



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DOS ALIMENTOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS ALIMENTOS

ARON BARROS VIRGOLINO

**USO DA TRANSGLUTAMINASE NA QUALIDADE REOLÓGICA E  
TEXTURAL DE PÃES DE FARINHA DE TRIGO E CENTEIO**

FLORIANÓPOLIS- SC

2024

Aron Barros Virgolino

**USO DA TRANSGLUTAMINASE NA QUALIDADE REOLÓGICA E  
TEXTURAL DE PÃES DE FARINHA DE TRIGO E CENTEIO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência dos Alimentos.

Orientador(a): Prof. Dr. Pedro Luiz Manique Barreto

Florianópolis

2024

Barros Virgolino, Aron

USO DA TRANSGLUTAMINASE NA QUALIDADE REOLÓGICA E TEXTURAL DE PÃES DE FARINHA DE TRIGO E CENTEIO / Aron Barros Virgolino ; orientador, Pedro Luiz Manique Barreto, 2024.

148 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Ciência dos Alimentos. 2. Pães. 3. Centeio. 4. Transglutaminase. I. Manique Barreto, Pedro Luiz. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos. III. Título.

Aron Barros Virgolino

**USO DA TRANSGLUTAMINASE NA QUALIDADE REOLÓGICA E  
TEXTURAL DE PÃES DE FARINHA DE TRIGO E CENTEIO**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

---

Prof. Juliano De Dea Lindner, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.(a) Cleonice Gonçalves da Rosa, Dr(a).  
Universidade do Planalto Catarinense

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Ciência dos Alimentos.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Dr. Pedro Luiz Manique Barreto  
Orientador(a)

Florianópolis, 2024

## **AGRADECIMENTOS**

Extremamente grato ao Prof. Dr. Pedro Luiz Manique Barreto, pelo auxílio para o desenvolvimento da pesquisa e por disponibilizar seu conhecimento e experiência acadêmica. Sou especialmente grato pelas conversas que me fizeram refletir sobre muitas questões além da sala de aula, pela sua paciência e por todos os demais aspectos que tornaram essa jornada possível.

Apesar da distância, sou grato aos meus pais, senhor Amphiloquio Serrão Virgolino e senhora Lucelina Barros Virgolino, por suas orações, carinho e motivação.

Não menos importante, a senhorita Yasmim Santos de Azevedo, pelo seu companheirismo e sua ajuda motivacional.

## RESUMO

O centeio não forma glúten como o trigo, o que representa um problema na panificação. Por isso, foram desenvolvidas formulações de pães de farinha de trigo branca (FTB) e farinha de centeio integral (FCI), para verificar o seu desempenho reológico com a adição da enzima transglutaminase (TGase) em concentrações de 85 ppm e 140 ppm. A FCI destaca-se pela sua concentração de Amido Total (71,4%) de caráter bimodal, Fibras Insolúveis (11,6%) e Proteínas Totais (10,12%), bem diluídas em meio a resíduos de farelo. Os tratamentos enzimáticos afetam consideravelmente os parâmetros verificados por RVA, aumentando a estabilidade da pasta em excesso de água sob aquecimento e resfriamento de acordo com o aumento da concentração da enzima. Melhoraram as propriedades extensográfica de Resistência à Extensão (Re), Extensibilidade (E) e Energia (A) com 85 ppm, sugerindo que as concentrações moderadas de TGase são mais efetivas, enquanto as concentrações mais elevadas reduzem esses efeitos em uma massa formulada com 57% de água. A análise de Oscilação por Varredura de Frequência e a Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) descreveram, respectivamente, um aprimoramento no módulo elástico ( $G'$ ) de até 35,26% a 1Hz de frequência com 140 ppm de composto enzimático, e evidente interferência da resistência térmica em DSC, segundo o qual as formulações contendo maior percentual de FTB a 85 ppm absorvem mais energia térmica (-0,0028 W/g), devido à presença de moléculas maiores e mais estáveis. Os dados observados na massa crua tratada com 85 ppm alinham-se com os resultados qualitativos dos pães assados que apresentaram maior Volume Específico (8,64 cm<sup>3</sup>/g) e menor Densidade (0,11 g/cm<sup>3</sup>) em amostras com 90% de FTB e 10% de FCI a 85 ppm. Os resultados de perfil de textura do pão assado (TPA) mostram melhorias significativas em Firmeza, Fraturabilidade, Adesividade, Coesividade e Resiliência com a adição de TGase, especialmente em formulações com maiores proporções de FTB. A enzima também afeta a Luminosidade ( $I^*$ ) e a Cromaticidade ( $a^*$  e  $b^*$ ), melhorando o aspecto visual comum em pães ricos em farelo, tornando-os mais claros. O aperfeiçoamento das características reológicas e texturais deve-se à reticulação das proteínas, promovidas pela TGase, por meio de ligações covalentes que formam o complexo glutamina-lisina. Este estudo fornece uma base para futuras otimizações de receitas de pães mistos de trigo e centeio, e abrem janelas para produtos formulados com centeio, que atendam a necessidade do mercado e dos consumidores que buscam produtos de qualidade e ricos em nutrientes.

**Palavras-chave:** Centeio; Trigo; Reticulação; Transglutaminase.

## ABSTRACT

Rye does not form gluten like wheat, which presents a challenge in baking. Therefore, formulations of breads made from white wheat flour (WWF) and whole rye flour (WRF) were developed to assess their rheological performance with the addition of the enzyme transglutaminase (TGase) at concentrations of 85 ppm and 140 ppm. WRF stands out for its concentration of Total Starch (71.4%) with a bimodal character, Insoluble Fibers (11.6%), and Total Proteins (10.12%), well-dispersed among bran residues. The enzymatic treatments significantly affect the parameters verified by RVA, increasing the paste stability in excess water during heating and cooling as the enzyme concentration increases. The extensograph properties of Resistance to Extension (Re), Extensibility (E), and Energy (A) improved with 85 ppm, suggesting that moderate TGase concentrations are more effective, while higher concentrations reduce these effects in dough formulated with 57% water. The Frequency Sweep Oscillation analysis and Differential Scanning Calorimetry (DSC) described, respectively, an improvement in the elastic modulus (G') of up to 35.26% at 1Hz frequency with 140 ppm of the enzymatic compound, and clear interference with thermal resistance in DSC, showing that formulations with a higher percentage of WWF at 85 ppm absorb more thermal energy (-0.0028 W/g) due to the presence of larger and more stable molecules. The data observed in the raw dough treated with 85 ppm align with the qualitative results of the baked breads, which showed a higher Specific Volume (8.64 cm<sup>3</sup>/g) and lower Density (0.11 g/cm<sup>3</sup>) in samples with 90% WWF and 10% WRF at 85 ppm. The Texture Profile Analysis (TPA) of the baked bread showed significant improvements in Firmness, Fracturability, Adhesiveness, Cohesiveness, and Resilience with the addition of TGase, especially in formulations with higher proportions of WWF. The enzyme also affects Lightness (L\*) and Chromaticity (a\* and b\*), enhancing the visual appearance common in bran-rich breads, making them lighter. The improvement of rheological and textural characteristics is due to protein cross-linking, promoted by TGase through covalent bonds forming the glutamine-lysine complex. This study provides a foundation for future optimizations of mixed wheat and rye bread recipes and opens opportunities for rye-based products that meet the needs of the market and consumers seeking quality, nutrient-rich products.

**Keywords:** Rye; Wheat; Crosslinking, Transglutaminase.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 -</b>	Corte esquemático longitudinal de grão de centeio.....	24
<b>Figura 2 -</b>	Estrutura químicas de arabinoxilanas.....	39
<b>Figura 3 -</b>	Estrutura molecular de frutanos.....	40
<b>Figura 4 -</b>	Estrutura químicas de $\beta$ -glucanas.....	42
<b>Figura 5 -</b>	Reações gerais catalisadas pela transglutaminase: a) reação de transferência de acila; b) reação de reticulação; c) desamidação.....	59
<b>Figura 6-</b>	Rotulo comercial da Activa STGase-F <sup>®</sup> .....	70
<b>Figura 7-</b>	Microestrutura eletrônica de varredura FCI (MEV).....	80
<b>Figura 8-</b>	Traços calorimétricos das massas de pão com 57% água.....	92
<b>Figura 9-</b>	Cor da crosta dos pães formulados.....	113
<b>Figura 10-</b>	Cor do miolo dos pães formulados.....	113
<b>Figura 11</b>	Vista aérea do pão formulado.....	117
<b>Figura 12</b>	Vista lateral do pão formulado.....	118
<b>Figura 13-</b>	Corte transversal dos pães formulados com redução do brilho, aumento de contraste e redução dos tons de amarelo e vermelho.....	120

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1-</b>	Mínerais e vitaminas presentes na farinha de centeio.....	32
<b>Quadro 2-</b>	Rendimento de amido, teor de amilose, tamanho de grânulos e padrão de difração de raios X de amidos de cultivares.....	36

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 -</b>	Efeito das diferentes concentrações de TGase.....	84
<b>Gráfico 2 -</b>	Reologia do modulo elástico (G'), e viscoso (G''), dos tratamentos de FTB, FCI, com e sem transglutaminase .....	101
<b>Gráfico 3 -</b>	Fator de perda ( $\tan \delta$ ) versus frequência angular dos tratamentos sem enzima, a 85 ppm e a 140 ppm.....	108



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b>	Perfil de hidratação da massa simples.....	71
<b>Tabela 2-</b>	Delineamento experimental das concentrações de TGase nos percentuais de FTB e FCI.....	72
<b>Tabela 3-</b>	Formulação básica para pão integral de centeio.....	72
<b>Tabela 4-</b>	Análise granulométrica da FCI.....	78
<b>Tabela 5-</b>	Análise bromatológica da amostra de FCI.....	83
<b>Tabela 6-</b>	Análise rápida de viscosidade (RVA) dos tratamentos realizados com FCI, FTB e Transglutaminase.....	85
<b>Tabela 7-</b>	Análise de textura das massas de farinha de trigo branca e farinha de centeio integral.....	89
<b>Tabela 8-</b>	Registros térmicos análise de DSC pico 1.....	96
<b>Tabela 9-</b>	Dados de $G'$ (Pa) a 1 Hz de frequência de oscilação.....	104
<b>Tabela 10-</b>	Constantes de Lei da Potência para os sistemas de massas de farinhas de trigo branco, centeio integral e suas misturas.....	106
<b>Tabela 11-</b>	Dados de fator de perda ( $\tan \delta$ ), a 1hz de frequência de oscilação.....	107
<b>Tabela 12-</b>	Parâmetros de cor dos pães elaborados com FTB_FCI com e sem transglutaminase.....	112
<b>Tabela 13-</b>	Resultados das análises experimentais dos pães formulados a partir de FCI, FTB e TGase.....	116
<b>Tabela 14</b>	Análise do perfil de textura dos pães assados e tratamentos dos grupos (A), (B), (C), (D) e (E).....	123

## TABELA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 1-</b>	Volume específico.....	77
<b>Equação 2-</b>	Densidade.....	77
<b>Equação 3-</b>	Lei da Potência.....	104
<b>Equação 4-</b>	Fator de Perda.....	107

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>AA</b>	Aminoácidos
<b><math>\beta</math>-D-</b>	Beta-D
<b>CD –</b>	Domínio Central Hidrofílico
<b>CIE –</b>	Commission Internationale de l’Eclairage (Comissão Internacional de Iluminação)
<b>DSC –</b>	Calorimetria Diferencial de Varredura
<b><math>D</math> –</b>	Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )
<b><math>E</math> –</b>	Extensibilidade
<b>FAs –</b>	Ácidos Graxos

<b>FAO</b> –	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (Food and Agriculture Organization)
<b>FCI</b> –	Farinha de Centeio Integral
<b>FIS</b> –	Fibra Dietética Insolúvel
<b>FOS</b> –	Frutooligossacarídeos
<b>FTB</b> –	Farinha de Trigo Branco
<b>FTI</b> –	Frutanos do Tipo Inulina
<b>FR</b> –	Fibra Dietética Solúvel
<b>GC</b> –	Grão de Centeio
<b>GP</b> –	Grau de Polimerização
<b>G'</b> –	Módulo elástico
<b>G''</b> –	Módulo Viscoso
<b>HHS</b> –	Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos EUA (Department of Health and Human Services)
<b>HMW-GS</b> –	High Molecular Weight Glutenin Subunit
<b>kDa</b> –	Kilodalton
<b>K</b> –	Coeficiente de viscosidade (Pa·s <sup>n</sup> )
<b>K'</b> –	Coeficiente do módulo elástico (G')
<b>K''</b> –	Coeficiente do módulo viscoso (G'')
<b>LMW-GS</b> –	Low Molecular Weight Glutenin Subunit
<b>n</b> –	Índice de fluxo (adimensional)
<b>NSL</b> –	Non-Starch Lipids
<b>PUFAs</b>	Ácidos graxos poli-insaturados
<b><math>\omega</math></b> –	Frequência angular (rad/s)
<b>Q</b> –	Quebra de Viscosidade
<b>Re</b> –	Resistência à Extensão
<b>RDC</b> –	Resolução da Diretoria Colegiada
<b>SEC-HPLC</b> –	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência por Exclusão de Tamanho
<b>SH</b> –	Grupo Sulfidril Livre
<b>SL</b> –	Starch Lipids
<b>SS</b> –	Ligações Dissulfeto
<b>T.ret.</b> –	Tendência à Retrogradação
<b>TGase</b> –	Transglutaminase
<b>TPA</b> –	Análise do Perfil de Textura (Texture Profile Analysis)
<b><math>\tau</math></b> –	Tensão tangencial (Pa)
<b>USDA</b> –	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
<b>V.fin.</b> –	Viscosidade Final
<b>V.max.</b> –	Viscosidade Máxima
<b>V.min.</b> –	Viscosidade Mínima
<b>XRD</b> –	X-ray Diffraction
<b><math>\gamma</math></b> –	Gamma
<b>k</b> –	Coeficiente de viscosidade (Pa·s <sup>n</sup> )
<b>n</b> –	Índice de fluxo (adimensional)
<b>R<sup>2</sup></b> –	Coeficiente de determinação (adimensional)
<b>tan <math>\delta</math></b> –	Fator de perda (adimensional)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
2. 1	OBJETIVOS GERAIS .....	16
2. 2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
3. 1	CENTEIO.....	18
<b>3. 1. 1</b>	<b>Identidade.....</b>	<b>18</b>
<b>3. 1. 2</b>	<b>Aplicações industriais .....</b>	<b>20</b>
<b>3. 1. 3</b>	<b>Comércio do centeio.....</b>	<b>21</b>
<b>3. 1. 4</b>	<b>Estrutura do grão de centeio .....</b>	<b>23</b>
3. 2	FÍSICO-QUÍMICA.....	24
<b>3. 2. 1</b>	<b>Umidade.....</b>	<b>24</b>
<b>3. 2. 2</b>	<b>Proteína.....</b>	<b>26</b>
3. 2. 2. 1	<i>Solubilidade das frações proteicas do centeio .....</i>	28
<b>3. 2. 3</b>	<b>Lipídios.....</b>	<b>29</b>
<b>3. 2. 4</b>	<b>Minerais e vitaminas .....</b>	<b>31</b>
<b>3. 2. 5</b>	<b>Carboidratos .....</b>	<b>3</b>
3. 2. 5. 1	<i>Amido .....</i>	33
3. 2. 5. 2	<i>Fibras dietéticas .....</i>	37
3. 2. 5. 2. 1	Arabinosilanas.....	38
3. 2. 5. 2. 2	Frutanos.....	40
3. 2. 5. 2. 3	$\beta$ -Glucanas .....	42
3. 3	PANIFICAÇÃO .....	43
<b>3. 3. 1</b>	<b>Tecnologia da panificação.....</b>	<b>44</b>
3. 3. 1. 1	<i>Moagem .....</i>	45
3. 3. 1. 2	<i>Mistura e amassamento.....</i>	46
3. 3. 1. 3	<i>Fermentação.....</i>	47
3. 3. 1. 4	<i>Cozimento.....</i>	48
<b>3. 3. 2</b>	<b>Comércio da panificação.....</b>	<b>49</b>
<b>3. 3. 3</b>	<b>Pão.....</b>	<b>50</b>
3. 3. 3. 1	<i>Pão de centeio.....</i>	51
<b>3. 3. 4</b>	<b>Componentes da massa do pão.....</b>	<b>53</b>
3. 3. 4. 1	<i>Farinha.....</i>	54
3. 3. 4. 2	<i>Água.....</i>	54
3. 3. 4. 3	<i>Fermento biológico seco .....</i>	55
3. 3. 4. 4	<i>Sal.....</i>	56
3. 3. 4. 5	<i>Aditivos .....</i>	57
3. 3. 4. 5 .1	Enzima Transglutaminase ( <i>Streptomyces mobaraense</i> ).....	58
3. 4	REOLOGIA.....	61
<b>3. 4. 1</b>	<b>Resistência da massa a extensão .....</b>	<b>62</b>

