindo diferentes níveis de atividade enzimática. O destaque negativo foi a cultivar Sena PF, com apenas 62 s, valor que indica atividade excessiva de α -amilase, possivelmente associada à ocorrência de germinação pré-colheita. Esse comportamento compromete a estabilidade da massa e reduz significativamente a capacidade de panificação, uma vez que massas provenientes de farinhas com FN muito baixo tendem a ser pegajosas e pouco tolerantes à fermentação (Delcour; Hoskeney, 2010).

Em contrapartida, cultivares como Madre Pérola AP (333 s), Audaz PF (334 s) e Audaz PG (329 s) apresentaram valores elevados, compatíveis com farinhas de boa qualidade tecnológica, com atividade enzimática equilibrada e maior previsibilidade no processamento (Sissons *et al.*, 2020).

Os resultados do *Stirring Number* (SN) reforçam essa interpretação. A cultivar Madre Pérola AP se destacou com o maior valor (2144 cP), sugerindo baixa ação enzimática e elevada viscosidade da pasta, condição que pode favorecer a estabilidade da massa, mas que, em excesso, também pode limitar a fermentação

devido à baixa disponibilidade de açúcares fermentescíveis (Ktenioudaki; Gallagher, 2012).

Em contraste, valores extremamente baixos de SN, como os observados em Sena PF (8 cP) e Destaque PF (439 cP), confirmam forte degradação enzimática do amido, corroborando os dados de FN e indicando severas limitações tecnológicas.

De forma geral, a maioria das cultivares manteve valores de FN entre 300 e 330 s, faixa considerada adequada para panificação, garantindo um balanço entre atividade enzimática e qualidade reológica da massa (Kiszonas *et al.*, 2018; Nhan *et al.*, 2015).

Entretanto, a variabilidade observada, especialmente em cultivares como Sena PF e Destaque PF, evidencia a forte influência de fatores ambientais sobre a expressão da α -amilase, aspecto já destacado por estudos conduzidos em diferentes regiões produtoras de trigo (Franceschi *et al.*, 2009).

A tabela 18 demonstra os resultados obtidos na safra 2(2023/2024).

Tabela 18 - Resultados do Falling Number e Stiring Number das farinhas - safra 2 (2023/2024)

Variedade	Falling Number (s)	Stiring Number (cP)
Audaz - PG	327 ^{bc} ±3,06	1349 ^d ±26,48
Audaz - AP	316 ^{cd} ±2,65	1362 ^d ±32,59
Sena - AP	188 ^h ±6,51	729 ^f ±49,52
Selvagem - AP	286 ^f ±4,73	793 ^f ±51,36
Feroz - AP	323 ^c ±3,21	1597 ^b ±61,96
ORS 1405 AP	320 ^{cd} ±2,52	1349 ^d ±16,47
Audaz IR	315 ^{cd} ±2,52	1357 ^d ±61,97
Feroz IR	323 ^{bc} ±3,21	1602 ^{ab} ±10,69
Calibre IR	326 ^{bc} ±4,04	1597 ^b ±44,26
Reporte GP	302 ^{de} ±3,46	1348 ^d ±14,36
Sonic GP	263 ^g ±4,04	794 ^f ±49,21
Calibre GP	330 ^{bc} ±5,03	1597 ^b ±31,78
Referência GP	321 ^{cd} ±3,61	1628 ^a ±20,19
Sena - GP	345 ^a ±4,51	1648 ^a ±16,76
Feroz -GP	337 ^{ab} ±2,65	1611 ^{ab} ±46,23
Audaz - GP	264 ^f ±3,21	941 ^e ±12,36
Toruk - GP	312 ^d ±3,06	1513 ^{bc} ±19,72
Oro - GP	334 ^b ±2,52	1594 ^b ±61,48
Triunfo - GP	312 ^d ±3,61	1359 ^d ±20,61
Ello Cascavel	297 ^e ±2,52	915 ^e ±36,97
Calibre Cscavel	328 ^{bc} ±1,15	1375 ^d ±41,03
Audaz Cascavel	329 ^{bc} ±1,53	1384 ^d ±23,60
Audaz Mga	310 ^d ±2,52	1496 ^c ±16,87
Feroz Mga	314 ^{cd} ±1,53	1342 ^d ±10,32
Madre Perola Mga	331 ^{bc} ±2,31	1358 ^d ±40,91

Fonte: a autora

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95% ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Na segunda safra, os valores de *Falling Number* apresentaram grande variação entre as cultivares, oscilando de 188 s (Sena AP) a 345 s (Sena GP). Esse intervalo reflete diferenças marcantes na atividade da α -amilase, influenciada tanto pela genética das cultivares quanto pelas condições ambientais da safra. O resultado observado para Sena AP (188 s) indica alta atividade enzimática, típica de lotes afetados por germinação pré-colheita, condição que compromete a reologia da massa e tende a reduzir o volume específico de pães (Delcour; Hoskeney, 2010; Nhan *et al.*, 2015).

Em contrapartida, o valor elevado de Sena GP (345 s) sugere baixa atividade enzimática, mais adequada à panificação de produtos fermentados, que destacam a faixa entre 300 e 350 s como ideal para estabilidade da massa e controle da degradação do amido.

Os valores intermediários de FN (300 – 330 s), verificados em cultivares como Audaz PG, Calibre Cascavel e Madre Pérola Mga, representam a maioria dos materiais avaliados. Essa faixa garante equilíbrio entre disponibilidade de açúcares fermentescíveis e estabilidade da estrutura da massa, condição considerada favorável à produção de pães de maior volume e uniformidade (Sissons *et al.*, 2020).

A análise do *Stirring Number* reforça a interpretação dos resultados. Valores reduzidos, como em Sena AP (729 cP) e Sonic GP (794 cP), confirmam alta atividade enzimática, o que está associado à redução da viscosidade da pasta e, consequentemente, à menor qualidade reológica da farinha. Já os maiores valores, observados em Sena GP (1648 cP), Referência GP (1628 cP) e Feroz GP (1611 cP), indicam baixa ação enzimática e maior estabilidade da viscosidade durante o aquecimento, característica desejável em farinhas para panificação (Franceschi *et al.*, 2009).

Assim, os resultados da safra 2 (2023/2024) evidenciam a amplitude de respostas enzimáticas entre cultivares de diferentes grupos e regiões. Enquanto cultivares como Sena AP e Sonic GP se mostraram altamente suscetíveis à degradação enzimática, comprometendo o desempenho tecnológico, outras, como Sena GP, Oro GP e Calibre GP, exibiram perfis mais estáveis, confirmando o papel determinante da interação entre genótipo e ambiente na qualidade tecnológica do trigo (He *et al.*, 2019; Franceschi *et al.*, 2019)

A tabela 19 demonstra os resultados obtidos na safra 3(2024/2025).

Tabela 19 - Resultados do Falling Number e Stirring Number das farinhas - safra 3 (2024/2025)

Variedade	Falling Number (s)	Stirring Number (cP)
Audaz PG	325 ^{bc} ± 2,08	1660 ^b ± 24,16
Calibre TS	346 ^{ab} ± 4,04	1648 ^b ± 29,12
Audaz AP	260 ^g ± 3,61	1611 ^b ± 37,02
Sena AP	314 ^{cd} ± 3,06	1513 ^c ± 16,20
Selvagem AP	290 ^{ef} ± 5,51	1594 ^{bc} ± 19,32
Feroz AP	338 ^{ab} ± 3,79	1727 ^a ± 10,44
ORS Turbo AP	316 ^{cd} ± 1,53	1375 ^e ± 18,62
Motriz AP	333 ^{bc} ± 3,00	1384 ^e ± 40,98
Audaz IR	324 ^{bcd} ± 3,06	1496 ^{cd} ± 39,41
Feroz IR	308 ^{cde} ± 3,51	1342 ^e ± 30,18
Calibre IR	339 ^{ab} ± 2,65	1358 ^e ± 37,59
Calibre GP	285 ^f ± 1,15	1446 ^d ± 41,63
Sena GP	354 ^a ± 4,58	1783 ^a ± 20,17
Feroz GP	347 ^{ab} ± 4,36	1349 ^e ± 27,32
Toruk GP	344 ^{ab} ± 2,08	1362 ^e ± 56,01
Oro GP	334 ^{abc} ± 3,51	1635 ^b ± 41,97
Ello Cascavel	301 ^{def} ± 2,65	1466 ^d ± 51,97
Calibre Cascavel	300 ^{def} ± 3,61	1597 ^{bc} ± 40,21
Motriz Cascavel	303 ^{de} ± 3,51	1349 ^e ± 23,10
Ello Mga	332 ^{bc} ± 2,00	1357 ^e ± 13,16
Feroz Mga	296 ^{ef} ± 2,52	1602 ^b ± 12,79
Calibre Mga	139 ^h ± 1,53	737 ^f ± 63,10

Fonte: a autora

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95% ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Na safra 3 (2024/2025), os resultados de *Falling Number* mostraram novamente grande amplitude entre as cultivares, variando de apenas 139 s (Calibre Mga) até 354 s (Sena GP). Valores tão reduzidos, como o observado para Calibre Mga, refletem atividade enzimática extremamente elevada, associada à intensa degradação do amido e à forte redução da qualidade tecnológica, uma vez que massas produzidas com esse perfil apresentam baixa estabilidade e excesso de açúcares solúveis, comprometendo o volume específico dos pães (Delcour; Hoskeney, 2010; He *et al.*, 2019).

Por outro lado, a cultivar Sena GP, com FN de 354 s, indicou baixa atividade de α -amilase, perfil mais adequado à panificação de produtos fermentados de longa duração, embora valores muito elevados também possam restringir a disponibilidade de substrato para a levedura (Sissons *et al.*, 2020).

Grande parte das cultivares situou-se na faixa de 300–340 s (como Audaz PG, Motriz AP, Calibre IR e Toruk GP), considerada ideal para a panificação, pois equilibra a atividade enzimática com a manutenção da estrutura da massa. Já cultivares como

Audaz AP (260 s) e Selvagem AP (290 s) apresentaram valores limítrofes, sugerindo maior sensibilidade às condições ambientais e potencial perda de qualidade reológica, aspecto que reforça a importância de monitorar FN como ferramenta de classificação tecnológica (Shao *et al.*, 2009).

Os dados de *Stirring Number* complementam essa análise. Valores elevados em cultivares como Calibre TS (1648 cP), Calibre GP (1611 cP) e Audaz PG (1597 cP) confirmam baixa atividade enzimática e maior viscosidade da pasta, condição que favorece massas mais estáveis durante o processo fermentativo. Em contraste, resultados extremamente baixos, como em Calibre Mga (737 cP), corroboram os achados de FN reduzido, caracterizando lotes altamente degradados por ação da α -amilase. Essa associação entre FN e SN já foi reportada em diferentes estudos, reforçando que ambos os parâmetros devem ser considerados de forma conjunta para a previsão do desempenho tecnológico da farinha (Shao *et al.*, 2009).

Portanto, a safra 3 (2024/2025) evidenciou forte variabilidade entre cultivares e regiões, com predominância de materiais dentro da faixa ideal de FN, mas também com casos extremos de excesso e deficiência enzimática. Esse padrão reforça o papel das condições ambientais na modulação da atividade da α -amilase, já destacado em investigações realizadas no Brasil e em outros países produtores de trigo (Lanzarini *et al.*, 2020; Kiszonas *et al.*, 2018).

2.4.10 Alveografia

A alveografia é um ensaio reológico amplamente utilizado na caracterização da qualidade tecnológica da farinha de trigo, pois avalia o comportamento da massa frente à expansão causada pela pressão de ar. A partir desse teste, obtêm-se parâmetros como a tenacidade (P), extensibilidade (L), força geral de glúten (W) e a relação P/L, que permitem compreender o equilíbrio entre resistência e elasticidade da massa. Esses indicadores são fundamentais para prever o desempenho da farinha em diferentes aplicações industriais: farinhas com altos valores de W e relações P/L equilibradas (0,5 – 1,0) são mais adequadas para panificação de pães de maior volume, enquanto farinhas com baixa extensibilidade ou relações muito desbalanceadas podem ser mais apropriadas para massas alimentícias ou biscoitos (Dobraszczyk *et al.*, 2003; Bloksma; Bushuk, 1988).

Além do efeito varietal, condições ambientais durante o cultivo e o processamento influenciam diretamente o perfil alveográfico, justificando a necessidade de avaliação por safra e região de cultivo (Jodal; Larsen, 2021).

A tabela 20 demonstra os resultados obtidos na safra 1(2022/2023).

Tabela 20 - Resultados da análise de alveografia - safra 1 (2022/2023)

Variedade	P (mmH ₂ O)	L(mm)	W(10 ⁻⁴ J)	P/L
Audaz PG	55	90	183	0,61
Audaz AP	102	109	366	0,94
Calibre AP	77	126	291	0,61
Ello AP	63	58	110	1,09
Feroz AP	96	100	273	0,96
ORS 1405 AP	101	68	226	1,49
Madre Pérola AP	38	95	138	0,40
Ágile PF	85	81	201	1,05
Audaz PF	73	80	186	0,91
Bela Jóia PF	68	48	92	1,42
Destaque PF	76	51	110	1,49
Sena PF	61	87	61	0,70
Sonic PF	108	47	157	2,30

Fonte: a autora

Os resultados de alveografia da safra 1 (2022/2023) evidenciam uma ampla variação entre as cultivares, revelando diferenças expressivas quanto à força da massa, equilíbrio entre tenacidade e extensibilidade e, consequentemente, ao seu potencial tecnológico. Entre as amostras analisadas, Audaz AP ($W = 366 \times 10^{-4}$ J; $P = 102$ mmH₂O; $L = 109$ mm; $P/L = 0,94$) se destacou como a cultivar de melhor desempenho reológico, apresentando valores de W superiores e razão P/L próxima de 1, parâmetro considerado ideal para panificação de pães fermentados, conforme descrito por Zhygunov *et al.* (2020).

Resultados semelhantes foram relatados por Cotovanu, Ungureanu-luga e Mironeasa (2021), que encontraram valores de $P = 86,33$ mm H₂O, $L = 94$ mm, $W = 253 \times 10^{-4}$ J e $P/L = 0,92$ em cultivares com ótimo comportamento na produção de pães.

Além de Audaz AP, outras cultivares apresentaram desempenho favorável. Calibre AP ($W = 291 \times 10^{-4}$ J; $P = 77$ mm H₂O; $L = 126$ mm; $P/L = 0,61$) e Feroz AP ($W = 273 \times 10^{-4}$ J; $P = 96$ mm H₂O; $L = 100$ mm; $P/L = 0,96$) mostraram equilíbrio entre tenacidade e extensibilidade, posicionando-se na faixa de classificação de farinhas de pão proposta por Zhygunov *et al.* (2020), em que valores de W acima de 170×10^{-4} J

e P/L entre 0,5–1,2 caracterizam massas elásticas e de boa panificação. Esses resultados confirmam a aplicabilidade dessas cultivares para produtos fermentados de maior exigência tecnológica.

No entanto, também foram observadas cultivares com desempenho restrito. Sena PF ($W = 61 \times 10^{-4}$ J; $P = 61$ mm H₂O; $L = 87$ mm; $P/L = 0,70$), embora tenha apresentado o maior valor de glúten úmido da safra ($43,62$ g 100 g⁻¹), demonstrou baixa força alveográfica, resultado que reforça a conclusão de Schuster, Huen e Scherf (2022), de que altos teores de glúten não asseguram qualidade tecnológica se não houver funcionalidade adequada das proteínas. Essa discrepância entre quantidade e qualidade do glúten também foi destacada por Gianibelli *et al.* (2001) e Wieser (2022), os quais ressaltam a importância da composição de subunidades de glutenina na definição da elasticidade da rede proteica.

Outras cultivares apresentaram comportamentos contrastantes que ajudam a compreender a amplitude da safra 1 (2022/2023). Sonic PF ($W = 157 \times 10^{-4}$ J; $P = 108$ mm H₂O; $L = 47$ mm; $P/L = 2,30$) produziu massas extremamente tenazes e pouco extensíveis, inadequadas para pães de maior volume, mas com potencial para massas alimentícias secas. Situação oposta foi observada em Ágile PF ($W = 201 \times 10^{-4}$ J; $P = 85$ mm H₂O; $L = 81$ mm; $P/L = 1,05$) e Ello AP ($W = 110 \times 10^{-4}$ J; $P = 63$ mm H₂O; $L = 58$ mm; $P/L = 1,09$), que apresentaram massas equilibradas, confirmando seu potencial para panificação básica. Essa diferença entre cultivares reforça o que foi apontado por Dufour *et al.* (2024), de que a capacidade de deformação da massa (L) e a resistência ao rompimento (P) dependem fortemente da origem e da qualidade das proteínas presentes.

Ainda, as variações observadas no parâmetro W , que foram de 61 a 366×10^{-4} J, corroboram os achados de Huen *et al.* (2018), que identificaram amplitude semelhante (141 a 419×10^{-4} J) em cultivares avaliadas em diferentes regiões. Essa amplitude sugere que a safra 1 (2022/2023) concentrou tanto cultivares de aplicação restrita quanto materiais com forte aptidão à panificação.

Segundo Gao *et al.* (2020), tais diferenças não estão apenas relacionadas ao teor de glúten e proteína, mas também à proporção de gluteninas de alto peso molecular e às interações amido-glúten durante a formação da rede proteica, o que explica o desempenho superior de cultivares como Audaz AP mesmo com teores de glúten apenas intermediários.

De maneira geral, a safra 1 (2022/2023) revelou predominância de cultivares com massas pouco resistentes, mas em alguns casos extensíveis e equilibradas, embora com baixa energia de deformação em parte das amostras. Esse comportamento indica que, para a maioria das cultivares, a aplicação direta em panificação de pães volumosos seria limitada, necessitando mesclas com trigos de maior força. Resultados semelhantes foram descritos por Xinyang *et al.* (2022), que destacam a importância do W como parâmetro-chave para prever a capacidade da massa em reter gases e sustentar o volume final do pão. Assim, a safra 1 (2022/2023) mostrou-se heterogênea: algumas cultivares (Audaz AP, Calibre AP e Feroz AP) evidenciaram alto potencial para panificação, enquanto outras (Sena PF e Sonic PF) apresentaram desempenho restrito, confirmando a alveografia como ferramenta essencial para diferenciar a qualidade tecnológica do trigo.

A tabela 21 demonstra os resultados obtidos na safra 2(2023/2024).

Tabela 21 - Resultados da análise de alveografia - safra 2 (2023/2024)

Variedade	P (mm H ₂ O)	L(mm)	W(10 ⁻⁴ J)	P/L
Audaz - PG	36,00	130,00	325,00	0,28
Audaz - AP	71,00	120,00	275,00	0,59
Sena - AP	154,00	67,00	325,00	2,30
Selvagem - AP	35,00	156,00	158,00	0,22
Feroz - AP	34,00	195,00	166,00	0,17
ORS 1405 AP	42,00	157,00	188,00	0,27
Audaz IR	97,00	143,00	393,00	0,68
Feroz IR	50,00	102,00	166,00	0,49
Calibre IR	81,00	142,00	389,00	0,57
Reporte GP	95,00	100,00	322,00	0,95
Sonic GP	102,00	127,00	359,00	0,80
Calibre GP	74,00	136,00	353,00	0,54
Referência GP	81,00	128,00	345,00	0,63
Sena - GP	40,00	143,00	169,00	0,28
Feroz -GP	76,00	120,00	322,00	0,63
Audaz - GP	140,00	71,00	383,00	1,97
Toruk - GP	125,00	92,00	335,00	1,36
Oro - GP	140,00	80,00	332,00	1,75
Triunfo - GP	96,00	90,00	352,00	1,07
Ello Cascavel	36,00	128,00	111,00	0,28
Calibre Cscavel	108,00	99,00	309,00	1,09
Audaz Cascavel	42,00	172,00	190,00	0,24
Audaz Mga	67,00	163,00	388,00	0,41
Feroz Mga	87,00	124,00	384,00	0,70
Madre Perola Mga	135,00	97,00	342,00	1,39

Fonte: a autora

Na safra 2 (2023/2024), os resultados alveográficos revelaram grande heterogeneidade entre as cultivares, evidenciando desde materiais de alta força de

glúten até outros de desempenho mais restrito. Os maiores valores de energia foram observados em Audaz IR ($W = 393 \times 10^{-4}$ J; $P = 97$ mm H₂O; $L = 143$ mm; $P/L = 0,68$) e Calibre IR ($W = 389 \times 10^{-4}$ J; $P = 81$ mm H₂O; $L = 142$ mm; $P/L = 0,57$), que reuniram massas fortes e equilibradas, perfil considerado ideal para a produção de pães de maior volume. Esses resultados se aproximam dos reportados por Cotovanu, Ungureanu-luga e Mironeasa (2021), que observaram valores de W em torno de 250×10^{-4} J e P/L próximo a 1 em cultivares que resultaram em pães com volume satisfatório. Também reforçam a classificação de Zhygunov *et al.* (2020), que definem farinhas de pão como aquelas com $W > 170 \times 10^{-4}$ J e razão P/L entre 0,5 e 1,2.

Ainda no grupo de destaque, a cultivar Sonic GP ($W = 359 \times 10^{-4}$ J; $P = 102$ mm H₂O; $L = 127$ mm; $P/L = 0,80$) também demonstrou forte aptidão à panificação, apresentando massa equilibrada entre resistência e extensibilidade. Em contrapartida, Audaz GP ($W = 383 \times 10^{-4}$ J; $P/L = 1,97$) e Sena AP ($W = 325 \times 10^{-4}$ J; $P/L = 2,30$) revelaram massas extremamente tenazes, pouco extensíveis e de difícil expansão durante a fermentação. Esse comportamento, embora acompanhado de valores altos de W , direciona o uso dessas cultivares para massas alimentícias secas, nas quais a maior rigidez estrutural é benéfica. De acordo com Zhygunov *et al.* (2020), valores de P/L acima de 1,5 caracterizam farinhas mais adequadas para esse tipo de aplicação.

No extremo oposto, algumas cultivares demonstraram massas fracas e excessivamente extensíveis, com baixa energia de deformação. É o caso de Selvagem AP ($W = 158 \times 10^{-4}$ J; $P = 35$ mm H₂O; $L = 156$ mm; $P/L = 0,22$) e Feroz AP ($W = 166 \times 10^{-4}$ J; $P = 34$ mm H₂O; $L = 195$ mm; $P/L = 0,17$), que apresentaram alta extensibilidade, mas resistência reduzida. Esses perfis comprometem a capacidade da massa de reter gases e manter volume durante o crescimento, sendo mais compatíveis com produtos de fermentação rápida ou massas moles. Segundo Xinyang *et al.* (2022), farinhas com esse tipo de comportamento tendem a apresentar desenvolvimento limitado em pães fermentados.

Outras cultivares apresentaram perfis intermediários. Oro GP ($W = 332 \times 10^{-4}$ J; $P/L = 1,75$) mostrou força considerável, mas com excesso de tenacidade, o que pode restringir seu uso em panificação tradicional, direcionando-a ao setor de massas. Já Triunfo GP ($W = 352 \times 10^{-4}$ J; $P/L = 1,07$) apresentou massa mais equilibrada, com potencial para pães de volume satisfatório. Esse contraste reforça que cultivares com

W semelhantes podem ter destinos tecnológicos diferentes, dependendo da razão P/L (Dufour *et al.*, 2024).

Os resultados da safra 2 (2023/2024) também confirmam que a qualidade do glúten não está diretamente relacionada à sua quantidade. Apesar de Sena AP ter apresentado glúten elevado (39,55 g 100 g⁻¹), seu perfil alveográfico (P/L = 2,30) indicou massa extremamente rígida e pouco extensível, limitando a aplicabilidade em panificação. Essa discrepância entre teor de glúten e desempenho reológico já foi descrita por Schuster, Huen; Scherf (2022), que destacam a necessidade de avaliar a funcionalidade proteica e não apenas o conteúdo quantitativo. De forma semelhante, Gianibelli *et al.* (2001) ressaltam que a presença e proporção de gluteninas de alto peso molecular são decisivas para a força da rede proteica.

As variações de W observadas nesta safra, que oscilaram entre 158 e 393 × 10⁻⁴ J, estão dentro da faixa reportada por Huen *et al.* (2018), que identificaram valores entre 141 e 419 × 10⁻⁴ J em diferentes cultivares, confirmando a representatividade dos dados obtidos. Além disso, Gao *et al.* (2020) reforçam que a resistência da massa não está apenas ligada ao glúten e à proteína, mas também às interações amido-glúten, que modulam a elasticidade e a estabilidade da rede.

De maneira geral, a safra 2 (2023/2024) apresentou cultivares com massas fortes e equilibradas, adequadas para panificação (Audaz IR, Calibre IR e Sonic GP), ao lado de materiais com restrições por excesso de tenacidade (Audaz GP, Sena AP) ou fraqueza extrema (Selvagem AP, Feroz AP). Essa diversidade reforça a necessidade de seleção criteriosa das cultivares, direcionando-as conforme seu perfil reológico: farinhas fortes e equilibradas para pães fermentados, massas tenazes para produtos secos e farinhas extensíveis para biscoitos e massas moles. A integração dos parâmetros P, L, W e P/L, conforme ressaltado por Shewry e Halford (2022) e Wieser (2022), permanece fundamental para definir o real potencial industrial das cultivares de trigo.

A tabela 22 demonstra os resultados obtidos na safra 3 (2024/2025).

Tabela 22 - Resultados da análise de alveografia - safra 3 (2024/2025)

Variedade	P (mm H ₂ O)	L(mm)	W(10 ⁻⁴ J)	P/L
Audaz - PG	80	118	328	0,68
Calibre T S	92	115	387	0,8
Audaz - AP	133	69	346	1,93
Sena - AP	99	134	476	0,74
Selvagem - AP	34	119	113	0,29
Feroz - AP	98	119	408	0,82
ORS Turbo - AP	144	78	441	1,85
Motriz - AP	33	199	155	0,17
Audaz IR	29	209	135	0,14
Feroz IR	31	159	142	0,19
Calibre IR	79	154	418	0,51
Calibre GP	53	113	168	0,47
Sena - GP	69	166	362	0,42
Feroz -GP	72	139	313	0,52
Toruk - GP	92	119	398	0,77
Oro - GP	62	142	287	0,44
Ello Cascavel	74	126	305	0,59
Calibre Cscavel	34	220	170	0,15
Motriz Cascavel	72	129	313	0,56
Ello Mga	112	88	367	1,27
Feroz Mga	110	103	422	1,07
Calibre Mga	88	129	347	0,68

Fonte: a autora

Na safra 3 (2024/2025), os resultados de alveografia confirmaram grande heterogeneidade entre as cultivares, com amplitudes marcantes nos valores de força (W), resistência (P), extensibilidade (L) e equilíbrio (P/L). Os maiores desempenhos foram observados em Sena AP ($W = 476 \times 10^{-4}$ J; $P = 99$ mm H₂O; $L = 134$ mm; $P/L = 0,74$), ORS Turbo AP ($W = 441 \times 10^{-4}$ J; $P = 144$ mm H₂O; $L = 78$ mm; $P/L = 1,85$) e Feroz AP ($W = 408 \times 10^{-4}$ J; $P = 98$ mm H₂O; $L = 119$ mm; $P/L = 0,82$). Esses resultados evidenciam massas fortes, com capacidade para aplicações em pães fermentados, sobretudo no caso de Sena AP e Feroz AP, cujo equilíbrio entre P e L favorece a expansão e a retenção de gases. Já ORS Turbo AP, apesar da alta força, apresentou massa demasiadamente tenaz ($P/L = 1,85$), o que pode comprometer sua aplicabilidade em panificação de pães volumosos, aproximando-se do perfil de farinhas para massas secas, como descrito por Zhygunov *et al.* (2020).

Também se destacaram cultivares equilibradas, como Toruk GP ($W = 398 \times 10^{-4}$ J; $P = 92$ mm H₂O; $L = 119$ mm; $P/L = 0,77$) e Calibre TS ($W = 387 \times 10^{-4}$ J; $P = 92$ mm H₂O; $L = 115$ mm; $P/L = 0,80$), que combinaram força elevada e boa relação

P/L, características compatíveis com farinhas de pão segundo os critérios de Zhygunov *et al.* (2020). Esses resultados confirmam que valores de W acima de 170×10^{-4} J e equilíbrio entre tenacidade e extensibilidade são determinantes para o desempenho em panificação. Situação semelhante foi relatada por Cotovanu; Ungureanu-Iuga; Mironeasa (2021), ao observarem que farinhas com W em torno de 250×10^{-4} J e P/L próximo a 1 resultaram em pães com características tecnológicas adequadas.

No entanto, várias cultivares apresentaram massas fracas e pouco adequadas à panificação. Selvagem AP (W = 113×10^{-4} J; P = 34 mmH₂O; L = 119 mm; P/L = 0,29) e Motriz AP (W = 155×10^{-4} J; P = 33 mm H₂O; L = 199 mm; P/L = 0,17) revelaram massas frágeis e excessivamente extensíveis, perfil compatível apenas com produtos de menor exigência reológica, como biscoitos ou massas moles. Situação semelhante foi encontrada em cultivares do grupo IR, como Audaz IR (W = 135×10^{-4} J; P = 29 mm H₂O; L = 209 mm; P/L = 0,14) e Feroz IR (W = 142×10^{-4} J; P = 31 mm H₂O; L = 159 mm; P/L = 0,19), que demonstraram extensibilidade extrema sem resistência proporcional, comprometendo a estabilidade da rede de glúten. De acordo com Gianibelli *et al.* (2001), esse comportamento está relacionado à baixa proporção de gluteninas de alto peso molecular, fundamentais para conferir elasticidade e tenacidade à massa.

Essas discrepâncias reforçam que o teor de glúten por si só não explica o desempenho alveográfico. Sena AP, por exemplo, mesmo com glúten relativamente baixo (27,97 g 100g⁻¹), apresentou o maior valor de W da safra (476×10^{-4} J), evidenciando que a qualidade proteica é mais determinante do que a quantidade absoluta. Esse fenômeno já foi destacado por Wieser (2022) e Shewry; Halford (2019), que apontam a interação entre gliadinas e gluteninas como fator-chave para a definição da elasticidade e força da rede de glúten. Do mesmo modo, Gao *et al.* (2020) demonstram que interações amido-glúten e a proporção de gluteninas de alto peso molecular desempenham papel essencial na resistência da massa, explicando o bom desempenho de cultivares com glúten apenas intermediário, como Toruk GP e Calibre TS.