3. 4. 2	<b>Análise rápida de viscosidade (RVA).....</b>	<b>62</b>
3. 4. 3	<b>Calorimetria diferencial de varredura (DSC).....</b>	<b>63</b>
3. 4. 4	<b>Reologia de oscilação por varredura de Frequência.....</b>	<b>64</b>
3. 5	<b>QUALIDADE DOS PÃES.....</b>	<b>65</b>
3. 5. 1	<b>Volume e densidade.....</b>	<b>65</b>
3. 5. 2	<b>Textura .....</b>	<b>66</b>
3. 5. 2. 1	<i>Perfil de Textura de Pães Tipo Francês: Tecnologia e Funcionamento.....</i>	<i>66</i>
3. 5. 3	<b>Cor.....</b>	<b>67</b>
4	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>69</b>
4. 1	<b>MATERIAL.....</b>	<b>69</b>
4. 2	<b>MÉTODOS .....</b>	<b>70</b>
4. 2. 1	<b>Delineamento experimental.....</b>	<b>71</b>
4. 2. 2	<b>Formulação dos pães.....</b>	<b>72</b>
4. 2. 3	<b>Caracterização da Farinha.....</b>	<b>73</b>
4. 2. 3. 1	<i>Granulometria.....</i>	<i>73</i>
4. 2. 3. 2	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....</i>	<i>73</i>
4. 2. 3. 3	<i>Análises Bromatológicas.....</i>	<i>74</i>
4. 2. 4	<b>Análise de Propriedade Reológica da Massa Crua.....</b>	<b>74</b>
4. 2. 4. 1	<i>Análise Rápida de Viscosidade (RVA- Rapid Visco Analyser).....</i>	<i>74</i>
4. 2. 4. 2	<i>Resistência da massa a extensão .....</i>	<i>75</i>
4. 2. 4. 3	<i>Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC- Differential Scanning Calorimetry).....</i>	<i>76</i>
4. 2. 4. 4	<i>Reologia de Oscilação–Varredura de Frequência.....</i>	<i>76</i>
4. 2. 5	<b>Análise de Qualidade do Pão.....</b>	<b>77</b>
4. 2. 5. 1	<i>Cor.....</i>	<i>77</i>
4. 2. 5. 2	<i>Volume específico e densidade.....</i>	<i>77</i>
4. 2. 5. 3	<i>Análise do perfil de textura do pão assado.....</i>	<i>77</i>
4. 2. 6	<b>Análise Estatística .....</b>	<b>75</b>
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>78</b>
5. 1	<b>CARACTERIZAÇÃO DA FARINHA.....</b>	<b>78</b>
5. 1. 1	<b>Granulometria.....</b>	<b>78</b>
5. 1. 2	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....</b>	<b>79</b>
5. 1. 3	<b>Análise Bromatológica.....</b>	<b>82</b>
5. 2	<b>ANÁLISE DE PROPRIEDADE REOLÓGICAS DA MASSA.....</b>	<b>84</b>
5. 2. 1	<b>Análise Rápida de Viscosidade (MEV) .....</b>	<b>84</b>
5. 2. 2	<b>Resistência da massa a extensão.....</b>	<b>88</b>
5. 2. 3	<b>Calorimetria Exploratória Diferencia (DSC).....</b>	<b>91</b>
5. 2. 4	<b>Reologia de Oscilação - Varredura de Frequência.....</b>	<b>99</b>
5. 3	<b>ANÁLISE DE QUALIDADE DO PÃO.....</b>	<b>111</b>
5. 3. 1	<b>Cor.....</b>	<b>111</b>
5. 3. 2	<b>Volume específico e densidade .....</b>	<b>115</b>

<b>5.3.3</b>	<b>Análise do perfil de textura do pão assado.....</b>	<b>122</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>131</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>133</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As culturas cerealíferas, possuem primeiro lugar entre as plantas domesticadas pelo homem, segundo o qual, estima-se que 60% do total das culturas agrícolas sejam compostas por cereais (Alkuwari *et al.*, 2022), em uma área de cultivo de aproximadamente 723 milhões de hectares, dentre os quais destacam-se o trigo (30,6%), o milho (26,7%) e o arroz (22,6%), entre outros cereais que por sua vez detém menos de 1/3 da participação nas colheitas globais (cevada, sorgo, milho-miúdo, aveia, centeio, triticale e trigo sarraceno) (FAO, 2022).

Dessa forma, os cereais participam como fonte relevante do comércio e de energia, posicionando-se como base da nutrição humana ao participar em ~45% da energia alimentar e colaborando com 1.307 kcal per capita por dia do indivíduo (FAO, 2022). Devido a existência de um forte apelo de consumo, essas características são tratadas como indícios de qualidade alimentar, que agregam recomendações por órgãos preocupados com a saúde nutricional, como o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e pelo Departamento de Saúde e Serviços Humanos (HHS), que designam diretrizes para a dietéticas e orientam um consumo de  $\geq 170$  gramas por dia de grãos, incluindo seus subprodutos e derivados,  $\geq 85$  g de produtos de grãos integrais e 85 g de produtos de grãos refinados (US, 2005), tendo em vista que os cereais proporcionam proteção contra doenças cardiovasculares e crônicas (Novotni *et al.*, 2012).

Devido à sua relevância como alimento e *commodity* industrial (Falola, 2017) e aderência de uma parcela significativa da população a dietas enriquecidas com nutrientes específicos e compostos bioativos (Purewal *et al.*, 2020), vastos esforços tem explorado o potencial dos cereais para inovar a cadeia produtiva: o trigo (Gupta *et al.*, 2021), arroz (Prasad, 2019; Verma; Shrivastava, 2018), milho (Trinidad-Calderón *et al.*, 2021; Poole *et al.*, 2021), milheto (Dias-Martins *et al.*, 2018; Chandra *et al.*, 2016), cevada (Holland *et al.*, 2021; Obadi *et al.*, 2021), aveia (Soycan *et al.*, 2019; Ding *et al.*, 2019). É nesse contexto que o centeio tem ganhado espaço por meio de novas frentes de aplicação.

Esse interesse particular em alimentos básicos a base de cereais, a exemplo do pão, ganham destaque por permitirem uma dinâmica especializada com fáceis reformulações e fomento de benefícios para grandes segmentos (Han, 2021; Olagunju, Oluwajuyitan, Oyeleye, 2021). Fato esse que justifica interesses atuais no estudo de pães híbridos ricos em proteínas, formulados com farinhas compostas nas quais o trigo foi parcialmente substituído por componentes promissores, capazes de aperfeiçoar a

composição de aminoácidos e seu valor nutricional (Chinma, 2020; Hoehnel, 2020; Shrivastava, 2018).

Diante desta nova realidade, os profissionais e consumidores buscam reaver sabores tradicionais perdidos no processo de industrialização ao se tornarem mais refinados e padronizados. Tanto padeiros como clientes, demonstram interesse em ingredientes dinâmicos para produzir pães com aspecto mais rústicos com sabores mais próximos aos dos grãos de origem e com apelo mais saudável, com o mínimo de aditivos alimentares (Ofreede, 2015).

Esse interesse inovador, também é um aliado para problemas de baixa oferta, que pressionam o mercado internacional de trigo, visto como um fardo econômico vigente devido as altas do custo do trigo agravado como resultado da guerra Ucrânia-Rússia, uma vez que a Ucrânia é um grande exportador, 12% do total de trigo produzido no mundo (Lang, 2022).

Uma vertente que vem surgindo no comércio, é a utilização da farinha proveniente do centeio (*Secale cereale L.*) (Czubaszek *et al.*, 2021). Esse cenário alinhado com a diminuição do fardo ecológico e consumo mundial, permite a oportunidade do centeio ser participante significativo nessa nova perspectivas de produtos. Já existem empresas alimentícias trabalhando no desafio de aumentar o consumo de alimentos saudáveis à base de centeio, mas é fundamental buscar novas ferramentas de processamento e melhoramento de meios para adequar o produto ao interesse do consumidor, pois novas percepções de produtos, vem acompanhadas por novos conceitos e abordagens modernas que adaptem a matéria-prima a sua nova realidade (Jonsson, 2018).

Com aumento do uso de outras matérias-primas na panificação, é possível se observar o emprego de outros componentes que atuam como auxiliares no preparo, garantindo mais tempo de vida de prateleira, características sensoriais melhores, mais suavidade, entre outros aspectos tidos para o consumidor como elementos de qualidade (cor, textura, volume). É por esse motivo que aplicações de aditivos (condicionadores ou melhoradores) são explorados como meio tecnológico para assegurar a qualidade do produto final. (Oest *et al.*, 2020)

Entre as classes que se destacam neste processo, apresentam-se, as enzimas e os oxidantes químicos. Ambos contribuem ativamente no processo de fabricação de pães levando a acentuar ou melhorar o processo e suas propriedades (Oest *et al.*, 2020).

É nesse sentido, que órgãos de pesquisas se interessam e exploram farinhas não tradicionais, em combinação com aplicação da enzima transglutaminase, outros com o uso de fermentação láctica por exemplo (Alvarez- Jubete *et al.*, 2010; Renzetti; Dal Bello; Arendt, 2008; Rózyło *et al.*, 2015; Zys; Garncarek, 2017) com viés de aperfeiçoamento. A introdução da enzima transglutaminase é uma solução inovadora e pesquisas possibilitam determinar a influência da enzima na qualidade do pão e seus quantitativos de aplicação (Sadowska; Diowks, 2020)

A utilização da transglutaminase (EC 2.3.2.13) - enzima capaz de formar moléculas grandes pela união de substratos proteicos inferiores - chama a atenção para uma possível fortificação e equilíbrio da rede de glúten em produtos panificados, tal qual, surge nesse cenário como uma nova ferramenta tecnológica, que caminha na contramão da maioria das enzimas utilizadas em alimentos, que por sua vez, quebram o substrato em compostos menores (Gragnani, 2010)

Portanto, a análise da viabilidade tecnológica do uso da enzima transglutaminase microbiana na elaboração de pães com farinha de centeio integral, e como ela pode contribuir para o avanço técnico científico sobre a ação deste componente biológico nos produtos panificados. Ademais, os resultados podem servir como subsídio para o fomento desta matéria-prima, como destaque mediante a dependência da farinha de trigo nos produtos panificados o que ampliaria as opções de alimentos mais saudáveis para o consumo humano.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Elaborar misturas de farinha de trigo branca e farinha de centeio integral e avaliar seu potencial na elaboração de pães com utilização da enzima transglutaminase.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para atender o objetivo geral apresentado na seção 2. 1 esta dissertação pauta-se nos seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar a composição centesimal, morfologia e granulometria na farinha de centeio integral;
- b) Avaliar o efeito nas propriedades reológicas e térmicas das massas elaboradas com as diferentes concentrações das farinhas e da enzima transglutaminase



- c) Avaliar a qualidade dos pães pelas técnicas de volume específico, densidade e cor (escala CIElab);
- d) Medir os atributos de textura instrumental por Análise de Perfil de Textura (TPA) dos pães assados.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 CENTEIO

##### 3.1.1 Identidade

Acredita-se que a cultura do centeio tenha suas origens no sudoeste da Ásia e se disseminado amplamente pela Europa, América do Norte ao longo do tempo. Os grãos de centeio apresentam uma relação genética próxima com os grãos de trigo e cevada. Ao ponto de seu cruzamento com o trigo dar origem a um cereal híbrido, o triticale. Esse aspecto genético entre as culturas pode influenciar não apenas suas características físicas e nutricionais, mas também sua adaptabilidade a diferentes ambientes e condições de cultivo (Wrigley, 2010).

O centeio (*Secale cereale L.*) é uma gramínea pertencente à família *Poaceae*, cujos grãos têm múltiplos usos na alimentação humana e animal, bem como na agricultura, servindo como planta forrageira e para a cobertura do solo (Lucas, 2022). É um grão de grande importância, reconhecido por sua resistência e estudado por sua notável tolerância ao frio (Chikmawati *et al.*, 2013), é particularmente adequado para a produção de grãos em condições climáticas difíceis e em solos marginais com baixa riqueza de nutrientes (Kottmann *et al.*, 2016), características essa, que o distingue dos outros cereais.

O centeio demonstra uma notável capacidade de tolerância a diferentes condições climáticas adversas, baixo pH e altas concentrações de alumínio (Fresno *et al.*, 2020; Petersson *et al.*, 2007; Tuck *et al.*, 2006). Essa adaptabilidade a ambientes desafiadores contribui para sua importância como uma cultura resiliente e versátil em sistemas agrícolas diversos.

A cultura do centeio também é conhecida por sua capacidade de germinar facilmente em temperaturas que variam de 1,11-3,33 °C e em uma faixa de pH de 4,5-8,2. Como uma cultura de dias longos, o centeio requer um período de 40 a 60 dias para transição para o estágio reprodutivo, com um período de vegetação dos grãos que pode variar de 120 a 150 dias (Arendt; Zannini, 2013).

Além disso, em comparação com outros grãos de cereais, o centeio demonstra uma resistência superior a doenças e a outros distúrbios patogênicos (Fresno *et al.*, 2020; Crespo-Herrera *et al.*, 2017; Szakács *et al.*, 2016), destacando a robustez e a capacidade adaptativa dessa cultura em face de desafios fitopatológicos.

Ele se destaca entre os grupos mais relevantes de plantas cultivadas devido à sua ampla aplicação e uso diversificado como componente alimentício, ração e na produção de bebidas, juntamente com trigo, triticale e cevada, (UR Rehman *et al.*, 2020). Seu uso, aquece a indústria alimentícia, principalmente na Europa, onde o grão desfruta de uma ampla utilização, sendo valorizado por suas propriedades rústicas e aplicações diversificadas. Em outras regiões do globo como nos Estados Unidos, embora seu uso tenha sido mais difundido em outros momentos da história, ainda é empregado em várias indústrias, incluindo panificação, destilação e como alimento para o gado (Bushuk, 2001a; Oelke *et al.*, 1992; Pickrell, 2018).

Em termos constitucionais, o amido é o principal componente do centeio integral, constituindo em aproximadamente 54% de sua composição, cuja estrutura granular do amido possui um diâmetro de 1 a 100 nanômetros, sendo composta principalmente por dois polissacarídeos, amilose e amilopectina (Taggart; Mitchell, 2009), que também é encontrado em seu semelhante, o trigo.

Além do amido, o centeio também contém proteínas em concentrações que variam entre 8 e 18% em peso, (Poutanen, *et al.*, 2022). Seu endosperma amiláceo é uma fonte significativa de energia, enquanto o farelo e o gérmen do centeio são ricos em vitaminas, minerais e fibras alimentares (Kaur; Sharma, 2019).

O centeio, embora tenha uma composição semelhante a outras culturas cerealíferas, se destaca pelo seu notável teor de fibra alimentar (Andersson *et al.*, 2009; Jonsson *et al.*, 2018; Németh; Tömösközi, 2021). De acordo com Németh; Tömösközi, (2021), dentre todas as culturas de grãos pequenos, seu teor de fibra varia de 15% a 25% de matéria seca, seguido pela aveia descascada, trigo, cevada descascada e triticale, com percentagens de 11,8% a 19,1%; 10% a 17%; 8% a 16,2% e 7,5% a 16% de matéria seca, respectivamente.

Apesar de sua alta quantidade de fibras, a proporção de fibras solúveis para insolúveis no centeio é consideravelmente baixa em comparação com outras espécies de cereais. Essa característica pode acarretar algumas dificuldades na extração da farinha, exigindo tratamentos específicos, como temperatura mais elevada do grão e pré-tratamento alcalino, para obter um maior rendimento de farinha (Comino *et al.*, 2014; Wood, 2010).

No grão também estão presentes as arabinoxilanas,  $\beta$ -glucanas e pentosanas que podem ocorrer em formas solúveis ou insolúveis, cuja proporção entre as fibras dietéticas

solúveis e insolúveis nos grãos exerce influência direta na taxa de extração da farinha (Comino *et al.*, 2014; Wood, 2010).

Os frutano também estão presentes no centeio, os quais exercem uma influência positiva na saúde do cólon ao atuarem como probióticos intestinais humanos (Hincha *et al.*, 2007; Karppinen *et al.*, 2003; Verspreet *et al.*, 2015). Além disso, o centeio é rico em compostos fenólicos e flavonoides, os quais possuem potencial antioxidante e podem reduzir o risco de doença coronariana (Hanhineva *et al.*, 2012; Pihlava *et al.*, 2018; Ravisankar *et al.*, 2020; SUN *et al.*, 2020; Rhowell *et al.*, 2022).

O centeio é o grão que após o trigo, contém uma quantidade significativa de proteínas do glúten, utilizadas pelas indústrias alimentícias em todo o mundo para a preparação de uma variedade de produtos, como pão, biscoitos, tostas, flocos, cerveja, entre outros (Arendt; Zannini, 2013). O centeio possui um teor de glúten consideravelmente mais baixo do que o trigo, o que resulta em um volume reduzido do pão e uma textura de miolo mais densa em comparação com o pão de trigo (Meeus *et al.*, 2021; Schalk *et al.*, 2017).

Assim, tanto na forma de farinha quanto de grão, o centeio assegura seu valor constitucional, o que reflete em seu potencial comercial no segmento de produtos panificáveis (Arendt; Zannini, 2013). Além disso, os compostos bioativos presentes no centeio não apenas conferem características nutricionais, mas também funcionais, agregando valor aos produtos derivados desse cereal.

### **3. 1. 2 Aplicações Industriais**

Os grãos de cereais têm adquirido cada vez mais importância devido ao seu potencial como uma fonte rica de nutrientes benéficos para a saúde, essenciais para sustentar um estilo de vida livre de doenças. Entre esses cereais, o centeio é singular em relação aos demais, principalmente pelo seu teor de fibras, perfeitamente habilitado para promover a sensação de saciedade (Rokhsartalab-Azar, *et al.*, 2020).

Em razão da presença desses nutrientes específicos, os grãos de centeio têm sido amplamente empregados na preparação de uma variedade de produtos alimentícios e bebidas de grande valor, tais como pães, biscoitos, flocos, cerveja, uísque, mingaus e tortas, além de aplicações filmogênicas comestíveis (Katina *et al.*, 2007; Go; Song, 2019). Essa diversidade de aplicações ressalta a versatilidade e o potencial do centeio como um ingrediente valioso na indústria alimentícia.

Em aplicações alimentares, o centeio desempenha um papel peculiar como fonte de aromas e sabores distintos durante o cozimento e a destilação, características que não podem ser reproduzidas por outros grãos (Pickrell, 2018). Nesse contexto, a título de exemplo, tanto o pão de centeio quanto os uísques de centeio compartilham uma ampla gama de descritores de aroma e sabor. O pão de centeio em particular é reconhecido por suas notas maltadas, de nozes, caramelo, baunilha, entre outras (Callejo, 2011; Majcher *et al.*, 2019; Sandvik *et al.*, 2016; Tran *et al.*, 2019). Por outro lado, os uísques de centeio são conhecidos por suas características picantes, mas também revelam nuances ricas de caramelo, baunilha, amargo, frutado e floral (Balcerek *et al.*, 2016; Lahne *et al.*, 2019; Trial, 2021; Wang *et al.*, 2018).

Essas nuances sensoriais desempenham um uma participação na complexidade e diversidade das experiências sensoriais associadas aos produtos elaborados através do centeio. Esses aromas e sabores são provenientes de compostos voláteis, incluindo (E)-2-nonenal, metional, 2-metilofurano, 1-octen-3-ona, 2-etilofurano, hexanal e pentanal (Heiniö *et al.*, 2003; Kirchhoff ; Schieberle, 2001; Majcher *et al.*, 2019) responsáveis pelo perfil sensorial distinto, tornando-o um ingrediente valioso na indústria.