As variações de W na safra 3 (2024/2025), que oscilaram de 113 a 476×10^{-4} J, estão dentro da faixa relatada por Huen *et al.* (2018), que observaram valores de 141 a 419×10^{-4} J em cultivares avaliadas em diferentes ambientes. Contudo, nesta

safra a concentração de cultivares próximas ao limite inferior foi maior do que nas anteriores, sugerindo forte influência das condições edafoclimáticas sobre a síntese e a qualidade das proteínas.

De maneira geral, a safra 3 (2024/2025) confirmou a discrepância entre quantidade e qualidade de glúten: cultivares com valores intermediários de glúten, como Toruk GP e Calibre TS, apresentaram melhor aproveitamento tecnológico do que materiais de glúten semelhante, mas com composição proteica menos funcional, como Selvagem AP e Motriz AP. Esse comportamento reforça a importância de avaliar a funcionalidade proteica por meio da alveografia, principal ferramenta para prever a real qualidade para uso em panificação das cultivares de trigo (Xinyang *et al.*, 2022).

De maneira geral, os resultados demonstram que o potencial tecnológico do trigo está relacionado não apenas à quantidade de glúten presente, mas principalmente à interação entre composição, equilíbrio e funcionalidade da rede proteica. Nesse sentido, algumas cultivares se mostraram adequadas para a panificação de pães de maior volume, como Audaz AP, Calibre IR e Toruk GP, enquanto outras revelaram características mais compatíveis com o setor de massas secas, como Sena AP e Audaz GP, ou ainda para produtos de menor exigência tecnológica, como Selvagem AP, Motriz AP e Audaz IR. Esses resultados reforçam que a avaliação criteriosa dos parâmetros P, L, W e P/L é indispensável para orientar a aplicação industrial das cultivares (Zhygunov *et al.*, 2020; Xinyang *et al.*, 2022; Dufour *et al.*, 2024).

Em síntese, a análise comparativa entre as três safras confirma que o desempenho tecnológico das cultivares de trigo é altamente variável, não apenas entre grupos genéticos, mas também entre diferentes ciclos de produção. O comportamento reológico demonstrou que cultivares com teores intermediários de glúten podem superar aquelas com valores mais elevados quando apresentam composição proteica mais funcional, evidenciando a importância de análises integradas para definição do uso industrial. Assim, a alveografia se consolida como ferramenta essencial para diferenciar cultivares e direcionar seu aproveitamento, seja para panificação de qualidade superior, para massas secas ou para produtos de menor exigência tecnológica, garantindo o uso adequado de cada material e evitando inadequações no processamento.

2.4.11 Farinografia

A farinografia constitui uma das análises reológicas mais utilizadas na avaliação tecnológica da farinha de trigo, pois permite caracterizar o comportamento da massa durante a mistura e prever seu desempenho em diferentes processos industriais. Por meio de parâmetros como absorção de água, tempo de desenvolvimento, estabilidade e índice de tolerância à mistura, o ensaio fornece informações sobre a capacidade da farinha em formar e manter uma rede de glúten estável, diretamente relacionada à qualidade de panificação. Valores de maior absorção e estabilidade indicam farinhas com glúten mais forte e adequadas à produção de pães de maior volume, enquanto tempos curtos de desenvolvimento e altos índices de enfraquecimento estão associados a massas menos tolerantes, mais indicadas para produtos de fermentação curta, como bolos e biscoitos (Biel *et al.*, 2021). Além disso, a resposta farinográfica é fortemente modulada por fatores genéticos e ambientais, o que justifica a variabilidade entre cultivares e safras (Zhang *et al.*, 2022).

A tabela 23 demonstra os resultados obtidos na safra 1(2022/2023).

Tabela 23 - Resultados da análise de farinografia - safra 1 (2022/2023)

Variedade	Absorção (%)	Estabilidade (min)	Tempo de desenvolvimento (min)	ITM (FU)
Audaz PG	63,4	6,2	4,7	-
Audaz AP	66,2	18,0	14,5	94,1
Calibre AP	63,1	18,4	2,5	12,5
Ello AP	63,4	5,8	5,3	91,4
Feroz AP	64,8	14,0	10,1	-
ORS 1405 AP	52,1	16,7	1,9	32,0
Madre PérolaAP	65,7	10,4	6,9	32,0
Ágile PF	66,2	7,5	5,9	110,5
Audaz PF	61,2	11,2	7,4	63,3
Bela Jóia PF	66,7	4,7	4,2	104,1
Destaque PF	62,8	5,2	3,1	153,9
Sena PF	ND	ND	ND	ND
Sonic PF	70,3	4,1	3,3	205,9

Fonte: A autora.

Nota: ND: Não determinado.

Na safra 1 (2022/2023), os resultados de farinografia revelaram grande amplitude de variação entre as cultivares, refletindo diferenças genéticas e a interação com as condições ambientais. A absorção de água variou de 52,1 % (ORS 1405 AP) a 70,3 % (Sonic PF), com destaque para materiais como Audaz AP e Ágile PF (66,2 %) e Bela Jóia PF (66,7 %), que apresentaram valores compatíveis com farinhas

destinadas à panificação de pães com maior hidratação. Esses resultados estão de acordo com estudos que apontam que farinhas com absorção acima de 65 % tendem a produzir massas mais extensíveis e produtos finais de melhor volume (Zhang *et al.*, 2022; Perten, 2018; Cui *et al.*, 2023).

A estabilidade, que reflete a resistência da massa à mistura, também apresentou variação expressiva, indo de apenas 4,1 min (Sonic PF) a 18,4 min (Calibre AP). Variedades como Audaz AP e Calibre AP demonstraram elevada estabilidade (≥ 18 min), característica associada a massas mais tolerantes ao processamento e de interesse para panificação industrial. Em contrapartida, cultivares como Sonic PF e Bela Jóia PF exibiram baixa estabilidade (< 5 min), sugerindo menor força de glúten, aspecto já evidenciado por estudos que relacionam baixos tempos de estabilidade a farinhas indicadas para produtos como bolos e biscoitos (Dobraszczyk; Salman, 2003; Abo-Dief *et al.*, 2019).

O tempo de desenvolvimento da massa reforçou essas diferenças, com valores variando de 1,9 min (ORS 1405 AP) a 14,5 min (Audaz AP). Tempos mais longos, como os observados para Audaz AP, são desejáveis em panificação de pães fermentados, pois indicam maior capacidade da massa em reter gás e manter estrutura estável. Já valores muito baixos (< 3 min) sugerem menor tenacidade e rápido enfraquecimento da rede de glúten, conforme discutido por Saraswathi; Hameed (2018).

O grau de enfraquecimento ou índice de tolerância a mistura (do inglês, *softening degree*), que expressa a perda de consistência após o desenvolvimento máximo, variou de 12,5 FU (Unidades Farinográficas) (Calibre AP) até 205,9 FU (Sonic PF). Valores mais baixos, como nos casos de Calibre AP e Madre Pérola AP (32,0 FU), são indicativos de massas estáveis e com boa resistência, enquanto valores elevados, como em Sonic PF e Destaque PF (> 150 FU), apontam massas frágeis e mais propensas ao colapso durante a fermentação. Esse comportamento é consistente com a literatura, que relaciona maiores valores de enfraquecimento à baixa qualidade reológica e restrição do uso dessas farinhas em panificação de longa fermentação (Mirza *et al.*, 2022).

No conjunto, a safra 1 (2022/2023) apresentou cultivares com características contrastantes, indo desde materiais de alto desempenho tecnológico (como Audaz AP e Calibre AP, com elevada estabilidade e bom tempo de desenvolvimento) até variedades de uso mais restrito (como Sonic PF e Destaque PF, com baixa

estabilidade e elevado grau de enfraquecimento). Esses resultados refletem achados semelhantes aos de Mirza *et al.* (2022), que verificaram ampla variabilidade na resposta farinográfica entre genótipos brasileiros de trigo, e de Zhang *et al.* (2022), que confirmaram a influência dos fatores ambientais sobre a estabilidade e absorção de água.

Assim, a análise farinográfica da safra 1 (2022/2023) evidencia que, embora algumas cultivares se destaquem para panificação de pães com maior volume e boa tolerância ao processo (ex.: Audaz AP e Calibre AP), outras demonstram potencial limitado para esse fim, podendo ser direcionadas à produção de massas alimentícias ou biscoitos, onde menor estabilidade pode ser vantajosa.

A tabela 24 demonstra os resultados obtidos na safra 2(2023/2024).

Tabela 24 - Resultados da análise de farinografia - safra 2 (2023/2024)

Variedade	Absorção (%)	Estabilidade (min)	Tempo de desenvolvimento (min)	ITM (FU)
Audaz - PG	51,80	5,30	1,50	74,00
Audaz - AP	56,50	8,70	4,70	47,00
Sena - AP	63,60	20,60	2,40	8,00
Selvagem - AP	51,00	6,30	1,80	59,00
Feroz - AP	52,00	5,00	1,90	76,00
ORS 1405 AP	51,40	7,20	1,60	46,00
Audaz IR	60,80	16,00	9,30	21,00
Feroz IR	51,90	2,70	1,60	80,00
Calibre IR	58,00	12,20	8,60	42,00
Reporte GP	59,40	10,00	4,50	38,00
Sonic GP	58,20	22,40	11,20	7,00
Calibre GP	56,20	18,00	2,20	21,00
Referencia GP	57,50	11,80	1,80	14,00
Sena - GP	50,80	8,50	4,70	51,00
Feroz -GP	56,20	13,80	2,00	27,00
Audaz - GP	64,70	8,60	2,30	32,00
Toruk - GP	60,80	13,50	2,60	24,00
Oro - GP	64,50	17,80	2,60	23,00
Triunfo - GP	54,50	22,90	2,30	34,00
Ello Cascavel	54,10	3,70	1,90	114,00
Calibre Cscavel	59,60	17,50	2,80	9,00
Audaz Cascavel	53,20	5,80	3,80	75,00
Audaz Mga	57,40	16,10	8,80	17,00
Feroz Mga	57,10	21,20	8,50	16,00
Madre Perola Mga	61,90	21,90	5,60	7,00

Fonte: A autora.

Os resultados da farinografia da safra 2 (2023/2024) revelam forte variabilidade entre as cultivares, tanto na absorção de água quanto nos parâmetros de estabilidade,

tempo de desenvolvimento e índice de tolerância à mistura. A absorção oscilou de 50,8 % (Sena GP) a 64,7 % (Audaz GP), refletindo a composição heterogênea das farinhas, especialmente em termos de teor de proteínas e características da matriz amido-glúten. Valores próximos ou acima de 60 %, como em Audaz IR (60,8 %), Sonic GP (58,2 %) e Oro GP (64,5 %), indicam farinhas com maior capacidade de hidratação e potencial para formulações de pães de maior volume, conforme descrito por Biel *et al.* (2021) e corroborado por Saraswathi; Hameed (2018) que destacam a relação entre absorção elevada e melhor desempenho panificável.

A estabilidade apresentou amplitude considerável, variando de 2,7 min (Feroz IR) a 22,9 min (Triunfo GP). Cultivares como Sonic GP (22,4 min), Madre Pérola Mga (21,9 min) e Triunfo GP (22,9 min) se destacaram pelo elevado tempo de estabilidade, indicativo de massas mais fortes e tolerantes ao processo de mistura, condição valorizada na panificação industrial. Em contraste, materiais como Ello Cascavel (3,7 min) e Feroz IR (2,7 min) exibiram baixa estabilidade, sugerindo menor força de glúten e reduzida capacidade de suportar processos fermentativos longos, aspecto também relatado por Cui *et al.* (2023).

O tempo de desenvolvimento da massa também variou amplamente, indo de 1,5 min (Audaz PG) a 11,2 min (Sonic GP). Valores mais longos, como em Sonic GP (11,2 min), Audaz IR (9,3 min) e Calibre IR (8,6 min), estão associados a uma rede de glúten mais robusta, com maior retenção de gases durante a fermentação. Já tempos muito curtos (<3 min), como em ORS 1405 AP (1,6 min) e Feroz GP (2,0 min), apontam menor elasticidade e rápida desestruturação da massa, limitando o uso dessas farinhas em pães fermentados e direcionando-as a produtos de fermentação rápida, como biscoitos (Saraswathi; Hameed. 2018).

O índice de tolerância à mistura (ITM) reforça esse contraste: variou de 7 FU (Sonic GP e Madre Pérola Mga) a 114 FU (Ello Cascavel). Valores reduzidos de ITM indicam massas mais estáveis e resistentes ao sobre-amassamento, como observado em Sonic GP, Madre Pérola Mga e Calibre Cascavel (9 FU). Por outro lado, cultivares como Ello Cascavel (114 FU) e Destaque PF da safra anterior (>150 FU) revelam massas mais frágeis, facilmente desestruturadas após o ponto ideal de desenvolvimento, o que restringe seu uso na panificação de longa fermentação (Abo – Dief *et al.*, 2019).

A safra 2 (2023/2024) evidenciou materiais de alto desempenho reológico, como Sonic GP, Madre Pérola Mga e Triunfo GP, cujas características de alta

estabilidade, maior tempo de desenvolvimento e baixo índice de tolerância se alinham ao perfil desejado para pães de grande volume e processos industriais mais exigentes.

Em contrapartida, cultivares como Ello Cascavel e Feroz IR demonstraram limitações tecnológicas, sugerindo aplicações em biscoitos, massas secas ou pães de fermentação rápida. Esses resultados convergem com achados de Biel *et al.* (2021), que ressaltam a grande variabilidade entre genótipos de trigo brasileiros, e de estudos internacionais que destacam o papel dos fatores edafoclimáticos na modulação da absorção e estabilidade das massas (Zhang *et al.*, 2022).

Em síntese, a safra 2 (2023/2024) demonstrou diversidade de respostas tecnológicas, com cultivares aptas para diferentes nichos industriais, confirmando a importância da análise farinográfica como ferramenta de direcionamento no uso do trigo

A tabela 25 demonstra os resultados obtidos na safra 3(2024/2025).

Tabela 25 - Resultados da análise de farinografia - safra 3 (2024/2025)

Variedade	Absorção (%)	Estabilidade (min)	Tempo de desenvolvimento (min)	Índice de Tolerância à mistura (FU)
Audaz - PG	57,3	12,8	6,5	32
Calibre Teix Soares	56,9	35,7	3,1	17
Audaz - AP	65,8	9,4	5,6	40
Sena - AP	56,1	61,1	30,9	5
Selvagem - AP	50,3	4,8	1,8	88
Feroz - AP	61,1	25,5	15	19
ORS Turbo - AP	62,8	14,8	7,7	28
Motriz - AP	51,2	5,4	1,7	77
Audaz IR	51,4	4,8	2	84
Feroz IR	50,7	6,5	1,7	46
Calibre IR	59,6	17,9	9,2	16
Calibre GP	51,7	2,2	1,4	88
Sena - GP	58,7	11,3	6,8	35
Feroz -GP	59,4	7	5,2	54
Toruk - GP	59,3	15,9	7,7	16
Oro - GP	56,1	11,1	6,8	38
Ello Cascavel	55,7	14,5	2,5	15
Calibre Cscavel	51	6,4	2,1	65
Audaz Cascavel	55,6	19,2	2,8	17
Ello Mga	62,5	12,5	8,5	40
Feroz Mga	60,2	21,5	6,1	13
Calibre Mga	54,2	48,4	28,4	8

Fonte: A autora.

A análise farinográfica da safra 3 (2024/2025) revelou comportamentos bastante contrastantes entre as cultivares, evidenciando a influência combinada de fatores genéticos e ambientais sobre a qualidade reológica da farinha. A absorção de água variou de 50,3 % (Selvagem AP) a 65,8 % (Audaz AP), com destaque para Audaz AP (65,8 %) e ORS Turbo AP (62,8 %), que apresentaram maior capacidade de hidratação, característica desejável em farinhas voltadas à panificação de pães de maior volume. Valores mais baixos (<52 %), como os observados em Calibre GP (51,7 %) e Audaz IR (51,4 %), indicam farinhas menos aptas para formulações que exigem alta absorção de água, o que está em consonância com estudos que relacionam absorção reduzida a produtos de fermentação curta, como biscoitos (Saraswathi; Hameed, 2018).

A estabilidade apresentou ampla amplitude, desde apenas 2,2 min (Calibre GP) até 61,1 min (Sena AP). Cultivares como Sena AP (61,1 min) e Calibre Mga (48,4 min) destacaram-se pela elevada estabilidade, evidenciando massas altamente resistentes ao processo de mistura, com grande tolerância ao amassamento excessivo. Em contraste, Selvagem AP (4,8 min), Audaz IR (4,8 min) e Calibre GP (2,2 min) revelaram baixa estabilidade, sinalizando glúten mais frágil e limitada resistência tecnológica. Essa variabilidade reforça achados de Cui *et al.* (2023), que destacam a forte influência das condições ambientais sobre a estabilidade e a força do glúten.

O tempo de desenvolvimento da massa variou de 1,4 min (Calibre GP) a 30,9 min (Sena AP). O desempenho de Sena AP (30,9 min) e Calibre Mga (28,4 min) foi notável, caracterizando massas com desenvolvimento muito lento e, portanto, alto teor de proteínas de qualidade, o que é desejável em formulações de pães de longa fermentação. Por outro lado, cultivares como Calibre GP (1,4 min) e Motriz AP (1,7 min) apresentaram tempo de desenvolvimento reduzido, revelando baixa capacidade de formar uma rede de glúten estável, alinhando-se ao perfil de farinhas mais indicadas para biscoitos ou massas alimentícias de cozimento rápido (Saraswathi; Hameed, 2018).

O ITM variou de 5 FU (Sena AP) a 88 FU (Selvagem AP e Calibre GP). Valores baixos de ITM, como os encontrados em Sena AP (5 FU) e Calibre Mga (8 FU), indicam massas extremamente estáveis, com grande resistência ao enfraquecimento. Já os valores elevados de ITM, como em Selvagem AP (88 FU) e Motriz AP (77 FU), revelam massas frágeis, facilmente enfraquecidas após atingir o ponto ideal de desenvolvimento, limitando seu uso em panificação mais exigente.

De forma geral, a safra 3 (2024/2025) apresentou cultivares de destaque para panificação industrial, como Sena AP e Calibre Mga, que associaram alta estabilidade, longo tempo de desenvolvimento e baixo ITM, refletindo massas com alto potencial tecnológico para produtos fermentados de maior volume. Em contrapartida, cultivares como Selvagem AP, Calibre GP e Motriz AP apresentaram baixa estabilidade e alto ITM, posicionando-se em um perfil menos favorável para panificação tradicional, mas potencialmente interessante para produtos de fermentação rápida. Esses resultados estão de acordo com observações de Saraswathi; Hameed (2018), que ressaltam a importância da combinação entre estabilidade, tempo de desenvolvimento e tolerância à mistura como determinantes da qualidade da farinha. Além disso, convergem com estudos brasileiros que destacam a forte variação entre genótipos em função de ambiente e manejo (Cui *et al.*, 2023).

De maneira integrada, observa-se que a safra 1 (2022/2023) apresentou equilíbrio entre absorção e estabilidade, mas também materiais com alto grau de enfraquecimento; a safra 2 (2023/2024) reuniu cultivares de desempenho intermediário, com alguns destaques (Sonic GP e Madre Pérola Mga) voltados à panificação de maior exigência; e a safra 3 (2024/2025) trouxe cultivares de extremos, com materiais de altíssimo desempenho (Sena AP e Calibre Mga) e outros de baixa aptidão reológica (Selvagem AP, Calibre GP). Esses resultados confirmam que a qualidade tecnológica do trigo não depende apenas do teor proteico, mas da interação entre composição, funcionalidade e equilíbrio reológico, aspecto amplamente discutido na literatura (Abo - Dief *et al.*, 2019; Mirza *et al.*, 2022).

2.4.12 Propriedade de Pasta

A análise pelo *Rapid Visco Analyzer* (RVA) tem sido amplamente empregada para compreender as propriedades de pasta do amido e sua relevância tecnológica na panificação. O método consiste em submeter uma suspensão de farinha e água a um ciclo controlado de aquecimento e resfriamento, simulando o processo de cozimento dos cereais, de modo a registrar o comportamento da viscosidade ao longo do tempo (Balet *et al.*, 2019). Esse perfil viscoamilográfico fornece informações cruciais sobre parâmetros como viscosidade de pico, quebra e viscosidade final, os quais se relacionam diretamente com a atividade enzimática (particularmente da α -amilase) e com o grau de dano do amido. Na prática, esses aspectos refletem na

capacidade da farinha em absorver água, no desenvolvimento da massa e na retenção de gás, impactando de forma decisiva o volume, a textura e a qualidade final dos pães (Hammed; Simsek, 2018; Li *et al.*, 2020).

A tabela 26 demonstra os resultados obtidos na safra 1(2022/2023).

Tabela 26 - Resultados das curvas viscoamilográficas - safra 1 (2022/2023)

Variedade	Pico visc (cP)	Breakdown (cP)	Visc final	Setback	TP (°C)
Ágile PF	481	437	134	90	-
Audaz PF	1355	755	1417	816	85,57
Bela Jóia PF	1010	535	1163	688	81,4
Destaque PF	270	261	74	65	-
Sena PF	16	59	36	6	-
Sonic PF	239	204	130	95	-
Audaz PG	1662	783	1885	1007	86,87
Audaz AP	1096	610	1150	664	84,4
Calibre AP	1258	417	1780	940	85,79
Elo AP	892	535	892	534	84,82
Feroz AP	1066	528	1287	748	71,32
ORS 1405 AP	1152	584	1322	754	85,8
Madre Pérola AP	1739	718	2218	1197	87,77

Fonte: a autora

Na safra 1 (2022/2023), os resultados de RVA evidenciaram contrastes marcantes entre as cultivares, revelando diferenças expressivas no comportamento do amido. A variedade Madre Pérola AP apresentou os valores mais elevados de viscosidade de pico (1739 cP), viscosidade final (2218 cP) e setback (1197 cP), indicando amido com maior tendência à retrogradação e, portanto, maior propensão ao envelhecimento do pão. Apesar de o elevado pico estar relacionado a um amido mais íntegro e menos suscetível à degradação enzimática, a alta retrogradação pode comprometer a maciez e reduzir a vida de prateleira dos produtos panificados (Singh *et al.*, 2021). Por outro lado, a cultivar Audaz PG também se destacou positivamente, com valores elevados de pico (1662 cP) e viscosidade final (1885 cP), associados a melhor estrutura de grânulos e potencial de retenção de água, características desejáveis para pães de maior volume e melhor textura (Li *et al.*, 2020).

Em contraste, a variedade Sena PF apresentou desempenho extremamente baixo em todos os parâmetros avaliados, com viscosidade de pico de apenas 16 cP e setback praticamente inexistente (6 cP), refletindo intensa degradação do amido ou alta atividade de α -amilase. Esse comportamento compromete significativamente a

qualidade tecnológica da farinha, uma vez que massas obtidas a partir desse perfil apresentam baixa capacidade de retenção de gás e estrutura enfraquecida, resultando em produtos de menor volume e textura inferior (Moiraghi *et al.*, 2019; Balet *et al.*, 2019). De forma semelhante, cultivares como Ágile PF e Destaque PF mostraram baixos valores de viscosidade final (134 e 74 cP, respectivamente), sinalizando limitações para uso em panificação de maior exigência.

Assim, a análise comparativa da safra 1 (2022/2023) indica que cultivares como Madre Pérola AP e Audaz PG possuem maior potencial tecnológico para panificação, ainda que a primeira apresente risco de envelhecimento acelerado, enquanto materiais como Sena PF e Destaque PF evidenciam baixa aptidão, reforçando a importância da caracterização reológica via RVA para o direcionamento industrial adequado.

A tabela 27 demonstra os resultados obtidos na safra 2(2023/2024).

Tabela 27 - Resultados das curvas viscoamilográficas - safra 2 (2023/2024)

Variedade	Pico visc (cP)	Breakdown (cP)	Visc final	Setback	TP (°C)
Audaz - PG	1761	837	1960	1036	86
Audaz - AP	1563	730	1811	978	87,75
Sena - AP	1557	425	2390	1258	88,75
Selvagem - AP	1220	433	1738	951	87,2
Feroz - AP	1246	415	1829	998	51,25
ORS 1405 AP	1254	746	1821	972	87,25
Audaz IR	1602	810	1738	946	85,3
Feroz IR	1360	444	1970	1054	86
Calibre IR	1245	410	1766	931	85,65
Reporte GP	1982	824	2422	1264	85,7
Sonic GP	1793	706	2284	1197	85,55
Calibre GP	1271	425	1795	949	86,3
Referência GP	1487	690	1808	1011	87,2
Sena - GP	669	360	771	462	86,8
Feroz -GP	1161	404	1636	879	87,25
Audaz - GP	1056	429	1345	718	86,75
Toruk - GP	1464	570	1932	1038	86,5
Oro - GP	1253	413	1771	1452	85,6
Triunfo - GP	1020	532	1192	704	77,95
Ello Cascavel	1142	586	1301	754	85,6
Calibre Cscavel	1401	627	1742	968	86
Audaz Cascavel	1364	751	1428	815	86,4
Audaz Mga	1347	759	1406	818	84,75
Feroz Mga	1050	535	1239	724	56,6
Madre Perola Mga	1753	720	2246	1213	87,55

Fonte: a autora

Na safra 2 (2023/2024), os perfis de RVA revelaram comportamentos contrastantes entre as cultivares. Entre os destaques positivos, a variedade Reporte

GP apresentou os maiores valores de viscosidade de pico (1982 cP) e final (2422 cP), além de um elevado *setback* (1264 cP). Esse perfil sugere grânulos de amido bem estruturados e baixa suscetibilidade à hidrólise enzimática, fatores que conferem maior absorção de água e maior viscosidade durante a gelatinização. No entanto, o alto *setback* indica propensão à retrogradação, o que pode comprometer a maciez e acelerar o processo de envelhecimento do pão, reduzindo sua vida de prateleira (Nhan *et al.*, 2015; Balet *et al.*, 2019; Imoise *et al.*, 2021). Situação semelhante foi observada para a cultivar Sonic GP, com valores também elevados de pico (1793 cP), viscosidade final (2284 cP) e *setback* (1197 cP), características associadas a boa performance em panificação, ainda que com risco de maior endurecimento do miolo durante o armazenamento.

A cultivar Sena AP, embora tenha registrado valores de pico relativamente altos (1557 cP), apresentou o maior *setback* da safra (1258 cP), reforçando sua forte tendência à retrogradação e à perda de qualidade sensorial ao longo do tempo. Já a variedade Madre Pérola Mga também se destacou pelo desempenho elevado (pico de 1753 cP e final de 2246 cP), mantendo equilíbrio entre viscosidade e estabilidade, o que indica maior potencial para panificação de pães de volume expressivo.

Em contraste, o pior desempenho foi verificado na cultivar Sena GP, com valores bastante reduzidos de viscosidade de pico (669 cP), final (771 cP) e *setback* (462 cP). Esse comportamento indica intensa degradação do amido ou forte atividade de α -amilase, resultando em massas pouco consistentes, de baixa retenção de gás e com elevado risco de colapso estrutural durante a fermentação e o forneamento (Li *et al.*, 2020). Além disso, cultivares como Triunfo GP e Feroz Mga também exibiram viscosidades finais relativamente baixas (1192 cP e 1239 cP, respectivamente), limitando seu potencial para produtos panificados de maior exigência tecnológica.

Dessa forma, a análise integrada da safra 2 (2023/2024) confirma que materiais como Reporte GP, Sonic GP e Madre Pérola Mga possuem maior aptidão tecnológica para panificação, enquanto Sena GP e Triunfo GP se mostram menos adequados, reforçando a importância da caracterização viscoamilográfica para direcionar o uso industrial do trigo.

A tabela 28 demonstra os resultados obtidos na safra 3(2024/2025).

Tabela 28 - Resultados das curvas viscoamilográficas - safra 3 (2024/2025)

Variedade	Pico visc (cP)	Breakdown (cP)	Visc final	Setback	TP (°C)
Audaz – PG	1368	423	1996	1051	87,6
Calibre TS	1213	631	1309	727	87,6
Audaz - AP	1115	617	1171	673	84,4
Sena – AP	1117	538	1135	673	84,85
Selvagem - AP	1560	577	2100	1118	88,25
Feroz – AP	1083	521	1335	773	86,05
ORS Turbo - AP	1274	408	1944	1078	86,85
Motriz – AP	1515	562	2104	1151	84,5
Audaz IR	1078	604	1130	656	84,4
Feroz IR	1108	416	1490	798	87
Calibre IR	1358	491	1851	1245	86
Calibre GP	1211	577	1529	1228	82,2
Sena – GP	1162	582	1334	754	86
Feroz -GP	659	375	715	431	87,5
Toruk – GP	1731	797	1962	1028	85,65
Oro – GP	1271	606	1521	861	85,8
Ello Cascavel	1726	717	2190	1181	88
Calibre Cascavel	1161	404	1636	879	87,25
Motriz Cascavel	1069	538	1265	754	78,6
Ello Mga	1553	433	1751	1387	86
Feroz Mga	1106	428	1462	761	88,5
Calibre Mga	1327	742	1398	812	85

Fonte: a autora.

Na safra 3 (2024/2025), os perfis de RVA evidenciaram cultivares com alto potencial tecnológico, mas também materiais limitados para a panificação. Entre os melhores desempenhos, a variedade Ello Cascavel apresentou valores elevados de viscosidade de pico (1726 cP), final (2190 cP) e *setback* (1181 cP), indicando grânulos de amido mais estáveis e boa capacidade de retenção de água. Embora esse perfil esteja associado a maior volume e melhor estrutura do pão, a retrogradação elevada sugere tendência ao endurecimento mais acelerado do miolo durante o armazenamento (Balet *et al.*, 2019; Yuan *et al.*, 2021). Comportamento semelhante foi observado em Motriz AP e Selvagem AP, que atingiram viscosidades finais superiores a 2100 cP, associadas a amido menos degradado e maior consistência da massa, características desejáveis para panificação de produtos de maior volume e textura mais firme (Li *et al.*, 2022). Além disso, a cultivar Toruk GP também se destacou, registrando o maior pico da safra (1731 cP) e boa viscosidade final (1962 cP), evidenciando elevado potencial de panificação.