A fonte de amido em conta no grão de centeio é vista com interesse para a indústria não alimentícias, devido a alavancagem de demanda de propriedades funcionais e físico-químicas específica que impulsionam os pesquisadores a explorar novas fontes botânicas desse importante polissacarídeo (Kaur, *et al.*, 2021).

Sua característica polimérica estabelece seu valor industrial, como agente de cobertura, estabilizante e espessante. Além disso, suas propriedades não se limitam apenas ao setor alimentício, encontrando aplicação em produtos não alimentícios, como materiais de embalagem, formação de comprimidos, produtos cosméticos/de beleza, indústrias de papel e têxteis (Kaur *et al.*, 2021).

Um destaque adicional é o uso do amido de centeio como um encapsulador/excipiente, possibilitando sua utilização na distribuição direcionada de medicamentos e nutrientes. Essa versatilidade do amido de centeio evidencia seu potencial como um componente versátil em uma gama de setores industriais. (Kaur *et al.*, 2021).

### **3. 1. 3 Comércio do centeio**

O centeio (*Secale cereale L.*) é uma cultura especialmente adaptada para produção de grãos em ambientes com condições climáticas (Kottmann *et al.*, 2016), no entanto, o

preço por tonelada de grão de centeio é aproximadamente 25-30% menor em comparação com o trigo, (Hübner *et al.*, 2013). Essa diferença de preço impacta significativamente os custos de produção, o que pode influenciar as decisões dos agricultores na escolha das culturas a serem cultivadas em determinadas áreas.

No cenário brasileiro, os principais destinatários do centeio são os moinhos, que o fornece às indústrias de panificação para a produção de pães mistos de trigo com centeio. Entretanto, a cadeia de produção e utilização desse grão carece de organização, resultando em um mercado instável e pouco definido, prejudicando tanto os produtores quanto os processadores de farinha e pães. A estimativa oficial da produção de centeio muitas vezes carece de informações precisas. Em diversos casos, quando os produtores utilizam recursos próprios ou destinam a cultura para a cobertura do solo ou pastejo, essas informações não são devidamente repassadas ou contabilizadas. O estado do Rio Grande do Sul (RS) destaca-se como o principal produtor de centeio no Brasil, exceto durante anos de ocorrência do fenômeno "El Niño", quando eventos de chuvas excessivas, especialmente durante a fase reprodutiva da cultura, limitam a produtividade final dos grãos (Nascimento, 2021).

De acordo com dados oficiais, a área cultivada com centeio na última década foi de aproximadamente 8 mil hectares, sendo que em 2003 apenas 2,6 mil hectares foram cultivados. A produtividade média de grãos é superior a 1.200 kg/ha. Apesar de o Brasil não importar grãos de centeio, a indústria farmacêutica compra no exterior alcaloide (ergotamina) derivado dessa cultura (Nascimento, 2021).

Os dados nacionais apesar de incerto em diversos aspectos espelham os dados da região Sul e Centro-Sul, onde a produção nacional é fortemente influenciada pelas dinâmicas da região Sul. A Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) para os anos de 2023/2024 com dados comparativo da área produzida e da produtividade, os valores tendem a uma queda de 11,1% na área cultivada, um aumento de 30,8% na produtividade, e um crescimento de 16,2% na produção total. (Conab, 2023).

A produtividade e produção de determinadas regiões do Brasil para as safras de 2023 e 2024 são dados da CONAB. Na região Sul, houve uma redução na área cultivada de 4.5 mil hectares em 2023 para 4.0 mil hectares em 2024, representando uma queda de 11,1%. Apesar dessa redução na área, a produtividade aumentou significativamente, passando de 1.644 kg/ha para 2.150 kg/ha, um crescimento de 30,8%. Isso resultou em um aumento na produção total de 7,4 mil toneladas em 2023 para 8.6 mil toneladas em 2024, uma variação positiva de 16,2% (Conab, 2023).

No Paraná, a área cultivada diminuiu de 2,6 mil hectares em 2023 para 2.1 mil hectares em 2024, uma queda de 19,2%. A produtividade, no entanto, teve um incremento de 18,3%, passando de 1.873 kg/ha para 2.215 kg/ha. Esse aumento na produtividade não foi suficiente para compensar a redução na área, resultando em uma ligeira diminuição na produção total de 4.9 mil toneladas em 2023 para 4,7 mil toneladas em 2024, uma queda de 4,1% (Conab, 2023).

No Rio Grande do Sul, a área cultivada permaneceu constante em 1.9 mil hectares entre 2023 e 2024. A produtividade experimentou um aumento expressivo de 57,7%, passando de 1.294 kg/ha para 2.041 kg/ha. Esse aumento na produtividade resultou em uma produção total que passou de 2.5 mil toneladas em 2023 para 3.9 mil toneladas em 2024, uma variação positiva significativa de 56,0% (Conab, 2023).

Não há dados relevantes de produção de centeio em outras regiões do Brasil, segundo a CONAB (Conab, 2023).

### **3. 1. 4 Estrutura do grão de centeio**

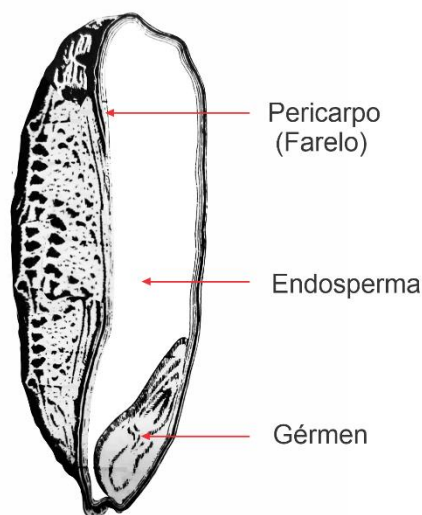
O cultivo do centeio (*Secale cereale*) revela diferenças marcantes entre suas variedades cultivadas e as silvestres. As variedades cultivadas são reconhecidas por terem raquis não fragmentados, grãos de grande porte e um ciclo anual de desenvolvimento. Em contraste, as formas silvestres são caracterizadas por raquis que se quebram durante a maturação, grãos menores e um padrão de crescimento perene. Existe uma variação considerável na expressão desses traços tanto em termos de intensidade quanto de frequência, entre as diversas variedades de centeio (Baier, 1996).

Em relação a outras espécies de cereais de inverno, o centeio destaca-se pela sua notável regularidade na formação das espigas, amadurecimento e morfologia da planta. Caracteriza-se por uma espiga alongada, contendo duas flores fecundas e dois grãos por espigueta, seguidas por glumas lineares e uninervadas, além de aristas curtas. Seu aspecto floral apresenta três estames grandes, produtoras de uma boa quantidade de pólen. Diversas partes da planta, as primeiras folhas, como coleótilos, os nós, as bases dos colmos, as aurículas e as antenas, bem como as regiões (camadas) de aleurona, comumente apresentam uma coloração violácea. Essa coloração é atribuída à presença de antocianina, o pigmento responsável por essa característica (Baier, 1996).

Os grãos de centeio (GC) possuem formato oval ou de cunha e podem apresentar uma variação de cor entre acastanhada clara a escura (Fresno *et al.*, 2020; Petersson *et al.*, 2007; Tuck *et al.*, 2006). O grão de cereal integral (Whole Grain Cereal - WGC) é

estruturado por três regiões organizacionais primárias: endosperma (80–85%), farelo (13–17%) e germe (1,2–11,9%) (Boukid *et al.*, 2018; Tsen, 1985; Rojas *et al.*, 2017). O GC está conectado ao endosperma pela camada de aleurona e consiste no embrião e no escutelo. Semelhante ao grão de trigo, o principal componente do grão de centeio são os carboidratos, mais os conteúdos lipídicos e proteicos dos grãos (Boukid *et al.*, 2018) (Figura 1).

**Figura 1-** Corte esquemático longitudinal de grão de centeio.



Fonte: Adaptado de Grist (1959).

## 3. 2 FÍSICO-QUÍMICA

### 3. 2. 1 Umidade

O teor de umidade em produtos como farinha de grãos e cereais desempenha um papel crucial não apenas na determinação da vida útil, mas também na avaliação do teor de sólidos presentes (Popper; Schäfer; Freund, 2006). Além disso, o conteúdo de água representa um índice comercial significativo, pois influencia tanto o peso específico dos grãos quanto a conservação da farinha e suas características tecnológicas (Quaglia, 1991).

O teor de água nos grãos é altamente variável e está diretamente relacionado ao clima e ao ambiente de cultivo e desempenhando um papel na determinação da qualidade do produto final. Em certos casos quando os grãos apresentam elevada carga de umidade, é necessário submetê-los a um processo de secagem para minimizar o teor de água a um nível seguro segundo os requisitos de qualidade (Quaglia, 1991).



A retirada de água pode ser feita empregando-se vários métodos, desde a secagem natural até a retirada de umidade por via mecânica, que envolve a técnica intermitente, estacionária, contínua e seca-aeração (Biagi *et al.*, 2002).

No caso específico da farinha de centeio integral (FCI), os valores de umidade podem apresentar variações aceitáveis, no entanto, é fundamental ressaltar que valores dentro dos limites recomendados, os valores de aceitabilidade para farinha de centeio situam-se entre 14,5% (Cardoso *et. al.*, 2019).

Com base na Resolução da Diretoria Colegiada - RDC N° 711, de 1° de julho de 2022, que dispõe sobre os requisitos sanitários de diversos produtos alimentícios, incluindo amidos, biscoitos, cereais integrais, cereais processados, farelos, farinhas, farinhas integrais, massas alimentícias e pães, observa-se que o teor máximo de umidade permitido é de 15% para amidos de cereais, farelos e farinhas (Brasil, 2022b)

É importante evitar fermentações indesejadas e o aumento excessivo da temperatura. Outro fator importante que faz da umidade um parâmetro importante (Elias *et. al.*, 2007), são as reações químicas e bioquímicas que podem ocorrer durante o armazenamento, uma vez que níveis elevados podem permitir o crescimento de microrganismos, representando um perigo para o crescimento de fungos e a produção de micotoxinas (Hădărugă *et al.*, 2016) e redução dos valores de água dificulta a atividade biológica que ocorrem durante o período de pós-colheita.

O controle, parte do princípio de que tanto as enzimas presentes no grão de centeio e micro-organismos que metabolizam seus substratos e demais componentes dependem da presença de água para a desempenhar de sua funcionalidade. Ao mitigar o percentual de umidade disponível para níveis seguros de estocagem e armazenamento, ocorre uma desaceleração na velocidade das reações que haveriam de ocorrer no produto e no avanço de interações indesejáveis (Gonelli *et. al.*, 2007).

Portanto, a manutenção de níveis baixos de umidade é fundamental para garantir uma vida útil longa do produto, haja vista que, o conteúdo de água representa uma problemática comercial importante, visto que interfere no peso específico do grão e suas características tecnológicas (Quaglia, 1991).

Em síntese, o controle da umidade simboliza segurança de processo ao longo da cadeia produtiva (Gonelli *et al.*, 2007).

### 3. 2. 2 Proteínas

As proteínas são definidas como polímeros naturais estruturados por cadeias de aminoácidos (Shewry; Lafiandra, 2022) que se ligam entre si através de ligações peptídicas entre o grupo carboxila e o grupo amino dos resíduos de aminoácidos, ambos ligados ao mesmo átomo de carbono (carbono- $\alpha$ ) (Sgarbieri, 1996; Nelson; Cox, 2011). Essas ligações podem variar de acordo com a afinidade de suas cadeias laterais, cujas características apolares ou polares determinam o aspecto hidrofóbico ou hidrofílico das moléculas (Nelson; Cox, 2011).

Os grupos R é variável em estrutura, tamanho e carga elétrica, e influencia a solubilidade dos aminoácidos em água e sua interação (Chieh, 2006) provocando alterações na disposição da molécula, ou seja, dobramentos e interações intercadeias, por meio de atração iônica, interações hidrofílicas, ligações de hidrogênio, e hidrofóbicas, para favorecer ligações de sulfeto, que por sua vez, formar uma rede tridimensional entre as proteínas, enquanto que cadeias helicoidal e dobrada permitem elasticidade e viscosidade (Chieh, 2006).

As proteínas dos cereais podem ser classificadas de acordo com a solubilidade, sendo elas as albuminas, que são solúveis em água; globulinas, solúveis em soluções salinas diluídas; prolaminas, solúveis em soluções alcoólicas e glutelinas, solúveis em soluções ácidas ou alcalinas (Sgarbieri, 1996).

As proteínas de cereais que não são solúveis em água compõem o glúten apesar de ter semelhanças entre a origem vegetal constituem uma matriz contínua ao redor dos grânulos de amido (Goesaert *et al.*, 2005) e pode variar dependendo do grão. Elas possuem composição e estrutura distintas e são distinguidas com base na forma da molécula, tamanho da proteína, perfil de agregação e habilidade de formar estruturas maiores, fator essencial para desvendar sua complexidade biológica e seu potencial na indústria alimentícia. (Arendt; Zannini, 2013).

Nesse sentido, as proteínas presentes no centeio podem ser agrupadas em três categorias distintas, as secalinas, categorizadas como prolaminas, enzimas hidrolíticas e proteínas relacionadas à resistência contra patógenos (Arendt; Zannini, 2013).

Distintamente, as secalinas, também conhecidas como prolaminas, constituem uma parte significativa, principalmente no endosperma amiláceo do centeio. Além disso, as enzimas hidrolíticas desempenham um papel fundamental na mobilização de nutrientes durante o processo de germinação, garantindo o desenvolvimento saudável do grão. As

proteínas associadas à resistência a patógenos destacam a importância do centeio como um organismo resiliente em ambientes desafiadores (Arendt; Zannini, 2013)

Os grãos de centeio apresentam teores de proteínas totais variando entre 6,5% e 14,5% (Hanse *et al.*, 2004). As proteínas de armazenamento contidas no endosperma do centeio são reconhecidas como proteínas capazes de formar glúten. Em comparação com o trigo, o centeio é o segundo cereal com maior quantidade dessas proteínas. No entanto, a massa de centeio é mais fraca ao estiramento quando comparada à do trigo (Arendt; Zannini, 2013). Nesse contexto, a proteína do trigo ganha certo destaque, por ser uma das proteínas vegetais mais utilizadas comercialmente para formar glúten. A digestibilidade ideal de seu resíduo cru purificado é de cerca de 93%, contém albumina (34,5% da proteína total), globulina (15,6% da proteína total), glutelina (10,6% da proteína total) e prolaminas – gliadina – (4,6% da proteína total) (Akharume; Aluko; Adedeji, 2021; Zhu; Zhou; Qian, 2006).

Dessa forma as proteínas do centeio, em comparação ao trigo ocasionam diferenças reológicas por não conseguir formar estrutura tridimensionais. Existem duas possíveis razões para essa particularidade. Proteínas do centeio e do trigo apresentam diferenças tanto qualitativas quanto quantitativas. A rede de glúten do trigo é composta por subunidades de glúten de alto peso molecular (*HMW-GS: High Molecular Weight Glutenin Subunit*) e baixo peso molecular (*LMW-GS: Low Molecular Weight Glutenin Subunit*) estabilizadas por ligações dissulfeto intermoleculares (Wieser; Kieffer, 2001).

Mas especificamente, de acordo com Lindsay; Skerritt, (1999); Kasarda, 1999, (apud Branlard *et al.*, 2001), esse contraste é atribuído às gluteninas (HMW-GS e LMW-GS) a qual se destaca-se por duas classes distintas de proteínas: as proteínas lineares de 77 a 160 kDa (HMW-GS) e as proteínas globulares de 23 a 68 kDa (LMW-GS), cujas interações entre as proteínas lineares ocorre por meio de ligações dissulfeto (SS), enquanto as cadeias de proteínas globulares por meio de ligações SS e forças de ligação não covalentes, como interações de Van de Waals, (Wieser, 2007), interações que formam a rede de glúten e fornecem viscoelasticidade à massa (Lindsay; Skerritt, 1999) e a gliadina (aciformes do trigo) é composta por misturas heterogêneas de proteínas monoméricas, divididas em quatro grupos de acordo com a mobilidade eletroforética:  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - e  $\omega$ -gliadina. Seu peso molecular (Pm) varia de 3 a  $8 \times 10^4$  kDa que conferem propriedades espumantes e viscosas à massa (Mita *et al.*, 1978; Thewissen *et al.*, 2011), geralmente no estado de ligação intramolecular por pontes de dissulfeto (SS) ou com grupos sulfidril livres (SH) e estruturas primárias de domínio central hidrofílico (CD)

contendo sequências repetitivas de aminoácidos (AA) particularmente ricas em glutamina e prolina (Thewissen *et al.*, 2011).

No entanto, as proteínas do centeio não possuem subunidades de glúten de baixo peso molecular. Embora o centeio também contenha subunidades de alto peso molecular (secalinas HMW), sua capacidade de formar ligações dissulfeto intermoleculares é inferior em comparação com as subunidades de glúten HMW do trigo (Köhler; Wieser, 2000). A singularidade do centeio reside em seu distinto, teor de lisina e perfil de aminoácidos equilibrado em cerca de 0,151–0,281mg/g (Bushuk, 2001; Nystrom *et al.*, 2008)

A segunda razão para a limitada capacidade de agregação das proteínas do centeio é a fração pentosana, que em meio ao processo de mistura ou maquinagem forma uma camada gelatinosa nas partículas de farinha, atribuindo um perfil limitante de ligações intermoleculares entre os resíduos de proteína (Wang, 2003).

Consequentemente, a massa de centeio tem uma plasticidade maior do que a massa de trigo e sua superfície é mais úmida e pegajosa, o que torna tanto o processamento manual da massa quanto o mecânico mais desafiador em comparação com a massa de trigo (Bushuk, 2001).

### 3. 2. 2. 1 Solubilidade das frações proteicas do centeio

Os grãos de centeio possuem semelhanças com o trigo em sua variedade de proteínas solúveis em diferentes meios. Quantitativamente, as albuminas e globulinas representam 29-40% e 8-11% da proteína total no grão de centeio, respectivamente, enquanto as glutelinas e prolaminas contribuem com 9-15% e 17-24%, respectivamente (Redant *et al.*, 2017; Deleu *et al.*, 2020).

As proteínas, albuminas e globulinas, são solúveis em partes incluindo água e sal diluído respectivamente, apresentam variações em seus pesos moleculares, que variam de 66 -150 kDa, conforme observado por técnicas como SEC-HPLC (cromatografia líquida de alta eficiência por exclusão de tamanho), filtração em gel e eletroforese em disco (Redant *et al.*, 2017; Deleu *et al.*, 2020).

As prolaminas e glutelinas encontradas no centeio são compostas por quatro grupos específicos de proteínas, chamadas secalinas HMW,  $\omega$ -secalinas, 40 k  $\gamma$ -secalina e 75 k  $\gamma$ -secalina. Cada uma destas frações expressa diferentes características de extensões de ligações dissulfeto intermoleculares, o que corrobora com sua variação e capacidade de extração (Schalk *et al.*, 2017; Gellrich *et al.*, 2003).

De acordo com a categorização de Osborne, as prolaminas são consideradas proteínas extraíveis com álcool aquoso (60-70% de etanol ou 50% de acifor-1-ol), sendo que parte delas pode não ser recuperada em meio alcoólico aquoso. Por outro lado, a glutelina é a fração solúvel em ácido diluído (Tatham; Shewry, 2012).

O grupo HMW-secalina constitui aproximadamente 7–9% da secalina total, com peso molecular aparente na faixa entre 90-144 kDa (Gellrich *et al.*, 2003). Para a extração total do grupo HMW-secalina, é preciso o uso de um agente redutor juntamente com meio alcoólico (Redant *et al.*, 2017; Salmanowicz *et al.*, 2014).

Dois outros grupos de proteínas são 40 k  $\gamma$ -secalina (33-40 kDa) e 75 k  $\gamma$ -secalina (54-75 kDa), participam em 24–29% e 39–46% da proteína total. Um agente redutor é necessário para a extração completa de 75 k  $\gamma$ -secalinas, no entanto, a fração monomérica de 40 k  $\gamma$ -secalinas é extraível em meio alcoólico (Redant *et al.*, 2017; Salmanowicz *et al.*, 2014).

O quarto grupo,  $\omega$ -secalinas (48-53kDa), são solúveis em álcoois aquosos e representam cerca de 13–17% da proteína secalina total (Redant *et al.*, 2017; Salmanowicz *et al.*, 2014).

### 3.2.3 Lipídios

Os lipídios são participantes importantes das membranas celulares, de acordo com o caráter hidrofóbico ou hidrofílico presente em sua estrutura, são classificados em oito categorias, a saber: Ácidos Graxos (Faz), glicerolipídios, glicerofosfolipídios, esfingolipídios, lipídios esteróis, lipídios prenol, sacarolipídios, e policetídeos, que apresentam subcategorias (Fahy *et al.*, 2005). Sua personalidade é definida por sua polaridade, uma vez que esses lipídios possuem uma “cabeça” hidrofílica e uma “cauda” hidrofóbica (lipofílica), concedendo estabilidade e funcionalidade às membranas das células orgânica (Faergemand; Krog, 2003).

Os lipídios são oriundos de organelas, esferossomos, membranas e diferentes estruturas bioquímicas (Goesaert *et al.*, 2005). Apesar de compreenderem uma pequena proporção, variando de 1,5% a 7%, na composição dos cereais, estão distribuídos de forma desigual em todo grão. Os lipídios são compostos por complexo de componentes, incluindo ácidos graxos essenciais, vitaminas lipossolúveis e fitosteróis, conhecidos por suas propriedades hipocolesterolêmicas, capazes de contribuir para a redução dos níveis de colesterol no sangue (Ruibal-Mendieta *et al.*, 2004; Jiang; Wang, 2005). Originais de

diversas estruturas celulares, como membranas, organelas e esferossomos, esses lipídios participam para a complexidade da matriz lipídica dos cereais (Goesaert *et al.*, 2005).

É possível serem encontrados em diversas regiões do grão, sendo encontrados no germe, na camada de aleurona e no endosperma (Finnie *et al.*, 2009). Os lipídios do grão de centeio (GC), por exemplo, possuem mais de 50% de ácidos graxos poli-insaturados (PUFAs) e vários compostos bioativos, como carotenoides e tocoferóis, conferindo ao GC características bastante particulares (Ghafoor *et al.*, 2017; Hadbaoui *et al.*, 2010; Rondanelli *et al.*, 2019; Saoussem *et al.*, 2009). Sua presença no grão, desempenha funções importantes na germinação e no desenvolvimento da semente (Hargin; Morrison, 1980).

São divididos em lipídios aciform (*SLs: Starch Lipids / Lipídios amiláceo*) e não aciform (*NSLs: Non-Starch Lipids / lipídios não-amiláceo*) (Pareyt *et al.*, 2011; Gerits *et al.*, 2014; Chinma *et al.*, 2015), distinguidos como lipídios livre (60% deles) e ligados (40% deles). O conteúdo livre compreende cerca de 75% dos apolares e 25% dos polares, enquanto a fração ligada é composta em sua vasta maioria de lipídios polares (galactolipídios e fosfolipídios) (Morrison *et al.*, 1975; Morrison, 1978; Pareyt *et al.*, 2011).

Em cereais como o trigo, a carga lipídica varia entre 2,0 e 3,5% do peso seco (Carr *et al.*, 1992; Prabhasankar *et al.*, 2000) distribuído entre o endosperma, cariopse e gérmen. O endosperma contem entre 35 e 45% de lipídios (Pareyt *et al.*, 2011; Gerits *et al.*, 2014; Chinma *et al.*, 2015), apesar de pequena quantidade pode estar presente em 2,5 a 3,3% da cariopse (Finnie *et al.*, 2009) e 10-15% no gérmen (Brandolini e Hidalgo, 2012).

Os SLs e NSLs encontrados dentro dos grânulos de amido contém em torno de 1% do total de acifor, 89-94% dos quais são fosfolipídios, 4-6% de lipídios não polares e 1-7% de galactolipídios (Morrison, 1978; Hargin; Morrison, 1980). A maioria dos NSLs, também representam 1% do total de lipídios, compostos de apolares (33-47%), seguidos por fosfolipídios (22-35%) e galactolipídios (20-38%) (Hargin; Morrison, 1980). Apesar de pequena quantidade pode estar presente em 2,5 a 3,3% da cariopse (Finnie *et al.*, 2009) e 10-15% no gérmen (Brandolini; Hidalgo, 2012).

A concentração de lipídios no grão processado e comercializado como farinha, tende a representar uma pequena proporção dos componentes gordurosos, variando de 1,0 a 1,5%, entretanto sua influência é significativamente sentida em aspectos qualitativos de produtos elaborados. Produtos panificados tendem a ser grande beneficiados na sua

estabilização das células de gás na fase de fermentação por exemplo (Sroan; Macritchie, 2009a).

A estrutura e funcionalidade bioquímica das gorduras está intimamente relacionada a seu desempenho tecnológico, pois em contextos específicos como a panificação suas características desempenham controle das células gasosas, e ajudam a formar uma estrutura na massa de pão, proporcionando uma rede na qual o dióxido de carbono liberado durante a fermentação pode se prender. Essa retenção de gás ajuda a massa a crescer e a desenvolver uma textura aerada, além de sua pouca afinidade com a água, ajudar no controle da umidade durante o processo de panificação (Sroan; Macritchie, 2009a)

Nesse sentido, seu desempenho é relevante em toda linha produtiva graças as propriedades tensoativas e à capacidade de interação com as proteínas que atuam positivamente na transformação e conservação do produto acabado, (Quaglia, 1991).

Ademais, as gorduras desempenham um papel fundamental como marcadores para avaliar a qualidade dos alimentos e determinar a tecnologia de processamento, posicionando-se como itens de grande interesse em pesquisa nas áreas de saúde, bem-estar e nutrição dietética (X. Guo *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2022).

### **3. 2. 4 Vitaminas e minerais**

A maioria dos cereais é uma fonte importante de vitaminas e minerais (Hoseney, 1991). Muitos estudos destacam a vantagem dos micronutrientes e fitoquímicos presentes no farelo dos grãos dos cereais. No entanto, as etapas de refino do grão removem o farelo como subproduto, diminuindo sua quantidade no produto comercializado e consequentemente, no que é consumido (Liu, 2007).

Considerando sua importância constitucional, existem recomendações que quantificam a ingestão média diária de cereais, para o indivíduo adulto. Essas indicações são descritas no documento “*Dietary Reference Intakes*” (Ingestão Dietética de Referência) (Iom, 2000; apud Trumbo *et al.*, 2002), onde os micronutrientes pertinentes à necessidade alimentar, conforme o documento, incluem: ácido nicotínico (B3), riboflavina (B2), zinco, ácido pantotênico (B5), selênio, sódio, fósforo, manganês, tiamina (B1), piridoxina (B6), biotina (B8), folato (B9), vitamina E, potássio, magnésio, cálcio, ferro e cobre.

O centeio é uma fonte naturalmente rica e diversificada de vitaminas e minerais essenciais, fornecendo uma mistura enriquecedora de nutrientes vitais, ricos nos grãos de

centeio (Rodehutschord *et al.* 2016; Koehler; Wieser, 2012; Arendt; Zannini, 2013; Liukkonen *et al.*, 2006). O quadro 1 abaixo apresenta os principais componentes minerais e vitaminas do centeio.

**Quadro 1** – Minerais e vitaminas presentes na farinha de centeio

Minerais	Peso
Potássio	520 (mg/Kg)
Fósforo	380 (mg/Kg)
Magnésio	130 (mg/Kg)
Cálcio	70 (mg/Kg)
Manganês	7.5 (mg/Kg)
Ferro	9 (mg/Kg)
Selênio	22(µg/100 g)
Zinco	2,4-4 (mg/Kg)
Cobre	0,4-0,9 (mg/Kg)
Sódio	2.34 (mg/Kg)
Vitamina	
Tiamina	3.7 (mg/Kg)
Riboflavina	1.7 (mg/Kg)
Niacina	18 (mg/Kg)
Piridoxina	2.3 (mg/Kg)
Ácido	
Pantotênico	15 (mg/Kg)
Ácido fólico	1.4 (mg/Kg)
Vitamina E	40 (mg/Kg)

Fonte: Arendt, Zannini. (2013); Michalska. (2008); Rodehutschord *et al.* (2016); Koehler, Wieser. (2012), apud Kaur, (2021).

### 3. 2. 5 Carboidratos

Nos cereais, os carboidratos são os principais componentes do grão maduro em termos quantitativos, representando aproximadamente 70% de seu peso seco. Esses carboidratos compreendem principalmente amido, que varia entre 60 a 68%, além de pentosanas, que correspondem a cerca de 6,5%, celulose, presente em uma faixa de 2 a 2,5%, e 1,5% de açúcares redutores (Quaglia, 1991).

Os carboidratos são categorizados com base no tamanho molecular e na extensão da polimerização, quantidade e na composição dos monossacarídeos presentes. Essa classificação abrange açúcares, que englobam mono e dissacarídeos; oligossacarídeos; amido, representado por amilose e amilopectina e polissacarídeos não amiláceo (Lafiandra *et al.*, 2014). Adicionalmente, podem ser divididos em duas categorias principais: carboidratos disponíveis e não disponíveis (Englyst; Hudson, 1996).



Os carboidratos disponíveis ou glicêmicos são aqueles que são digeridos e absorvidos pelo intestino delgado humano. Isso inclui o amido não resistente, os açúcares solúveis e as maltodextrinas (Hoseney, 1991; Englyst; Hudson, 1996). Por outro lado, os carboidratos não disponíveis consistem em polissacarídeos não aciform, como arabinoxilanas,  $\beta$ -glucanas, celulose e peptídeos arabinogalactanas (Henry, 1985), além do amido resistente. Este último passa pelo intestino grosso, onde serve como substrato para fermentação, sendo considerado um carboidrato não glicêmico (Englyst; Englyst, 2005).

Em sua composição descrita entre 66% a 80% de sua composição total, o centeio tem o amido como o carboidrato mais abundante. O amido é o principal tipo de carboidrato encontrado nos grãos de centeio, representando de 56% a 75% de sua composição. Em seguida, encontramos cerca de 15% a 22% de fibras e aproximadamente 3% de açúcares, incluindo glicose (0,61%), frutose (0,18%) e sacarose (2,58%) (Rodehutschord *et al.*, 2016; Frølich *et al.*, 2013; Arendt; Zannini, 2013; Shewry *et al.*, 2010; Andersson *et al.*, 2009).

### 3. 2. 5. 1 Amido

O amido, é de longe o componente glicídico mais significativo e destaca-se por sua categórica significância tecnológica, especialmente devido à sua capacidade de interação com a água ao absorvê-la (Quaglia, 1991). A funcionalidade do amido relaciona-se com o controle ou agregação de propriedades como textura, volume, consistência, umidade e vida de prateleira de alimentos (Yonemoto *et al.*, 2007).

É um material biológico de grande utilidade para várias indústrias. Sua extração corre na casa dos milhões de toneladas extraídas anualmente em todo o mundo. Entretanto, o os cereais não são os únicos que compõem a lista de culturas que são exploradas nesse grupo, também se destacam o os tubérculos e raízes. (Burrell, 2003).

Diversos estudos indicam a presença de moléculas intermediárias entre a amilose e a amilopectina em amidos de origem botânica, como trigo (Banks *et al.*, 1972), ervilha enrugada (Bertoft *et al.*, 1993), batata (Yoon; LIM, 2003), milho com alto teor de amilose (Klucinec; Thompson, 1998; Wang, 1993), arroz (Takeda *et al.*, 1993), e aveia (Wang; White, 1994). No caso do amido de centeio, também foram identificados materiais intermediários (Banks *et al.*, 1972; Hew; Unrau, 1970).

Dentre essas extrações, aproximadamente 60% são direcionadas para a indústria alimentícia, enquanto os outros 40% são utilizados em produtos farmacêuticos e para fins não-comestíveis (Burrell, 2003).

Em termos de composição, o amido consiste em uma combinação de amilose (Am) e amilopectina (Ap). Em amidos de cereais, é comum encontrar uma proporção típica de 22-28% de amilose e 72-78% de amilopectina. No entanto, em certas fontes botânicas específicas, são identificados genótipos com níveis baixos de amilose, denominadas de “*waxy*”, com menos de 1% de amilose, e predomínio de amilopectina chegando a até 70% (Colonna; Buléon, 1992; Jane *et al.*, 1999; Moore *et al.*, 1984, apud Oates, 1997; Naguleswaran *et al.*, 2013).

A amilose é uma molécula essencialmente linear que corresponde a resíduos D-glucopiranosil ligados a  $\alpha$ - (1-4) (Liu *et al.*, 2023), com uma proporção reduzida, inferior a 1%, de ligações  $\alpha$ -(1-6) (Ball *et al.*, 1996). Seu grau de polimerização (GP) varia entre  $5 \times 10^2 - 6 \times 10^3$  (Colonna; Buléon, 1992). A amilose pode formar complexos de inclusão helicoidais com lipídios e possui um peso molecular relatado de aproximadamente  $2,2 \times 10^5$  Da (Berry *et al.*, 1971).

Apesar do baixo grau de ramificação (Copeland *et al.*, 2009), a molécula pode formar uma dupla hélice por via das ligações de hidrogênio que estão presentes paralelamente à sua estrutura cristalina (Hsein-Chih; Sarko, 1978). E a presença de átomos de hidrogênio no interior da hélice propicia um caráter hidrofóbico disponível para a formação de complexos com ácidos graxos livres, álcoois, componentes glicéridos dos ácidos graxos e iodo (Thomas; Atwell, 1999).

A amilopectina é ligada por ligações glicosídicas  $\alpha$ -D-(1-4) e ligações glicosídicas  $\alpha$ -D-(1-6) e atinge uma massa molecular média de  $1 \times 10^7 - 1 \times 10^9$  Da, devido à sua estrutura altamente ramificada (Gous; Fox, 2017), com uma proporção de 5-6% de ligações  $\alpha$ -(1-6) (Colonna; Buléon, 1992). Seu GP variando entre  $3 \times 10^5 - 3 \times 10^6$  (Zobel, 1988). Possui estrutura em dupla hélice presente entre 60-90% dos amidos é o componente cristalino predominante que da forma ao grânulo (Copeland *et al.*, 2009; Veregin *et al.*, 1986; Zeeman *et al.*, 2010).

Além de sua estrutura central cristalina o amido pode variar significativamente dependendo da espécie botânica. Ele pode apresentar uma diversidade de formas, como elipsoides, esféricas, poliédricas, ovoides, lenticulares, truncadas, redondas, cilíndricas,

cupuliformes, mitriformes, aciformes, pentagonais arredondadas, hexagonais arredondadas, e até mesmo convexo-bicôncavas (Cereda *et al.*, 2003).

Além disso, o tamanho dos grânulos de amido pode variar de 1 a 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro, com distribuição de tamanho podendo ser unimodal ou bimodal. A forma como os grânulos se associa também pode ser simples ou composta, influenciando em suas propriedades. A composição química do amido, bem como seu tipo (A, B ou C), também são fatores determinantes em suas características (Zeeman *et al.*, 2010). Essa diversidade de características evidencia a complexidade e versatilidade do amido como um componente fundamental em muitas plantas.

O amido encontrado em grãos de cereais como centeio, além de cevada e trigo, exibe uma distribuição dimensional bimodal, expondo uma complexidade de formas do grânulo. A análise por difração de raios X (*XRD – X-ray diffraction*) revela a presença de dois tipos de grânulos de amido: tipo (A) e tipo (B). Esses dois tipos de grânulos de amido têm características morfológicas distintas. Os grânulos do tipo (A) são maiores e têm um formato lenticular, enquanto os do tipo (B) possuem uma forma mais esférica. Essa diversidade morfológica resulta em uma variação significativa no tamanho dos grânulos, que varia aproximadamente de 6,67 a 31  $\mu\text{m}$  no amido de centeio (Vamadevan; Bertoft, 2015; Gomand *et al.*, 2011; Buksa, 2018).

Os amidos derivados do centeio, especialmente aqueles com pequenos grânulos, exercem uma influência significativa nas propriedades de inchaço e colagem (Buksa, 2018). Esses amidos demonstraram um poder de inchaço e capacidade de ligação à água variados, reportados entre 6,2 e 13,8 g/g e 86,5–141%, respectivamente, reforçando sua eficácia na indústria alimentícia (Áucio; Eliasson, 2009; Buksa, 2018).

O teor de amilose nos grãos de centeio pode variar consideravelmente, de 13,1 a 25,8%, dependendo da variedade e do método de isolamento do amido. Além disso, tanto o teor de amilose/amilopectina quanto a cristalinidade do amido podem apresentar variações significativas (Verwimp *et al.*, 2004; Gomand *et al.*, 2011; Buksa, 2018; Zobel, 1988; Nowotna *et al.*, 2006) como pode ser observado o quadro 2 a seguir:

**Quadro 2-** Rendimento de amido, teor de amilose, tamanho de grânulos e padrão de difração de raios X de amidos de cultivares de centeio.