Por outro lado, a cultivar Feroz GP exibiu os valores mais baixos em praticamente todos os parâmetros: pico (659 cP), viscosidade final (715 cP) e *setback* (431 cP), o que denota intensa degradação do amido ou atividade enzimática excessiva. Esse perfil compromete a estrutura da massa e resulta em produtos de menor volume, com textura menos uniforme e risco de colapso estrutural durante o forneamento (Hrivna *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2022). Outras variedades, como Audaz IR e Sena AP, apresentaram valores intermediários, mas relativamente baixos de viscosidade final (1130–1171 cP), indicando menor consistência e restrições para panificação de maior exigência tecnológica.

Assim, a safra 3 (2024/2025) confirmou o elevado potencial de materiais como Ello Cascavel, Motriz AP, Selvagem AP e Toruk GP, que se mostraram mais adequados para panificação, enquanto cultivares como Feroz GP apresentaram limitações evidentes, reforçando a importância da avaliação viscoamilográfica para orientar o uso industrial do trigo de acordo com sua aptidão tecnológica.

A avaliação conjunta das três safras por RVA mostrou contrastes consistentes no comportamento do amido, permitindo identificar cultivares com elevado potencial tecnológico para panificação e outras com desempenho restrito.

Na safra 1 (2022/2023), variedades como Madre Pérola AP, Audaz PG e Calibre AP apresentaram os perfis mais favoráveis, com elevada viscosidade final e boa consistência das pastas, características associadas a maior retenção de água e maior volume de pão. Em contrapartida, Sena PF, Destaque PF e Ágile PF revelaram baixa estabilidade e reduzida capacidade de estruturação, o que compromete sua aptidão para panificação de maior exigência.

Na safra 2 (2023/2024), o destaque positivo coube a Reporte GP, Sonic GP e Madre Pérola Mga, que exibiram perfis viscoamilográficos robustos, indicativos de grânulos de amido mais íntegros e massas com maior consistência. Já cultivares como Sena GP, Triunfo GP e Feroz Mga mostraram limitações expressivas, refletidas em baixa consistência e menor potencial para aplicação em pães de alto volume.

Na safra 3 (2024/2025), materiais como Ello Cascavel, Motriz AP, Selvagem AP e Toruk GP confirmaram seu potencial tecnológico, combinando elevada viscosidade final e *setback* pronunciado, atributos valorizados na panificação. Em contraste, cultivares como Feroz GP, Audaz IR e Sena AP apresentaram desempenho inferior, com pastas de menor estabilidade e restrições quanto à retenção de gás e ao desenvolvimento da massa.

De forma integrada, a análise evidencia que a performance tecnológica do trigo, mensurada pelo RVA, resulta da interação entre fatores genéticos e ambientais. Enquanto determinadas cultivares se consolidam como alternativas promissoras para a produção de pães de maior qualidade, outras se ajustam melhor a produtos de menor exigência tecnológica. Assim, o uso criterioso do RVA confirma-se como ferramenta estratégica para orientar o destino industrial das variedades de trigo, garantindo maior eficiência no aproveitamento do grão e produtos finais mais adequados às demandas do setor (Balet *et al.*, 2019; Huen *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020).

2.4.13 Características Gerais das Farinhas de Trigo

A partir dos resultados obtidos e discutidos nesta pesquisa, constatou-se que as cultivares avaliadas apresentaram respostas diferenciadas em todas as análises realizadas.

Nas tabelas 29, 30 e 31 estão apresentados os coeficientes de correlação de Pearson calculados para as principais variáveis deste estudo.

A análise revelou a existência de associações positivas entre diversas variáveis, evidenciando que o desempenho tecnológico do trigo depende de interações complexas entre características físico-químicas e reológicas. Assim, parâmetros interdependentes tendem a se reforçar mutuamente, contribuindo tanto para resultados superiores em panificação quanto para limitações tecnológicas quando esses vínculos são desfavoráveis.

2.4.13.1 Safra 1 (2022/2023)

A matriz de correlação de Pearson da Safra 1 (2022/2023), apresentada na Tabela 29, possibilitou identificar vínculos consistentes entre diferentes variáveis de qualidade do trigo, confirmando que diversos parâmetros estão interligados e exercem influência conjunta no desempenho tecnológico das farinhas. Entre os achados mais evidentes destacou-se a associação positiva entre o teor de proteínas e o glúten úmido. Ainda que esse resultado aponte para uma relação direta entre quantidade proteica e disponibilidade de glúten, a análise global dos dados demonstrou que níveis elevados de proteína não asseguram, por si só, a formação de uma rede proteica funcional. Esse aspecto reforça a importância de avaliar não apenas a quantidade,

mas sobretudo a qualidade estrutural da proteína para garantir o bom desempenho reológico.

Outro ponto de destaque foi a correlação negativa entre amido danificado e *Falling Number*. Esse comportamento pode ser explicado pela maior suscetibilidade de grânulos de amido lesionados à ação enzimática, favorecendo reações de degradação durante a moagem e resultando em valores mais baixos de FN. A relação observada evidencia a necessidade de um controle rigoroso no processo de moagem, já que a presença excessiva de amido danificado compromete tanto a estabilidade quanto a qualidade final da farinha.

O peso hectolítrico também apresentou correlação positiva com o rendimento de farinha após a extração, mostrando que grãos mais densos e bem formados proporcionam maior eficiência de moagem. Assim, quando o cultivo é exposto a condições climáticas desfavoráveis, o desenvolvimento inadequado do grão pode comprometer diretamente esse indicador e, conseqüentemente, reduzir a competitividade industrial do lote.

De forma geral, a Safra 1 (2022/2023) demonstrou que as cultivares responderam de maneira diferenciada às variáveis analisadas, reflexo direto das condições ambientais enfrentadas no período de cultivo. As correlações encontradas reforçam a necessidade de interpretar os parâmetros tecnológicos de forma integrada, permitindo direcionar a aplicação dos diferentes trigos na indústria alimentícia e assegurar o aproveitamento mais adequado de cada lote.

Tabela 29 - Correlação de Pearson - safra 1 (2022/2023)

	PH	PMG	Rend	PP	U	Cinzas	L*	AD	Estab	L	FN	SN	GU
PH	1												
PMG	0,94	1											
Rendimento	0,95	0,96	1										
PP				1									
U	0,81	0,86	0,82		1								
Cinzas				0,87		1							
L*							1						
AD					-0,83			1					
Estab			0,85						1				
L	0,81		0,82							1			
FN								-0,88			1		
SN				-0,84			0,85				0,81	1	
GU				0,91			-0,84	0,85			-0,84	-0,97	1
PV				-0,83							0,90	0,96	-0,95

Fonte: a autora.

Nota: PH: peso hectolítrico, PMG: peso de mil grãos, Rend: rendimento, PP: proteína, U: umidade, L*: luminosidade, AD: amido danificado, Estab: estabilidade, L: extensibilidade, FN: *Falling Number*, SN: *Stirring Number*, GU: glúten úmido, PV: pico de viscosidade

2.4.13.2 Safra 2 (2023/2024)

A matriz de correlação de Pearson da Safra 2 (2023/2024), tabela 30 mostrou associações significativas que ajudam a compreender como diferentes atributos da farinha de trigo se relacionam entre si e influenciam o desempenho tecnológico. Entre os resultados mais expressivos, destacou-se a forte associação entre o *Falling Number*, o *Stirring Number* e o pico de viscosidade. Essa proximidade indica que esses métodos captam de forma convergente a influência da atividade enzimática sobre o amido. Em linhas gerais, farinhas que apresentaram valores mais elevados de FN e SN também mantiveram maior viscosidade no RVA, revelando grãos mais íntegros e menos sujeitos à degradação. Esse comportamento confirma a relevância desses indicadores para monitorar a qualidade da matéria-prima e prevenir problemas associados à germinação pré-colheita, que comprometem diretamente a estabilidade da massa durante o processamento.

Outro conjunto de correlações fortes emergiu nos parâmetros relacionados ao glúten. A tenacidade (P), a força global da massa (W) e o índice P/L apresentaram vínculos estreitos entre si, evidenciando que farinhas mais resistentes à deformação tendem a acumular maior energia total no alveógrafo e a manter um equilíbrio mais definido entre elasticidade e extensibilidade. Essas associações também se estenderam à absorção de água e à estabilidade farinográfica, confirmando que a funcionalidade do glúten depende não apenas da sua quantidade e qualidade, mas também da sua interação com a água durante a mistura. Essa leitura é essencial para compreender por que determinadas farinhas se destacam em processos de panificação, oferecendo massas mais estáveis e com maior potencial de retenção de gases.

As interações observadas com parâmetros de cor trouxeram elementos adicionais de interpretação. A correlação positiva entre os valores de P e W com o componente b^* sugere que farinhas mais fortes do ponto de vista reológico também exibiram tonalidade ligeiramente mais amarelada, possivelmente refletindo a presença de pigmentos associados à matriz proteica. Em contrapartida, a relação negativa entre a extensibilidade (L) e o mesmo parâmetro b^* mostrou que farinhas mais extensíveis não coincidiram com aquelas de coloração amarelada mais intensa. Além disso, o teor de proteínas manteve associação positiva com o ângulo Hue ($^{\circ}$ H),

sugerindo que diferenças composicionais, mesmo que sutis, também influenciam a percepção visual da farinha.

De maneira integrada, as correlações acima de 0,6 da Safra 2 (2023/2024) permitem identificar dois grandes núcleos de variabilidade: de um lado, a influência da atividade enzimática sobre o comportamento do amido, refletida nas relações entre FN, SN e RVA; de outro, a funcionalidade proteica que sustenta a força e o equilíbrio da massa, traduzida pelas associações entre parâmetros alveográficos, farinográficos e o teor de proteínas. A interação com atributos de cor, embora secundária, reforça que a qualidade tecnológica da farinha não se restringe a um único conjunto de variáveis, mas resulta da interação dinâmica entre composição química, propriedades reológicas e características visuais, todas determinantes para o desempenho industrial e a aceitação final do produto.

Tabela 30 - Correlação de Pearson - safra 2 (2023/2024)

	FN	SN	PP	P	L	W	P/L	Abs	Estab	TD	ITM	a*
FN	1											
SN	0,93	1										
PP			1									
P			0,69	1								
L				-0,8	1							
W			0,67	0,68		1						
P/L				0,95	-0,86		1					
Abs			0,76	0,94	-0,68	0,69	0,87	1				
Estab			0,68	0,7		0,72			1			
TD			0,63							1		
ITMA			-0,67	-0,74		-0,79		-0,67	-0,85		1	
a*												1
b*				0,75	-0,66	0,72	0,63	0,73	0,62		-0,63	
°H			0,68									-0,83
PV	0,85	0,87										

Fonte: a autora

Nota: FN: Falling Number, SN: Stirring Number, PP: proteína da farinha, P: tenacidade, L: extensibilidade, W: força geral do glúten, P/L: relação tenacidade/extensibilidade, Abs: absorção de água, Estab: estabilidade, TD: tempo de desenvolvimento, ITM: índice de tolerância à mistura, a*: coordenada de cor (verde-vermelho), b*: coordenada de cor (azul-amarelo), °H: ângulo de matiz, PV: pico de viscosidade.

Tabela 31- Correlação de Pearson - safra 3 (2024/2025)

	FN	SN	GU	Cinzas	PP	P	L	W	P/L	Abso	Estab
FN	1										
SN	0,91	1									
GU			1								
Cinzas				1							
PP			0,78		1						
P						1					
L						-0,8	1				
W					0,67	0,82		1			
P/L						0,94	-0,82	0,6	1		
Abors					0,65	0,92	-0,69	0,84	0,85	1	
Estabil						0,62		0,79			1
TD					0,76	0,6		0,71		0,74	
ITM						-0,66		-0,85		-0,61	-0,92
L*				-0,95							
PV	0,80	0,89									

Fonte: a autora.

Nota: FN: Falling Number, SN: Stirling Number, GU: glúten úmido, Cinzas: teor de cinzas, PP: proteína da farinha, P: tenacidade, L: extensibilidade, W: força geral do glúten, P/L: relação tenacidade/extensibilidade, Abors: absorção de água, Estabil: estabilidade, TD: tempo de desenvolvimento, ITM: índice de tolerância à mistura, L*: luminosidade, PV: pico de viscosidade.

2.4.13.2 Safra 3 (2024/2025)

A matriz de correlação de Pearson referente à Safra 3 (2024/2025), tabela 31, revelou, de maneira consistente, que os indicadores de integridade do amido e os parâmetros reológicos se organizam de forma complementar quando avaliados de maneira cruzada entre diferentes metodologias. No contexto da estabilidade da pasta, observou-se forte associação entre o Falling Number, o Stirring Number e o pico de viscosidade do RVA. Essa relação evidencia que lotes com menor atividade enzimática preservam melhor a viscosidade máxima durante o aquecimento, resultado que integra medições baseadas em princípios distintos, mas igualmente sensíveis à capacidade da amostra de resistir à degradação térmica. Ao considerar esse conjunto integrado de variáveis, reduz-se a redundância entre métodos e obtém-se um marcador mínimo robusto para o monitoramento tecnológico.

No campo da funcionalidade proteica, os parâmetros alveográficos de resistência e energia da massa mostraram correlações expressivas com os indicadores farinográficos de absorção e estabilidade. Esse padrão confirma que o comportamento elástico da rede de glúten traduz-se, na prática, em maior capacidade de hidratação e manutenção estrutural durante a mistura. A integração entre os ensaios de deformação biaxial (alveógrafo) e de mistura (farinógrafo) amplia a relevância industrial da análise, pois desloca a interpretação estatística de comparações internas para um diálogo entre métodos, aproximando o diagnóstico laboratorial das condições reais de processamento.

Evidenciaram-se ainda associações específicas entre atributos composicionais e propriedades de cor, sem necessidade de cotejar índices cromáticos entre si. O teor de proteínas apresentou correlação com o ângulo de tonalidade ($^{\circ}\text{H}$), sugerindo que variações na matriz proteica influenciam, ainda que de modo sutil, a percepção visual da farinha. Esse achado reforça que a cor deve ser entendida como reflexo da composição, especialmente em aplicações em que o padrão visual constitui critério de qualidade tecnológica.

De forma integrada, as correlações fortes estabelecidas entre métodos distintos delineiam um quadro analítico coerente para a tomada de decisão industrial. O par $\text{FN} \leftrightarrow$ pico de viscosidade sintetiza a estabilidade térmica da pasta sem sobreposição de informação; a ligação entre alveografia e farinografia traduz a funcionalidade do glúten

em parâmetros operacionais de mistura e absorção; e a relação entre proteínas e tonalidade adiciona uma dimensão composicional à interpretação visual. Esse arranjo assegura profundidade analítica, elimina redundâncias e oferece uma narrativa estatística ajustada às demandas industriais, nas quais poucos marcadores, desde que complementares, são suficientes para sustentar escolhas estratégicas de seleção de lotes e definição de uso final.

2.4.14 Avaliação conjunta do desempenho tecnológico nas três safras

2.4.14.1 Safra 1 (2022/2023)

A cultivar Audaz PG foi classificada como Tipo I, com rendimento de moagem elevado e farinha enquadrada como Tipo II devido ao teor de cinzas. A ausência de enfraquecimento da massa nas análises sugere uma rede de glúten forte, o que favorece a produção de biscoitos fermentados, onde a estabilidade estrutural é essencial.

A variedade Audaz AP, também Tipo I, apresentou ótimo equilíbrio entre elasticidade e extensibilidade, além de elevada estabilidade farinográfica e valor de W expressivo, confirmando a força do glúten. Esses atributos justificam sua indicação para pães e massas, que exigem boa retenção de gás e desempenho reológico consistente.

A cultivar Calibre AP destacou-se como Tipo I, combinando rendimento industrial elevado com maior estabilidade da massa e baixo tempo de desenvolvimento. A qualidade do glúten e a baixa perda de viscosidade durante o aquecimento indicam robustez tecnológica, recomendando seu uso em pães, que necessitam de glúten resiliente e estável. Na cultivar Ello AP, tanto o grão quanto a farinha foram enquadrados como Tipo I. Seu perfil alveográfico mostrou equilíbrio entre elasticidade e extensibilidade, embora com baixa energia de deformação. Esse comportamento torna a cultivar mais adequada para bolos e biscoitos doces, em que a massa não precisa sustentar fermentações longas.

A variedade Feroz AP apresentou-se como Tipo I, com farinha clara e sem registro de enfraquecimento da massa durante os testes, sugerindo resistência da rede de glúten. Por essas características, mostra-se indicada para pães, onde força e estabilidade são essenciais para a estrutura final do produto. A cultivar ORS 1405 AP,

também Tipo I, destacou-se pela menor coloração da farinha e pelo baixo teor de amido danificado, o que implica em grãos menos suscetíveis à quebra mecânica. Sua massa revelou perfil elástico, ainda que pouco extensível, mas com energia de deformação adequada, o que a direciona ao uso em pães, com desempenho satisfatório em fermentações controladas.

A cultivar Madre Pérola AP apresentou o menor teor proteico entre as amostras, mas foi classificada como Tipo I. A farinha mostrou a maior luminosidade, típica de cultivares branqueadoras, além de elevado valor de viscosidade de pico e forte tendência à retrogradação do amido. Tais atributos são desejáveis em bolos e biscoitos doces, que demandam coloração clara e géis de amido estáveis.

A variedade Ágile PF integra o grupo de cultivares indicadas para panificação fina, em virtude de seu comportamento farinográfico equilibrado e potencial proteico adaptado à elaboração de massas leves. A cultivar Audaz PF, de perfil semelhante, mostrou características consistentes com a aplicação em produtos panificados específicos, ajustando-se conforme o balanço entre estabilidade, absorção e força do glúten.

A variedade Bela Jóia PF, relaciona-se à produção de farinhas claras, com potencial tecnológico intermediário, sugerindo sua utilização em preparações que necessitam equilíbrio entre extensibilidade e força, como pães mais leves e biscoitos.

A cultivar Destaque PF foi classificada como Tipo I no grão, mas a farinha foi enquadrada como Tipo II devido ao teor de cinzas. Apresentou coloração mais escura e maior atividade enzimática, confirmada pelo valor de Falling Number. Esses fatores justificam sua recomendação para bolos, nos quais a cor mais intensa e a atividade enzimática elevada podem ser bem aproveitadas.

A variedade Sena PF não atingiu os parâmetros mínimos de PH e rendimento industrial, sendo enquadrada fora de tipo. Apesar do elevado teor proteico, as análises revelaram glúten de baixa qualidade, força limitada e alta atividade enzimática. Assim, não é recomendada para panificação, mas pode ser destinada à alimentação animal ou à fabricação de cola, onde não se exige qualidade tecnológica.

Por fim, a cultivar Sonic PF, classificada como Tipo II, apresentou altos teores de amido danificado e absorção de água, associados à dureza dos grãos. A massa mostrou elevada elasticidade, porém baixa extensibilidade e estabilidade reduzida, resultando em enfraquecimento acentuado. Diante disso, é mais indicada para bolos, onde o perfil reológico restritivo não compromete o desempenho final.

2.4.14.2 Safra 2 (2023/2024)

No grupo GP, a cultivar Audaz GP, classificada como Tipo I, apresentou glúten de boa força, mas associado a massas excessivamente rígidas e pouco extensíveis. Esse perfil restringe sua utilização em panificação convencional, mas favorece sua aplicação em massas alimentícias secas, que demandam maior rigidez estrutural. A variedade Sonic GP, enquadrada como Tipo III, destacou-se pelo equilíbrio entre elasticidade e extensibilidade, além de boa estabilidade farinográfica, características que a tornam altamente indicada para pães de grande volume e processos industriais exigentes.

A cultivar Reporte GP, classificada como Tipo III, reuniu elevado teor de glúten com coloração mais escura e baixos níveis de amido danificado, perfil direcionado a biscoitos e massas alimentícias, em que a firmeza é mais valorizada que a expansão. A variedade Oro GP, enquadrada como Tipo II, apresentou massa tenaz e de baixa extensibilidade, menos adequada à panificação, mas útil para massas secas e produtos firmes. Já a cultivar Triunfo GP, classificada como Tipo I, demonstrou excelente equilíbrio entre força, elasticidade e estabilidade, revelando grande potencial para pães de grande volume e panificação industrial.

No grupo AP, a cultivar Audaz AP, classificada como Tipo I, apresentou glúten em nível intermediário e massas menos estáveis, restringindo seu aproveitamento na panificação tradicional, mas permitindo uso em produtos de fermentação rápida. A variedade ORS 1405 AP, também Tipo I, mostrou desempenho semelhante, com massas frágeis e de rápida desestruturação, mais adequadas para biscoitos e preparações de curta fermentação. A cultivar Selvagem AP, enquadrada como Tipo II, revelou massas muito extensíveis, mas pouco resistentes, perfil inadequado para pães fermentados, porém útil em massas menos estruturadas ou produtos de fermentação curta. A variedade Sena AP, classificada como Tipo I, apresentou glúten elevado, mas de baixa funcionalidade, resultando em massas tenazes e pouco expansíveis, sendo mais indicada para massas secas. Já a cultivar Feroz AP, classificada como Tipo II, apresentou massas excessivamente extensíveis e frágeis, de menor estabilidade, direcionando sua aplicação a biscoitos e produtos de fermentação rápida.

No grupo IR, a cultivar Calibre IR, classificada como Tipo I, destacou-se pelo bom equilíbrio entre resistência e extensibilidade, demonstrando alto potencial para pães de grande volume. A variedade Audaz IR, também Tipo I, revelou massas frágeis e pouco resistentes, com baixa capacidade de retenção de gases, o que restringe seu uso a produtos de fermentação rápida ou biscoitos. Já a cultivar Feroz IR, enquadrada como Tipo II, apresentou massas frágeis e de baixa estabilidade, características que comprometem seu uso em pães fermentados, mas a tornam mais adequada para massas alimentícias de menor exigência tecnológica.

No grupo Cascavel, a cultivar Calibre Cascavel, classificada como Tipo I, apresentou bom equilíbrio entre absorção de água, extensibilidade e estabilidade, indicando potencial para pães com volume adequado e textura uniforme. Em contrapartida, a variedade Ello Cascavel, classificada como Tipo I, revelou baixa estabilidade e menor tolerância ao processo de mistura, comprometendo seu uso em panificação tradicional, mas favorecendo aplicações em biscoitos e produtos de fermentação rápida.

No grupo Mga, a cultivar Madre Pérola Mga, classificada como Tipo I, destacou-se pela elevada estabilidade farinográfica e pela tolerância ao processo de mistura, o que a torna indicada para pães de longa fermentação e panificação industrial. Já a variedade Audaz Mga, também Tipo I, apresentou baixos níveis de amido danificado, o que resulta em farinhas de menor absorção de água e maior firmeza, perfil mais adequado para biscoitos e massas alimentícias. A cultivar Feroz Mga, classificada como Tipo III, revelou altos níveis de amido danificado, favorecendo maior absorção, mas com risco de enfraquecimento da rede de glúten. Por isso, mostra desempenho limitado em pães de longa fermentação, sendo mais adequada a produtos de fermentação curta ou massas menos estruturadas.

2.4.14.3 Safra 3 (2024/2025)

No grupo GP, a cultivar Feroz GP, classificada como Tipo II, apresentou bom rendimento e farinha clara, associada a massas equilibradas e estáveis, o que confirma sua aptidão para pães de maior volume e panificação industrial. Já a variedade Sena GP, enquadrada como Tipo III, demonstrou glúten de boa qualidade e massas resistentes, favorecendo seu uso em produtos fermentados de longa duração, nos quais a estabilidade proteica é determinante.

A cultivar Calibre GP, também Tipo II, revelou desempenho mais limitado, com menor estabilidade e absorção de água, perfil que a direciona para biscoitos e produtos de fermentação rápida, em vez da panificação tradicional. A variedade Toruk GP, classificada como Tipo I, apresentou equilíbrio satisfatório entre resistência e extensibilidade, confirmando sua adequação para pães volumosos. Já a cultivar Oro GP, sem dados completos de cinzas e proteína, não pôde ser classificada, mas revelou comportamento alveográfico de elevada tenacidade e baixa extensibilidade, favorecendo sua aplicação em massas secas e produtos de maior rigidez estrutural.

No grupo AP, a cultivar Audaz AP, enquadrada como Tipo II, apresentou massas tenazes e pouco expansíveis, limitando seu uso em pães, mas adequadas a massas secas. A variedade ORS Turbo AP, classificada como Tipo I, exibiu massas fortes, porém excessivamente rígidas, restringindo seu uso em panificação, mas confirmando potencial para massas alimentícias secas. Já a cultivar Selvagem AP, enquadrada como fora de tipo pelo teor de cinzas elevado, revelou massas muito extensíveis e frágeis, adequadas apenas para produtos de fermentação rápida ou massas menos estruturadas.

A variedade Sena AP, também fora de tipo, apresentou glúten relativamente baixo, mas qualidade proteica que resultou em massa forte e estável, destacando-se como cultivar de desempenho excepcional para pães de grande volume e longa fermentação. A cultivar Feroz AP, classificada como Tipo III, mostrou equilíbrio entre glúten e força de massa, assegurando boa estabilidade e confirmando sua indicação para panificação tradicional. Por fim, a variedade Motriz AP, classificada como Tipo I, revelou massas frágeis e muito extensíveis, inadequadas para pães, mas aproveitáveis em biscoitos e produtos de menor exigência reológica.

No grupo IR, a cultivar Calibre IR, classificada como Tipo I, destacou-se pela alta qualidade do glúten e massa equilibrada, confirmando sua vocação para pães de grande volume e panificação industrial. A variedade Audaz IR, também Tipo I, apresentou massas frágeis e muito extensíveis, pouco adequadas à panificação, mas úteis em produtos de fermentação rápida ou biscoitos. Já a cultivar Feroz IR, igualmente Tipo I, mostrou massas de baixa resistência e estabilidade, direcionando seu aproveitamento para massas menos estruturadas e preparações rápidas.

No grupo TS, a cultivar Calibre TS, classificada como Tipo III, demonstrou massas equilibradas, com boa estabilidade e extensibilidade, o que confirma seu potencial tecnológico para pães volumosos e panificação de qualidade.

No grupo Mga, a cultivar Calibre Mga, enquadrada como Tipo I, destacou-se pela elevada estabilidade e longo tempo de desenvolvimento da massa, condições ideais para pães de longa fermentação e panificação industrial. A variedade Ello Mga, também Tipo I, apresentou glúten mais baixo e massas pouco resistentes, perfil menos favorável à panificação, mas adequado para biscoitos e massas alimentícias. Já a cultivar Feroz Mga, classificada como Tipo II, revelou alto teor de amido danificado, associado a maior absorção e fermentabilidade, mas com risco de enfraquecimento da rede proteica, sendo mais apropriada para produtos de fermentação curta ou massas menos estruturadas.

No grupo Cascavel, a cultivar Motriz Cascavel, classificada como Tipo I, destacou-se pela alta luminosidade da farinha, atributo valorizado para aceitação sensorial, mas associada a massas pouco resistentes e instáveis. Esse perfil a direciona para biscoitos e produtos de fermentação rápida, nos quais a coloração clara é vantajosa, mas a força do glúten não é determinante.

Por fim, a cultivar Audaz PG, classificada como Tipo III, manteve desempenho estável em comparação às safras anteriores, com bom rendimento e massas equilibradas. Sua consistência tecnológica a torna recomendada para panificação tradicional e produtos fermentados, consolidando-se como cultivar versátil e confiável para a indústria.

A avaliação conjunta das três safras permitiu identificar padrões consistentes e contrastes relevantes no desempenho tecnológico das cultivares de trigo. A classificação oficial (Tipo I, II, III ou fora de tipo) mostrou-se essencial para compreender a variabilidade entre materiais e a previsibilidade de uso industrial.

De modo geral, cultivares classificadas como Tipo I, como Calibre IR, Triunfo GP, Sonic GP, Calibre Mga e Madre Pérola AP, revelaram massas fortes e equilibradas, com estabilidade farinográfica e desempenho alveográfico satisfatórios, confirmando sua vocação para a panificação de qualidade. A presença recorrente dessas cultivares entre os destaques das três safras evidencia maior estabilidade genética e menor sensibilidade às oscilações ambientais, condição valorizada pela indústria moageira.

Por outro lado, as cultivares enquadradas como Tipo II, como Feroz AP, Feroz GP e Oro GP, mostraram potencial tecnológico mais restrito, frequentemente associado a massas tenazes ou excessivamente extensíveis. Embora úteis em determinados segmentos, como massas secas, produtos de fermentação rápida ou

biscoitos, apresentaram limitações para panificação tradicional, sobretudo em fermentações prolongadas.

As variedades classificadas como Tipo III, entre elas Audaz PG, Calibre TS, Sena GP e Feroz AP, apresentaram desempenho heterogêneo: algumas confirmaram aptidão para panificação, desde que em condições controladas, enquanto outras evidenciaram fragilidades que restringem sua aplicação. Essa oscilação reforça a necessidade de análises complementares e maior cautela na indicação tecnológica.

Já as cultivares fora de tipo, como Sena AP e Selvagem AP, mostraram fragilidades consistentes ao longo das safras, refletidas em baixo rendimento de moagem, maiores teores de cinzas e massas instáveis. Essas características comprometem o uso em panificação, direcionando-as a aplicações de menor exigência tecnológica ou até a destinações alternativas, como ração e insumos industriais.

A análise integrada também confirmou tendências gerais observadas na literatura, a relação inversa entre teor de cinzas e luminosidade (L), a influência determinante do amido danificado e da atividade enzimática (FN e SN) sobre a qualidade tecnológica, e a discrepância recorrente entre a quantidade e a qualidade do glúten. Cultivares como Sena AP e Toruk GP, por exemplo, demonstraram que mesmo com teores intermediários de glúten, a composição proteica pode garantir alto desempenho reológico, confirmando que a funcionalidade é mais determinante que o teor absoluto de proteínas.