Cultivar	Tipo de amido/método de isolamento	Rendimento de amido (%)	Teor de amilose (%)	Teor de amilopectina (%)	Tamanho do grânulo (µm)	Padrão de raios X	Cristalinidade (%)
Local	Baseado em pronase	79,8–80,9 <sup>a</sup>	24,3– 25,6 <sup>a</sup>	-	31µm <sup>a</sup>	Tipo <sup>a</sup>	100–113,1 <sup>a</sup>
	Base alcalina	42,2 <sup>a</sup>	25,8 <sup>a</sup>				
Avanti	Baseado em pronase	85,5 <sup>b</sup>	22,4 <sup>b</sup>	73,2 <sup>b</sup>	30–31 µm <sup>b</sup>	Tipo A <sup>b</sup>	92 <sup>b</sup>
Nikita	Baseado em pronase	83,0 <sup>b</sup>	24,2 <sup>b</sup>	72,3 <sup>b</sup>	30–31 µm <sup>b</sup>	Tipo A <sup>b</sup>	100 <sup>b</sup>
Treviso	Baseado em pronase	81,5 <sup>b</sup>	24,9 <sup>b</sup>	70,4 <sup>b</sup>	30–31 µm <sup>b</sup>	Tipo A <sup>b</sup>	93 <sup>b</sup>
Amilo	Método`s de Richter	64,1 <sup>c</sup>	23,40 <sup>c</sup>	-	6,67 µm <sup>c</sup>	-	-
	Método enzimático baseado em xilanase-protease	97 <sup>c</sup>	17.21 <sup>c</sup>		19,53µm <sup>c</sup>		
Eco	Método`s de Richter	-	22,9 <sup>e</sup>	-	-	-	-
Schlagler	Método`s de Richter	-	23,8 <sup>e</sup>	-	-	-	-
Espírito	Método`s de Richter	-	22,8 <sup>e</sup>	-	-	-	-
Dankowskie Zlote	Método`s de Richter	-	22,9 <sup>e</sup>	-	-	-	-
Waldstaudenroggen	Método`s de Richter	-	13.1 <sup>e</sup>	-	-	-	-

Fonte: Verwimp *et al.*, (2004)<sup>a</sup>, Gomand *et. al.*, (2011)<sup>b</sup>, Buksa (2018)<sup>c</sup>, Zobel (1988)<sup>d</sup>, Nowotna *et al.*, (2006)<sup>e</sup>, apud, KAUR, (2021)

### 3. 2. 5. 2 *Fibra Dietética*

As fibras dietéticas são polissacarídeos não amiláceos e, no trigo, estão presentes, basicamente, no pericarpo (Atwell, 2001), destacando-se as arabinoxilanas, a celulose e a  $\beta$ -glucanas (Maes; Delcour, 2001). Podem ser classificadas de acordo com a estrutura, com a solubilidade em água e o grau de fermentação, em solúveis e insolúveis (Atwell, 2001).

As fibras desempenham diversas funções fisiológicas vitais, modificação das propriedades reológicas que estão intimamente ligadas às suas propriedades físico-químicas. Dentre as quais incluem a capacidade de retenção de água, o intumescimento, a capacidade de ligação a lipídios, a suscetibilidade à degradação bacteriana ou fermentação, e a formação de emulsões e/ou géis favoráveis a produção de pães, laticínios, geleias, carnes e sopas, influenciando significativamente sua textura (Rosell *et al.*, 2010; Elleuch *et al.*, 2011).

É importante ressaltar que as fibras também desempenham um papel na estabilidade dos alimentos, prevenindo a sinérese (separação de líquidos de um gel devido à contração) e contribuindo para a extensão da vida útil dos produtos ricos em gordura (Elleuch *et al.*, 2011). Essas propriedades funcionais das fibras destacam sua importância não apenas na saúde, mas também na indústria alimentícia.

A Regulamentação da Comissão Europeia (CE Nº 1924 de 30 de dezembro de 2006) estabelece critérios específicos para a classificação dos alimentos com base em seu teor de fibras. De acordo com esses critérios, um alimento é considerado uma "fonte de fibras" se contiver pelo menos 3g de fibra por 100g de alimento, ou 1,5g de fibra por 100 kcal. Para ser classificado como "rico em fibras", o alimento deve conter pelo menos 6 gramas de fibra por 100 gramas de alimento, ou 3 gramas de fibra por 100 kcal.

Depois do amido, as fibras alimentares são os principais carboidratos presentes nos grãos de centeio, frações razoáveis estão presentes na camada externa de farelo dos grãos, na faixa de 18–22% em grãos, nesse sentido, o conteúdo total de fibra dos grãos de cereais é caracterizado como a mistura de fibras solúveis e insolúveis (Andersson *et al.*, 2009). O centeio contém 14,41% de fibras insolúveis e 4,50% de fibras solúveis (Aprodu; Banu, 2016)

A fibra dietética é uma estrutura que não pode ser digerida, composta de carboidratos e lignina. É um componente estrutural importante, cujo conteúdo pode modificar durante o processamento do pão de centeio (Hui *et al.*, 2008).

Os compostos de fibra alimentar insolúveis no centeio incluem celulose (1–3%), lignina (1–2%) (Hui *et al.*, 2008; Frølich *et al.*, 2013) e a parte insolúvel das arabinoxilanas. O perfil específico de fibra dietética dos grãos de centeio inclui arabinoxilanas insolúveis (8–12%), frutana (4,5–6,4%) e  $\beta$ -glucana (1–3%) (Hui *et al.*, 2008; Karppinen *et al.*, 2003; Poutanen *et al.*, 2014; Hansen *et al.*, 2003). Presença de arabinoxilanas (21–22%), frutanos (6,6–7,2%) e  $\beta$ -glucanas (4,3–5,3%) no farelo de centeio (Kamal-Eldin *et al.*, 2009). Além disso, a quantidade de  $\beta$ -glucanas possíveis de serem extraído com água no centeio é de 1,2% (Aura *et al.*, 2007).

Por sua vez, fibras solúveis presentes no centeio incluem fruto-oligossacarídeos, como 1-cestose (0,6%), 1,1-cestotetraose (0,3%) e 1,1,1-cestopentaose (0,3%) (Karppinen *et al.*, 2003). Em resumo, as fibras são participantes essenciais dos grãos, e sua presença em produtos alimentícios tem um efeito grande no sabor, na textura e nas propriedades nutricionais e funcionais (Almeida *et al.*, 2013; Koletta *et al.*, 2014).

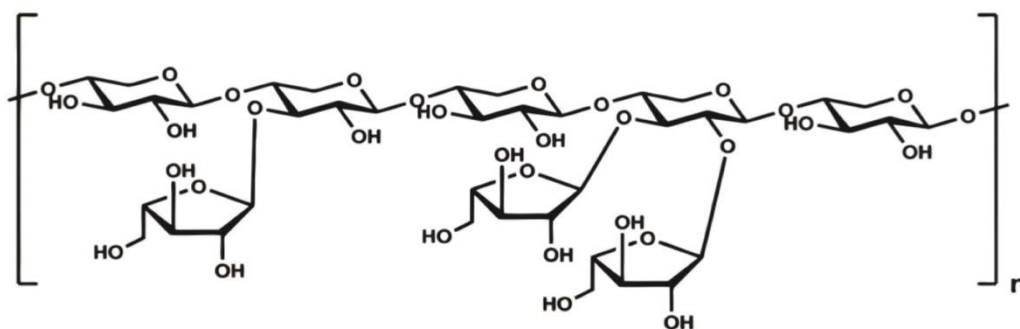
#### 3. 2. 5. 2. 1 Arabinoxilanas

As arabinoxilanas são o participante de destaque do polissacarídeo não amiláceo encontrado nos cereais, proveniente da união de resíduos de arabinose e xilose (Fadel *et al.*, 2018; Hansen *et al.*, 2003; Buksa *et al.*, 2018). De acordo Knudsen; Laerke, (2010) por via de comparação, diferentes cereais, como trigo, centeio, aveia, arroz, cevada e sorgo, o centeio se destaca por possuir uma quantidade superior de arabinoxilana.

As arabinoxilanas estão predominantemente pela estrutura do grão, no endosperma amiláceo, camada de aleurona, farelo e casca dos grãos de cereais, contribuindo em média com 55% da fração total de fibra alimentar (Knudsen; Laerke, 2010). Na farinha de centeio, o conteúdo total de arabinoxilana varia entre 8% e 12,1%, com aproximadamente 2,6% a 4,1% sendo arabinoxilana solúvel em água (HANSEN *et al.*, 2003). Shewry *et al.* (2010) ressalta que os valores podem variar dependendo dos cultivares de centeio utilizados.

A estrutura de um arabinoxilana é fundamentada por uma cadeia linear de resíduos de  $\beta$ -D-xilopiranosil ligados por ligações  $\beta$ -(1→4), nos quais os substituintes de L-arabinofuranosil são conectados através de O-2 ou O-3 (Fadel *et al.*, 2018; Hansen *et al.*, 2003; Buksa *et al.*, 2018) (Figura 2).

**Figura 2-** Estrutura química de arabinoxilanas



Fonte: Kaur *et al.*, (2021)

Relatórios científicos indicam que fatores como a época de colheita, o genótipo do grão e os métodos de extração interferem no conteúdo total de fibra alimentar e em suas propriedades funcionais (Fadel *et al.*, 2018).

Ademais o conteúdo de arabinoxilana também pode ser influenciado pelo método utilizado na extração, que pode variar entre métodos por meio em água, métodos alcalinos, enzimáticos, de extrusão ou mecânicos (Fadel *et al.*, 2018). O arabinoxilana é o componente de fibra alimentar dominante nas amostras de centeio, com um teor médio de 8,9% (variação de 7,5 a 10,3%) (Andersson *et al.*, 2009). Tratamentos com etanol e amostras não tratadas apresentam rendimento percentual recuperado das amostras não tratadas superior a 2,10%, a farinha tratada com etanol, tem rendimento de 1,08% (Dervilly-Pinel *et al.*, 2001). Essas variações destacam a importância da escolha adequada do método de extração ao avaliar o conteúdo de arabinoxilana.

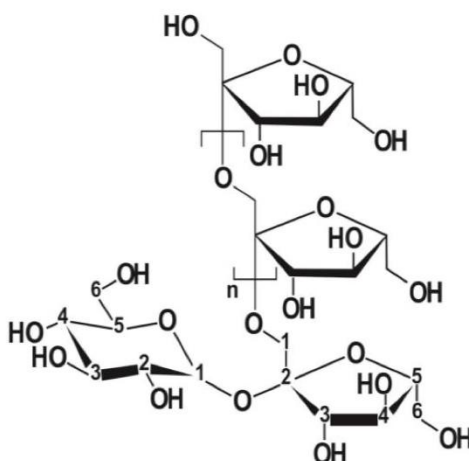
A arabinoxilana apresenta diversas propriedades funcionais que o tornam um componente versátil em aplicações alimentícias. Entre essas propriedades, destacam-se a atividade prebiótica, a capacidade de formação de gel, a absorção de água, a estabilização de emulsões, a substituição de gorduras, o aumento da viscosidade, a formação de filmes comestíveis e a melhoria das características do pão (Buksa, *et al.*, 2012).

Especificamente, arabinoxilanas com alta capacidade de absorção de água é associado à formação de massas com alta viscosidade, o que pode resultar em pães de melhor qualidade (Buksa *et al.*, 2016; Döring; Jekle; Becker, 2016; Katapodis *et al.*, 2003). Essa característica contribui para uma textura mais macia e uma melhor retenção de umidade no produto final.

### 3. 2. 5. 2. 2 Frutanos

Frutanos estão amplamente distribuídos no reino vegetal como constituintes de espécies de dicotiledôneas e monocotiledôneas, assim como algumas espécies de algas (Benkeblia, 2013), são polímeros naturais e FOS, esses, também conhecido como oligofrutano ou oligofrutose, é um nome compartilhado de oligossacarídeos interligados através de ligações glicosídicas  $\beta$ -(2 $\rightarrow$ 1) frutossilfrutose (Chen, 2016; Rahim, *et al.*, 2021). São comumente encontradas em cereais, frutas e vegetais (Rahim, *et al.*, 2021; Martínez-Villaluenga *et al.*, 2014; Singh, *et al.*, 2019). Sua estrutura fundamental está descrita na figura 3:

**Figura 3-** Estrutura molecular de frutanos



Fonte: Kaur *et al.*, (2021)

Quimicamente, frutanos e FOS (frutooligosacarídeos) são polímeros de frutose, com estruturas que variam em comprimento e complexidade que tem a sacarose como molécula central, pode ser composta por massas moleculares diversificadas. A partir de uma visão bioquímica, são definidos por  $1^F(1\text{-}\beta\text{-D-frutofuranosil})_n$  sacarose;  $6^F(6\text{-}\beta\text{-D-frutofuranosil})_m$  sacarose e/ou oligômero de sacarose  $6^G(6\text{-}\beta\text{-D-frutofuranosil})_k$ . Segundo o qual, ( $G$ ) e ( $F$ ) designando a molécula de glicose e frutose ligada a sacarose, assim como definem em qual molécula a cadeia tem início, enquanto ( $n$ ), ( $m$ ) e ( $k$ ) representam o número de unidades monoméricas que podem variar de 0 a 15 para FOS, e até 200 unidades em caso de frutanos em plantas (Ni *et al.*, 2021; Benkeblia, 2013).

Sua nomenclatura geral, classifica-se em quatro categorias: grupo inulina, levan, graminano e neofrutano (Van Laere, 2022; Hernández, 2023; Cimmini, 2023).



Em primeiro lugar, a categoria da inulina consiste em cadeias lineares compostas por 2–60 moléculas de frutose que possuem ligações  $\beta$ -(2→1)-frutossil-frutose, em plantas dicotiledôneas, e apresentam frutano não-redutor do tipo inulina mais curto a 1-cestotriose (Van Laere, 2002; Hernández, 2023; Redondo-Cuenca, *et. al.*, 2021). Com base no grau de polimerização (GP), os frutanos do tipo inulina (FTI) podem ser divididos em FOS (GP<10), uma oligofrutose de cadeia curta, e inulina de cadeia longa (GP>10) (Kocot *et. al.*, 2022).

Por sua vez, o grupo Levan é qualquer material que contém principalmente ou exclusivamente ligações  $\beta$ -(2 → 6)-frutossilfrutose. Apresenta como frutano não-redutor do tipo levan mais curto o 6-cestotriose, comum em bactérias (Versluys, 2022; Hernández, 2023).

Em seguida, o perfil graminan contém ligações frutossil-frutose  $\beta$ -(2→1) e  $\beta$ -(2→6) presente em grande volume em cereais (Poaceae), também apresenta tetrassacarídeo (1 e 6)-cestotetraose como o mais curto frutano ramificado não-redutor (Apolinário *et. al.*, 2014; Hernández, 2023; Benkeblia, 2013).

Por outro lado, o grupo denominado de neo-frutano podem ser divididos em três outras categorias, são eles: o neo-inulina, neo-levan e agavin. O neo-frutano resumem-se como glicose em meio a duas unidades de frutose alongadas pelas ligações  $\beta$ -(2→1) e/ou  $\beta$ -(2→6) frutossil-frutose. Além do mais, nos neo-frutanos, a 6G-cestotriose atua como uma coluna de alongamento das regiões laterais da molécula (Hernández, 2023).

Os Neo-inulina ou neo-série de inulina, tem a presença das ligações  $\beta$ -(2→6) frutossil-frutose em pequenas quantidades e possui duas cadeias de frutose ligadas a  $\beta$ -(2→1) conectadas a cada extremidade de uma molécula de sacarose fundamental. As Neo-levan ou levan neo-series, tem duas cadeias de frutose ligadas  $\beta$ -(2→6) conectadas a cada extremidade da sacarose (núcleo) em conjunto com ligações  $\beta$ -(2→1) frutossil-frutose em baixa quantidade (Hernández, 2023).

Por fim, as agavin ou neo-frutano ramificado, possui duas cadeias de frutose conectadas à molécula do núcleo de sacarose, com ligações  $\beta$ -(2→1) e  $\beta$ -(2→6)-frutossil-frutose presentes em vasta quantidade, formando um complexo muito ramificado (Hernández, 2023).

Tanto a inulina quanto a levan são tipicamente encontradas nos vacúolos das células vegetais (Vijn; Smeekens, 1999), e no contexto dos grãos integrais, as frações resultantes da moagem do centeio representam fontes notáveis de frutanos, com teores distintos a outros cereais, entre 3,4 a 5% (Rakha; Aman; Andersson, 2010). Segundo

dados mais atuais, teores de frutanos de 4,57% na farinha integral de centeio gira em torno de 4,35% na fração de endosperma (Pejcz; Szychaj; Gil, 2020).

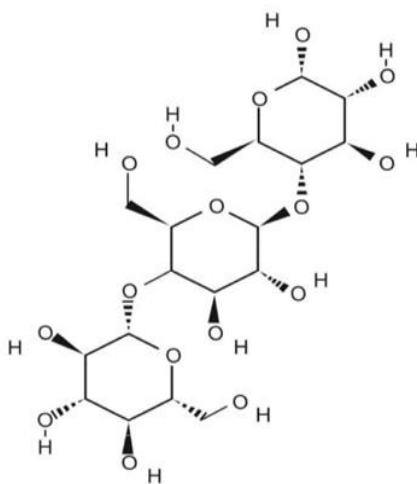
Nesse contexto, o farelo de centeio se destaca por apresentar um teor mais elevado de frutano, com valores de 7%, em comparação com a farinha integral, que contém aproximadamente 4%, e a farinha leve refinada, com cerca de 3% (Jonsson *et al.*, 2018; Holscher, 2017; Vuholm *et al.*, 2017 e Gibson *et al.*, 1995).

São atuantes na modulação da fisiologia intestinal, auxiliam no aumento de bifidobactérias e protegem contra patógenos. São reconhecidos como prebióticos, por melhorar níveis de glicose, modular o metabolismo lipídico e reduzir os lipopolissacarídeos da membrana plasmática, entretanto ressalta-se que, embora os frutanos sejam considerados uma forma solúvel de fibra alimentar, o sistema digestivo humano tem dificuldade particular esses compostos. (Jonsson *et al.*, 2018; Holscher, 2017; Vuholm *et al.*, 2017; Gibson *et al.*, 1995).

#### 3. 2. 5. 2. 3 $\beta$ -glucanas

As  $\beta$ -glucanas são polímeros de estrutura linear composto por ligações de moléculas de D-glucopiranosil, conforme ilustrado na Figura 4. Sua estrutura é conhecida por apresentar uma ligação mista, compreendendo aproximadamente 30% de ligações de  $\beta$ - (1 $\rightarrow$ 3) e 70% de ligações  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) (Butardo; Sreenivasulu, 2016). Sua solubilidade em água não é muito expressiva, devido aos seus polímeros de alto peso molecular, as  $\beta$ -glucanas exibem uma solubilidade moderada. No centeio, o teor de  $\beta$ -glucanas varia entre 1,2% e 2% (Izydorczyk; Dexter, 2008).

**Figura 4-** Estruturas químicas de  $\beta$ -glucanas.



Fonte: Kaur *et al.*, (2021)

É facilmente encontrado na parte interna do grão (endosperma), e na camada de aleurona dos grãos de cereais (Wood, 2007). Kamal-Eldin *et al.*, (2009), destaca que o farelo de centeio vem a apresentar apresenta teores de  $\beta$ -glucana entre 4,3% e 5,3%, podendo variar com a eficiência do método de extração, tal qual, o efeito de diferentes condições de extração na recuperação de  $\beta$ -glucana. De acordo com o mesmo autor, pode ser observado que o NaOH se destaca em termos de eficiência, como o solvente à temperatura ambiente, com um rendimento de 73,8%. Estudos mais recentes, relatam que diferentes frações resultantes do processo de moagem dos grãos de cereais apresentam teores de  $\beta$ -glucana que variam de 1,5% no endosperma a 4,4% no farelo (Rakha; Aman; Andersson, 2010).

Dessa forma, o  $\beta$ -glucana encontrada nos grãos demonstrou a capacidade de modular diversos mecanismos bioquímicos do sistema imunológico associados às ilhotas pancreáticas (Kida, *et al.*, 1992). Além disso, os  $\beta$ -glucanas têm sido reconhecidos como imunomoduladores potentes, apresentando propriedades anticancerígenas (Chromanska, *et al.*, 2017).

Podem ser considerados um componente de grande utilidade tecnológica para a indústria, a saber que produtos como a farinha enriquecida com  $\beta$ -glucana demonstra melhora vantajosa nas propriedades funcionais, texturais e reológicas dos produtos alimentícios (Ragaee *et al.*, 2008), além de um papel desempenhado no controle do diabetes, na redução do colesterol e na estimulação do sistema imunológico (Henrion *et al.*, 2019).

### 3.3 PANIFICAÇÃO

A prática ancestral da panificação remonta à pré-história, dentro de um contexto de descobertas, onde os primeiros grupos humanos perceberam que certas sementes vegetais podiam ser consumidas depois de serem processadas, amalgamadas com água e posteriormente submetidas ao calor do fogo para a serem consumidas (BOCK *et al.*, 2016). Esta descoberta, fundamental para a evolução alimentar da humanidade, representou um marco no desenvolvimento das técnicas culinárias e na ampliação das opções dietéticas disponíveis às comunidades ancestrais.

Essas descobertas e aprimoramentos, de acordo com evidências arqueológicas, provem de grupos ancestrais que habitavam no Crescente Fértil do Oriente Médio, situadas nas regiões da Mesopotâmia, Anatólia e Levante - correspondentes às áreas geográficas do atual Iraque, Turquia, Síria, Líbano, Jordânia e Israel, datando

aproximadamente de 10.000 a 12.000 anos antes da era comum (AEC) (Bobrow-Strain, 2012; Revedin *et al.*, 2010). Notavelmente, com a expansão da agricultura nessas regiões, os egípcios emergiram como o povo pioneiros na elaboração da "arte branca" da panificação, difundindo-a e popularizando-a em escala global (Mondal e Datta, 2008).

Ao longo do tempo, a panificação evoluiu para se tornar a forma convencional de culinária baseada em cereais, ocupando uma posição proeminente no atual cenário do processamento de alimentos, que associados ao interesse dos consumidores por alimentos assados, se fundamenta nas percepções organolépticas, tais como sabor, cor, textura e aroma. Essas percepções, dependem de diversos processos de cocção e fenômenos físico-químicos, incluindo o escurecimento não enzimático, a gelatinização do amido e a desnaturação de proteínas, os quais contribuem para a formação da estrutura distintiva do produto final (Nematollahi *et al.*, 2021; Shahrabaki *et al.*, 2018; Sruthi *et al.*, 2021).

Apesar de a receita básica da panificação compreender ingredientes simples, tais como farinha de trigo, água, fermento e sal, o produto acabado em muitos casos reflete as tradições regionais e a disponibilidade de matérias-primas e gostos presentes na região de produção (Bredariol *et al.*, 2020; Raheem *et al.*, 2019).

É interessante destacar que essa percepção pode ser verificada em diversas localidades, nacional ou internacional, na Europa por exemplo, pães como o Schüttelbrot e o Roggenbrot (pão de centeio) são predominantes em ambientes alpinos (Mayr *et al.*, 2019). Da mesma forma, em países asiáticos, como China, o pão cozido no vapor, conhecido como Mantou Chinês, é uma especialidade (Zhu, 2019; He *et al.*, 2020).

Essas variações regionais demonstram a influência das culturas locais e das condições ambientais na diversidade da panificação ao redor do mundo, mas principalmente como a tecnologia e versatilidade possibilitaram a obtenção de uma personalidade singular para cada receita.

### **3.3.1 Tecnologia de panificação**

O processo de produção é primariamente influenciado por três aspectos da cadeia produtiva: moagem, amassamento e cocção (Arepally *et al.* 2020; Cappelli; Cini 2021; Cappelli *et al.*, 2020b; 2020g; 2019a; Lucas, 2014; Pagani *et al.*, 2014), cujo objetivo, é converter a farinha de cereal e outros ingredientes em um alimento leve, aerado e palatável (Cauvain, 2001). O processo de elaboração do produto em sí é dividido em diversas etapas, entre elas a mistura ou amassamento, fermentação e cocção, o qual pode

ser mitigado sob os principais passos que formam a base desse processo (Cauvain, 2001; Hosney, (1991), apud Hrušková; Svec; Jirsa, 2006), e está descrito a seguir:

- Combinação adequada de farinha do cereal, água, levedura, sal e outros ingredientes específicos em quantidades apropriadas;
- mistura com desenvolvimento da estrutura do glúten na massa por meio da energia gerada na mistura e incorporação de ar na massa;
- maturação da massa ou contínuo fortalecimento da estrutura do glúten, e acondicionamento das propriedades reológicas, para resistir à pressão de gás na fase de fermentação;
- promoção e mudança de componentes específicos de sabor e odor;
- divisão da massa e desenvolvimento na forma;
- avanço das propriedades reológicas das peças formadas;
- moldagem das peças;
- fermentação e aumento da pressão por liberação de CO<sub>2</sub>; e
- fixação da estrutura final durante o cozimento após salto de forno

### 3.3.1.1 Moagem

A moagem é um processo pelo qual o grão é transformado em farinha. Entretanto, existe etapas anteriores que asseguram qualidade do produto moído tais como conservação, limpeza, condicionamento e mistura, até seguir para a moagem, que se caracteriza pela separação dos constituintes do grão (Azudin, 2006).

A moagem se dedica a separar o endosperma de outros tecidos do grão segundo o grau de interesse reduzindo gradualmente a medida das partículas até que se transformem em farinha refinada ou branca. Este processo compreende duas etapas principais, a quebra onde o grão é fragmentado e a maior parte do endosperma, recuperado como farinha, é isolado dos demais tecidos; a etapa de redução, onde a farinha obtida é reduzida a uma granulometria menor e as partículas remanescentes do germe e do farelo são removidas. A qualidade da farinha produzida em cada etapa da moagem varia, pois, a força mecânica aplicada difere. Ao final do processo, a farinha resultante é uma combinação de cada fração obtida seguindo a sua finalidade (Greffeuille *et al.*, 2005).

Para exercer a tarefa de triturar os grãos destacam-se técnicas as técnicas de fresagem de pedra e de rolo (Cappelli *et al.*, 2020g), as quais possibilitaram a correta gestão do condicionamento do cereal (trigo, cevada, centeio, etc..) sob a velocidade de

rotação da pedra (Cappelli *et al.*, 2020d). Destaca-se que ao longo dos anos, essa tecnologia se desenvolveu e sofreu aprimoramento de fábricas automáticas e adaptativas (Campbell *et al.*, 2012) além disso, a utilização de sistemas de quebra, dimensionamento e redução tem contribuído para a melhoria da tecnologia de moagem, a diferenciação da farinha e a redução dos impactos ambientais (Cappelli *et al.*, 2020e).

### 3.3.1.2 *Mistura ou amassamento*

Embora a moagem tenha um grande impacto na reologia da massa e nas características do pão (Cappelli *et al.*, 2020g), o amassamento também desempenha um papel fundamental (Cappelli *et al.*, 2020a). O processo de amassamento tem sua importância acentuada, uma vez que é responsável por moldar a estrutura da molécula, onde, ocorre o desenvolvimento das propriedades viscoelásticas do glúten, o que influencia significativamente a reologia e a textura do alimento (Dobraszczyk; Morgenstern, 2003). Essa compreende duas etapas principais, sendo a homogeneização do ingrediente que iram formar a massa e a etapa da sova, fase que ocorre a formação da rede gluteica (Cauvain, 2000, apud Tiwari *et al.*, 2011).

A homogeneização, conceitua-se pela dispersão uniforme dos componentes secos, dissolução e hidratação dos ingredientes após a absorção da água pelos grupos hidrofílicos das moléculas de proteínas e aplicação de energia mecânica (Cauvain, 2012; Scanlon; Zghal, 2001) seguida pela formação da rede de glúten (Pareyt *et al.*, 2011).

Nessa fase, também ocorrem a incorporação de gás na fase líquida da massa, formando pequenos núcleos. Essa oclusão de gás é um aspecto crucial do processo de mistura, pois à medida que o processo avança, não ocorre mais a oclusão de gás necessários para promover a subdivisão e estabilização das células pela rede proteica. Esse processo contribui para melhorar o número e a distribuição de tamanho das células, para a uniformidade e aeração (Sroan *et al.*, 2009b), assim como evitar a convalescência e prevenir o desprendimento da mesma (Salt *et al.*, 2006).

A fase líquida da massa, permite que o dióxido de carbono se espalhe até as células gasosas onde é evaporado e expandida. Essa expansão forma uma estrutura de espuma é estabilizada pelas membranas delgadas (filme líquido) que envolve as células de gás, no decorrer da fermentação (Gan *et al.*, 2006).

A concepção de textura advinda do miolo do pão é caracterizada como a distribuição do tamanho e quantidades das áreas gasosas na massa (Scanlon; Zghal,

2001), cuja importância corresponde a 70% do volume total do produto acabado e influencia os atributos de textura sensorial (Mills *et al.*, 2003).

A importância do gerenciamento dos seguintes parâmetros-chave: tempo adequado de amassamento, ajuste preciso da temperatura e velocidade de mistura da massa, controle da temperatura da água, absorção de água e teor de umidade (Cappelli; Cini, 2021). Também devem ser considerados o formato do misturador e a operação utilizada, que impactam no desenvolvimento da reologia e da textura do produto final. Além disso, é fundamental medir a reologia durante a mistura, utilizando parâmetros como o torque do batedor ou a força consumida. Esses parâmetros servem para compreender o efeito da reologia de mistura e para simular os modelos de deformação e escoamento da mistura com base na geometria do batedor (Dobraszczyk; Morgenstern, 2003).

### 3.3.1.3 Fermentação

A fermentação da massa é uma das etapas essenciais para a elaboração de produtos de panificação de boa qualidade. Durante a fermentação, os açúcares liberados do amido da farinha, são fermentados pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*, juntamente com a ação das enzimas naturais presentes, resultando na formação do produto levedado (Mondal; Datta 2008).

O fermento converte glicose em dióxido de carbono e etanol, resultando na pressão que modifica o volume na massa (Pareyt *et al.*, 2011). As células de ar formadas durante a mistura sofrem expansão pela pressão que o dióxido de carbono exerce nas paredes da célula de ar durante a fermentação (Gan *et al.*, 1995). Esses gases formados também atuam como isolantes, impedindo o aumento excessivo da temperatura e a evaporação da umidade durante o cozimento do pão (Mondal; Datta, 2008).

Essa expansão pode levar ao adelgaçamento das paredes das células de gás, e se isso continuar em regiões pouco espessas, há o risco de ruptura. No entanto, se a tensão na região pouco espessa se tornar maior que a deformação, a região da parede celular ou matriz glúten-amido resistirá à expansão, permitindo que o gás se expanda em partes mais espessas da parede celular. Essa capacidade de resistir à tensão é uma propriedade reológica crucial para garantir um volume adequado no pão final (Dobraszczyk; Roberts, 1994).

Nessa etapa, fica evidente a inter-relação física entre a produção do gás, a expansão do volume da massa, a gelatinização do amido e os parâmetros reológicos (Mondal; Datta, 2008).

#### 3.3.1.4 Cozimento

Durante esse processo, ocorrem fenômenos como a evaporação da água, a formação da estrutura dos poros, o aumento do volume, a desnaturação das proteínas, a gelatinização do amido e a formação da crosta. Essas transformações são cruciais para conferir ao pão suas propriedades finais e torná-lo adequado para consumo, destacando-se pelos aspectos sensoriais de qualidade. Entre os atributos que definem a qualidade de um pão estão o volume, a cor, a estrutura interna, a firmeza, a vida útil e a crocância. (Tiwari *Et Al.*, 2011; Mondal; Datta, 2008; Pareyt *et al.*, 2011; Skendi *et al.*, 2010).

Autores como Devu, (2022), o processo de cozimento ou assamento, pode ser subdividido em três fases distintas: expansão da massa, dessecação da superfície e escurecimento da crosta. Estas fases são reguladas pelo aumento gradual da temperatura durante o processo de cozedura: a rápida expansão do volume da massa (salto de forno) ocorre entre 5 a 10 minutos a uma temperatura de 35 a 70 °C, seguida pela eliminação de leveduras e outros microrganismos contaminantes e cessação da formação de CO<sub>2</sub> a uma faixa de temperatura de 60 a 70 °C. Posteriormente, a gelatinização do amido ocorre a aproximadamente 76 °C, seguida pela inativação de enzimas a uma temperatura entre 80 a 95 °C, e por fim, a formação da crosta começa a partir de 105 °C, seguida pelo escurecimento que ocorre em torno de 160 °C).

As temperaturas comumente empregadas no processo de cozimento convencional são consideravelmente elevadas, situando-se na faixa de 120 °C a 180 °C, o que caracteriza esse tratamento como de alta temperatura aplicado aos alimentos (Devu, 2022). Esse regime térmico é essencial para garantir a adequada cocção dos produtos de panificação, assegurando sua segurança alimentar e qualidade sensorial.

Diversas características externas e internas dos pães podem ser observadas e avaliadas. Esses parâmetros incluem a cor da crosta, a quebra, a simetria, a característica da crosta, a cor do miolo, a célula miolo, a textura, o aroma e o gosto (EL-Dash, 1978).



### 3.3.2 Comércio da panificação

A panificação surgiu e se tornou um dos processos alimentícios mais antigos e amplamente difundidos. De acordo com Lopes, Cavaleiro e Ramos (2017), o consumo anual de produtos de panificação ultrapassa nove bilhões de quilos em todo o mundo. Nesse contexto, a cultura da panificação tem demonstrado um desempenho notável e desempenha um papel significativo em diversas regiões do globo. Dados recentes, destacam o impacto proeminente da panificação em países como China, Coreia do Sul, Estados Unidos, Espanha e Canadá (Ozbun, 2024).

Colocando o mercado da panificação um setor de grande relevância no contexto econômico global. Em 2024, a receita total desse mercado é estimada a marca de 181,10 bilhões de dólares, com uma projeção de crescimento anual estimado em 4,93% até 2028, conforme indicado pela taxa de crescimento composto anual (*CAGR: Compound Annual Growth Rate*). É interessante notar que a China se destaca como o maior gerador de receitas nesse setor, estima-se que sua contribuição está no valor de um valor de 278 milhões de dólares para 2024. (Ozbun, 2024).

Em termos per capita, as receitas geradas no mercado de Pães e Produtos de Panificação estima a média de 177,80 dólares por pessoa para 2024, indicando o valor monetário atribuído a esses produtos por indivíduo (Ozbun, 2024).

Além disso, em termos de volume, comercio dos pães e derivados, deve atingir 60,61 bilhões de kg até 2028. O volume médio por pessoa no mercado é estimado em 54,2 kg em 2024, evidenciando o consumo generalizado desses produtos em todo o mundo e sua importância na dieta alimentar das populações. Essa previsão sugere um crescimento constante da demanda por produtos de panificação nos próximos anos, com um aumento de volume projetado em 2,9% para o ano de 2025 (Ozbun, 2024).

No cenário brasileiro, ao longo dos últimos anos, de 2007 a 2022, observou-se um incremento nas vendas das padarias, elevando-as de R\$ 39 bilhões para um faturamento registrado de R\$ 121,09 bilhões, no período de 2022, aumento de 14,4% nas atividades dessas empresas (Rodrigues, *et. al.*, 2023).

De acordo com o relatório do ITPC (2023), foram observados os seguintes avanços percentuais em diversos aspectos, o número de clientes registrou um aumento de 7,24%, enquanto o consumo de pão francês por volume apresentou uma diminuição de -0,80%. Entretanto, o faturamento proveniente do pão francês cresceu consideravelmente, alcançando 11,95%, ao passo que o preço médio deste produto registrou um incremento

de 12,86%, cuja perspectiva sugere um crescimento situado entre 8% e 10% até o final do ano de 2023/2024. (Rodrigues, *et. al.*, 2023).

No mercado brasileiro, o comércio e consumo de panificados se destacam: Fortaleza, Belo Horizonte, São Paulo, Recife, Brasília; Salvador, Belém, Goiânia, Porto Alegre, Rio de Janeiro. Onde as padarias artesanais são responsáveis por produzir mais da metade dos produtos do setor, frente as padarias industriais e os supermercados. Devido ao aumento no preço do trigo, principal matéria-prima utilizada na panificação, os empresários estão investindo em outros produtos para a produção, como a mandioca e o milho (Sebrae, 2017).