Assim, as três safras evidenciam que cultivares como Audaz PG, Calibre IR, Sonic GP, Triunfo GP e Madre Pérola AP se consolidam como materiais estáveis e previsíveis, recomendados para panificação de qualidade e uso industrial abrangente. Em contrapartida, cultivares como Selvagem AP, Motriz AP e Feroz IR revelaram desempenho frágil e irregular, restringindo-se a nichos específicos. Esses resultados reforçam a importância de avaliar cultivares em diferentes ciclos agrícolas, permitindo identificar materiais que conciliem regularidade produtiva e qualidade tecnológica, fatores determinantes para a competitividade da cadeia tritícola.

2.5 CONCLUSÃO

O estudo realizado ao longo de três safras consecutivas permitiu caracterizar de forma abrangente a qualidade tecnológica de diferentes cultivares de trigo

cultivadas no Paraná, revelando como a interação entre genótipo e ambiente molda o desempenho industrial do grão e da farinha. A análise integrada de parâmetros físicos, químicos e reológicos mostrou que a qualidade não depende de um único fator, mas emerge da combinação entre rendimento, teor proteico, atividade enzimática, propriedades do amido e comportamento da massa.

As cultivares Audaz PG, Calibre IR, Sonic GP, Triunfo GP e Madre Pérola AP demonstraram estabilidade ao longo dos ciclos, consolidando-se como materiais de maior previsibilidade tecnológica e forte indicação para a panificação industrial. Em contraste, variedades como Selvagem AP, Motriz AP e Feroz IR apresentaram fragilidades recorrentes, adequando-se melhor a nichos específicos de aplicação, como biscoitos e produtos de fermentação rápida. Essa distinção reforça a importância da seleção criteriosa de cultivares conforme o destino tecnológico desejado.

A leitura conjunta dos eixos avaliados trouxe novas perspectivas. O núcleo enzimático (FN, SN e RVA) mostrou-se fundamental para indicar a estabilidade da pasta e prevenir riscos tecnológicos. O bloco reológico (alveógrafo e farinógrafo) reafirmou a complementaridade entre força, extensibilidade, absorção e estabilidade, enquanto o eixo mineral–cor evidenciou relações clássicas entre cinzas e luminosidade, ainda que moduladas pelo ambiente. A comparação entre safras também demonstrou que a ênfase da qualidade variou ao longo dos ciclos: na primeira safra, a força do glúten foi determinante; na segunda, a integração entre reologia e mistura ganhou maior relevância; e na terceira, destacou-se o equilíbrio entre absorção, estabilidade e tolerância à mistura, em paralelo à consistência do par FN, SN e RVA.

Do ponto de vista aplicado, o trabalho propõe um painel mínimo de parâmetros capaz de orientar decisões industriais sem redundância: FN, SN e RVA para estabilidade da pasta; W e P/L para estrutura da massa; absorção e estabilidade farinográficas para competência de mistura; e L* e cinzas para acabamento visual e rendimento. Esse conjunto se mostrou suficiente para prever o desempenho tecnológico e reduzir incertezas no direcionamento de lotes, fortalecendo a padronização da cadeia tritícola e contribuindo para maior eficiência produtiva.

Em síntese, esta tese confirma que a qualidade do trigo não pode ser entendida de forma estática, mas como o resultado de uma rede de interações entre genética, ambiente e tecnologia. Ao reunir três safras consecutivas, foi possível não apenas

mapear as diferenças regionais e varietais, mas também identificar cultivares estáveis e perfis tecnológicos aplicáveis à indústria. O conhecimento gerado amplia a base científica para a caracterização do trigo brasileiro e fornece subsídios práticos para produtores, moinhos e panificadores, contribuindo com o avanço de uma produção mais consistente, competitiva e orientada à qualidade.

CAPÍTULO 3 – EXTRAÇÃO E ANÁLISE DO AMIDO DE TRIGO (*TRITICUM AESTIVUM* L.)

RESUMO

O amido representa a principal fração da farinha de trigo e participa diretamente da formação da estrutura do miolo, da estabilidade da massa durante o forneamento e da evolução da textura ao longo do armazenamento. Neste capítulo, amidos foram extraídos de farinhas da cultivar Audaz provenientes de diferentes regiões do estado do Paraná, obtidas em três safras consecutivas (2022/23, 2023/24 e 2024/25), e caracterizados quanto ao teor de amilose, propriedades de pasta, transições térmicas, morfologia e desempenho tecnológico na panificação (volume, cor e textura). O teor de amilose variou de 21,60% a 25,31%, com diferenças significativas entre amostras, indicando modulações na proporção amilose–amilopectina ao longo de regiões e safras. No RVA, a temperatura de pasta permaneceu praticamente constante (91,20–92,21 °C), enquanto os parâmetros de viscosidade discriminaram o comportamento funcional: pico de viscosidade entre 944,50 e 1279,00 cP, breakdown de 328,50 a 495,00 cP, setback de 789,50 a 934,00 cP e viscosidade final de 1364,00 a 1674,00 cP. Por DSC, a gelatinização apresentou T_o de 53,50–55,86 °C, T_p de 58,11–60,25 °C, T_f de 60,27–63,95 °C e ΔH_{gel} de 4,75–7,44 J g⁻¹, evidenciando diferenças sutis na estabilidade e na heterogeneidade das regiões cristalinas. Observou-se ainda um segundo evento endotérmico relacionado à dissociação de complexos amilose–lipídio (T_o = 85,04–92,42 °C; T_p = 88,11–94,98 °C; T_f = 90,02–96,93 °C; ΔH = 0,05–2,94 J g⁻¹), sugerindo variações na extensão dessas associações entre amostras. Na panificação, os pães apresentaram perda de massa de aproximadamente 12–17 % e volumes entre 843,75 e 1237,17 cm³, indicando desempenho volumétrico dependente do equilíbrio entre transições térmicas e comportamento de pasta do amido. O miolo variou em luminosidade (L^* = 65,18–74,49) e firmeza (23,08–87,25 N), enquanto a casca apresentou dureza de 92,90–194,37 N, reforçando que diferenças estruturais do amido se expressam de forma integrada em volume, cor e textura. Em conjunto, os resultados confirmam que, mesmo dentro do perfil típico de amido de trigo comum, variações na organização térmica e viscoamilográfica do amido, associadas à origem regional e à safra, modulam o desempenho tecnológico das farinhas e a qualidade do pão.

Palavras-chave: amilose; retrogradação; amilopectina; propriedades térmicas; propriedades de pasta; panificação.

ABSTRACT

Starch is the major fraction of wheat flour and plays a central role in crumb structure development, dough setting during baking, and texture evolution during storage. In this chapter, starches were extracted from flours of the wheat cultivar Audaz produced in different regions of Paraná State (Brazil) across three consecutive seasons (2022/23,

2023/24, and 2024/25), and characterized in terms of amylose content, pasting properties (RVA), thermal transitions (DSC), morphology (FE-SEM), and breadmaking performance (loaf volume, color, and texture). Amylose content ranged from 21.60 % to 25.31 %, with significant differences among samples, indicating seasonal and regional modulation of the amylose–amylopectin balance. RVA pasting temperature showed minimal variation (91.20–92.21 °C), whereas viscosity-related parameters differentiated functional behavior: peak viscosity of 944.50–1279.00 mPa·s, breakdown of 328.50–495.00 mPa·s, setback of 789.50–934.00 mPa·s, and final viscosity of 1364.00–1674.00 mPa·s. DSC gelatinization exhibited T_o of 53.50–55.86 °C, T_p of 58.11–60.25 °C, T_f of 60.27–63.95 °C, and ΔH_{gel} of 4.75–7.44 J g⁻¹, evidencing subtle differences in crystalline stability and structural heterogeneity. A second endothermic event related to amylose–lipid complex dissociation was also observed (T_o = 85.04–92.42 °C; T_p = 88.11–94.98 °C; T_f = 90.02–96.93 °C; ΔH = 0.05–2.94 J g⁻¹), suggesting differences in the extent of these associations among samples. In breadmaking, mass loss was approximately 12–17% and loaf volume ranged from 843.75 to 1237.17 cm³, indicating that volumetric performance depends on the balance between starch thermal transitions and pasting behavior. Crumb lightness (L^* = 65.18–74.49) and firmness (23.08–87.25 N), as well as crust hardness (92.90–194.37 N), confirmed that starch structural differences translate into integrated quality attributes. Overall, even within the expected profile of common wheat starch, variations in thermal and pasting organization associated with region and season modulate flour technological performance and bread quality.

Keywords: amylose; retrogradation; amylopectin; thermal properties; pasting properties; breadmaking.

3.1 INTRODUÇÃO

O amido constitui o principal componente da fração sólida da farinha de trigo, representando cerca de 70 a 80 % de sua massa seca, e exerce papel central tanto no valor nutricional quanto no desempenho tecnológico dos produtos derivados. Nos cereais, esse polímero atua como a principal reserva energética do grão, sendo formado e organizado durante o enchimento do endosperma sob forte influência das condições genéticas e ambientais. No trigo (*Triticum aestivum* L.), a organização estrutural do amido, expressa pela proporção entre amilose e amilopectina, pela presença de lipídeos associados e pela distribuição do tamanho dos grânulos, distingue-se de outras fontes botânicas e confere características funcionais específicas à farinha, especialmente no contexto da panificação (Shewry, 2015; Shewry *et al.*, 2022; Solah *et al.*, 2016).

A funcionalidade tecnológica do amido de trigo está intimamente relacionada à sua interação com a matriz proteica do glúten e ao seu comportamento frente aos

processos de hidratação, aquecimento e resfriamento. Durante a panificação, o amido participa ativamente da formação da estrutura do miolo, contribuindo para a expansão da massa, a fixação da rede de glúten após a gelatinização parcial e a estabilidade do produto final. Variações na composição química do amido, na organização semicristalina dos grânulos e na distribuição das populações granulares dos tipos A (grânulos maiores) e B (grânulos menores) refletem-se diretamente nas propriedades de gelatinização, empastamento e retrogradação, influenciando parâmetros reológicos, textura e vida de prateleira dos produtos à base de trigo (Cauvain; Young, 2015; Zhang *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2022).

As características do amido de trigo não permanecem constantes entre regiões e safras, uma vez que sua biossíntese é altamente sensível às condições ambientais predominantes durante o enchimento dos grãos. Fatores como temperatura, disponibilidade hídrica e condições edafoclimáticas regionais podem modificar a proporção amilose e amilopectina, o teor de lipídeos associados, a cristalinidade relativa e a distribuição do tamanho dos grânulos, resultando em amidos com comportamentos físico-químicos distintos. Em regiões produtoras como o estado do Paraná, marcadas por variabilidade climática interanual, a análise do amido extraído de farinhas obtidas em diferentes localidades e ao longo de três safras consecutivas permite compreender, de forma integrada, como a interação entre ambiente e genótipo se traduz em alterações estruturais e funcionais da fração amilácea do trigo (Franceschi *et al.*, 2009; Kiszonas *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2025).

3.2 OBJETIVOS

3.2.1 Objetivo Geral

Avaliar as características estruturais, térmicas, viscoamilográficas e funcionais do amido extraído de farinhas de trigo (*Triticum aestivum* L.) provenientes de diferentes regiões do estado do Paraná, cultivadas ao longo de três safras consecutivas.

3.2.2 Objetivos Específicos

- Extrair o amido das farinhas de trigos provenientes de diferentes regiões do estado do Paraná e de três safras consecutivas;

- Determinar o teor de amilose dos amidos de trigo extraídos;
- Caracterizar as propriedades de pasta dos amidos de trigo por meio de análise viscoamilográfica;
- Avaliar as propriedades térmicas dos amidos de trigo, considerando os eventos de gelatinização, retrogradação e dissociação de complexos amilose–lipídio;
- Analisar a morfologia dos grânulos de amido por microscopia eletrônica de varredura;
- Investigar a influência das características do amido de trigo no desempenho tecnológico das farinhas, com ênfase na panificação.

3.3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.3.1 Materiais

Trigos da cultivar Audaz, provenientes de diferentes regiões do estado do Paraná, foram avaliados ao longo das safras 2022/23, 2023/24 e 2024/25.

As amostras foram: Audaz PG (1), Audaz PF (1), Audaz PG (2), Audaz IR (2), Audaz Cascavel (2), Audaz Mga (2), Audaz PG (3), Audaz IR (3), onde 1, 2 e 3 representam as safras analisadas: (1) 22/23; (2) 23/24; (3) 24/25.

A cultivar Audaz foi selecionada para a extração e caracterização do amido em razão de sua ampla representatividade no conjunto experimental deste estudo. Entre as cultivares avaliadas no Capítulo 2, o trigo Audaz, classificado como um trigo panificável/melhorador, apresentou a maior disponibilidade de amostras oriundas de distintas regiões do estado, bem como maior volume de material por localidade, o que permitiu a realização das análises de extração e caracterização do amido com adequada reprodutibilidade e consistência experimental.

As análises foram conduzidas nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Alimentos e do Complexo de Laboratórios Multiusuários da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

3.3.2 Métodos

3.3.2.1 Extração do amido

Para a extração do amido de trigo, foram utilizados 100 g de farinha de trigo. Inicialmente, a farinha foi homogeneizada com solução salina a 2 % (m/v), formando uma massa, a qual permaneceu em repouso por 20 min. Em seguida, a massa foi submetida a sucessivas lavagens com água destilada, sendo o líquido de lavagem coletado para posterior separação do amido.

Após a etapa de lavagem, ao material coletado foi adicionada solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 0,1 % (m/v), permanecendo em repouso por 24 h, com o objetivo de promover a solubilização de proteínas residuais. Decorrido esse período, a suspensão foi submetida à centrifugação, sendo o sobrenadante descartado após cada ciclo.

O material precipitado foi então seco em estufa com circulação de ar a 45 °C / 24 h. Após a secagem, o amido obtido foi cuidadosamente triturado em almofariz e pistilo e, posteriormente, peneirado em peneira de 150 mesh, visando à padronização do tamanho de partícula.

3.3.2.2 Teor de amilose

O teor de amilose foi determinado por meio de método potenciométrico, fundamentado na afinidade de complexação da amilose com iodo. O cálculo baseou-se na relação entre o índice de afinidade da amilose pelo iodo, considerado como 20 %, e o índice de afinidade do amido (IAs), conforme descrito por Demiate *et al.* (2016). A quantificação do teor de amilose foi expressa de acordo com a Equação 12:

$$\text{Amilose (\%)} = (\text{IAs} / 0,2) \times 100 \quad (12)$$

Onde: IAs: índice de afinidade do amido

Considerando que o amido foi obtido a partir da farinha de trigo, procedeu-se previamente à etapa de desengorduramento com etanol a 85 % (v/v), com o objetivo de minimizar possíveis interferências lipídicas na determinação analítica (Demiate *et al.*, 2016). Para a análise, uma alíquota de 0,1 g de amostra foi transferida para um béquer de 250 mL, à qual se adicionaram 1 mL de água deionizada e 5 mL de solução de KOH 1 N. A mistura foi mantida sob agitação, à temperatura ambiente, por 30 min, promovendo a gelatinização química do amido. Em seguida, adicionou-se alaranjado

de metila como indicador ácido-base, e a solução foi titulada com HCl 0,5 N até a mudança de coloração, visando à neutralização do meio. Posteriormente, foram incorporados 10 mL de KI 0,5 N, completando-se a massa final para 100,9 g com água deionizada. A titulação potenciométrica foi realizada em autotitulador equipado com eletrodo, bureta automática e software de controle (Tritino Plus, Metrohm, Suíça).

3.3.2.3 Propriedade de pasta

A caracterização viscoamilográfica foi empregada para avaliar as propriedades de pasta do amido nativo de trigo. As análises foram conduzidas em um Rápido Visco Analisador (RVA-4, Newport Scientific, Austrália), utilizando-se uma suspensão aquosa contendo 8 % (m/m) de amido, em base seca, com massa total de 28 g. As amostras foram aquecidas de 50 °C a 95 °C a uma taxa de 6 °C min⁻¹, seguidas de resfriamento até o término da análise, com tempo total de 23 min, conforme metodologia da ICC (1996) e Bet *et al.* (2018).

3.3.2.4 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

As curvas de gelatinização foram obtidas utilizando-se o equipamento DSC Q200 (TA Instruments, New Castle, EUA), o qual foi previamente calibrado com índio de alto grau de pureza (99,9%), apresentando ponto de fusão de 156,6 °C e entalpia de fusão ($\Delta H_{\text{fusão}}$) de 28,56 J g⁻¹. Os ensaios foram conduzidos sob atmosfera de ar, com fluxo de 50 mL min⁻¹, faixa de aquecimento de 30 a 100 °C e razão de aquecimento de 5 °C min⁻¹. As amostras foram pesadas (aproximadamente 2 mg, em base seca) e homogeneizadas com 6,0 µL de água deionizada em cadinhos de alumínio hermeticamente seláveis. Um cadinho vazio foi utilizado como referência (Bet *et al.*, 2018)

3.3.2.5 Microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV)

A caracterização morfológica das amostras foi realizada por microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV-FEG), utilizando o equipamento MIRA 3 (Tescan, República Tcheca). As amostras de amido foram cuidadosamente distribuídas sobre fita adesiva de carbono e, posteriormente, submetidas à

metalização com uma liga de ouro e paládio, por 150 s, sob corrente de 20 mA, com o objetivo de conferir condutividade elétrica à superfície. As micrografias foram obtidas a partir de um canhão de emissão de campo equipado com filamento de tungstênio, operando com tensão de aceleração de 15 kV (Ito *et al.*, 2018).

3.3.2.6 Elaboração dos pães

Os pães foram elaborados a partir de uma formulação padrão contendo 300 g de farinha de trigo, 6 g de sal, 4 g de fermento biológico, 6 g de açúcar e 180 g de água. Os ingredientes secos foram previamente homogeneizados, e a água foi adicionada gradualmente até a obtenção de uma massa uniforme. Após o preparo, a massa foi submetida à fermentação por 1 hora e 30 minutos. Em seguida, os pães foram acondicionados em estufa climatizada para pães, permanecendo por aproximadamente 1 a 2 horas, à temperatura de 35 °C, e posteriormente assados em forno previamente aquecido a 170 °C, por um período de 45 minutos. Ao longo de todo o experimento, não foram utilizados aditivos ou melhoradores, sendo adotada a mesma formulação para todas as amostras, com o objetivo de assegurar a padronização do processo e permitir a comparação direta do desempenho tecnológico dos pães.

3.3.2.7 Determinação da cor instrumental

A análise de cor foi realizada conforme a metodologia descrita no item 2.3.2.9 do Capítulo 2 (Determinação da cor instrumental) do presente trabalho.

3.3.2.8 Análise de textura

A firmeza do miolo e da casca foram medidas segundo a método AACC (74-09.01) no dia do assamento dos pães. O equipamento utilizado foi um texturômetro (TA.XT2 - Stable Micro Systems) e foi determinada a força de compressão máxima 40%, utilizando um *probe* cilíndrico com 36 mm de diâmetro.

A medida de cada fatia foi de 3 cm de espessura e foram colocadas no momento da análise duas fatias. O pico máximo de força (g) foi medido através da curva de deformação, resultando na firmeza do miolo.

3.3.2.9 Análise Estatística

Os resultados foram expressos em média $\pm$ desvio padrão, utilizando-se o software STATISTICA StatSoft 8.0.360 (Tulsa, USA). Análise de variância foi realizada com objetivo de analisar o comportamento das amostras. Foram realizados os testes de Tukey para avaliar a diferença significativa entre amostras a um nível de confiança de 95% ($p < 0,05$).

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 Teor de Amilose

Os resultados do teor de amilose estão descritos na tabela 32.

Tabela 32 - Teor de amilose dos amidos de trigo	
Amostra	Amilose (%)
Audaz PG (1)	25,05 ^{ab} $\pm$ 0,23
Audaz PF (1)	23,70 ^{bc} $\pm$ 1,04
Audaz PG (2)	25,11 ^{ab} $\pm$ 0,23
Audaz IR (2)	21,60 ^d $\pm$ 0,39
Audaz Cascavel (2)	25,00 ^{ab} $\pm$ 0,71
Audaz Mga (2)	25,26 ^a $\pm$ 0,79
Audaz PG (3)	23,41 ^c $\pm$ 0,65
Audaz IR (3)	25,31 ^{ab} $\pm$ 0,47

Fonte: a autora.

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95% ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

Os teores de amilose das amostras de amido de trigo variaram de 21,60% a 25,31%, com diferenças estatisticamente significativas entre algumas amostras ($p < 0,05$). A Audaz Mga (2) apresentou o maior teor médio de amilose (25,26%), enquanto a Audaz IR (2) apresentou o menor valor (21,60 %), diferindo significativamente das demais, o que indica uma composição relativamente mais rica em amilopectina. As amostras Audaz Mga (2) e Audaz IR (3) também exibiram valores elevados de amilose, próximos a 25 %, ao passo que as amostras 1 (23,41%) e 4 (23,70%) apresentaram valores intermediários.

A amplitude de valores observada neste estudo encontra-se dentro da faixa típica reportada para amidos de trigo comuns, geralmente situada entre 20 e 30% de amilose, dependendo do genótipo, das condições ambientais de cultivo e da metodologia analítica empregada. Estudos indicam que variações no teor de amilose

em trigo podem refletir das diferenças na proporção e na contribuição relativa dos grânulos de amido do tipo A e B, bem como na expressão das enzimas envolvidas na biossíntese do amido durante o enchimento do grão (Tester; Karkalas; Qi, 2004; Shevkani *et al.*, 2017; Oro *et al.*, 2013).

Quando comparados a outros cereais, os teores de amilose observados neste estudo posicionam o amido de trigo em uma faixa intermediária. Em amidos de milho normal (não ceroso), a literatura reporta valores geralmente entre 24 e 28%, faixa semelhante à observada para o trigo comum (Sandhu; Singh, 2007; Tester *et al.*, 2004). Em contraste, amidos de centeio apresentam, em geral, teores de amilose mais baixos, situados entre 17 e 23%, enquanto amidos de cevada tendem a apresentar valores ligeiramente mais elevados e mais variáveis, frequentemente entre 25 e 32%, em função da maior contribuição de grânulos pequenos e de diferenças na organização granular (Ao; Jane, 2007; Hansen *et al.*, 2004).

A separação estatística observada para as amostras Audaz PG (3) e Audaz PF (1) sugere uma relação amilose–amilopectina mais equilibrada quando comparadas às amostras de maior teor de amilose. Na literatura, essa condição intermediária é descrita como potencialmente associada a diferenças no comportamento do amido, especialmente em sistemas térmicos e de pasta (Eliasson; Gudmundsson, 2006; Zhang *et al.*, 2024). Assim, mesmo variações relativamente pequenas no teor de amilose podem refletir alterações estruturais no sistema amido, as quais serão exploradas em seções posteriores.

Os valores de amilose obtidos confirmam que todas as amostras avaliadas se enquadram no perfil de amido de trigo normal, distinguindo-se claramente de amidos cerosos, caracterizados por teores inferiores a 5%, e de amidos de alto teor de amilose, geralmente superiores a 35% (Tester; Morrison, 1990; Huang *et al.*, 2022). Essa classificação é fundamental para a correta interpretação do comportamento funcional do amido em sistemas térmicos e viscoamilográficos.

Esses resultados encontram-se em estreita concordância com a literatura. Zhai *et al.* (2025), ao avaliarem amidos de trigo cultivado com diferentes teores de amilose, relataram valores típicos para trigo comum situados entre 22 e 28 %, destacando essa faixa como representativa de genótipos convencionais. De forma semelhante, Song *et al.* (2024) observaram teores de amilose entre 23 e 27 % em amidos de trigo comum, independentemente da predominância de grânulos do tipo A ou B. Tao *et al.* (2025) também reportaram valores próximos, variando entre 25 e 28 %, ao investigarem

amidos normais de trigo antes e após a remoção de lipídios associados ao grânulo. Em conjunto, esses estudos reforçam que a faixa observada neste trabalho corresponde ao intervalo fisiológico esperado para amido de trigo comum.

As variações detectadas entre as amostras, embora estatisticamente significativas, podem ser consideradas modestas do ponto de vista biológico e tecnológico, refletindo diferenças inerentes ao genótipo, às condições ambientais de cultivo e às interações genótipo × ambiente. Conforme discutido por Li; Dhital; Gidley (2023), e Singh *et al.* (2007), o teor de amilose em trigo comum pode oscilar dentro de um intervalo relativamente amplo, intervalo típico reportado para esse tipo de trigo (20-30%) sem que isso implique alterações estruturais profundas que caracterizem amidos de alto teor de amilose. Assim, as diferenças observadas no presente estudo não descaracterizam o material como trigo comum, mas evidenciam a variabilidade natural desse polímero em sistemas agrícolas reais.

Observou-se que as amostras provenientes de condições de menor disponibilidade hídrica (conforme descrito no item 2.4.1 do capítulo 2), durante o ciclo de cultivo (Audaz PG, Audaz Cascavel e Audaz Mga (2)) apresentaram, de modo geral, teores de amilose mais elevados, próximos ou superiores a 25%, enquanto amostras associadas a maior regime de chuvas exibiram valores mais baixos ou intermediários, incluindo o menor teor observado no estudo (Audaz IR (2)). Esse comportamento sugere que a disponibilidade hídrica durante o enchimento do grão pode influenciar a proporção amilose–amilopectina no amido de trigo comum. A literatura aponta que condições de estresse hídrico moderado podem alterar a expressão e a atividade das enzimas envolvidas na biossíntese do amido, favorecendo relativamente a síntese de amilose em detrimento da amilopectina (Wen *et al.*, 2018; Shevkani *et al.*, 2017; Li; Dhital; Gidley, 2023). No entanto, as variações observadas permaneceram dentro da faixa fisiológica típica do trigo comum, indicando que regime hídrico pode ter atuado como fator modulador, e não determinante, da composição do amido.

Do ponto de vista funcional, a amilose desempenha papel central na definição do comportamento nutricional e tecnológico do amido. Embora o presente estudo não tenha como foco amidos de alto teor de amilose, é relevante destacar que, conforme descrito por Zhai *et al.* (2025), amidos com teores elevados desse polímero têm sido amplamente explorados como ingredientes funcionais, devido à maior formação de amido resistente (AR) e amido de digestão lenta (ADS), associados à redução da

resposta glicêmica pós-prandial. Em contraste, amidos de trigo comum, como os avaliados neste trabalho, apresentam teores intermediários de amilose, resultando em um equilíbrio na funcionalidade tecnológica, característica desejável para aplicações alimentícias convencionais.

Do ponto de vista funcional, a faixa intermediária de amilose observada para o trigo comum confere comportamento distinto daquele observado em outros cereais. Amidos de milho ceroso, com baixo teor de amilose, apresentam elevada expansão granular e menor tendência à retrogradação, enquanto amidos de cevada e de trigo com maiores teores de amilose exibem maior estabilidade estrutural e maior propensão à reassociação molecular durante o resfriamento (Eliasson; Gudmundsson, 2006; Shevkani; Singh, 2014). Assim, os valores observados neste estudo favorecem um equilíbrio entre desempenho tecnológico e estabilidade estrutural, característica desejável para aplicações alimentícias convencionais.

3.4.2 Propriedade de Pasta

A tabela 33 apresenta os valores obtidos na análise utilizando o equipamento RVA.

Tabela 33 - Resultados da análise viscoamilográfica dos amidos de trigo

Amostra	Temperatura pasta/°C	Pico Viscosidade /cP	Breakdown / cP	Setback / cP	Viscosidade Final /cP
Audaz PG (1)	92 ^a ±0,28	1081 ^c ±9,19	393 ^{cd} ±7,78	789 ^c ±0,71	1477 ^d ±2,12
Audaz PF (1)	91 ^a ±0,48	1156 ^{bc} ±2,83	416 ^{bc} ±5,66	828 ^b ±10,61	1568 ^b ±7,78
Audaz PG (2)	91 ^a ±0,21	955 ^d ±1,41	328 ^e ±3,54	792 ^c ±2,12	1419 ^e ±4,24
Audaz IR (2)	91 ^a ±0,21	944 ^d ±7,78	372 ^d ±8,49	791 ^c ±3,554	1364 ^f ± 4,24
Audaz Cascavel (2)	91 ^a ±0,62	1127 ^{bc} ±4,24	441 ^b ±4,94	817 ^{bc} ±12,02	1503 ^c ±11,31
Audaz Mga (2)	91 ^a ±0,54	1234 ^{ab} ±4,95	495 ^a ±5,66	934 ^a ±1,41	1673 ^a ±0,71
Audaz PG (3)	91 ^a ±0,28	1279 ^a ±8,49	445 ^b ±4,24	840 ^b ±7,78	1674 ^a ±12,02
Audaz IR (3)	91 ^a ±0,57	1061 ^c ±0,71	377 ^d ±1,41	823 ^{bc} ±4,95	1508 ^c ±2,83

Fonte: a autora.

Nota: Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam que houve diferença significativa ao nível de 95% (p<0,05) pelo teste de Tukey entre as cultivares avaliadas.

A temperatura de empastamento do amido de trigo determinada por RVA apresenta-se consistentemente mais elevada quando comparada à de outros cereais, refletindo diferenças estruturais e composicionais intrínsecas ao grânulo. Em amidos de trigo comum (*Triticum aestivum* L.), a literatura reporta valores tipicamente superiores a 88 °C, frequentemente situados entre 90 e 95 °C. A revisão conduzida por Huang *et al.* (2022) indica que a temperatura de empastamento do amido de trigo concentra-se majoritariamente nessa faixa, sendo influenciada pelo genótipo e pelo grau de organização estrutural do grânulo, especialmente pela elevada cristalinidade do tipo A e pela forte associação entre amilose e lipídios endógenos. De forma consistente, Zhang *et al.* (2013), ao avaliarem separadamente grânulos A e B de amido de trigo por RVA, observaram temperaturas de empastamento variando de 89,6 a 93,4 °C, associadas à maior estabilidade cristalina e à presença de complexos amilose-lipídio que retardam o inchamento do grânulo e o aumento da viscosidade.

Em contraste, amidos de outros cereais apresentam empastamento em temperaturas substancialmente mais baixas. Para o amido de milho, Sandhu e Singh (2007) reportaram temperaturas de empastamento entre 72 e 78 °C, enquanto Tester *et al.* (2004) indicam que esse evento geralmente ocorre na faixa de 65 a 80 °C, em função de diferenças na arquitetura supramolecular e na interação entre cadeias de amilopectina. De modo semelhante, o amido de cevada apresenta empastamento mais precoce, com valores entre 68 e 75 °C, atribuídos à menor estabilidade granular e à influência de constituintes não amiláceos, como β -glucanas, que modificam a dinâmica de hidratação e inchamento (Ao; Jane, 2007). No caso do centeio, Hansen *et al.* (2004) observaram temperaturas de empastamento ainda mais baixas, variando de 62 a 70 °C, associadas a grânulos menos compactos e à maior interferência de polissacarídeos não amiláceos na matriz do endosperma. Assim, a temperatura de empastamento mais elevada do amido de trigo reflete a combinação de alta organização cristalina, distribuição bimodal de grânulos e formação de complexos amilose-lipídio, exigindo maior aporte térmico para o início efetivo do empastamento.

No presente estudo, a temperatura de pasta das amostras de amido de trigo variou entre 91,2 e 92,2 °C, sem diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$), em plena concordância com os intervalos reportados na literatura para amidos de trigo nativos. Esse comportamento indica que o início do empastamento ocorreu de forma semelhante entre as amostras, sugerindo organização estrutural comparável no que se refere à energia necessária para a desestabilização inicial das regiões cristalinas

do grânulo. Em amidos de trigo, a temperatura de pasta reflete predominantemente características intrínsecas da estrutura granular e, quando pouco variável, indica que eventuais diferenças funcionais observadas nos demais parâmetros viscoamilográficos estão associadas principalmente ao comportamento do amido após o início da gelatinização (Tester; Morrison, 1990; Zhu, 2017).

Embora as temperaturas de gelatinização determinadas por DSC tenham apresentado variações limitadas entre as amostras, com valores de T_o entre aproximadamente 53 e 56 °C, T_p entre 58 e 60 °C e T_f entre 60 e 64 °C, a temperatura de empastamento obtida no RVA apresentou valores mais elevados, situando-se em torno de 91–92 °C. Essa diferença não indica inconsistência metodológica, uma vez que DSC e RVA descrevem eventos térmicos distintos. Conforme demonstrado por Ao e Jane (2007), a gelatinização do amido corresponde à primeira endoterma observada por DSC, enquanto uma segunda endoterma, associada à fusão do complexo amilose–lipídio, ocorre em temperaturas mais elevadas, com início entre 93,2 e 95,5 °C e término entre 102,2 e 109,2 °C. No mesmo estudo, amidos de trigo com maior contribuição de grânulos B apresentaram temperatura de empastamento em torno de 92,0 °C, superior àquela observada em amidos ricos em grânulos A (85,0 °C), atribuída à maior presença de lipídios e fosfolipídios e à formação de complexos helicoidais com a amilose.

Apesar da semelhança na temperatura de pasta, diferenças significativas foram observadas nos demais parâmetros viscoamilográficos. O pico de viscosidade variou de 944,5 a 1279,0 cP, refletindo diferenças na capacidade de intumescimento dos grânulos durante o aquecimento (Copeland *et al.*, 2009). O breakdown variou entre 328 e 495 cP, indicando diferenças na estabilidade da pasta frente à ação combinada de temperatura e cisalhamento mecânico, enquanto valores mais elevados refletiram maior suscetibilidade à desestruturação após o pico de viscosidade (Copeland *et al.*, 2009; Zhu, 2017; Shevkani; Singh, 2014).

O setback apresentou variação entre 789 e 934 cP, indicando diferenças na tendência de reassociação molecular durante o resfriamento da pasta, fortemente associadas à retrogradação inicial da amilose lixiviada (Eliasson; Gudmundsson, 2006; Shevkani; Singh, 2014). A viscosidade final acompanhou esse comportamento, variando de 1364 a 1674 cP, refletindo a formação de redes estruturais mais estáveis após o resfriamento.

As variações observadas nesses parâmetros podem ser parcialmente explicadas pelas diferenças no teor de amilose entre as amostras, cujo valor médio variou de aproximadamente 21,6 a 25,3%, faixa característica de amidos de trigo normal. Embora essas variações não tenham influenciado significativamente a temperatura de pasta, indicaram diferenças relevantes no comportamento do amido após o início da gelatinização, corroborando relatos de que a temperatura de empastamento está mais associada à organização supramolecular da amilopectina do que ao teor absoluto de amilose (Tester; Morrison, 1990; Zhu, 2017).

Resultados semelhantes foram descritos por Yonemoto *et al.* (2007), que observaram, em amidos de trigo isolados de diferentes genótipos, altas temperaturas de pasta (90–92 °C), associadas a elevada resistência ao cisalhamento e alta tendência à retrogradação inicial, comportamento relacionado a teores elevados de amilose (27,46–28,31%). Comparativamente, Wan *et al.* (2023) reportaram, para um amido de referência com teor de amilose de 24,2%, valores mais elevados de viscosidade máxima e breakdown. Assim, os resultados do presente estudo sugerem que os amidos de trigo avaliados apresentam restrições estruturais intrínsecas à expansão dos grânulos, possivelmente associadas à distribuição dos grânulos do tipo A e B, ao teor de amilose e à maior estabilidade da matriz cristalina, evidenciando o papel determinante da organização molecular do amido de trigo sobre seu comportamento viscoamilográfico.

3.4.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Os resultados da análise de calorimetria exploratória, estão descritos na tabela 34.

Amostra	To / °C	Tp/ °C	Tf/ °C	Tf- To/ °C	$\Delta H_{gel}/ J.g^{-1}$
Audaz PG (1)	54,54 ^b ±0,14	59,61 ^{ab} ±0,05	62,16 ^{ab} ±1,43	7,62 ^b ±0,41	6,16 ^b ±0,07
Audaz PF (1)	54,51 ^b ±0,34	59,01 ^c ±0,07	60,27 ^b ±0,05	5,76 ^e ±0,43	6,96 ^{ab} ±0,26
Audaz PG (2)	55,79 ^a ±0,15	59,92 ^{ab} ±0,33	62,80 ^a ±3,12	7,01 ^c ±0,25	4,75 ^c ±0,50
Audaz IR (2)	54,72 ^b ±0,11	59,43 ^b ±0,02	63,44 ^a ±0,03	8,72 ^a ±0,29	7,17 ^a ±0,17

Audaz Cascavel (2)	55,56 ^a ±0,23	59,65 ^{ab} ±0,03	62,61 ^{ab} ±1,11	7,05 ^c ±0,16	6,69 ^{ab} ±0,40
Audaz Mga (2)	55,53 ^a ±0,14	60,25 ^a ±0,04	63,95 ^a ±0,18	8,42 ^a ±0,75	6,79 ^{ab} ±0,31
Audaz PG (3)	53,50 ^c ±0,14	58,11 ^d ±0,05	60,42 ^b ±2,11	6,62 ^d ±0,19	7,44 ^{ab} ±0,23
Audaz IR (3)	55,86 ^a ±0,04	59,02 ^c ±0,03	62,72 ^{ab} ±0,03	6,86 ^d ±0,67	7,12 ^a ±0,03

Fonte: a autora

Nota: Valores apresentados como média ± desvio padrão. Valores seguidos pela mesma letra na mesma coluna não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os parâmetros térmicos obtidos por calorimetria exploratória diferencial evidenciaram diferenças estatisticamente significativas entre as amostras de amido de trigo, indicando variações sutis, porém relevantes, na organização estrutural dos grânulos e na estabilidade das regiões cristalinas. As amostras Audaz PG e Audaz IR (3) apresentaram temperaturas *onset* de gelatinização (T_o) entre 53,50 e 55,86 °C, temperaturas de pico (T_p) entre 58,11 e 60,25 °C e temperaturas finais (T_f) entre 60,27 e 63,95 °C, caracterizando perfis térmicos típicos de amidos de trigo nativos, embora com diferenças intrínsecas na estabilidade térmica inicial e na heterogeneidade estrutural intrínseca ao grânulo.

As amostras Audaz PG (2), Audaz Cascavel (2), Audaz Mga (2) e Audaz IR (3), que apresentaram valores mais elevados de T_o , indicam maior resistência inicial à penetração de água e ao rompimento das duplas hélices da amilopectina. Esse comportamento sugere regiões cristalinas mais organizadas ou menos acessíveis à hidratação, refletindo variações na arquitetura dos cristalitos, no empacotamento das cadeias laterais da amilopectina e na possível influência de lipídios endógenos naturalmente presentes no grânulo, conforme descrito para amidos de trigo nativos (Tester; Morrison, 1990; Eliasson; Gudmundsson, 2006).

Embora a temperatura de pico de gelatinização tenha apresentado intervalo relativamente estreito, a separação estatística observada indica diferenças na taxa de fusão das regiões cristalinas e, conseqüentemente, na homogeneidade estrutural do amido. Audaz Mga (2), que apresentou o maior valor de T_p , evidencia maior estabilidade térmica durante o estágio principal da gelatinização, sugerindo a presença de cristalitos mais estáveis ou mais uniformemente distribuídos.

A temperatura final de gelatinização (T_f) variou de 60,27 a 63,95 °C, com valores mais elevados observados nas amostras Audaz IR (2) e Audaz Mga (2). T_f

mais alta indica que a completa desorganização das regiões cristalinas ocorre ao longo de uma faixa térmica mais extensa, refletindo maior heterogeneidade estrutural intrínseca ao grânulo, com coexistência de domínios cristalinos de diferentes estabilidades térmicas (Zhu, 2015; Shevkani *et al.*, 2017).

Essa interpretação é reforçada pela faixa de gelatinização ($T_f - T_o$), que variou entre 5,76 e 8,72 °C, sendo mais ampla nas amostras Audaz IR (2) e Audaz Mga (2), o que indica maior dispersão das energias necessárias para a transição cristalina–amorfa. Em amidos de trigo, amplitudes térmicas mais elevadas têm sido associadas à variabilidade no tamanho dos cristalitos e à contribuição diferencial de grânulos do tipo A e B no perfil térmico global (Tester; Karkalas; Qi, 2004).

A tabela 35 apresenta os resultados dos parâmetros térmicos de dissociação de complexo amilose – lipídio dos amidos de trigo.

Tabela 35 - Parâmetros térmicos de dissociação de complexos amilose-lipídio dos amidos de trigo

Amostra		T_o / °C	T_p / °C	T_f / °C	$T_f - T_o$ / °C	$\Delta H_{dissoc} / J.g^{-1}$
Audaz (1)	PG	85,22	88,11	96,70	11,48	0,07
Audaz (1)	PF	87,51	89,97	90,02	2,51	2,94
Audaz (2)	PG	85,04	91,24	96,20	11,16	2,11
Audaz (2)	IR	90,20	93,27	96,70	6,50	0,55
Audaz Cascavel (2)		89,24	90,08	92,07	2,83	0,06
Audaz (2)	Mga	92,42	94,98	96,44	4,02	0,09
Audaz (3)	PG	88,08	89,26	90,20	2,12	0,25
Audaz (3)	IR	90,25	93,65	96,93	6,68	0,05

Fonte: a autora

Além do evento endotérmico associado à gelatinização, observou-se na primeira varredura de DSC um segundo evento térmico em temperaturas mais elevadas ($T_o = 85,04\text{--}92,42$ °C; $T_p = 88,11\text{--}94,98$ °C; $T_f = 90,02\text{--}96,93$ °C), característico da dissociação de complexos amilose–lipídio formados no interior dos grânulos de amido. Essa transição tem sido amplamente descrita como a fusão de complexos de inclusão do tipo V, nos quais cadeias lineares de amilose se organizam em hélices simples capazes de acomodar moléculas lipídicas, resultando em

estruturas termicamente mais estáveis do que as regiões cristalinas da amilopectina responsáveis pela gelatinização convencional (Huang, 2020).

A variação observada nos valores de entalpia associados a esse evento ($\Delta H_{\text{dissoc}} = 0,05 - 2,94 \text{ J g}^{-1}$) indica diferenças na quantidade relativa e no grau de organização dos complexos amilose–lipídio entre as amostras. Valores reduzidos de ΔH sugerem menor contribuição dessas associações ou complexos menos ordenados, enquanto entalpias mais elevadas, como as observadas para as amostras Audaz PF (1) e Audaz PG (2), refletem maior participação relativa e maior estabilidade estrutural dessas interações, demandando maior aporte energético para sua dissociação (Huang, 2020).

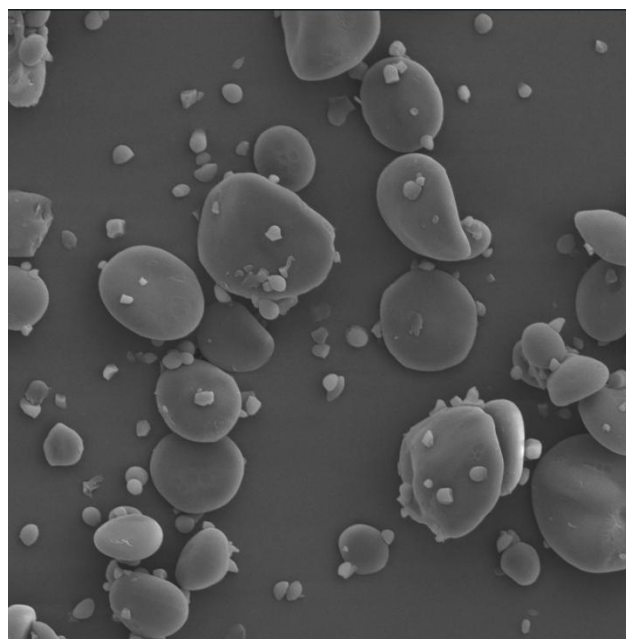
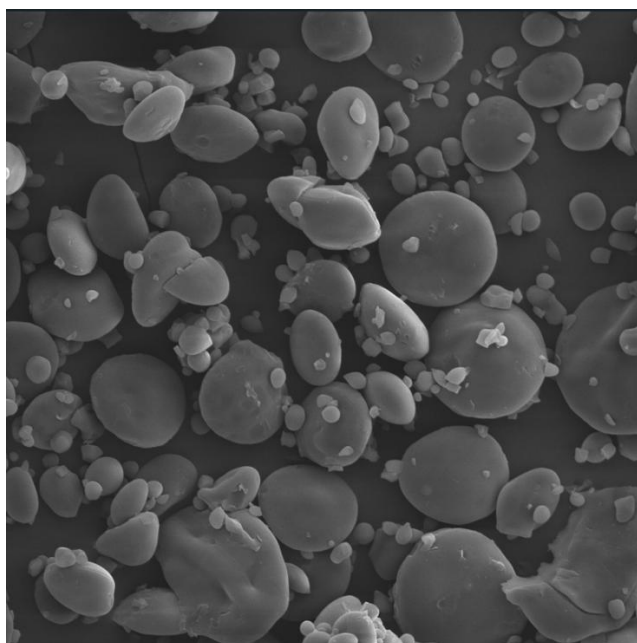
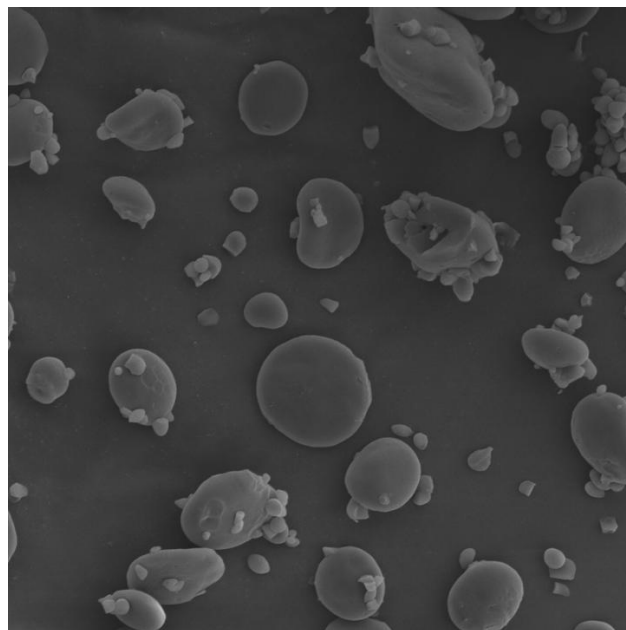
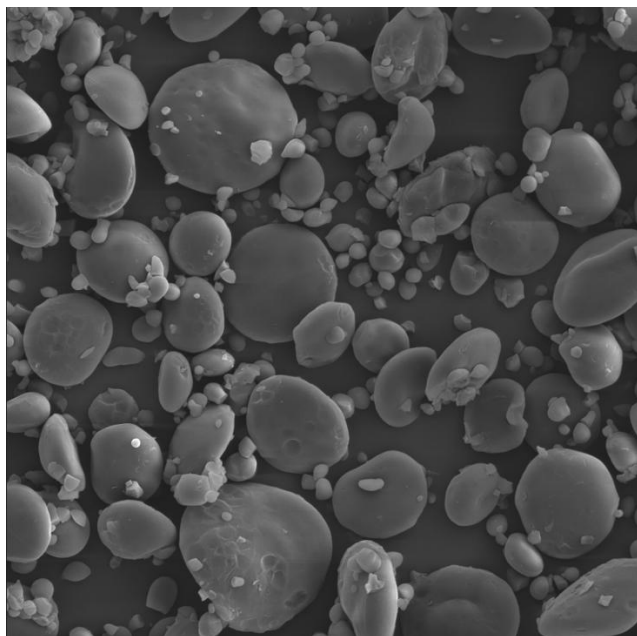
Estudos indicam que a formação e a estabilidade térmica dos complexos amilose–lipídio dependem do teor de amilose, da natureza e do comprimento da cadeia lipídica, bem como do grau de organização estrutural do amido na presença de lipídios endógenos. Esses complexos representam uma forma particular de amido modificado por lipídios, capaz de alterar significativamente as propriedades térmicas, estruturais e funcionais do amido, incluindo sua estabilidade térmica e comportamento durante o armazenamento (Zhao *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2023; Huang, 2020).

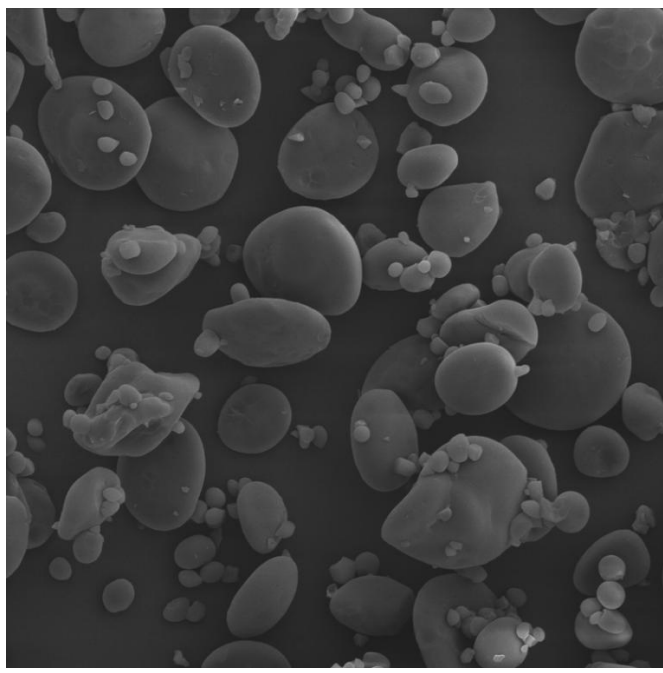
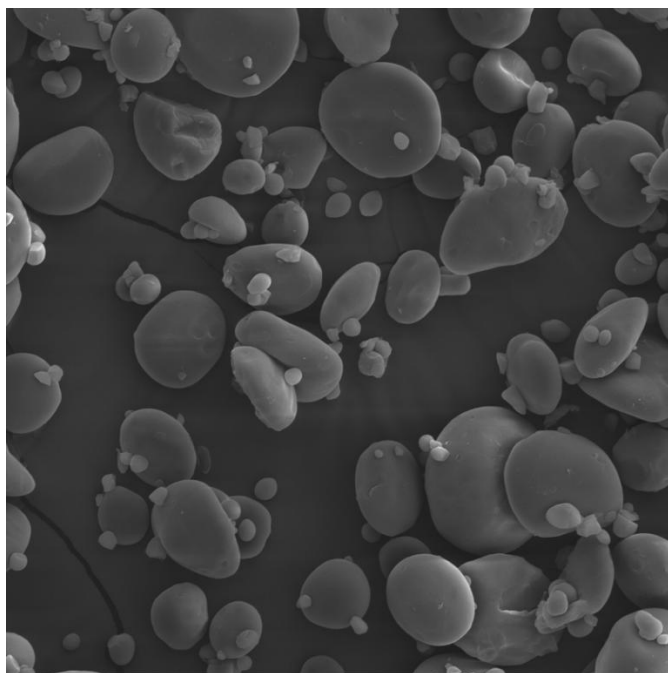
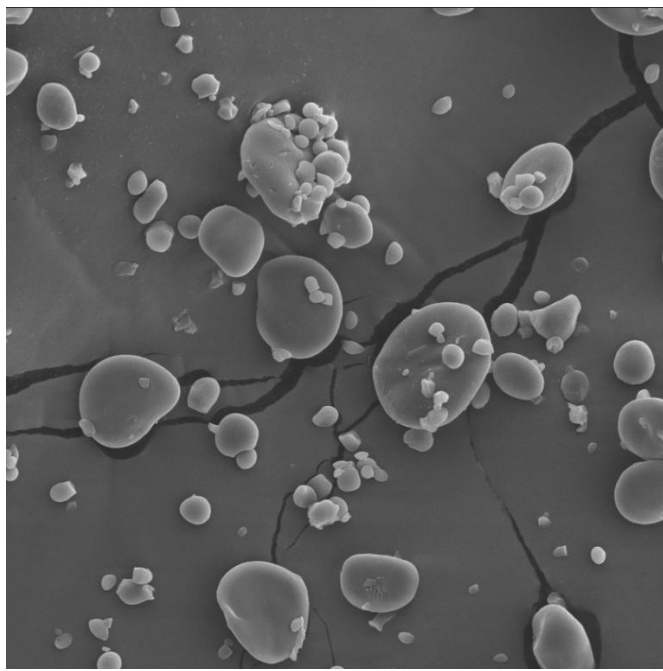
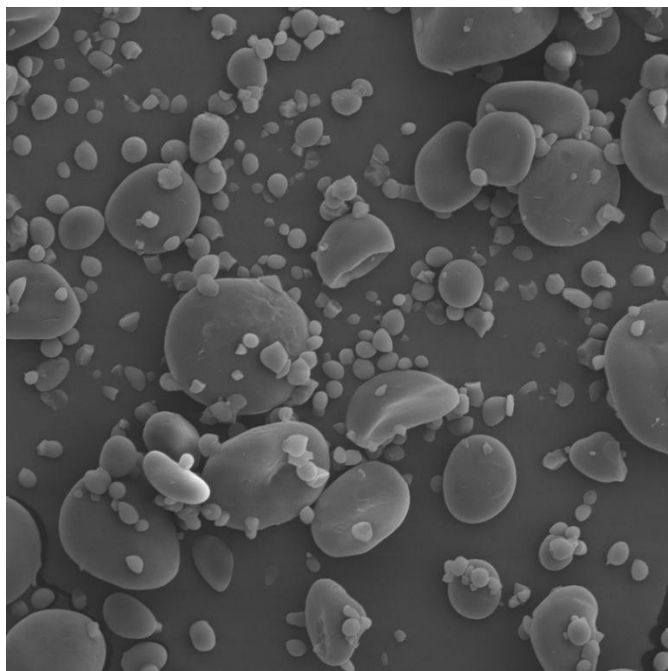
Dessa forma, a dissociação dos complexos amilose–lipídio observada neste estudo deve ser interpretada em conjunto com os parâmetros de gelatinização, uma vez que essas interações estruturais podem influenciar a estabilidade térmica do amido e a extensão das transições endotérmicas detectadas por DSC.

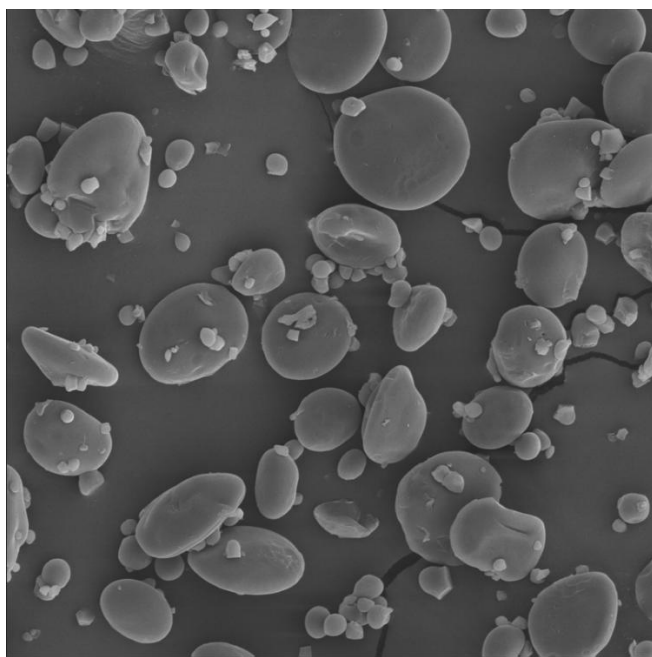
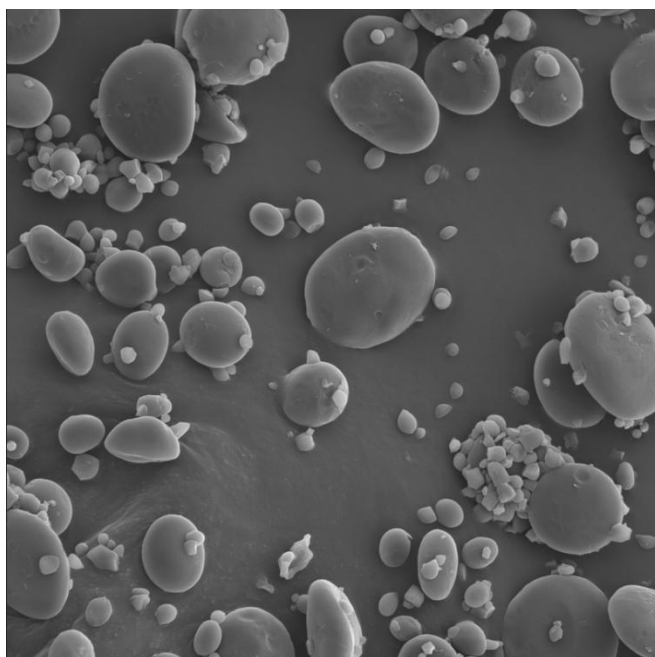
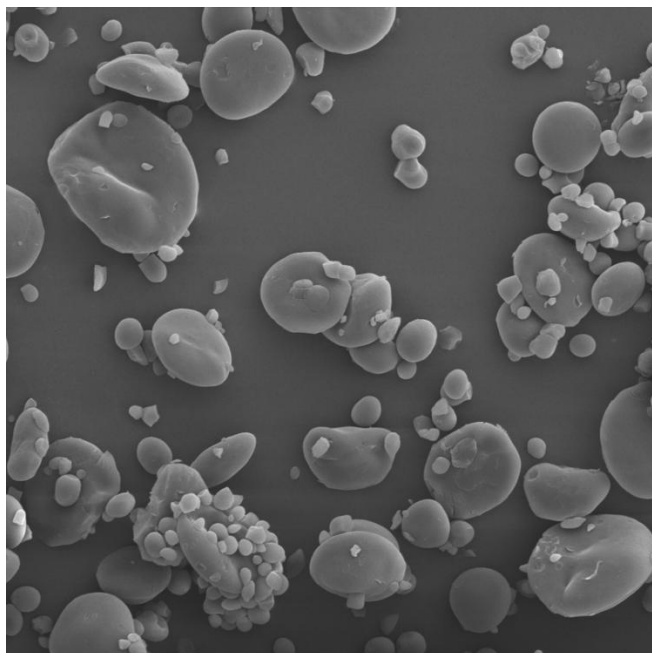
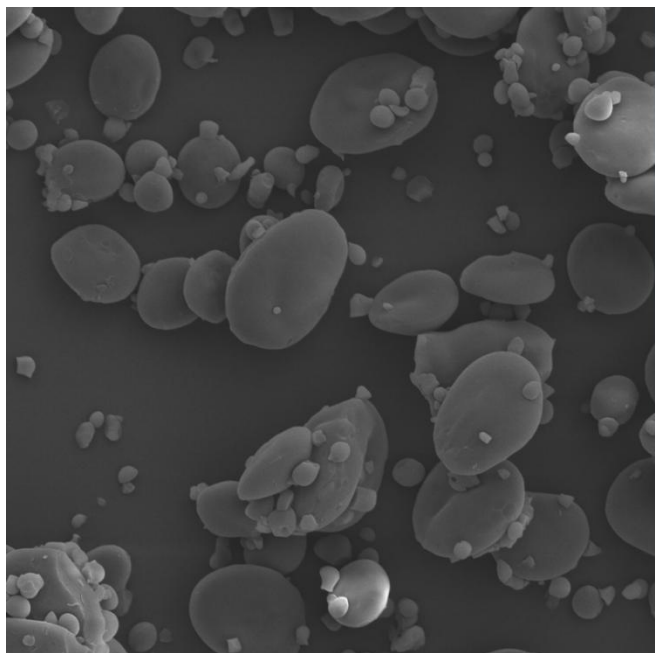
3.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura com Emissão de Campo (MEV)