De acordo com, Czubaszek *et al.*, (2021) um ramo de interesses vem tornando espaço é a farinha de centeio um item atrativo para o mercado da panificação. devido à sua importância e diversas aplicações, tem experimentado um notável crescimento recentemente, como observado por Korzun *et al.* (2021). Esse crescimento é particularmente evidente nos países da União Europeia, onde houve um aumento significativo na produção de centeio. Segundo dados fornecidos por Shahbandeh; Stipp (2023), os países da União Europeia representaram cerca de 69% da produção global de centeio durante o período de 2019 a 2020. Esses números refletem a crescente demanda e valorização do centeio, não apenas como uma cultura agrícola, mas também como um ingrediente chave na indústria alimentícia e em diversas outras aplicações.

### **3.3.3 Pão**

O pão e seus derivados são elementos característicos da panificação e representam uma das fontes mais importantes de macro e micronutrientes. Estima-se que o pão forneça 17–21% da ingestão diária recomendada de fibra alimentar, 16–20% do total de carboidratos e 10–12% de proteína na dieta (Lockyer; Spiro, 2020).

É conhecido que o pão foi inicialmente elaborado usando como ingredientes a farinha de um cereal primitivo, água, sal e, posteriormente, com um agente levedante (Boukid *et al.*, 2019), entretanto com o avanço da culinária da panificação e conseqüentemente com os tempo outras cereais e ingredientes foram sendo adicionados e manipulados para conferir a massa primária uma composição mais específica e desejável para o paladar, logo diversas formulações foram sendo criadas com o objetivo de atender um mercado cada vez mais específico (Olagunju; Oluwajuyitan; Oyeleye, 2021).

Atualmente, no Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (BRASIL, 2022b, p.2), por meio da Resolução de Diretoria Colegiada (RDC) N° 711, datada de 1° de julho de 2022, estabelece uma definição precisa para o termo "pão", como:

Produto obtido do processo de cocção de farinha adicionada de líquido, fermentados ou não, podendo apresentar cobertura, recheio, formato e textura diversos.

A definição inclui a possibilidade de o pão apresentar características variadas, como cobertura, recheio, formatos e texturas distintos. Essa regulamentação proporciona um entendimento claro e abrangente do que constitui um produto de panificação, garantindo a qualidade e segurança dos pães disponíveis no mercado brasileiro.

No entanto, apesar dessas variações regionais, o processo básico de criação do pão permanece fundamentado em três etapas essenciais: mistura da massa, fermentação da massa e cozimento (Amaral *et al.*, 2016). Essas etapas constituem a espinha dorsal da produção de pão em todo o mundo, independentemente das nuances locais.

O pão elaborado com farinha de centeio, se destaca em virtude de propriedades promotoras de saúde com a presença de  $\beta$ -glucanas e pentosanas da fibra dietética do centeio, que atuam sobre o peristaltismo, remediando a constipação, diminuindo o colesterol sanguíneo e contribuindo no tratamento do diabetes (Górecka *et al.*, 2010; Salamon *et al.*, 2011). Os pães de centeio, por possuírem características, bem mais específicas em comparação o pão de trigo comum a aceitação geral desses produtos pelo público permanece limitada (Rosell *et al.*, 2009).

### 3.3.3.1 Pão de centeio

Os pães de centeio são considerados como pães integrais de centeio e tendem a apresentar menor volume e uma textura mais densa e grosseira (Rosell *et al.*, 2009).Essas características são consequência direta da presença de farelo e germe que alteram significativamente as propriedades reológicas da massa, resultando em um produto final com características distintas.

Em comparação com os pães feitos de farinha refinada, os pães integrais tendem a ter um volume específico reduzido e uma firmeza de miolo aumentada. Além disso, a crosta dos pães integrais apresenta crosta mais densa e escura, cujo perfil de sabor, apresenta diferença significativa em comparação aos pães de farinha de trigo (Van Hung *et al.*, 2007).

No Brasil, não existe uma legislação específica, entretanto, a legislação vigente oferece poucas informações a respeito de identidade e qualidade dos pães de centeio. Tal qual definido pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Brasil, 2022b; p.2), o pão de centeio pode ser inserido na definição padrão dos pães, como o produto obtido a partir da cocção de uma mistura de farinha (Farinha de centeio integral ou refinada) e líquido, fermentada ou não. Apresentando ampla variedade de características, incluindo diferentes tipos de cobertura, recheios, formatos e texturas, dependendo da receita e do processo de fabricação utilizado, tal como a participação parcial ou total da farinha de centeio integral ou refinada.

A formulação pode vir da substituição parcial (25–60%) da farinha de trigo integral por farelo de centeio que resulta em um aumento significativo da saciedade após as refeições (Isaksson, 2014). Além disso, a presença de farelo de centeio, que contém entre 30-40% de fibra alimentar, destaca sua importância na promoção da saciedade pós-refeição quando incorporado à farinha, caracterizando-se por um valor nutricional superior ao pão de trigo, rico em fibras, vitaminas e minerais (Katina *et al.*, 2007).

O pão de centeio é uma fonte significativa de fibras, proteínas e uma variedade de macro e micronutrientes, vitaminas B, bem como de elementos como zinco, fósforo, magnésio e cálcio. Os produtos de centeio contêm maiores quantidades de pentosanas e  $\beta$ -glucanas, que aumentam a viscosidade do conteúdo intestinal e reduzem o colesterol no sangue (Katina *et al.*, 2007, Kopeć *et al.*, 2011), resultando em uma gama de benefícios na indústria e na saúde do consumidor.

A compreensão regulatória desempenha um papel fundamental no tratamento dos pães de centeio. Pães macios e duros preparados com diferentes concentrações de trigo e centeio variam a taxa de alquilresorcinol na faixa entre 21 e 548  $\mu\text{g/g}$  de massa seca em pão macio, enquanto em pão duro o teor de alquilresorcinol foi de 27–2766  $\mu\text{g/g}$  de massa seca (Andersson *et al.*, 2010). Nesse contexto, caracteriza-se o pão de centeio crocante como aquele que possui aproximadamente 17,8% de fibras dietéticas totais, 7,8% de arabinxilana, 1,9% de  $\beta$ -glucana, 2,4% de amido resistente e 2,8% de frutano. Por sua vez, o pão de centeio macio é descrito como contendo cerca de 12,6% de fibra alimentar total, 5,4% de arabinxilana, 1,2% de  $\beta$ -glucana, 2,5% de amido resistente e 1,6% de frutano (Rakha; Aman; Andersson, 2010).

Os pães de centeio podem ser elaborados com diferentes taxas de extração de farinha notavelmente, taxas de extração mais elevadas, próximas a 100%, estão associadas a uma concentração mais alta de metabólitos bioativos e compostos fenólicos.

O mesmo autor em comparação com os componentes fenólicos desta que o teor de fenólicos e observado em pães preparados com 100% de farinha de extração (1,72 mg/g) seguido por valores progressivamente menores de 95% (1,68 mg/g), 90% (1,76 mg/g) e 70% (1,29 mg/g) de extração (Michalska *et al.*, 2007).

Os pães a partir de centeio também podem ser enriquecidos com diversos ingredientes funcionais, como bagaço de tomate, extrato de chá, frutas vermelhas e subprodutos de uva, visando aprimorar sua composição nutricional e seu potencial antioxidante (Bajerska *et al.*, 2014a; 2015b; Mildner-Szkudlarz *et al.*, 2011).

Nesse contexto, as técnicas de fabricação de pães de centeio estão em constante evolução, visando melhorias tanto na sua qualidade estrutural quanto microbiológica. A escolha da cultura de fermentação tem um impacto significativo no teor de folato no pão de centeio. Pães fermentados com ácido láctico apresentam um teor de 29 µg/100 g de folato, enquanto aqueles fermentados com fermento chegam a 42 µg/100 g. Esses registros destacam a influência direta dos processos de fermentação na composição nutricional do pão de centeio (Kariluoto *et al.*, 2015).

A produção de pães utilizando culturas mistas é uma prática comum na indústria. Pães de centeio preparados com 20% e 40% de massa fermentada, utilizando diferentes culturas iniciadoras mistas. Esses pães, fermentados com bactérias lácticas heterofermentativas, apresentam características distintas, como volume específico (1,37–1,58, 1,33–1,42 cm<sup>3</sup>/100 g), acidez total titulável (5,11–5,74, 6,08–6,52%) e umidade do miolo (46,01–45,78%). Esses aspectos influenciam diretamente os perfis sensoriais dos pães, contribuindo para a diversidade de opções disponíveis no mercado. (Banu; Vasilean; Aprodu, 2011).

### **3.3.4 Componentes da massa do pão**

Na produção de pães, a farinha de trigo e a água são ingredientes essenciais, contribuindo com 100% da composição da massa. Além disso, a água desempenha um papel fundamental na textura e na formação do miolo do pão. No entanto, outros ingredientes são adicionados em quantidades variáveis, dependendo das características desejadas para a massa (Mondal; Datta, 2008).

Em uma receita típica, o fermento é utilizado em uma proporção de cerca de 2%, ajudando na fermentação da massa e proporcionando a leveza e maciez ao pão. O sal, presente em aproximadamente 2%, tem o papel de impulsionar a aglutinação e a expansão da massa, além de realçar o sabor. Embora não sejam aplicados no contexto deste trabalho

específica, em algumas elaborações, pode-se adicionar cerca de 4% de açúcar para iniciar a fermentação e proporcionar um sabor ligeiramente adocicado, enquanto a gordura, que pode ser utilizada em torno de 3%, ajuda a amaciar a massa e prolongar sua frescura (Mondal; Datta, 2008).

#### 3.3.4.1 *Farinha*

Na indústria alimentícia, a farinha é um ingrediente essencial, obtido principalmente de cereais como trigo, centeio, milho e arroz. Tanto a farinha refinada quanto a integral desempenham papéis fundamentais na produção de uma ampla gama de produtos de panificação. No processo convencional de moagem, a farinha é coletada e purificada através de várias etapas, incluindo moagem, peneiramento e purificação (Cao, 2020).

Devido à importância do centeio na indústria de panificação, é necessário regulamentar a produção e comercialização de farinhas derivadas desse cereal. A RDC nº 711 da (BRASIL, 2022b; p.2) estabelece os requisitos sanitários para farinhas e farinhas integrais como:

Farinha: produto obtido de partes comestíveis de uma ou mais espécies de cereais, leguminosas, frutos, sementes, tubérculos e rizomas por moagem ou outros processos tecnológicos considerados seguros para a produção de alimentos;

Já a farinha integral, como a derivada do centeio:

Farinha integral: produto resultante da trituração ou moagem de cariopses intactas de alpiste, amaranto, arroz, arroz selvagem, aveia, centeio, cevada, fonio, lágrimas-de-Jó, milheto, milho, painço, quinoa, sorgo, teff, trigo, trigo sarraceno e triticale, onde os componentes anatômicos - endosperma amiláceo, farelo e gérmen - estão presentes na proporção típica que ocorre no grão intacto, sendo permitidas perdas de até 2% do grão ou 10% do farelo.

Essas regulamentações visam garantir a qualidade e segurança dos produtos derivados do centeio, essenciais para a indústria alimentícia.

#### 3.3.4.2 *Água*

A água destinada ao consumo humano, conforme definida pela Portaria nº 2.914 da ANVISA (Brasil, 2011a), é aquela considerada potável, adequada não apenas para ingestão direta, mas também para uso na preparação de alimentos e na higiene pessoal, independentemente de sua origem.

No contexto da panificação, a água desempenha um papel crucial na formação da massa. Além de dissolver os ingredientes sólidos, permitindo a atuação das enzimas e dos fermentos, ela também hidrata os amidos e outros compostos solúveis. Esses processos são essenciais para a formação do glúten, responsável pela estrutura e elasticidade da massa, alterando as propriedades reológicas e características de viscosidade e elasticidade (Spies, 1990).

A quantidade de água adicionada durante a elaboração da massa do pão desempenha um papel crucial, pois é responsável por hidratar os ingredientes presentes na massa. Essa hidratação ocorre principalmente através da absorção pela grupos hidrofílicos das moléculas de proteínas. Quando a quantidade de água não é suficiente para uma hidratação adequada, isso pode comprometer a formação do glúten e a elasticidade natural da massa. Por outro lado, o excesso de água também pode ser problemático. Um aumento significativo na quantidade de água pode resultar em uma massa com menor resistência à extensão e caracterizada por uma textura excessivamente pegajosa (Spies, 1990).

#### 3.3.4.3 *Fermento biológico seco*

O fermento biológico desempenha um papel fundamental como força motriz para o processo de fermentação (Campbell, 2003). Trata-se de uma levedura conhecida como *Saccharomyces cerevisiae*, que, durante a fermentação, tem a função de produzir álcool etílico, dióxido de carbono (Cauvain; Young, 2009) e ácidos orgânicos, como ácido acético e ácido láctico, como subprodutos (Jayaram *et al.*, 2013).

Além de sua capacidade de levedar a massa, o fermento biológico também desempenha um papel importante no fortalecimento e desenvolvimento do glúten, contribuindo significativamente para a textura e elasticidade da massa final. Além disso, ele também adiciona sabor e aroma característicos ao pão (Campbell, 2003; Birch *et al.*, 2013).

O fermento biológico desempenha um papel essencial na fermentação da massa de pão, sendo capaz de metabolizar facilmente a sacarose adicionada à massa. Esse processo promove uma fermentação vigorosa e prolongada (Carlson, 1997). Além disso, durante o processo de fermentação, o fermento tem acesso a uma pequena porção de açúcares livres presentes na farinha de trigo, que variam de 0,3% a 0,5%, principalmente compostos por glucose, frutose, sacarose e maltose. Esses açúcares funcionam como fonte

de carbono para o fermento biológico, contribuindo para o seu metabolismo e para o desenvolvimento adequado da massa de pão (Macarthur D'appolonia, 1979).

A incorporação de ar na massa durante o processo de mistura e a estabilização das células ao longo do processo de panificação são aspectos cruciais que definem o volume e a estrutura do miolo do pão (Gan *et al.* (1995).

O dióxido de carbono gerado durante o processo de fermentação é um componente essencial na produção de pães e outros produtos de panificação. É esse gás que diferencia os produtos de panificação de outros alimentos, conferindo-lhes diferentes texturas, que variam de acordo com a densidade celular do miolo do produto final (Mondal; Datta (2008),

#### 3. 3. 4. 4 Sal

O cloreto de sódio (NaCl) exerce uma influência significativa em todas as fases do processo de fabricação do pão. Ao ser incorporado na massa durante sua elaboração, o NaCl desempenha um papel crucial na melhoria da estrutura da rede de glúten, resultando em uma massa com maior estabilidade, extensibilidade, coesão e resistência, a capacidade do NaCl de reduzir a viscosidade da massa, facilitando seu manuseio e processamento (Beck *et al.*, 2012a)

As proteínas do glúten são compostas por uma alta concentração de aminoácidos hidrofóbicos, além de uma quantidade menor de aminoácidos carregados. A presença de cloreto de sódio pode induzir um mecanismo de blindagem eletrostática em determinados aminoácidos localizados na superfície da proteína, o que retarda sua hidratação. A redução da carga superficial da proteína, em presença de NaCl, diminui a repulsão eletrostática entre as moléculas proteicas, facilitando interações mais próximas através de interações hidrofóbicas. Essas interações favorecem a formação de estruturas proteicas intermoleculares do tipo  $\beta$ -folha (Wellner *et al.*, 2005). Conseqüentemente, a proteína adquire uma estrutura mais rígida e fibrosa, resultando em uma massa com características endurecidas e tensionadas, resistente à deformação por extensão (McCann; Day, 2013).

Entretanto, alguns estudos revelam que a diminuição do teor de sal de 1,2% para 0,3% na fabricação de pães não compromete as propriedades reológicas da massa, apesar dos testes sensoriais apontarem a necessidade de aprimoramento do sabor (Lynch *et al.*, 2009). Em contraste, a completa ausência de sal leva a uma redução no volume específico do pão (Czuchajowska *et al.*, 1989). Exerce influência sobre a gelatinização do amido, modificando a estrutura molecular do mesmo. Este composto iônico tem um efeito



estruturante, aumentando a viscosidade da solução aquosa e reduzindo a quantidade de água móvel disponível. Isso resulta no deslocamento das temperaturas de gelatinização para valores mais elevados (Chiotelli *et al.*, (2002).

O NaCl também influencia o volume e a textura do pão. Sua presença diminui o volume do pão e aumenta a densidade e firmeza do miolo. Ele intensifica os processos de caramelização e as reações de Maillard, impactando significativamente a cor e o sabor do pão (Moreau *et al.*, 2009; Beck *et al.*, 2012a).

### 3.3.4.5 Aditivos

O Ministério da Saúde e Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Brasil, 2023c; p. 2) ao invocar a RDC nº 778, de 1º de março de 2023 – que trata das funções tecnológicas e as formas de utilização de aditivos consumíveis e coadjuvantes introduzidos em alimentos – considera aditivo alimentar como:

Todo ingrediente adicionado intencionalmente aos alimentos, sem propósito de nutrir, com o objetivo de modificar as características físicas, químicas, biológicas ou sensoriais, durante a fabricação, processamento, preparação, tratamento, embalagem, acondicionamento, armazenagem, transporte ou manipulação de um alimento.

Os aditivos alimentares podem ser categorizados em diversas classes funcionais, tais como estabilizantes, conservantes, antioxidantes, corantes, emulsificantes, adoçantes, reguladores de acidez e espessantes. Essa classificação permite uma compreensão mais abrangente dos diferentes papéis desempenhados pelos aditivos na indústria alimentícia. (Blekas, 2016)

A aplicação desses aditivos e potencializadores de processamento, incluindo redutores, oxidantes, enzimas e preparações enzimáticas, visa aprimorar características específicas do pão, como volume, sabor aprimorado ou capacidade de absorção de água (Gioia *et al.*, 2017). Isso confere ao pão atributos que o tornam mais atraente e com uma qualidade sensorial e organoléptica superior.