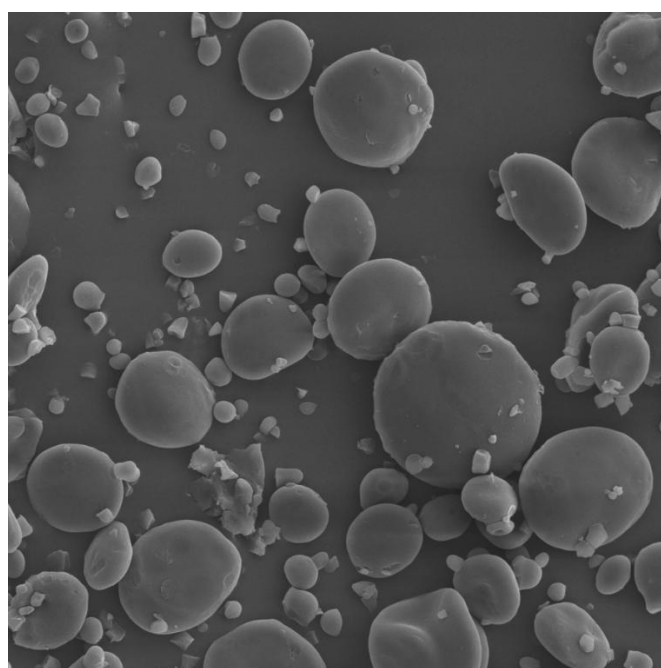
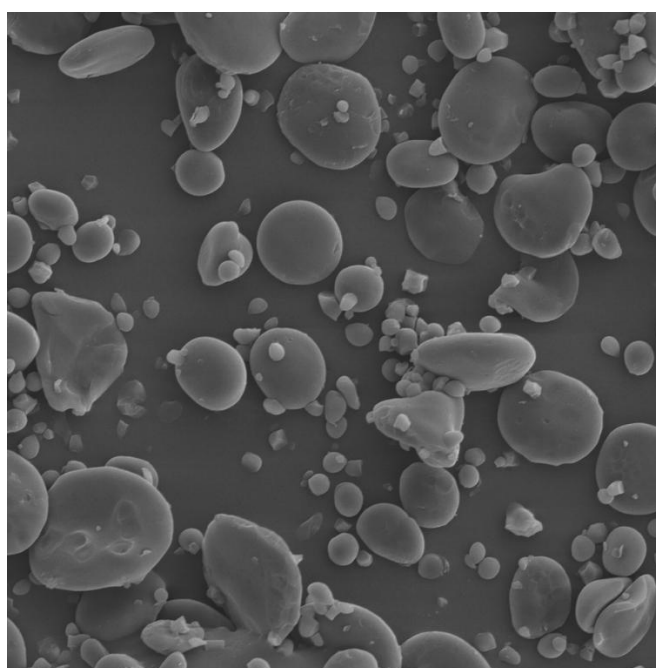
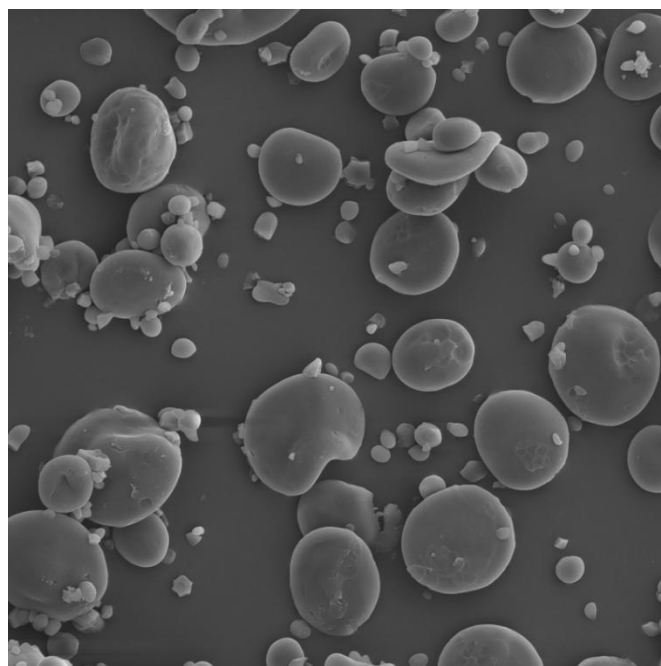
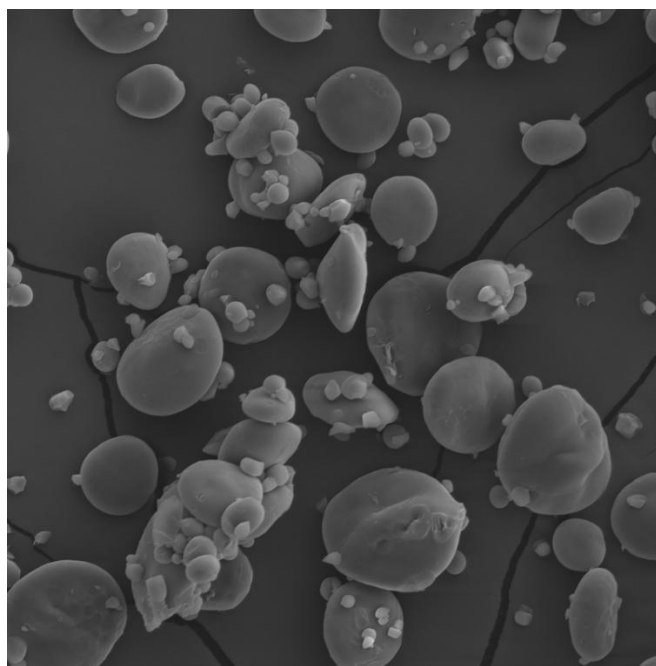
Os grânulos de amido de trigo apresentaram distribuição heterogênea de tamanhos, com predominância de grânulos grandes de formato lenticular ou discoidal, característicos do tipo A, e grânulos menores de formato esférico ou poligonal, correspondentes ao tipo B. De modo geral, os grânulos exibiram superfície lisa e bem definida, embora alguns apresentassem leve rugosidade superficial, possivelmente associada à presença de resíduos estruturais ou a particularidades do processo de extração (Figura 9).

Figura 9 - Imagens microscópicas de amostras de amido de trigo









Fonte: a autora

Nota: as linhas representam cada amostra, sendo representado na sequência por: Audaz PG (1), Audaz PF (1), Audaz PG (2), Audaz IR (2), Audaz Cascavel (2), Audaz Mga (2), Audaz PG (3), Audaz IR (3).

3.4.5 Elaboração dos Pães

As tabelas 36 e 37 apresentam os valores dos pesos iniciais e finais, e o volume obtido, respectivamente.

Tabela 36 - Peso inicial e final dos pães produzidos

Amostra	Peso Inicial (kg)	Peso Final (kg)
Audaz PG (1)	0,506	0,429
Audaz PF (1)	0,501	0,425
Audaz PG (2)	0,517	0,431
Audaz IR (2)	0,531	0,451
Audaz Cascavel (2)	0,501	0,435
Audaz Mga (2)	0,514	0,451
Audaz PG (3)	0,497	0,428
Audaz IR (3)	0,518	0,452

Nota: a autora

Tabela 37 - Volume final dos pães

Amostra	Volume (cm ³)
Audaz PG (1)	1237 ^a ± 89,09
Audaz PF (1)	1205a ^b ± 79,22
Audaz PG (2)	967 ^c ± 39,23
Audaz IR (2)	995 ^{bc} ± 59,19
Audaz Cascavel (2)	1025 ^{bc} ± 64,40
Audaz Mga (2)	956 ^{bc} ± 170,27
Audaz PG (3)	843 ^c ± 219,64
Audaz IR (3)	1126 ^{ab} ± 116,87

Nota: a autora.

A perda de massa durante o forneamento variou aproximadamente entre 12 e 17 %, valores compatíveis com pães de trigo elaborados sob condições controladas e associados principalmente à evaporação de água e à liberação de gases durante o aquecimento. Essa perda reflete a migração de água no sistema amido–glúten e a reorganização estrutural que ocorre concomitantemente à gelatinização do amido e à desnaturação das proteínas do glúten, conforme descrito por Van Rooyen *et al.* (2023). No entanto, a análise integrada dos resultados indica que a perda de massa, considerada isoladamente, não explica o desempenho volumétrico dos pães.

Observou-se que amostras com volumes elevados apresentaram perdas de massa semelhantes ou até superiores às de amostras com menor volume, evidenciando que o volume final do pão depende fundamentalmente da capacidade da matriz amido–glúten em sustentar a expansão gasosa antes da fixação estrutural do miolo. Durante o forneamento, a sobreposição entre a gelatinização do amido e a desnaturação do glúten representa um momento crítico, sendo o atraso relativo da gelatinização um fator favorável à maior expansão volumétrica, mesmo quando a evaporação de água não é minimizada (Van Rooyen *et al.*, 2023; Corrado *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a funcionalidade do amido emerge como elemento central para a interpretação do volume dos pães. Sistemas com maior contribuição funcional da amilopectina favorecem o inchamento granular e retardam a rigidez estrutural, enquanto teores mais elevados de amilose tendem a restringir o inchamento e antecipar a reorganização estrutural, limitando a expansão da massa. Essa interpretação é consistente com os resultados obtidos por RVA e DSC, que permitem compreender, respectivamente, a estabilidade da pasta, a resistência dos grânulos à ruptura e o intervalo térmico e energético associado à gelatinização e à retrogradação do amido (Shevkani *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2022).

De forma integrada, os resultados demonstram que o volume do pão não está associado a um único parâmetro isolado, mas resulta do equilíbrio entre comportamento viscoamilográfico, transições térmicas do amido, dinâmica de reorganização estrutural e migração de água durante o forneamento. Amostras que apresentaram gelatinização mais gradual e menor tendência à retrogradação imediata foram capazes de sustentar a expansão gasosa por mais tempo, resultando em maiores volumes, em concordância com descrições recentes para sistemas amido-glúten em pães de trigo (Van Rooyen *et al.*, 2023; Corrado *et al.*, 2023).

3.4.5.1 Análise de cor

As tabelas 38 e 39 apresentam a análise de cor da casta e do miolo respectivamente.

Tabela 38 - Valores da análise de cor da casca dos pães

Amostra	L*	a*	b*	C*	H°
Audaz PG (1)	44,14 ^{bc} ±1,22	17,58 ^c ±0,21	29,57 ^{bc} ±0,49	34,40 ^d ±0,35	59,27 ^c ±0,15
Audaz PF (1)	43,69 ^{bc} ±0,14	18,70 ^a ±0,23	30,45 ^b ±0,19	35,73 ^c ±0,38	58,45 ^d ±0,14
Audaz PG (2)	41,06 ^c ±2,11	18,08 ^{ab} ±0,36	27,39 ^{cd} ±1,63	32,82 ^e ±0,21	56,57 ^e ±0,13
Audaz IR (2)	44,26 ^{bc} ±3,25	17,88 ^{bc} ±0,21	26,90 ^d ±5,44	32,30 ^e ±0,18	56,39 ^e ±0,08
Audaz Cascavel (2)	50,09 ^a ±2,85	16,85 ^d ±1,16	33,99 ^a ±0,25	37,94 ^a ±0,11	63,63 ^a ±0,02
Audaz Mga (2)	43,96 ^{bc} ±2,74	18,81 ^a ±0,18	30,71 ^b ±2,33	36,01 ^b ±0,09	58,51 ^d ±0,16
Audaz PG (3)	42,73 ^c ±0,30	18,93 ^a ±0,20	28,07 ^c ±0,07	33,86 ^e ±0,17	56,00 ^e ±0,11

Audaz IR	45,64 ^b ±0,76	17,58 ^c ±0,22	31,64 ^b ±0,11	36,20 ^b ±0,12	60,94 ^b ±0,09
(3)					

Fonte: a autora

Nota: Valores apresentados como média ± desvio padrão. Valores seguidos pela mesma letra na mesma coluna não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os parâmetros colorimétricos da casca apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as amostras ($p < 0,05$), demonstrando que tanto as características das farinhas quanto as condições térmicas do forneamento influenciaram diretamente o desenvolvimento da coloração superficial dos pães. A formação da cor da casca resulta de um conjunto complexo de transformações físico-químicas, especialmente das reações de escurecimento não enzimático, como a reação de Maillard e a caramelização de açúcares, que ocorrem de maneira mais intensa nas regiões superficiais submetidas a elevadas temperaturas e menor atividade de água.

A amostra Audaz Cascavel (2) destacou-se pelos maiores valores de luminosidade (L^*) e do componente amarelo (b^*), indicando uma casca mais clara e com tonalidade dourada mais evidente. Esse comportamento sugere menor intensidade de escurecimento superficial, possivelmente associada a uma desidratação menos intensa durante o forneamento ou a diferenças na disponibilidade de açúcares redutores e compostos nitrogenados na superfície da massa. A predominância de tons mais amarelados normalmente está relacionada à formação inicial de compostos intermediários provenientes das reações térmicas, conferindo à casca aspecto visual mais uniforme e menos escurecido.

Por outro lado, as amostras Audaz PG (3), Audaz PF (1) e Audaz Mga (2) apresentaram maiores valores de a^* , indicando maior intensidade de tonalidades avermelhadas na casca. Esse resultado evidencia maior avanço das reações de Maillard, favorecendo a formação de melanoidinas, pigmentos responsáveis pelas colorações marrons e avermelhadas típicas de produtos panificados submetidos a maior intensidade térmica. Além disso, valores mais elevados de a^* podem refletir diferenças na transferência de calor, na retenção de umidade da massa e na composição química das farinhas, fatores que interferem diretamente na velocidade e na intensidade do escurecimento superficial.

As menores médias de luminosidade observadas nas amostras Audaz PG (2) e Audaz PG (3) indicam cascas mais escuras, possivelmente associadas a maior perda de umidade superficial e maior concentração de compostos resultantes das

reações térmicas. A redução de L^* geralmente acompanha o aumento da intensidade do forneamento e da formação de pigmentos escuros, refletindo maior desenvolvimento da crosta. Esse comportamento também pode estar relacionado à estrutura da massa e à dinâmica de migração de água entre o miolo e a superfície durante o aquecimento.

Os valores de croma (C^*) evidenciaram diferenças na intensidade e na saturação da cor entre as amostras. A amostra Audaz Cascavel (2) apresentou maior intensidade cromática, indicando coloração mais viva e visualmente mais intensa, enquanto as amostras Audaz PG (2), Audaz IR (2) e Audaz PG (3) apresentaram menores valores, sugerindo tonalidades menos saturadas. Essas diferenças demonstram que a extensão das transformações químicas superficiais variou entre os tratamentos, refletindo respostas distintas ao forneamento.

Em relação ao ângulo Hue (H°), a amostra Audaz Cascavel (2) apresentou os maiores valores, indicando predominância de tonalidades mais amareladas, enquanto as menores médias observadas para Audaz PG (3), Audaz IR (2) e Audaz PG (2) sugerem deslocamento da coloração para regiões mais avermelhadas do espectro. Essas variações reforçam que o equilíbrio entre os componentes vermelho e amarelo da casca foi influenciado pela intensidade das reações térmicas e pela composição superficial da massa.

De forma geral, os resultados demonstram que a coloração da casca constitui um parâmetro altamente sensível às propriedades tecnológicas das farinhas e às condições de forneamento. A interação entre composição química, retenção de umidade, transferência de calor e desenvolvimento estrutural da crosta influencia diretamente a aparência final dos pães, refletindo atributos importantes não apenas do ponto de vista tecnológico, mas também sensorial, uma vez que a cor da casca representa um dos principais fatores associados à percepção de qualidade e aceitação pelo consumidor.

Tabela 39 - Valores da análise de cor do miolo dos pães

Amostra		L*	a*	b*	C*	H°
Audaz PG (1)		68,92 ^{bc} ±0,19	2,09 ^d ±0,06	23,44 ^b ±0,35	23,53 ^b ±0,12	84,90 ^b ±0,13
Audaz PF (1)		68,34 ^{bc} ±1,29	3,45 ^b ±0,18	25,15 ^a ±0,23	25,39 ^a ±0,19	82,19 ^d ±0,15
Audaz PG (2)		70,73 ^b ±0,47	2,44 ^c ±0,05	21,61 ^d ±0,29	21,75 ^d ±0,16	83,56 ^c ±0,06
Audaz IR (2)		67,13 ^c ±0,58	3,93 ^a ±0,07	25,69 ^a ±0,34	25,99 ^a ±0,12	81,30 ^e ±0,02
Audaz Cascavel (2)		70,10 ^b ±0,02	2,73 ^c ±0,03	22,69 ^{bc} ±0,41	22,85 ^c ±0,15	83,14 ^c ±0,15
Audaz Mga (2)		68,30 ^{bc} ±0,39	3,54 ^b ±0,04	22,16 ^c ±0,34	22,44 ^c ±0,11	80,92 ^f ±0,06
Audaz PG (3)		74,49 ^a ±0,85	1,83 ^e ±0,16	23,91 ^b ±0,01	23,98 ^b ±,16	85,62 ^a ±0,05
Audaz IR (3)		65,18 ^d ±0,88	4,33 ^a ±0,07	22,82 ^{bc} ±0,41	23,23 ^b ±0,14	79,26 ^g ±0,04

Fonte: a autora

Nota: Valores apresentados como média ± desvio padrão. Valores seguidos pela mesma letra na mesma coluna não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os parâmetros colorimétricos do miolo indicaram diferenças estatisticamente significativas entre as amostras ($p < 0,05$), evidenciando que as características estruturais da massa e o comportamento tecnológico das farinhas influenciaram diretamente a aparência interna dos pães. A coloração do miolo está associada não apenas à composição química da farinha, mas também à organização da estrutura alveolar, à retenção de umidade e à forma como a luz é dispersa na matriz formada durante o forneamento.

A luminosidade (L^*) variou amplamente entre as amostras, com a amostra Audaz PG (3) apresentando miolo significativamente mais claro e a amostra Audaz IR (3) os menores valores de L^* . Miolos com maiores valores de L^* geralmente estão associados a estruturas mais aeradas, homogêneas e com melhor dispersão da luz, favorecendo aparência visual mais clara. Além disso, a maior luminosidade pode refletir diferenças na gelatinização do amido e na distribuição das células gasosas formadas durante a fermentação e expansão da massa. Em contraste, menores valores de L^* indicam miolos visualmente mais escuros e densos, possivelmente relacionados a maior compactação estrutural, menor expansão volumétrica e maior retenção de pigmentos provenientes da farinha.

O parâmetro a^* evidenciou maior intensidade avermelhada nas amostras Audaz IR (2) e Audaz IR (3), sugerindo maior desenvolvimento de tonalidades quentes

no miolo. Embora as reações de escurecimento ocorram predominantemente na superfície do pão, pequenas variações no componente avermelhado do miolo podem estar associadas à composição da farinha, à distribuição de umidade e à intensidade das transformações térmicas nas regiões internas da massa. Valores mais elevados de a^* também podem refletir diferenças na organização da matriz proteica e na interação entre proteínas e amido gelatinizado durante o forneamento.

O componente b^* indicou maior tonalidade amarelada nas amostras Audaz IR (2) e Audaz PF (1), sugerindo maior predominância de pigmentos amarelos no miolo. Essa coloração pode estar relacionada à presença de carotenoides naturais da farinha, bem como ao grau de preservação desses compostos ao longo do processamento. Além disso, a intensidade do amarelo também pode ser influenciada pela estrutura do miolo e pelo teor de umidade residual, fatores que modificam a reflexão da luz na matriz interna do pão.

Os valores de croma (C^*) demonstraram diferenças na intensidade da cor entre as amostras, indicando que alguns miolos apresentaram coloração mais viva e saturada, enquanto outros exibiram tonalidades mais suaves. As amostras Audaz IR (2) e Audaz PF (1) apresentaram os maiores valores de C^* , indicando maior intensidade cromática, possivelmente associada à combinação entre maior tonalidade amarelada e componente avermelhado mais pronunciado. Em contrapartida, a amostra Audaz PG (2) apresentou menor intensidade de cor, sugerindo miolo visualmente mais neutro.

Em relação ao ângulo Hue (H°), a amostra Audaz PG (3) apresentou os maiores valores, indicando predominância de tonalidades mais amareladas e claras, enquanto a amostra Audaz IR (3) apresentou os menores valores, sugerindo deslocamento da coloração para tonalidades mais avermelhadas. Essas diferenças demonstram que o equilíbrio entre os componentes vermelho e amarelo variou de forma importante entre os pães, refletindo diferenças estruturais e físico-químicas da matriz do miolo.

De maneira geral, as variações observadas nos parâmetros colorimétricos refletem diferenças na organização da matriz interna dos pães, especialmente na interação entre amido gelatinizado, proteínas do glúten e água durante o forneamento. A estrutura alveolar formada ao longo da fermentação e da expansão térmica influencia diretamente a dispersão da luz no miolo, modificando sua aparência visual. Assim, a cor do miolo representa um importante indicador indireto da qualidade tecnológica do pão, estando associada à textura, ao volume específico e à

uniformidade estrutural do produto final. A Figura 10 apresenta os pães elaborados e permite visualizar as diferenças observadas entre as amostras.

Figura 10- Pães elaborados com farinha de trigo







Fonte: a autora.

Nota: as linhas representam cada amostra, sendo representado na sequência por: Audaz PG (1), Audaz PF (1), Audaz PG (2), Audaz IR (2), Audaz Cascavel (2), Audaz Mga (2), Audaz PG (3), Audaz IR (3).

3.4.5.2 Análise de textura

A tabela 40 mostra a análise de dureza do miolo e da casca dos pães.

Tabela 40 - Valores da análise de dureza do miolo e da casca dos pães

Amostra	Dureza (N) miolo	Dureza (N) casca
Audaz PG (1)	23,08 ^e ± 0,93	92,90 ^d ±11,27
Audaz PF (1)	29,59 ^e ±0,36	109,95 ^d ±0,63
Audaz PG (2)	64,93 ^c ±1,80	156,38 ^b ±34,10
Audaz IR (2)	36,13 ^d ±6,03	145,90 ^{bc} ±16,15
Audaz Cascavel (2)	50,28 ^{cd} ±3,33	157,52 ^b ±15,19
Audaz Mga (2)	72,31 ^b ±6,67	131,60 ^c ±7,27
Audaz PG (3)	87,25 ^a ±8,40	194,37 ^a ±54,28
Audaz IR (3)	50,60 ^{cd} ±11,22	125,14 ^c ±23,98

Fonte: a autora

Nota: Valores apresentados como média ± desvio padrão. Valores seguidos pela mesma letra na mesma coluna não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A dureza do miolo, expressa em Newton, apresentou diferenças estatisticamente significativas entre as amostras ($p < 0,05$), evidenciando variações relevantes na organização estrutural interna dos pães. A amostra Audaz PG (3) exibiu o maior valor médio de dureza (87,25 N), indicando um miolo mais firme e resistente à compressão, característica frequentemente associada à formação de uma matriz amido-glúten mais compacta e menos aerada. Esse comportamento pode estar relacionado à menor expansão volumétrica da massa durante a fermentação e o forneamento, resultando em células gasosas menores e mais densamente distribuídas. Além disso, o aumento da dureza pode refletir maior reorganização molecular do amido após o resfriamento, especialmente devido à retrogradação inicial da amilose, que contribui para o endurecimento da estrutura do miolo.

Em contraste, a amostra Audaz PG (1) apresentou o menor valor de dureza (23,08 N), refletindo um miolo mais macio, elástico e com maior capacidade de deformação. Esse comportamento sugere maior incorporação e retenção de gases durante a fermentação, favorecendo a formação de uma estrutura alveolar mais aberta e homogênea. Mios menos rígidos normalmente estão associados a maior expansão da massa e melhor equilíbrio entre gelatinização do amido e desenvolvimento da rede proteica, promovendo textura mais leve e maior aceitação sensorial.

As amostras Audaz PG (2) e Audaz Mga (2) apresentaram valores intermediários a elevados de dureza, sugerindo uma estrutura interna mais organizada

e coesa. Esse comportamento pode estar associado a diferenças na capacidade de absorção de água da farinha, no teor e qualidade do glúten, bem como no nível de amido danificado. Farinhas com maior absorção hídrica tendem a formar massas mais consistentes, capazes de modificar a viscosidade da fase contínua e influenciar diretamente a textura final do pão. Além disso, maiores níveis de gelatinização do amido durante o forneamento podem favorecer a formação de um miolo mais firme, especialmente em sistemas com menor expansão volumétrica.

As amostras Audaz PG (1) e Audaz PF (1), agrupadas estatisticamente, destacaram-se pela baixa dureza e reduzido desvio-padrão, indicando elevada homogeneidade estrutural do miolo. O menor desvio-padrão sugere maior uniformidade na distribuição das células gasosas e estabilidade do sistema massa durante a fermentação e o forneamento. Essa uniformidade estrutural geralmente está associada a melhor desempenho tecnológico da farinha e maior estabilidade da rede de glúten frente às tensões mecânicas e térmicas do processo.

A variabilidade observada na amostra Audaz IR (3), evidenciada pelo elevado desvio-padrão, sugere heterogeneidade na estrutura interna do miolo, possivelmente relacionada à distribuição irregular das bolhas de gás ou à ocorrência de colapso parcial de algumas regiões da massa durante o forneamento. Essa heterogeneidade também pode indicar diferenças locais na retenção de umidade e no grau de gelatinização do amido, resultando em regiões com diferentes níveis de resistência mecânica. Adicionalmente, fatores relacionados às condições ambientais de cultivo, como temperatura e disponibilidade hídrica durante o desenvolvimento do grão, podem ter influenciado a composição da farinha e, conseqüentemente, a formação estrutural do pão.

De forma geral, os resultados confirmam que a dureza do miolo constitui um parâmetro altamente sensível às modificações estruturais induzidas pelas características da farinha, pelo processamento e pelas interações entre amido, proteínas e água. A textura do miolo resulta diretamente do equilíbrio entre expansão gasosa, gelatinização do amido, coagulação proteica e redistribuição de umidade durante o forneamento, refletindo de maneira significativa a qualidade tecnológica final do pão.

A dureza da casca apresentou valores substancialmente superiores aos observados para o miolo, refletindo a intensa densificação estrutural promovida pelas elevadas temperaturas superficiais e pela rápida perda de umidade durante o

forneamento. A formação da crosta envolve processos simultâneos de desidratação, gelatinização superficial do amido, desnaturação proteica e reações de escurecimento não enzimático, especialmente a reação de Maillard, que contribuem para o aumento da rigidez estrutural da casca.

A amostra Audaz PG (3) destacou-se com o maior valor médio de dureza da casca (194,37 N), indicando uma crosta mais rígida e resistente à deformação. Esse comportamento pode estar associado à formação de uma camada superficial mais espessa e menos hidratada, resultante de maior migração de água do interior do pão para a superfície durante o forneamento. Além disso, cascas mais duras frequentemente refletem maior intensidade de secagem superficial e maior compactação da estrutura externa, fatores que também influenciam diretamente a crocância e a resistência mecânica da crosta.

As amostras Audaz PG (2) e Audaz Cascavel (2) apresentaram valores intermediários elevados de dureza, sugerindo comportamento estrutural semelhante. Esse resultado pode indicar taxas de transferência de calor e evaporação de água comparáveis entre essas formulações, promovendo níveis similares de desidratação superficial. A semelhança estatística observada entre essas amostras também sugere comportamento tecnológico próximo quanto à formação da crosta durante o forneamento.

Em contraste, as amostras Audaz PG (1) e Audaz PF (1) exibiram os menores valores de dureza da casca, agrupando-se estatisticamente. Esses resultados indicam a formação de uma crosta menos rígida e potencialmente mais fina, possivelmente devido à menor perda de umidade superficial ou a menor compactação estrutural durante o forneamento. Cascas menos duras podem estar relacionadas à maior retenção de umidade no sistema e à menor intensidade das reações térmicas superficiais.

O reduzido desvio-padrão observado para a amostra Audaz PF (1) evidencia elevada uniformidade estrutural da casca, sugerindo maior estabilidade térmica durante o forneamento e distribuição mais homogênea do calor. Por outro lado, a elevada variabilidade registrada para a amostra Audaz PG (3) pode indicar heterogeneidade na espessura da crosta ou diferenças locais na intensidade de desidratação superficial, possivelmente decorrentes de variações na circulação de calor dentro do forno ou diferenças estruturais da massa. Os resultados obtidos demonstram que a dureza da casca constitui um parâmetro altamente dependente

das condições de forneamento e da dinâmica de migração de água entre miolo e superfície. A formação da crosta representa um fenômeno complexo, influenciado simultaneamente pela composição da farinha, pelas propriedades reológicas da massa, pela retenção de água e pelas condições térmicas aplicadas durante o processo. Dessa forma, diferenças observadas entre as amostras refletem não apenas características estruturais intrínsecas das farinhas, mas também a interação entre gelatinização do amido, formação da rede proteica e intensidade das transformações térmicas ocorridas durante o forneamento.

3.4.5.3 Avaliação conjunta do desempenho dos amidos e as características da farinha de trigo

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos a partir de análises instrumentais da farinha e do amido, bem como de ensaios de panificação conduzidos sob condições experimentais controladas. A elaboração dos pães foi realizada com formulação padrão e procedimento único, de caráter experimental, utilizando-se um modelo de pão caseiro, uma vez que a quantidade de amostra disponível não permitiu a adoção de formulações padronizadas para pães de referência tecnológica, como o pão francês. Dessa forma, parâmetros do produto final, como peso, volume e textura do pão, não devem ser interpretados como indicadores absolutos de qualidade panificável, mas sim como respostas comparativas do sistema farinha, massa e pão, às diferenças composicionais e estruturais das amostras avaliadas. Nesse contexto, os resultados de panificação são utilizados como ferramentas auxiliares de interpretação, permitindo relacionar o comportamento observado durante o preparo das massas e o forneamento com os parâmetros físico-químicos, reológicos e viscoamilográficos previamente determinados, sem a pretensão de classificar tecnologicamente os pães obtidos segundo padrões industriais específicos.

Durante o preparo das massas, observou-se que as amostras Audaz PG (3), Audaz Mga (2) e Audaz PG (2) apresentaram comportamento mais rígido e menor extensibilidade, mesmo sob a mesma adição de água, enquanto as demais amostras originaram massas mais moles e pegajosas. Essa percepção tecnológica refletiu-se de forma consistente nos resultados instrumentais de textura e volume dos pães. As amostras que originaram massas mais duras apresentaram maiores valores de dureza do miolo, variando de 64,93 a 87,25 N, e da casca, atingindo até 194,37 N, associados

a menores volumes finais de pão, inferiores a 970 cm³. Em contraste, amostras com massas mais moles exibiram miolos menos resistentes e maiores volumes específicos, superiores a 1200 cm³. Esse comportamento indica que, embora a quantidade de água adicionada tenha sido a mesma, diferenças intrínsecas na capacidade de hidratação e expansão da matriz da massa limitaram a retenção de gases e a expansão volumétrica durante a fermentação e o forneamento, resultando em pães mais densos e estruturalmente compactos.

A avaliação dos pesos inicial e final dos pães indicou variação limitada entre as amostras, com valores finais situados entre 0,425 e 0,452 kg, inclusive para aquelas que originaram massas mais duras durante o preparo. Esse resultado demonstra que a perda de massa durante o forneamento ocorreu de forma semelhante entre os tratamentos, afastando a hipótese de que as diferenças observadas na textura e no volume dos pães estejam associadas à quantidade total de água retida ao final do processo. Quando analisados em conjunto com os dados de volume, esses resultados indicam que pães com pesos finais semelhantes, mas volumes menores, apresentaram maior densidade estrutural, refletindo menor expansão da massa durante a fermentação e o forneamento. Assim, as diferenças de comportamento observadas estão relacionadas principalmente à eficiência de hidratação e à distribuição da água na matriz da massa, e não à sua quantidade absoluta.

A integração dos resultados de amilose, DSC e RVA permite explicar de forma consistente o comportamento tecnológico observado durante o preparo das massas e a qualidade final dos pães. Embora as temperaturas de gelatinização determinadas por DSC e as temperaturas de empastamento obtidas por RVA tenham apresentado valores muito próximos entre as amostras, indicando organização cristalina inicial semelhante do amido, diferenças marcantes foram observadas nos parâmetros viscoamilográficos após o início da gelatinização.

As amostras Audaz PG (3), Audaz Mga (2) e Audaz PG (2), caracterizadas por teores de amilose mais elevados ($\approx 25\%$), apresentaram menores volumes de pão e maiores valores de dureza do miolo e da casca, mesmo sob a mesma adição de água. Esse comportamento indica que, embora a quantidade total de água no sistema tenha sido semelhante, a sua eficiência de hidratação e redistribuição na matriz da massa foi distinta. Em amostras com maior teor de amilose, a maior lixiviação e reassociação desse polímero após a gelatinização favorece a imobilização da água e o aumento da coesão estrutural da massa, restringindo sua extensibilidade e expansão durante a

fermentação e o forneamento. Assim, as diferenças observadas na textura e no volume dos pães refletem principalmente o comportamento do amido após o início da gelatinização, capturado pelos parâmetros de RVA e modulado pelo teor de amilose, e não variações na estrutura cristalina inicial do amido ou na quantidade absoluta de água adicionada.

A análise composicional das amostras que originaram massas mais duras durante o preparo revelou teores elevados de proteína, variando em torno de 15–16%, associados a valores de cinzas moderados a relativamente altos. As amostras Audaz PG (2), Audaz Mga (2) e Audaz PG (3) apresentaram esse perfil, o qual está diretamente relacionado à maior formação e coesão da rede de glúten, resultando em massas mais resistentes à deformação quando submetidas à mesma adição de água. Adicionalmente, o teor de cinzas pode atuar como fator modulador da hidratação, uma vez que a maior presença de constituintes minerais e frações periféricas do grão intensifica a competição por água na matriz da massa.

As amostras que originaram massas mais duras durante o preparo apresentaram teores elevados de glúten úmido. A Audaz PG (2) e a Audaz Mga (2), ambas da safra 2023/2024, apresentaram valores de glúten úmido de 36,77 e 37,68 g 100 g⁻¹, respectivamente, enquanto a Audaz PG (3), da safra 2024/2025, apresentou 33,85 g 100 g⁻¹. Esses valores, associados a elevados teores de proteína ($\approx$ 15–16 g 100 g⁻¹) e a teores de amilose próximos de 25%, contribuíram para a formação de uma rede proteica mais coesa e resistente à deformação. Quando integrados aos resultados de RVA e DSC, esses dados indicam que a maior rigidez observada na massa não decorre da quantidade total de água adicionada, mas da sua menor eficiência de distribuição entre a rede de glúten e o amido, resultando em menor extensibilidade da massa, menor expansão durante a fermentação e pães com menor volume e maior dureza do miolo.

As amostras que originaram massas mais rígidas durante o preparo apresentaram valores elevados de *falling number*. A Audaz PG (2) e a Audaz Mga (2), ambas da safra 2023/2024, apresentaram valores de *falling number* de 327,33 e 310,33 s, respectivamente, enquanto a Audaz PG (3), da safra 2024/2025, apresentou 325,33 s. Esses valores indicam baixa atividade amilolítica, refletindo menor degradação do amido durante a mistura e a fermentação. Associado aos elevados teores de glúten úmido e proteína observados nessas amostras, o *falling number*

elevado reforça a formação de massas menos extensíveis e com menor capacidade de expansão, resultando em pães de menor volume e maior dureza do miolo.

A análise alveográfica das amostras que originaram massas mais duras reforça a interpretação obtida a partir dos resultados de composição, RVA e amilose. A Audaz PG (2) apresentou energia alveográfica de 325×10^{-4} J, com extensibilidade de 130 mm e relação P/L de 0,28, enquanto a Audaz Mga (2) apresentou W de 388×10^{-4} J, L de 163 mm e P/L de 0,41. A Audaz PG (3), por sua vez, apresentou W de 328×10^{-4} J, L de 118 mm e P/L de 0,68. Esses valores indicam farinhas de força média a elevada, com potencial de extensibilidade, porém altamente dependentes da eficiência de hidratação da matriz. Quando integrados aos elevados teores de proteína ($\approx 15\text{--}16$ g 100 g $^{-1}$), glúten úmido ($33,85\text{--}37,68$ g 100 g $^{-1}$), teores de amilose próximos de 25% e valores elevados de *falling number*, os resultados indicam que o potencial extensível indicado pela alveografia não se traduziu plenamente em expansão durante a panificação. Assim, a combinação de alta força alveográfica, menor plasticização enzimática e maior imobilização de água contribuiu para a formação de massas mais rígidas e pães com menor volume e maior dureza do miolo.

Os resultados de farinografia corroboram o comportamento tecnológico observado durante o preparo das massas. A Audaz PG (2), da safra 2023/2024, apresentou baixa absorção de água (51,8%), curto tempo de desenvolvimento (1,5 min), baixa estabilidade (5,3 min) e elevado índice de tolerância à mistura (74 FU), indicando formação rápida de uma massa firme e pouco tolerante à mistura. A Audaz Mga (2), da mesma safra, apresentou absorção de 57,4 %, elevado tempo de desenvolvimento (8,8 min), alta estabilidade (16,1 min) e baixo ITM (17 FU), caracterizando uma rede de glúten forte e estável, porém mais rígida. Já a Audaz PG (3), da safra 2024/2025, apresentou absorção intermediária (57,3 %), estabilidade elevada (12,8 min), tempo de desenvolvimento de 6,5 min e ITM de 32 FU, indicando boa tolerância à mistura associada a elevada coesão estrutural.

Quando integrados aos elevados valores de energia alveográfica, aos teores de glúten e proteína, aos altos valores de *falling number* e ao comportamento viscoamilográfico do amido, esses resultados explicam de forma consistente a formação de massas mais duras, com menor extensibilidade efetiva e menor expansão durante a fermentação e o forneamento.

3.5 CONCLUSÃO

Os resultados deste capítulo demonstram que o amido extraído de farinhas de trigo da cultivar Audaz, provenientes de diferentes regiões do estado do Paraná e de três safras consecutivas, apresenta perfil característico de amido de trigo comum, porém com variações estruturais e funcionais relevantes do ponto de vista tecnológico. Essas variações, ainda que sutis, mostraram-se sensíveis às condições regionais e sazonais de cultivo, refletindo a influência do ambiente sobre a biossíntese, a organização molecular e o comportamento funcional do amido. Dessa forma, os resultados reforçam que a qualidade tecnológica do trigo não depende exclusivamente do genótipo, mas da interação dinâmica entre fatores genéticos e ambientais ao longo do desenvolvimento do grão.

O teor de amilose manteve-se dentro da faixa típica para trigos não cerosos, variando entre 21,6 % e 25,3 %, e atuou como importante fator modulador das propriedades de pasta, das transições térmicas e do comportamento de retrogradação. Diferenças relativamente pequenas na proporção amilose/amilopectina mostraram impacto expressivo sobre a viscosidade, a estabilidade térmica e a reorganização molecular do amido após o resfriamento, evidenciando a elevada sensibilidade funcional dessa fração frente às condições de cultivo e processamento.

A análise viscoamilográfica indicou temperaturas de pasta semelhantes entre as amostras, sugerindo manutenção do padrão geral de gelatinização do amido de trigo. Entretanto, parâmetros como pico de viscosidade, breakdown, setback e viscosidade final evidenciaram diferenças importantes relacionadas à capacidade de intumescimento granular, à resistência da pasta ao cisalhamento térmico e à tendência de reassociação molecular durante o resfriamento. Essas respostas demonstram que pequenas alterações estruturais no amido podem resultar em modificações significativas no comportamento tecnológico das farinhas, especialmente em aplicações que dependem diretamente da estabilidade da pasta e da retenção de água.

Os perfis térmicos obtidos por DSC confirmaram a natureza típica do amido de trigo nativo, mas revelaram diferenças na estabilidade e na heterogeneidade das regiões cristalinas, além de distintas intensidades de retrogradação após o armazenamento. As variações observadas nas temperaturas de gelatinização e nos

valores de entalpia evidenciam diferenças no grau de organização molecular e na distribuição das regiões cristalinas do grânulo de amido. Além disso, a identificação de eventos térmicos associados à dissociação de complexos amilose–lipídio reforça a relevância dessas interações na modulação do comportamento térmico, da estabilidade estrutural e da digestibilidade potencial do amido.

Os resultados obtidos também evidenciam que o comportamento funcional do amido não pode ser interpretado isoladamente, uma vez que suas propriedades estão diretamente associadas às interações estabelecidas com proteínas, água e demais componentes da matriz da farinha. Na panificação, o volume específico, a textura do miolo, a firmeza da crosta e os parâmetros de cor refletiram o equilíbrio entre gelatinização do amido, desenvolvimento da rede de glúten, retenção gasosa e redistribuição de umidade durante o forneamento. Amostras com comportamento mais equilibrado entre viscosidade, estabilidade térmica e retrogradação apresentaram melhor desempenho panificável, com maior expansão volumétrica e miolos menos rígidos. Em contrapartida, amidos com comportamento estrutural mais rígido estiveram associados a pães mais densos, com menor volume e maior dureza do miolo e da casca.

Os resultados de textura reforçam ainda que a firmeza do pão está intimamente relacionada à reorganização molecular do amido após o forneamento, principalmente devido à retrogradação da amilose e, posteriormente, da amilopectina. Dessa forma, as diferenças observadas entre as amostras indicam que alterações estruturais do amido influenciam diretamente não apenas o processamento, mas também a qualidade final e a estabilidade do produto durante o armazenamento.

De maneira integrada, este capítulo confirma o papel central do amido na definição da qualidade tecnológica da farinha de trigo e evidencia que modificações estruturais aparentemente discretas podem gerar respostas funcionais expressivas em sistemas alimentares complexos. A caracterização estrutural, térmica e viscoamilográfica do amido mostrou-se fundamental para compreender as diferenças observadas no desempenho tecnológico das farinhas oriundas de distintas regiões e safras.

Além disso, os resultados obtidos contribuem para ampliar a compreensão sobre os efeitos das condições edafoclimáticas na funcionalidade do amido de trigo em sistemas produtivos reais, fornecendo informações relevantes para programas de melhoramento genético, classificação tecnológica de cultivares e direcionamento

industrial das farinhas. O entendimento dessas relações representa ferramenta importante para o desenvolvimento de produtos panificáveis com maior estabilidade tecnológica, qualidade textural e desempenho industrial mais previsível.

Por fim, este estudo reforça a importância da integração entre análises estruturais, térmicas, reológicas e tecnológicas para a interpretação da qualidade do trigo e de seus derivados, demonstrando que a funcionalidade do amido constitui um dos principais fatores determinantes da performance tecnológica das farinhas e da qualidade final dos produtos panificados.

REFERÊNCIAS

ABO-DIEF, M.; BARK, T. A.; YOUOSSEF, M.; MOUSTAFA, A.; Quality of wheat flour and pan bread as influenced by the tempering time and milling system. **Cereal Chemistry**, v. 96, n. 3, p. 429 – 438, 2019.

AMBROSI, I. **Aspectos econômicos da cadeia produtiva de trigo no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000.

AKTAR-UZ-ZAMAN, M. D.; TUHINA-KHANTUN, M. S. T.; HANAFI, M. M.; SAHEBI, M. Genetic analysis of rust resistance genes in global wheat cultivars: an overview. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, v. 31, n. 3, p. 431 – 445, 2017.

ALARU, M.; KAASIK, R.; KHALEGHDOUST, B.; KORGE, M.; KERES, I.; MÖLL, K.; TALGRE, L.; LOIT, E. The combined effects of weather conditions and fertilization on wheat fiber to protein ratio and on dough quality. **Journal of Cereal Science**, v. 117, p. 103923, 2024.

AMERICAN ASSOCIATION OF CEREAL CHEMISTS **AACC International Approved Methods of Analysis**. 10. ed. St. Paul, 1995. American Association of Cereal Chemists – **AACC International Method 56-81.03**: Determination of Falling Number – Final approval November 2, 1972; Reapproval November 3, 1999.

AMERICAN ASSOCIATION OF CEREAL CHEMISTS AOAC International, Association of Official Agricultural Chemists. **Official Methods 20th edition**, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE TRIGO. **Estatísticas 2021**. Disponível em <http://www.abitrigo.com.br/estatisticas-trigo.php>. Acesso em: 02/04/2025.

AO, Z.; JANE, J. Characterization and modeling of the A- and B-granule starches of wheat, triticale, and barley. **Carbohydrate Polymers**, v. 67, n. 1, p. 46–55, 2007.

AYDOGAN, S.; SAHIN, M.; AKÇACIK, A. G.; HAMZAOGLU, S.; TANER, S.; Relationship between farinograph parameters and bread volume, physicochemical traits in bread wheat flours. **Journal of Bahri Dagdas Crop Research**, v. 3, n. 1, p. 14 – 18, 2015.

BALDWIN, P. M. Starch granule-associated proteins and polypeptides: a review. **Starch/Stärke**, v. 53, n. 10, p. 475–503, 2001.

BALET, S.; GUELPA, A.; FOX, G.; MANLEY, M. Rapid Visco Analyser (RVA) as a tool for measuring starch-related physiochemical properties in cereals: a Review. **Food Analytical Methods**, v. 12, p. 2344 – 2360, 2019.

BAIK, B. K.; DONELSON, T. Grain, flour, and better properties estimating cake baking potential of wheat flour. **Cereal Chemistry**, v. 100, n. 1, p. 99 – 108, 2022.

BARAK, S.; MUDGIL, D.; KHATKAR, B. S. Effect of flour particle size and damaged starch on the quality of cookies. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, p. 1342 – 1348, 2014.

BARROS, J. H. T.; TELIS, V. R. N.; TABOGA, S.; FRANCO, C. M. L. Resistant starch: effect on rheology, quality and staling rate of white wheat bread. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, p. 4578-4588, 2018.

BARRERA, G.N.; BUSTOS, M.C.; ITURRIAGA, L.; FLORES, S.K.; LEÓN, A.E.; RIBOTTA, P.D. Effect of damaged starch on the rheological properties of wheat starch suspensions. **Journal of food engineering**, v.116, p. 233–239, 2013.

BENASSI, V.T.; WATANABE, E. **Fundamentos da tecnologia de panificação**. Rio de Janeiro: EMBRAPA – CTAA, 60p. 1997

BENASSI, V. T.; WATABE, M. **O trigo e seus produtos derivados**. Londrina: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 1997.

BET, C. D.; OLIVEIRA, C. S.; COLMAN, T. A. D.; MARINHO, M. T.; LACERDA, L. G.; RAMOS, A. P.; SCHNITZLER, E. Organic amaranth starch: A study of its technological properties after heat-moisture treatment. **Food Chemistry**, v. 264, p. 435–442, 2018.

BETTGE, A.; RUBENTHALER, G. L.; POMERANZ, Y. Alveograph algorithms to predict functional properties of wheat in bread and cookie baking. **Cereal Chemistry**, v.66, p.81–86,1989.

BIEL, W.; JAROSZEWSKA, A.; STANKOWSKI, S.; SABOLEWSKA, M.; KEPINSKA-PACELIK, J. Comparison of yield, chemical composition and farinograph properties of common and ancient wheat grains. **European Food Research and Technology**, v. 247, n. 6, p. 1525 – 1538, 2021.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 604, de 10 de fevereiro de 2022. Enriquecimento obrigatório do sal com iodo e das farinhas de trigo e de milho com ferro e ácido fólico destinados ao consumo humano. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 11 fev. 2022. Disponível em: <https://anvisa.gov.br/legis/datalegis.net/action>. Acesso em: 29/10/2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: Mapa/ACS, 2009. 395p.

BRASIL, COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB – **Análise mensal – trigo**. Disponível em <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 13 jan. 2024.

BRASIL, MAPA – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 38, de novembro de 2010. **Regulamento técnico do Trigo**. Disponível em: <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=consultarLegislacaoFederal>. Acesso em: 12/04/2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Aprova o “Regulamento técnico de identidade e qualidade da farinha de trigo”. Instrução Normativa nº 8, de 2 de junho de 2005. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 105, p. 91, 3 jun. 2005. Disponível em http://sistemasweb.agricultura.gov.br/conjurnormas/index.php/instru%c3%87%c3%83o_normativa_n%c2%ba_8,_de_2_de_junho_de_2005. Acesso em: 30 jan. 2023.ok

BOYACI, I. H.; WILLIAMS, P. C.; KOKSEL, H. A rapid method for the estimation of damaged starch in wheat flours. **Journal of Cereal Science**, v. 39, p. 139 – 145, 2004.

BLOKSMA, A.H.; BUSHUK, W. Rheology and chemistry of dough. In: Khan K, Shewry PR, eds. **Wheat: chemistry and technology**. 4th ed. St. Paul: AACC International; 2021.

BRESSIANI, J.; ORO, T.; SANTETTI, G. S.; ALMEIDA, J. L.; BERTOLIN, T. E.; GÓMEZ, M.; GUTKOSKI, L. C.; Properties of whole grain wheat flour and performance in bakery products as a function of particle size. **Journal of Cereal Science**, v. 75, p. 269 – 277, 2017.

BROCA, Â.; BERTAN, L.; PASSOS, C. T. dos. Estudo da qualidade do trigo e da farinha de trigo destinada à panificação em um moinho no sul do Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, e20710414021, 2021.

BROUNS, F.; HEMERY, Y.; PRICE, R.; ANSON, N. M. Wheat aleurone: separation, composition, health aspects, and potential food use. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 52, n. 6, p. 553–568, 2012.

CAKMAK, O. K. Biodegradable polymers: a review on properties, processing, and degradation mechanism. **Circular Economy and Sustainability**, v. 4, p. 339–362, 2024.

CANKURTARAN, T.; CEYLAN, H.; BILGIÇLI, N. Effect of partial replacement of wheat flour by taro and Jerusalem artichoke flours on chemical and sensory properties of tarhana soup. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 44, n. 10, p. e14826, 2020.

CAPELLI, A.; OLIVA, N.; CINI, E. Stone milling versus roller milling: A systematic review of the effects on wheat flour quality, dough rheology, and bread characteristics. **Trends in Food Science & Technology**, v. 97, p. 147-155, 2020.

CARINI, E.; CURTI, E.; CASSOTTA, F.; NAJM, N. E. O.; VITTADINI, E. Physico-chemical properties of ready to eat, shelf-stable pasta during storage. **Food Chemistry**, v.144, p.74–79, 2014.

CAZZANIGA, A.; BROUSSE, M. M.; LINARES, R. A. Variation of color with baking time in snacks made with pregelatinized cassava. **Journal of Food Science**, v. 86, n. 9, p. 4100 – 4109, 2021.

CLARKE, L. C.; SWEENEY, T. S.; DUFFY, S. K.; RAJAURIA, G.; O'DOHERTY, J. V.; The variation in hectolitre weight of wheat grain fed with or without enzyme supplementation influences nutrient digestibility and subsequently affects performance pigs. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**, v. 103, n. 2, p. 583 – 592, 2018.

CHAI, Q.; ZHANG, J.; YAO, Y. C.; MA, Y.; ZHOU, Y.; YU, Z.; WANG, N. Efeitos do gérmen de trigo revestido com proteína do leite na reologia da massa e na qualidade do pão chinês cozido no vapor. **LWT**, [S. l.], In press, 2025.

CAUVAIN, S. P.; YOUNG, L. S. Technology of breadmaking. 3. ed. Cham: **Springer**, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Análise Mensal de Mercado**. 2023.

COTOVANU, I.; UNGUREANU-IUGA, M.; MIRONEASA, S.; Investigation of Quinoa seeds fractions and their application in wheat bread production. **Plants**, v. 10, n. 10, p. 2150, 2021.

COPELAND, L.; BLAZEK, J.; SALMAN, H.; TANG, M. C. Form and functionality of starch. **Food Hydrocolloids**, v. 23, n. 6, p. 1527–1534, 2009.

CORRADO, M.; ZAFEIRIOU, P.; AHN-JARVIS, J. H.; SAVVA, G. M.; EDWARDS, C. H.; HAZARD, B. A. Impact of storage on starch digestibility and texture of a high-amylose wheat bread. **Food Hydrocolloids**, v. 135, p. 108139, 2023.

CUI, C.; CAPORASO, N.; CHEN, J.; FEARN, T. Farinograph characteristics of wheat flour predicted by near infrared spectroscopy with an ensemble modelling method. **Journal of Food Engineering**, v. 359, p. 11689, 2023.

CZAJA, T.; SOBOTA, A.; SZOSTAK, R. Quantification of ash and moisture in wheat flour by Raman spectroscopy. **Foods**, v. 9, n. 3, p. 280, 2020.

DELCOUR, J. A.; HOSENEY, R. C. **Principles of cereal science and technology**. 3. ed. St. Paul: AACC International, 2010.

DEMIATE, I. M.; FIGUEROA, A. M.; ZORTÉA GUIDOLIN, M. E. B.; RODRIGUES DOS SANTOS, T. P.; YANGCHENG, H.; CHANG, F.; JANE, J. Physicochemical characterization of starches from dry beans cultivated in Brazil. **Food Hydrocolloids**, v. 61, p. 812–820, 2016.

DEVI, A.; SINDHU, R.; KHATKAR, B. S. Effect of fats and oils on pasting and textural properties of wheat flour. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, p. 3836 – 3842, 2020.

DIK, T.; YÖNDEM-MAKASCIOĞLU, F.; AYTAÇ, C. H.; KINCAL, N. S. Wet separation of wheat flours into starch and gluten fractions: effects of water-to-flour ratio and resting time on gluten yield and properties. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 82, n. 4, p. 405–413, 2002.

DIÓSI, G.; MÓRÉ, M.; SIPOS, P. Role of the farinograph test in the wheat flour quality determination. **Acta University Alimentaria**, v. 8, p. 104 – 110, 2015.

DOBRA SZCZYK, B. J.; MORGENSTERN, M. P. Rheology and the breadmaking process. **Journal of Cereal Science**, v. 38, n. 3, p. 229-245, 2003.

DOMINGUEZ-AYALA, J. E.; SOLER, A.; MENDEZ-MONTEALVO, G.; VELAZQUEZ, G. Supramolecular structure and technofunctional properties of starch modified by high hydrostatic pressure: a review. **Carbohydrate Polymers**, v. 291, p. 119609, 2022.

DUBE, N. M., XU, F., ZHAO, R. The efficacy of sorghum flour addition on dough rheological properties and bread quality: a short review. *Grain & Oil Science and Technology*, v. 4, p. 164-171, 2020.

DUFOUR, M.; CHAUNIER, L.; HUGON, F.; DUGUÉ, A.; KANSOU, K.; SAULNIER, L.; VALLE.; From alveograph test to extensional behavior of wheat four dough. **Rheological Acta**, v. 63, p. 179 – 190, 2024.

DUNĂREANU, I. C.; BONEA, D.; Grain yield and hectolitre weight of some wheat cultivars in organic and conventional production systems. **Romanian Agricultural Research**, n. 39, 2022.

DZIKI, D.; KRAJEWSKA, A.; FINDURA, P. Particle Size as an Indicator of Wheat Flour Quality: A Review. **Processes**, v.12, n.11, p.2480, 2024.

ELIASDÓTTIR, H. G.; EBUBE, P. E.; KRONA, A.; WIJAYARATHNA, E.R. K. B.; ZAMANI, A.; ABDOLLAHI, M. Targeting aleurone cells for enhanced protein recovery from wheat bran: Impact on protein functionality and phytate content. **Journal of Cereal Science**, v. 124, p. 104205, 2025.

ELIASSON, A. C.; GUDMUNDSSON, M. Starch: physicochemical and functional aspects. In: ELIASSON, A. C. (Ed.). **Carbohydrates in food**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. p. 391–469.

FAOSTAT – **Food and Agriculture Organization of the United States**. (2022). Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> Acesso em: 10 de junho de 2025.

FAO/WHO. **Codex Alimentarius: Standard for Wheat Flour**. Rome: FAO/WHO, 2019.

FARIA, L. P.; SILVA, S. R.; LOLLATO, R. P. Nitrogen and trinexapac-ethyl effects on wheat grain yield, lodging and seed physiological quality in southern Brazil. **Experimental Agriculture**, v. 58, e21, 2022.

FARRAND, E. A. Flour properties in relation to the modern bread processes in the United Kingdom, with special reference to alpha-amylase and starch damage. **Cereal Chemistry**, v. 41, n. 98, p. 99 – 111, 1964.

FERNÁNDEZ-PADILLA, K.; PEREA-FLORES, M. J.; *et al.* Heat stress in different development stages of wheat: effects on grain chemical composition and dough properties. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, v. 22, n. 3, art. e2108, 2023

FERREIRA, M. D.; SPRICIGO, P. C. Colorimetria – princípios e aplicações na agricultura. **Embrapa Instrumentação**, p. 8-10, 2017.

FICCO, D. B. M.; BELEGGIA, R.; PECORELLA, I.; GIOVANNIELLO, V.; FRENDA, A. S.; VITA, P. Relationship between seed morphological traits and ash and mineral distribution along the kernel using debranning in Durum Wheats from different geographic sites. **Foods**, v. 9, n. 11, p. 1523, 2020.

FOWLER, D. B.; BRIDON, J.; DARROCH, B. A.; ENTZ, M. H.; JOHNSTON, A. M. Environment and genotype influence on grain protein concentrations of wheat and rye. **Agronomy Journal**, v. 82, p. 655 – 664, 1990.

FRANCESCHI, L.; BENIN, G.; GUARIENTI, E.; MARCHIORO, V. S.; MARTIN, T. N. Fatores pré-colheita que afetam a qualidade tecnológica de trigo. **Ciência Rural**, v. 39, n. 5, p. 1625-1632, 2009.

GAO, X.; TONG, J.; GUO, L.; YU, L.; LI, S.; YANG, B.; WANG, L.; LIU, Y.; LI, F.; GUO, J.; ZHAI, S.; CHENG, L.; REHMAN A.; FARAHNAKY, A.; WANG, P.; WANG, Z.; CAO, X. Influence of gluten and starch granules interactions on dough mixing properties in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Food Hydrocolloids**, v. 106, p. 105885, 2020.

GAO, L.; WU, Y.; WAN, C.; WANG, P.; YANG, P.; GAO, X.; EECKHOUT, M.; GAO, J. Structural and physicochemical properties of pea starch affected by germination treatment. **Food Hydrocolloids**, v. 124, n. PA, p. 107303, 2022.

GEISLITZ, S.; LONGIN, C. F. H.; SCHERF, K. A.; KOEHLER, P. Comparative study on gluten protein composition of ancient (einkorn, emmer and spelt) and modern wheat species (durum and common wheat). **Foods**, v. 8, n. 9, p. 409, 2019.

GLENN, G. M.; SAUNDERS, R. M. Physical and structural properties of wheat endosperm associated with grain texture. **Cereal Chemistry**, v. 67, n. 4, p. 377-381, 1990.

GERMANI, R.; CARVALHO, J. L. V. de. Physical characteristics of Brazilian wheat and their utilization as an indication of flour extraction. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.42, n.1, p.23–30, 1999.

GIANIBELLI, M. C.; LARROQUE, O. R.; MACRITCHIE, F.; WRIGLEY, C. W. Biochemical, genetic, and molecular characterization of wheat glutenin and its component subunits. **Cereal Chemistry**, v.78, n.6, p.635–646, 2001.

GOBETTI, M.; DE ANGELIS, M.; DI CAGNO, R.; CALASSO, M.; ARCHETTI, G.; RIZELLO, C.G. Novel insights on the functional features of the sourdough fermentation. **International Journal of Food Microbiology**, v. 302, p. 103-113, 2018.

GONZÁLEZ-THUILLIER, I.; SALT, L.; CHOPE, G.; PENSON, S.; SKEGGS, P.; TOSI, P.; POWERS, S. J.; WARD, J. L.; WILDE, P.; SHEWRY, P. R.; HASLAM, R. P. Distribution of lipids in the grain of wheat (cv. Hereward) determined by lipidomic analysis of milling and pearling fractions. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 63, n. 43, p. 9591–9601, 2015.

GREFFEUILLE, V.; ABECASSIS, J.; BAROUH, N.; *et al.* Analysis of the milling reduction of bread wheat farina: physical and biochemical characterisation. **Journal of Cereal Science**, v. 45, n. 1, p. 97-105, 2007.

GUO, Y.; ZHAO, C.; YU, P.; GAO, J.; LIANG, Z.; JI, R.; FU, J.; LIANG, J.; YANG, D. Molecular basis of sodium chloride dominated glutenin interaction and bread properties. **LWT**, v. 142, 2021.

GUARIENTI, E. M. **Qualidade industrial de trigo**. 2. Ed. Passo Fundo: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, 1996. 36 p.

GUARIENTI, E. M.; CIACCO, C. F.; CUNHA, G. R.; DEL DUCA, L. J. A.; CAMARGO, C. M. O. Efeitos da precipitação pluvial, da umidade relativa do ar e de excesso e déficit hídrico do solo no peso do hectolitro, no peso de mil grãos e no rendimento de grãos de trigo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 3, p. 412-418, 2005.

GUTTIERI, M.J.; STARK, J.C.; O'BRIEN, K.; SOUZA, E. Relative sensitivity of spring wheat grain yield and quality parameters to moisture deficits. **Crop Science**, v. 41, p. 327–335, 2001.

HAMMED, T. T. A.; SIMSEK, S.; Comparison of physical and chemical properties of wheat flour, fermented yam four, and unfermented yam flour. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 12, e13844, 2018.

HAMMERMEISTER, A. The Anatomy of Cereal Seed: Optimizing Grain Quality Involves Getting the Right Proportions within the Seed. **Organic Agriculture Centre of Canada**, 2008.

HANSEN, A.; HANSEN, B.; LARSEN, L.; BERTELSEN, G. Rheological properties of rye doughs: effects of mixing time and testing temperature. **Journal of Cereal Science**, v. 39, n. 1, p. 43–52, 2004.

HARKNESS, C.; SEMENOV, M.A.; AREAL, F.; SENAPATI, N.; TRNKA, M.; BALEK, J.; BISHOP, J. Adverse weather conditions for UK wheat production under climate change. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.282-283, 2020.

HE, Y.; LIN, Y. L. CHEN, C. TSAI, M. H.; LIN, A. H. M. Impacts of starch and the interactions between starch and other macromolecules on wheat falling number. **Comprehensive reviews in food Science and food safety**, v. 18, n. 3, p. 641 – 654, 2019.

HEMERY, Y. M.; ANSON, N. M.; HAVEMAN, J. B.; HAAK, L.; BROEKAERT, W. F.; DELCOUR, J. A.; BINDRABAN, P. S.; BOUWEN, R. Wheat aleurone flour increases total antioxidant capacity and polyphenol content of whole wheat bread. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 3, p. 930–938, 2007.

HIDALGO, A.; FONGARO, L.; BRANDOLINI, A.; Wheat flour granulometry determines colour perception. **Food Research International**, v. 64, p. 363 – 370, 2014.

HRIVNA, L.; ZIGMUNDOVÁ, V.; BURESOVÁ, I.; MACO, R.; VYHNÁNEK, T.; TROJAN, V. Reological properties of dough and baking quality of products using coloured wheat. **Plan Soil Environmental**, v. 64, n. 5, p. 203 – 208, 2018.

HOSENEY, R.C. **Principios de ciencia y tecnologia de los cereales**. Zaragoza: Acribia, 321p. 1991.

HOUSTON, J.E.; IGNATZ, M.; REITH, M.; LEUBNER-METZGER, G.; STEINBRECHER, T. Biomechanical properties of wheat grains: the implications on milling. **Journal of Royal Society Interface**, v.14, n.20160828, 2017. <http://doi.org/10.1098/rsif.2016.0828>

HU, Y.; SJBERG, S. M.; CHEN, C.; HAUVERMALE, A. L.; MORRIS, C. F.; DELWICHE, S. R.; CANNON, A. E.; STEBER, C. M.; ZHANG, Z. As the number falls, alternatives to the Hagber-Perten falling number method: A review. **Comprehensive reviews in food science and food safety**, v. 21, n. 3, p. 2105 – 2117, 2022.

HUANG, J.; WANG, Z.; FAN, L.; MA, S. A review of wheat starch analyses: methods, techniques, structure and function. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 203, p. 130–142, 2022.

HUANG, Q.; CHEN, X.; WANG, S.; ZHU, J. Amylose–lipid complex. In: HUANG, Q. Starch structure, functionality and application in foods. Cham: Springer **Nature**, p. 57–76, 2020

HUEN, J.; BORSMANN, J.; MATULLAT, I.; BOHM, L.; STUKENBORG, F.; HEITMANN, M.; ZANNINI, E.; ARENDT, E. K. Wheat flour quality evaluation from the baker's perspective comparative assessment of 18 analytical methods. **European Food Research and Technology**, v. 244, p. 535 – 545, 2018.

IMOISI, C.; IYASELE, J. U.; IMHONTU, E. E.; IKPAHWORE, D. O.; OKPEBHO. A. O. Pasting Properties of composite of cassava and wheat flours. **Journal of Chemistry Society Nigeria**, v. 45, n. 6 p. 1157 – 1163, 2020.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

INSTITUTO DE ÁGUAS DO PARANÁ. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Sistema-de-Informacoes-Hidrologicas> Acesso em 10/06/2025.

INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR CEREAL SCIENCE AND TECHNOLOGY - **ICC** –. n.161, 1996.

ITO, V. C.; BET, C. D.; WOJEICCHOWSKI, J. P.; DEMIATE, I. M.; SPOTO, M. H. F.; SCHNITZLER, E.; LACERDA, L. G. Effects of gamma radiation on the thermo-analytical, structural and pasting properties of black rice flour. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 133, p. 529–537, 2018.

JIA, H.; REN, F.; LIU, H. Development of low glycemic index food products with wheat resistant starch: a review. **Carbohydrate Polymers**, v. 361, p. 123637, 1 ago. 2025.

JI, T.; MA, F.; BAIK, B. K. Biochemical characteristics of soft wheat grain associated with endosperm separation from bran and flour yield. **Cereal Chemistry**, v. 97, n. 3, p. 566-572, 2020.

JØDAL, A.-S. S.; LARSEN, K. L. Investigation of the relationships between the alveograph parameters. **Scientific Reports**, v. 11, art. 5349, 2021.

JOHANSSON, E.; BRANLARD, G.; CINIBERTI, M.; FLAGELA, Z.; HUSKEN, A.; NURIT, E.; PENA, R. J.; SISSONS, M.; VÁZQUEZ, D.; Genotypic and environmental effects on wheat technological and nutritional quality. In: Wheat quality for improving processing and human health. **Springer, Cham**, p. 171 – 204, 2020.

JUKIC, M.; SUMANOVAC, F.; NAKOV, G.; SIMIC, G.; KOMLENIC, D. K.; INANOVA, N.; LUKINAC, J.; Application of the Falling Number method in the evaluation of the α -amylase activity of mal flour. **Applied Sciences**, v. 13, n. 5 p. 3218, 2023.

KALINIEWICZ, Z.; MARKOWSKA-MENDIK, A.; WARECHOWSKA, M. An analysis of the correlations between the hardness index and selected physicochemical properties of wheat grain. **Journal of Cereal Science**, v.110, 2023.

KALITSIS, J.; MINASNY, B.; QUAIL, K.; MCBRATNEY, A.; Application of response surface methodology for optimization of wheat flour milling process. **Cereals & Grains Associations**, v. 98, p. 1215 – 1226, 2021.

KAUR, N.; SINGH, B.; KAUR, A.; YADAV, M.P.; SINGH, N.; AHLAWAT, A.K.; SINGH, A.M. Effect of growing conditions on proximate, mineral, amino acid, phenolic composition and antioxidant properties of wheatgrass from different wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. **Food Chemistry**, v. 341, 2021.

KHALID, A.; HAMEED, A.; TAHIR, M.F. Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. **Nutrition and Food Science Technology**, v.10, 2023.

KISZONAS, A. M.; ENGLE, D. A.; PIERANTONI, L. A.; MORRIS, C. F. Relationships between Falling Number, α -amylase activity, milling, cookie, and sponge cake quality of soft white wheat. **Cereal Chemistry**, v. 95, n. 3, p. 373 – 385, 2018.

KISZONAS, A. M.; MORRIS, C. F. Wheat breeding for quality: A historical review. **Cereal Chemistry**, v. 95, n. 1, p. 17 – 34, 2018.

KÖKŞEL, H. Starch. In: **Encyclopedia of food chemistry**. Elsevier, 2023.

KRENCHINSKI, F. H.; CESCO, V. J. S.; RODRIGUES, D. M.; PEREIRA, V. G. C.; ALBRECHT, A. J. P.; ALBRECHT, L. P. Yield and physiological quality of wheat seeds after desiccation with different herbicides. **Journal of Seed Science**, v. 39, n. 3, p. 254–261, 2017.

KTENIOUDAKI, A.; GALLAGHER, E. Recent advances in the development of high-fibre baked products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 28, n. 1, p. 4-14, 2012.

LANCELOT, E.; FONTAINE, J.; GRUA-PRIOL, J.; LE-BAIL, A.; Effect of long-term storage conditions on wheat flour and bread baking properties. **Food Chemistry**, v. 346, n-128902, 2021.

LANZARANI, D. P.; MARTINS, R. C.; RAUEN, T. G.; BRAVO, C. E. C.; PINTO, E. P; Controle de qualidade aplicado a farinha de trigo panificável produzida em moinhos do estado do Paraná. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 16919 – 16929, 2020.

LEBERT, L.; BUCHE, F.; SORIN, A.; AUSSENAC, T. The wheat aleurone layer: Optimisation of its benefits and application to bakery products. **Foods**, v. 11, n. 22, p. 3552, 2022.

LEON, A. E. **De tales harinas, tales panes: granos, harinas y productos de panificacion em Iberoamérica**. Córdoba: Hugo Báez, 480p., 2007.

LOPES, R. B.; POSNER, E. S.; ALBERTI, A.; DEMIATE, I. M.; Pre milling debranning of wheat with a commercial system to improve flour quality. **Journal of Food Science and Technology**, v. 59, p. 3881 – 3887, 2022.

LI, C.; GHITAL, S.; GILBERT, R. G.; GIDLEY, M. J.; High-amylose wheat starch: Structural basis for water absorption and pasting properties. **Carbohydrate Polymers**, v. 245, p. 116557, 2020.

LI, X.; HU, H.; XU, F.; LIU, Z.; ZHANG, L.; ZHANG, H. Effects of aleurone-rich fraction on the hydration and rheological properties attributes of wheat dough. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 54, n. 5, p. 1777 – 1786, 2018.

LI, C.; DHITAL, S.; GIDLEY, M. J. High amylose wheat foods: a new opportunity to improve human health. **Trends in Food Science & Technology**, v. 135, p. 93–101, 2023.

LI, L.; LIU, Z.; LI, X.; CHU, X.; YANG, W.; WANG, B.; XIE, Y.; LI, X. Superior gluten structure and more small starch granules synergistically confer dough quality for high amylose wheat varieties. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1195505, 2023.

MA, W.; YU, Z.; SHE, M.; ZHAO, Y.; ISLAM, S. Wheat gluten protein and its impacts on wheat processing quality. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 6, n. 3, p. 2779 – 287, 2019.

MACDOUGALL, D. B. **Colour in food: improving quality**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2002.

MADEIRA, R.A.V. **Caracterização tecnológica de linhagens de trigo desenvolvidas para o serrado mineiro**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos). Universidade Federal de Lavras. 2014.

MARTIN, T. N.; FILHO, A. C.; DEAK, E. A.; CECHEIN, J.; BURG, G. M.; GRUN, E.; Variation in the hectolitre weight of wheat grain for equipment and sample size. **Ciência Rural**, v. 52, n. 6, e2020992, 2022.

MATSUNAGA, N.; SEIB, P.A. Extraction of wheat starch with aqueous sodium hydroxide. **Cereal Chemistry**, v. 74, n. 6, p. 851–857, 1997.

MEMON, A. A.; MAHAR, I.; MEMON, R.; SOOMRO, S.; HARNLY, J.; MEMEN, N.; BHANGAR, M. I.; LUTHRIA, D. L. Impact of flour particle size on nutrient and phenolic acid composition of commercial wheat varieties. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 86, e-103358, 2020.

MIRZA, A. A.; PEIVASTEH-ROUDSARI, L.; TAJDAR-ORANJ, B.; BEIKZADEH, S.; BARANI-BONAB, H.; JAZAERI, S. Effect of flour particle size on chemical and rheological properties of wheat flour dough. **Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering**, v. 41, n2, p. 682 – 694, 2022.

MITTELSTADT, J. V.; **Germinação e crescimento de plântulas de genótipos de trigo submetidos a simulação de déficit hídrico**. 2023. 40f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2023.

MOIRAGHI, M.; SCIARINI, L. S.; PAESANI, C.; LEÓN, A. E.; PÉREZ, G. T.; Flour and starch characteristics of soft wheat cultivars and their effect on cookie quality. **Journal of Food Science and Technology**, v. 56, p. 4474 – 4481, 2019.

MUNTEANU, M.; VOICU, G.; STEFAN, E. M.; CONSTANTIN, G. A.; POPA, L.; MIHAILOV, N. Farinograph characteristics of wheat flour dough and rye flour dough. In: **International Symposium of ISB-INMA TEH. Agricultural and Mechanical Engineering, Bucharest, Romania, 29-31 October 2015**. INMA Bucharest, p. 645-650, 2015.

NHAN, T. T.; COPELAND, L. Effect of variety and growing environment on pasting and thermal properties of wheat starch. **Food Chemistry**, v. 174, p. 16-23, 2015

NUTTALL, J. G.; O'LEARY, G. J.; PANOZZO, J. F.; WALKER, C. K.; BARLOW, K. M.; FITZGERALD, G. J. Models of grain quality in wheat – A review. **Field Crops Reserach**, v. 202, p. 136 – 145, 2017.

NYEMBWE, P.M.; KOCK, H.L.; TAYLOR, J.R.N. Potential of defatted marama flour-cassava starch composites to produce functional gluten free bread-type dough. **LWT**, v. 92, p. 429-434, 2018

OLIVEIRA, M. E. A. S.; ALVES, T. O.; GUTKOSKI, L. C.; MIRANDA, M. Z.; FERREIRA, M. S. L.; TAKEITI, C. Y. Brazilian Cerrado wheat: technological quality of genotypes grown in tropical locations. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 12, e16228, 2021.

ORO, T.; LIMBERGER, V. M.; MIRANDA, M. Z.; RICHARDS, N. S. P. S.; GUTKOSKI, L. C.; DE FRANCISCI, A. Pasting Properties of Whole and refined wheat flour blends used for bread production. **Ciência Rural**, v. 43, n. 4, p. 754–760, 2013.

PANG, J.; GUAN, E.; YANG, Y.; LI, M.; BIAN, K. Effects of wheat flour particle size on flour physicochemical properties and steamed bread quality. **Food science & nutrition**, v. 9, n.9, p. 4691–4700, 2021.

PAPADIMITRIOU, K.; ZOMPOPOULOU, G.; GEORGALAKI, M.; ALEXANDRAKI, V.; KAZOU, M.; ANASTASIOU, R.; TSAKALIDOU, V. Sourdough Bread. *In*: CHARIS, G. **Innovations in Traditional Foods**. 1 ed. Editora Woodhead Publishing, 2019.

PINHEIRO, V. J. F.; BARBOSA, I. C. C.; CARDOSO, D. F. S. R.; ROSA, R. M. S. S.; SANTOS, L. P.; NETO, A. M. Quality evaluation of three brands of type 1 wheat flour commercialized in Belém, Pará, Brazil. **Agrarian and Biological Science**, v. 9, n. 8, 2020.

POMERANZ, Y. Wheat: Chemistry and Technology. 3rd ed. **American Association of Cereal Chemists**, St. Paul, MN, 1988.

POPA, N. C.; TAMBA-BEREHOIU, R.; POPESCU, S.; TAMBA S. Investigations on predictive modelling of the farinographic parameters. **Scientific Bulletin Biotechnology**, v. 14, p. 50-57, 2010.

POPOVSKA, O. Determination of some flour characteristics. **European Journal of Agriculture and Food Sciences**, v. 5 n. 8, p. 8 – 12, 2023.

POSNER, E. S. Wheat. *In*: KULP, Karel (ed.). **Handbook of cereal science and technology: revised and expanded**, cap. 1, 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2000.

POSNER, E. S.; HIBBS, A. N. **Wheat flour milling**. St. Paul: AACC International, 2005.

PROTONOTARIOU, S.; RITZOULIS, C.; MANDALA, I.; Jet milling conditions impact on wheat flour particle size. **Journal of Food Engineering**, v. 294, e-110418, 2021.

ROSELL, C. M.; COLLAR, C.; HAROS, M. Assessment of hydrocolloid effects on the thermo-mechanical properties of wheat using the Mixolab. **Food Hydrocolloids**, v. 21, n. 3, p. 452-462, 2007.

SANDHU, K. S.; SINGH, N. Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. **LWT – Food Science and Technology**, v. 40, n. 9, p. 1497–1503, 2007.

SARASWATHI, R.; HAMEED, R. S. Farinograph as a rheological tool to predict the quality characteristics for blend of wheat with pulse flour. **International Journal of Advances in Agricultural Science and Technology**, v. 5, n. 8, p. 146 – 153, 2018.

SARKAR, A.; FU, B.X. Impact of quality improvement and milling innovations on durum wheat and end products. **Foods**, v. 11, 2022.

SCARIOT, M.A.; RADUNZ, L.L.; DIONELLO, R.G.; TONI, J.R.; MOSSI, A.J.; JUNIOR, F.W.R. Quality of wheats grains harvested with different moisture contents and stored in hermetic and conventional system. **Journal of Stored Products Research**, v. 75, p. 29-34, 2018.

SCHEUER, P. M. Wheat: Characteristics and baking use. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 13, n. 2, p. 211-222, 2011.

SCHUSTER, C.; HUEN, J.; SCHERF, K. Comprehensive study on gluten composition and baking quality of winter wheat. **Cereal Chemistry**, v. 100, n. 1, p. 142 – 155, 2022.

SEIDEL, E. P.; FEY, E.; JUNIOR, J. B.B.S.; AUGUSTO, J.; COSTA, N. V.; BARILLI, D. R.; Wheat cultivars with agroecological management in the west of Paraná state. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 21, n. 3, p. 230 – 236, 2022.

SEZER, B.; BILGE, G.; SANAL, T.; KOKSEL, H.; BOYACI, I.H. A novel method for ash analysis in wheat milling fractions by using laser-induced breakdown spectroscopy. **Journal of Cereal Science**, v. 78, p. 33-38, 2017.

SHARMA, A.; GARG, S.; SHEIKH, I.; VYAS, P.; DHALIWAL, H. S. Effect of wheat grain protein composition on end-use quality. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, p. 2771–2785, 2020.

SHAO, Y.; TSAI, M-H.; HE, Y.; CHEN, J.; WILSON, C.; LIN, A. H-M. Reduction of falling number in soft white spring wheat caused by an increased proportion of spherical B-type starch granules. **Food Chemistry**, v. 284, p. 140 – 148, 2019.

SHEVKANI, K.; SINGH, N.; BAJAJ, R.; KAUR, A.; Wheat starch production, structure, functionality and applications: a Review. **International journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 1, p. 38 – 58, 2016.

SHEVKANI, K.; SINGH, N. Relationship between starch structure and pasting properties. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 49, n. 3, p. 651–658, 2014.

SHEWRY, P. R.; HEY, S. J. The contribution of wheat to human diet and health. **Food and Energy Security**, v. 4, n. 3, p. 178-202, 2015.

SHEWRY, P. R. Wheat grain proteins: Past, present, and future. **Cereal Chemistry**, v. 100, n. 1, p. 5-28, 2022.

SIAH, S.; QUAIL, K. J. Factors affecting Asian wheat noodle color and time-dependent discoloration—A review. **Cereal Chemistry**, v. 95, n. 2, p. 189-205, 2018.

SILVA, R. S.; **Avaliação qualitativa do uso de enzimas em produção de macarrão em escala industrial**. 2022. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso 87 (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás., Goiânia, 2022.

SILVA, R.R. Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de trigo em diferentes épocas de semeadura, no Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 11, p. 1439-1447, 2011.

SILVA, C. L.; BENIN, G.; BORNHOFFEN, E. Characterization of Brazilian wheat cultivars in terms of nitrogen use efficiency. **Bragantia**, v. 73, n. 2, p. 87–96, 2014.

SINGH, A.; BOBADE, H.; SHARMA, S.; SINGH, B.; GUPTA, A.; Enhancement of digestibility of nutrients (*In vitro*), antioxidant potential and functional attributes of wheat flour through grain germination. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 76, p. 118 – 124, 2021.

SINGH, J.; KAUR, L.; MCCARTHY, O. J. Factors influencing the physicochemical, morphological, thermal and rheological properties of starches: a review. **Food Hydrocolloids**, v. 21, n. 1, p. 1–22, 2007.

SISSONS, M. J. Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. **Foods**, v. 9, n. 4, p. 428, 2008.

SMÍDOVÁ, Z.; RYSOVÁ, J.; Gluten-free bread and bakery products technology. **Foods**, v. 11, n. 3, p. 480, 2022.

SOLAH, V.A.; FENTON, H.K.; CROSBIE, G.B. Wheat: Grain structure of wheat and wheat-based products. **Encyclopedia of Food and Health**, p. 470-477, 2016.

SONG, X.; CHEN, J.; DENG, L.; ZHAO, Q. Rheological, textural, and pasting properties of A- and B-type wheat starches in relation to their molecular structures. **Food Chemistry**, v. 460, p. 140810, 2024.

TAMBA – BEREHOIU, R. M.; POPA, C. N.; VISAN, L. V.; SIMION, V.; DOBRINOIU, R. V.; DANAILA – GUIDEA, S. M.; Farinograph vs. Alveograph predictive modelling of wheat flours quality. **Agriculture for Life Conference**, p. 586 – 593, 2018.

TAO, H.; LU, F.; ZHU, X. F.; XU, G. X.; XIE, H. Q.; XU, X. M.; WANG, H. L. Removing surface proteins promote the retrogradation of wheat starch. **Food Hydrocolloids**, v. 113, p. 106437, 2021.

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

TESTER, R. F.; MORRISON, W. R. Swelling and gelatinization of cereal starches. **Cereal Chemistry**, v. 67, n. 6, p. 558–563, 1990.

THYS, R. C. S.; NITZKE, J. A. **Avaliação da Qualidade Tecnológica/Industrial da Farinha de Trigo**. Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2010.

VAL-MORAES, S. P. Diseases of wheat in Brazil and their management. In: Management of wheat and barley diseases. **Apple Academic Press**, p. 427–442, 2017.

VALKOVÁ, V.; D'ÚRANOVÁ, H.; BILCÍKOVÁ, J.; Z'OFÁJOVÁ, A.; HAVRLENTOVÁ, M. The content and quality of starch in different wheat varieties growing in experimental conditions. **Journal Microbiology Biotechnology Food Science**, v. 9, p. 462–466, 2019.

VAN ROOYEN, J.; SIMSEK, S.; OYEYINKA, S. A.; MANLEY, M. Wheat starch structure–function relationship in breadmaking: a review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 2023.

VIANNA, F. S. V. **Manual prático de panificação**. São Paulo: SENAC, 2018.

WAN, L.; WANG, X.; LIU, H.; XIAO, S.; DING, W.; PAN, X.; FU, Y. Retrogradation inhibition of wheat starch with wheat oligopeptides. **Food Chemistry**, v. 427, p. 136723, 2023.

WANG, J.; WANG, C.; ZHEN, S.; LI, X.; YAN, Y. Low Molecular Weight Glutenin Subunits from the 1U Genome of *Aegilops umbellulata* Confer Superior Dough Rheological Properties and Improve Breadmaking Quality of Bread Wheat. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, p. 6, 2017.

WANG, K.; FU, B.X. Inter-relationships between test weight, thousand kernel weight, kernel size distribution and grain protein in durum wheat. **Foods**, v. 9, n. 9, p. 1308, 2020.

WANG, M.; VAN VLIET, T.; HAMER, R. J. How gluten properties are affected by pentosans. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 44, n. 1, p. 1–16, 2004.

WANG, J.; HASANALIEVA, G.; MADEIRA, L.; MARKELLOU, E.; IVERSEN, P. O.; BERNHOFT, A.; SEAL, C.; BARANSKI, M.; VIGARI, V.; ERNESTO, L.; WILSON, A.; BARKLA, B.; LEIFERT, C.; REMPELOS, L.; Effect of wheat species (*Triticum aestivum* vs *T. spelta*), farming system (organic vs conventional) and flour type (wholegrain vs white) on composition of wheat flour; results of a retail survey in the UK and Germany – 1. Mycotoxin content. **Food Chemistry**, v. 327, 127011, 2020.

WEN, Y. Q.; LIN, S.; LI, X.; ZHANG, J.; ZHAO, Y.; MA, D.; LI, M.; REN, X.; ZHANG, W. Relationship between wheat flour's quality characteristics and color of fresh wet noodles. **International Journal of Food Properties**, v. 26, n. 1, p. 290 – 300, 2023.

WEN, J.; FENG, J.; YAO, J.; XIAO, J.; NANGIA, V.; LI, J.; LIU, Y. Moderate drought stress during grain filling improves wheat starch quality by altering starch biosynthesis. **Journal of Cereal Science**, v. 79, p. 153–163, 2018.

WEN, J.; FENG, J.; YAO, J.; XIAO, J.; NANGIA, V.; LI, J.; LIU, Y. Moderate drought stress followed by re-watering enhances wheat starch biosynthesis. **Carbohydrate Polymers**, v. 374, p. 124685, 2026.

WIESER, H.; KOEHLER, P.; SCHERF, K. A. Chemistry of wheat gluten proteins: Qualitative composition. **Cereal Chemistry**, v. 100, n. 1, p. 23 – 35, 2022.

YONEMOTO, P. G.; CALORI-DOMINGUES, M. A.; FRANCO, C. M. L. Efeito do tamanho dos grânulos nas características estruturais e físico-químicas do amido de trigo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 4, p. 761–771, 2007.

YANG, Z.; XU, D.; ZHOU, H.; WU, F.; XU, X. New insight into the contribution of wheat starch and gluten to frozen dough bread quality. **Food Bioscience**, v. 48, 2022.

YOUSAF, S.; IQBAL, H. M.; ARIF, S.; KHURSHID, S.; AKBAR, Q. A.; Alveograph Rheological parameters in relation to physicochemical attributes as an indicator of wheat flour quality. **International Journal of Biology and Biotechnology**, v. 16, n. 2, p. 425 – 431, 2019

YUAN, T. Z.; LIU, S.; REIMER, M.; ISAAK, C.; AI, Y. Evaluation of pasting and gelling properties of commercial flours under high heating temperatures using Rapid Visco Analyzer 4800. **Food Chemistry**, v. 344, p. 128616, 2021.

XINYANG, S.; KOKSEL, F.; SCANLON, M. G.; NICKERSON, M. T. Effects of water, salt, and mixing on the rheological properties of bread dough at large and small deformations: A review. **Cereal Chemistry**, v. 99, n. 4, p. 709 – 723, 2022.

XIONG, Ling; ZHANG, Hongfei; ZHAN, Kun; WANG, Luan Feng; WANG, Fang; HAIZHAO, Canção; SHEN, Xinchun. Proteomic study on structural characteristics of wheat germ protein induced by lipid rancidity during storage. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 315, pt. 2, p. 144200, 2025.

XU, M.; HOU, G. G.; MA, F.; DING, J.; DENG, L.; KAHRAMAN, O.; NIU, M.; TRIVETTEA, K.; LEE, B.; WU, L.; BAIK, B-K. Evaluation of aleurone flour on dough, textural, and nutritional properties of instant fried noodles. **LWT**, v. 126, e-109294, 2020.

XUE, C.; ERLEY, G. S. A.; ROSSMANN, A.; SCHUSTER, R.; KOEHLER, P.; MUHLING, K-H. Split Nitrogen Application Improves wheat baking quality by influencing protein composition rather than concentration. **Front Plant Science**, v. 7, p. 738, 2020.

XUE, C.; MATROS, A.; MOCK, H-P.; MUHLING, K-H. Protein composition and baking quality of wheat flour as affected by split nitrogen application. **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 642, 2019.

ZHAI, M.; WEN, Q.; BU, Y.; TIAN, W.; WU, X.; GUO, D. A comparative study on the multi-scale, physicochemical properties and enzyme activities of tetraploid cultivated wheat starch with different amylose contents. **Food Chemistry: X**, v. 31, p. 103142, 2025.

ZHANG, B.; LI, X.; LIU, J.; XIE, F.; CHEN, L. Supramolecular structure of A- and B-type granules of wheat starch. **Food Chemistry**, v. 141, n. 3, p. 2436–2442, 2013.

ZHANG, S.; WANG, Z.; WANG, L.; TIAN, H.; WANG, H.; DU, C.; ZHANG, D.; LI, M.; HUANG, J.; ZHANG, X. A- and B-type wheat starch granules: the multiscale structural evolution during digestion. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 278, p. 135033, 2024.

ZHANG, T; KIM, H.; KWEON, W. Impact of kernel hardness and amylose content on quality characteristics of purple-colored whole wheat flour. **Journal of Food Science**, v. 101, n. 5, p. 1084–1093, 2024.

ZHANG, X.; MU, M.; TIAN, Y.; FU, J.; JIA, F.; WANG, Q.; LIANG, Y.; WANG, J. Aggregative and structural properties of wheat gluten during post-harvest maturation. **Journal of Stored Products Research**, v. 94, 2021.

ZHANG, Y-R.; WANG, Y-H.; SHEN, J-Q.; GUO, Y-Y.; FEI, Y-X.; YU, X-Y.; ZHANG, G-Z.; GUO, W-M.; YAN, M-H. Effects of wheat flour with different farinograph and pasting characteristics on the surface tackiness of fronzes cooked noodles. **Cereal Chemistry**, v. 99, n. 6, p. 1205 – 1217, 2022.

ZHU, F. Buckwheat starch: Structure, properties, and applications of cereal starches. **Trends in Food Science e Tecnology**, v. 75, p. 26–36, 2017.

ZHYGUNOV, D.; TOPORASH, I.; BARKOVKA, Y.; YEHOORSHYN, Y. Comparison of alveograph characteristic of flour obtained from different types of common wheat and spelt wheat. **Grain Products and Mixed Folder**, v. 20, n. 1, 2020.