A RDC nº 728 (Brasil, 2022d; p.1) por sua vez, traz um detalhe interessante quando se refere de enzimas ou preparações enzimáticas elaboradas para serem suporte na produção de alimentos consumíveis, uma definição que abrange o interesse de seu uso, logo se referindo da seguinte forma:

São proteínas capazes de catalisar reações bioquímicas, sem interferir no processo e resultando em alterações indesejáveis nas características de um alimento durante o seu processamento; enquanto que a preparação enzimática:

formulação constituída por uma ou mais enzimas, com a incorporação de ingredientes ou aditivos alimentares, a fim de facilitar o seu armazenamento, comercialização, padronização, diluição ou dissolução.

Na mesma linha de pensamento, a Instrução Normativa nº 211 (BRASIL, 2023e; p. 5) define um melhorador de farinha como uma substância que, quando adicionada à farinha, aprimora sua qualidade tecnológica para os fins a que se destina. Um melhorador possui a capacidade de se ligar tanto à água quanto a outras gorduras simultaneamente. Sua interação com os demais componentes permite a conservação dos produtos, melhora a lubrificação do glúten nas massas e facilita, além de reduzir, o tempo de preparo e manuseio da massa (Emulzint, 1985).

Devido aos aspectos constitucionais envolvidos, a aprovação de substâncias para uso como aditivos alimentares segue critérios específicos. Isso inclui a conformidade com os padrões de identidade estabelecidos, a aprovação dos aditivos para uso em produtos alimentícios específicos e a conscientização sobre os alimentos nos quais seu uso não é permitido. Essas regulamentações são definidas por normas nacionais e internacionais (Gioia *et al.*, 2017), uma vez que os aditivos alimentares possuem um amplo espectro de aplicações em diversos produtos alimentícios.

#### 3.3.4.5.1 Enzima Transglutaminase (*Streptomyces mobaraense*)

Transglutaminase (peptídeo glutaminil: amina  $\gamma$ -glutamyltransferase, EC.2.3.2.13) é uma enzima que é amplamente distribuída na natureza e foi encontrada em vários tecidos animais, peixes e plantas (Folk, 1980; Yasueda; Kumazawa; Motoki, 1994; Ickson; Apelbaum, 1987).

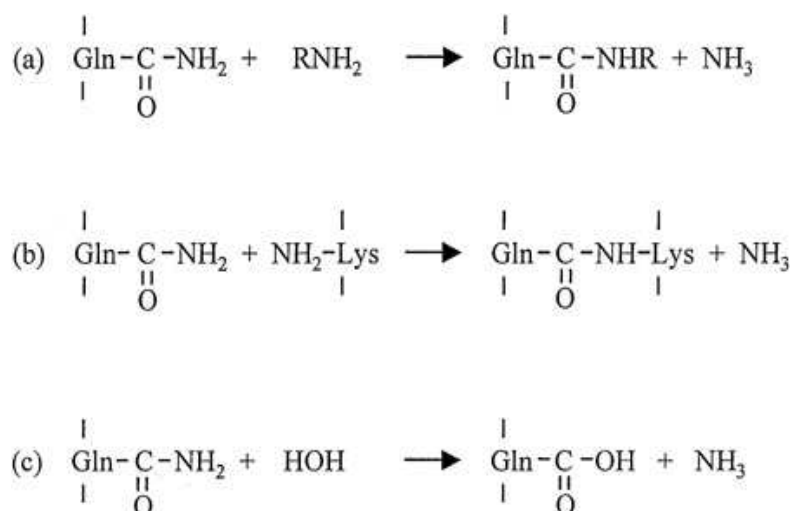
A transglutaminase microbiana foi isolada em 1989 da *Streptovercillium sp.* (Ando *et al.*, 1989). Desde então, foi comercializado como uma preparação de enzima alimentar pela Ajinomoto Co., Inc. Este é o único produto de transglutaminase disponível comercialmente atualmente. A maioria das aplicações discutidas nesta revisão diz respeito à transglutaminase comercial derivada de *Streptovercillium sp* (Kuraishi, Yamazaki; Susa, 2001).

Ele tem a capacidade de catalisar uma reação de transferência de acila entre um resíduo de glutamina, utilizando a  $\gamma$ -formamida como doadora de acila, e os grupos  $\epsilon$ -amina de resíduos de diferentes compostos, como proteínas que atuam como receptores de acila (Kieliszek; Misiewicz, 2014), (figura 5: a)

A reticulação acontece quando o grupo  $\epsilon$ -amino de um resíduo de lisina de uma proteína atua como receptor de acila. Nesse processo, a transferência do grupo acil para o resíduo de lisina resulta na formação de  $\epsilon$ -( $\gamma$ -glutamil) lisina (Gln-Lys), que pode ser covalentemente ligada de forma inter ou intramolecular, resultando em uma proteína que é rica em aminoácidos essenciais (Akbari *et al.*, 2021), (figura 5-b)

Além disso, a transglutaminase (TGase) pode catalisar a desamidação ou esterificação das  $\gamma$ -carboxamidas de resíduos de glutamina na ausência de grupos amina livres. Nesse caso, representado na Figura 5-c, a molécula de água ou álcool atua como um receptor de acila por meio de seus grupos hidroxila (Akbari *et al.*, 2021).

**Figura 5** - Reações gerais catalisadas pela transglutaminase: a) reação de transferência de acila; b) reação de reticulação; c) desamidação.



Fonte: MotokI, (1986)

Em sistemas alimentares contendo proteínas, a reação de reticulação (b) prossegue antes das outras reações (Kuraishi; Yamazaki; Susa; 2001). A reação catalisada pela transglutaminase resulta em modificações perceptíveis nas propriedades funcionais das proteínas, provocando alterações em sua viscosidade, estabilidade térmica, solubilidade e capacidade de retenção de água (Kieliszek; Misiewicz, 2014).

O centro ativo da TGase é composto por resíduos de cisteína, histidina e asparagina ou ácido aspártico. O grupo tiol da cisteína atua atacando a cadeia lateral do resíduo de glutamina do substrato, desempenhando um papel crucial na reação chave da enzima que catalisa a molécula de proteína (Kieliszek; Misiewicz, 2014).

É relevante observar que a TGase de origem microbiana não depende de  $\text{Ca}^{2+}$  e demonstrou reatividade ativa em relação às proteínas na maioria dos alimentos, tornando-se assim a principal TGase para modificar as propriedades das proteínas (Kieliszek, Misiewicz, 2014; Ando *et al.*, 1986). A TGase de origem microbiana gradualmente se estabeleceu como a principal fonte para aplicações comerciais. Com o avanço das tecnologias, como a engenharia genética, a atividade, estabilidade e rendimento da TGase têm sido continuamente aprimorados (Akbari *et al.*, 2021).

A temperatura ótima de reação para a TGase de origem microbiana varia de 45 a 55 °C, sendo ligeiramente variável dependendo do microrganismo. Por exemplo, a temperatura ótima para a TGase de *S. mobaraensis* é de 55 °C, enquanto a TGase de *Streptomyces canelaeum* apresenta uma temperatura ótima de 45°C. O pH de reação ideal situa-se na faixa de 5,0 a 7,0, e sua atividade é estável em um pH de 4,0 a 9,0 (AKBARI *et al.*, 2021).

O peso molecular (Mw) da transglutaminase (TGase) de origem microbiana é aproximadamente de 38 kDa (Duarte, 2020). Diferentes tipos de bactérias, fungos e actinomicetos têm a capacidade de sintetizar TGase, sendo que aquela produzida por *Streptomyces* sp. Cbmai 1617 (SB6) apresentou a maior atividade registrada (~6 U/mL). Cepas como *Enterobacter* e *Providencia* são consideradas as principais fontes de TGase sintetizado comercialmente atualmente (Akbari *et al.*, 2021).

A atividade enzimática da transglutaminase é medida pelo procedimento de hidroxamato com N-carbobenzoxi-L-glutaminil-glicina (Z-Gln-Gly). A unidade de atividade enzimática é definida como a quantidade que causa a formação de 1  $\mu\text{mol}$  de ácido hidroxâmico em 1 min a 37°C (Ando *et al.*, 1989).

Quando utilizada em produtos de panificação, as reações promovidas pela enzima resultam na modificação das características funcionais desses produtos, pois ocorre a ligação de várias proteínas, formando uma rede proteica com uma textura viscoelástica mais interessante para a panificação (Bollaín; Collar, 2004; Colla; Bollaín, 2004; Lindsay; Skerritt, 1999). Além disso, a transglutaminase é empregada em pesquisas biotecnológicas relacionadas às propriedades funcionais da matriz alimentar, incluindo emulsificação, formação de espuma, gelificação, capacidade de retenção de água e viscosidade (Strop, 2014).

A presença da TGase e a conseqüente estruturação do glúten podem resultar em materiais texturizados que apresentam maior elasticidade, melhor capacidade de retenção

de água (Zhu *et. al.*, 1995), miolos mais aerados (Gerrard *et al.*, 1998) e maior estabilidade térmica (Kuraishi; Yamazaki; Susana, 2001).

### 3.4 REOLOGIA

A reologia, que se concentra no estudo do escoamento e deformação dos materiais, busca alcançar uma descrição quantitativa das propriedades mecânicas. Isso inclui a obtenção de informações relacionadas à estrutura molecular e à composição do material, visando caracterizar e simular o desempenho dos materiais durante o processamento, além de controlar a qualidade do produto (Dobraszczyk; Morgenstern, 2003).

Em um contexto geral as propriedades reológicas sofrem influência da constituição do grão, granulometria da farinha e hidratação da massa (Branlard *et al.*, 2001). Essas propriedades são importantes na massa do pão por dois motivos: primeiro, porque determinam o comportamento da massa durante o processo de manuseio mecânico; segundo, porque afetam os processos que determinam o crescimento das cavidades celulares e a estabilidade da massa durante o processo de elaboração (Stojceska *et al.*, 2007).

Esse cenário é delineado pela participação do amido, das proteínas e da água. A parte proteica da farinha tem a habilidade de formar a rede viscoelástica contínua do glúten, desde que haja água suficiente hidratação e energia mecânica para efetuar a mistura (Gras; Carpenter; Anderssen, 2000).

É interessante destacar, que para averiguar esse comportamento em escala molecular, existe meios instrumentais que possibilitam uma análise segura para descrever esse comportamento. Dentre as análises para caracterização reológica da massa, destacam-se a extensografia e a análise rápida de viscosidade (RVA) (Song; Zheng, 2007). Além dessas, outras técnicas complementares são utilizadas para compreender o comportamento do objeto estudado. Nesse sentido, a análise de DSC, embora não seja estritamente reológica, é importante para caracterizar propriedades térmicas dos materiais. Enquanto a reologia se concentra na análise do comportamento mecânico e deformacional de materiais, como fluidos e sólidos deformáveis, a análise de DSC está mais relacionada à investigação de transições de fase e propriedades térmicas dos materiais.

### **3. 4. 1 Resistência da massa a extensão**

A análise de extensão é realizada com o auxílio de um equipamento específico analisador de textura, por meio de método de resistência a esticamento. Após a preparação da massa ela é esticada com o auxílio de um gancho, até o momento de sua ruptura (Quaglia, 1991). Durante esse processo, a força necessária para esticar a massa é transmitida é quantificada e registrada. Assim é registrando as informações sobre a resistência da massa à medida que ela é esticada. Esse registro é feito em tempo real e em uma velocidade constante, o que permite uma análise precisa do comportamento da massa durante o teste (Montenegro; Ormenese, 2008).

A interpretação seguiu os seguintes parâmetros: energia ( $A$ ), resistência à extensão ( $Re$ ), extensibilidade ( $E$ ). A energia é a área delimitada pela curva extensográfica, medida com planímetro e expressa em  $\text{cm}^2$ . Quanto maior for a área, mais energia é necessária para esticar a massa, e indica o trabalho necessário para romper a massa. Por sua vez, a resistência à extensão é a altura da curva a 5 cm da origem, expressa em (g), está relacionada a resistência que a massa possui ao esticamento e está relacionada com a força do glúten formado. A extensibilidade, medida em centímetros, indica o comprimento do extensograma e refere-se ao número de vezes que a massa foi esticada em relação ao seu comprimento original antes de se romper (Montenegro; Ormenese, 2008)

### **3. 4. 2 Análise rápida de viscosidade (RVA)**

Na análise rápida de viscosidade, em viscosímetro, é utilizado para determinar o comportamento da gelatinização e as propriedades de pasta do amido. Por meio de um viscosímetro, controla-se a resistência da amostra durante o aquecimento e o resfriamento, caracterizando assim o processo com base em suas propriedades funcionais (Crosbie; Ross, 2007; apud Copeland *et al.*, 2009). O método se fundamenta na mudança de viscosidade que ocorre quando os grânulos de amido são hidratados, inchados e desintegrados, seguido pela reorganização das moléculas com o resfriamento (AACC, 2000).

Com o aquecimento em água, ocorre a modificação do amido, que resulta na ruptura das ligações de hidrogênio entre as cadeias poliméricas, enfraquecendo assim a estrutura do amido. Esse processo é conhecido como intumescimento e expansão inicial (Thomas; Atwell, 1999). Em uma determinada temperatura, inicia-se a gelatinização do amido e o aumento da viscosidade da pasta (Pallarés *et al.*, 2007).

À medida que a temperatura continua aumentando, a viscosidade atinge um ponto máximo e, em seguida, começa a diminuir. Esse padrão indica a dissolução do grânulo de amido e a perda da integridade da estrutura inicial. Conforme a temperatura diminui, a estrutura modificada pode retrogradar, um processo no qual os polímeros de amilose e amilopectina solubilizados se reassociam por meio de novas ligações de hidrogênio (Thomas; Atwell, 1999).

Segundo Copeland *et. al.*, (2009), para interpretar os resultados obtidos com o equipamento RVA, são observados diversos parâmetros: viscosidade máxima (*V.máx.*), tempo de viscosidade máxima ou pico de viscosidade, viscosidade mínima (*V.mín.*) à temperatura constante (95°C), *breakdown* ou quebra de viscosidade (Q), *setback* ou tendência à retrogradação (*T. ret.*), temperatura de pasta (*T.pas.*) e viscosidade final (*V.fin.*). Esses parâmetros fornecem informações importantes sobre o comportamento do amido durante o aquecimento e o resfriamento, ajudando na compreensão da gelatinização e da retrogradação do amido.

### **3. 4. 3 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)**

A técnica de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) é amplamente empregada para medir temperaturas e fluxo de calor associados a transições em materiais ao longo do tempo e com a variação de temperatura em diferentes atmosferas (Poonia, 2017). Essas medições proporcionam informações quantitativas e qualitativas sobre mudanças químicas e físicas, incluindo processos endotérmicos, nos quais há absorção de calor, processos exotérmicos, nos quais há liberação de calor, e mudanças na capacidade térmica (Chiavaro, 2014).

O resultado comum do método é representado graficamente com os eixos correspondentes ao fluxo de calor e à temperatura ou ao tempo. Existem dois tipos principais de fatores que influenciam a curva DSC: as condições operacionais, que incluem a taxa de aquecimento, a posição dos sensores, a atmosfera do equipamento e a composição dos recipientes de amostra; e as características da amostra, que englobam a quantidade da amostra, o tamanho das partículas, a solubilidade do gás, o calor da reação e a condutividade térmica (Kodre, 2014).

Um esquema clássico é descrito da seguinte forma: na modalidade de fluxo de calor tipo DSC, tanto a amostra quanto a referência são submetidas a um programa de aumento de temperatura, sendo aquecidas por uma única fonte. Durante esse processo, as temperaturas são medidas por termopares em contato com cada forno de forma individual.

A curva calorimétrica resultante é apresentada em relação à diferença de temperatura entre a referência e a amostra, considerando tanto o tempo quanto a temperatura como variáveis (Chiavaro, 2014).

A amostra passar por uma mudança física dependente de seus constituintes, como uma transição de fase. Nesse caso, ocorrem reações do tipo endo e exotérmicas em virtude da transição de calor e flui pela amostra, por conta desse calor transitório surge picos de maior e menor absorção de calor. O DSC é capaz de medir a quantidade de calor que é absorvida ou liberada durante essa transição (Kodre, 2014).

#### 3.4.4 Reologia de oscilação por varredura de Frequência

A varredura de frequência é uma técnica crucial na análise reológica de massas e outros materiais alimentícios. Ela permite uma avaliação detalhada das propriedades viscoelásticas das amostras, fornecendo informações sobre o comportamento da massa durante o processamento e armazenamento. De acordo com Ghoshal *et al.*, (2017), a técnica de varredura de frequência consiste em aplicar uma força oscilatória em uma amostra e medir a resposta da amostra em diferentes frequências. O comportamento reológico da massa é descrito por dois parâmetros principais (Jin *et al.*, 2020):

- **Módulo Elástico (G')**: Representa a capacidade da amostra de retornar à sua forma original após a aplicação de força. Valores mais altos de G' indicam uma estrutura mais firme e elástica.
- **Módulo Viscoso (G'')**: Reflete a resistência ao fluxo contínuo. Valores mais altos de G'' indicam maior viscosidade e resistência ao fluxo.

A relação entre esses dois módulos é expressa pelo **fator de perda ( $\tan \delta$ )**, que é calculado pela fórmula (Weipert, 1990):

$$\tan\delta=G''/G'$$

Onde o G' é o módulo de armazenamento (módulo elástico), que representa a capacidade da amostra de retornar à sua forma original após a aplicação de força e o G'' é o módulo de perda (módulo viscoso), que reflete a resistência ao fluxo contínuo.

Esse fator fornece uma medida do equilíbrio entre elasticidade e viscosidade. Valores menores que indicam uma massa com maior rigidez e menor viscosidade. O comportamento reológico da massa pode ser descrito pelo modelo de Lei da Potência, que relaciona os módulos elástico e viscoso com a frequência angular da oscilação (Jin *et al.*, 2020). No presente trabalho as massas de farinha de trigo, farinha de centeio integral



e de suas misturas, o comportamento reológico foi avaliado com os módulos de armazenamento (elástico) em função da frequência angular, ou seja,  $G'(\omega)$ , e foram caracterizados usando um modelo de lei de potência.

$$G'(\omega) = k \omega^n$$

Onde  $k$  (Pa.s<sup>n</sup>) é o intercepto, enquanto  $n$  (adimensional) é a inclinação para o modelo de Lei da Potência, onde  $K'$  e " $k$ " são os coeficientes de viscosidade para os módulos elástico e viscoso, respectivamente,  $\omega$ /omega é a frequência angular e  $n$  é índice de fluxo. Essas fórmulas ajudam a caracterizar a massa em termos de elasticidade e viscosidade em função da frequência aplicada (Jin *et al.* (2020).

### 3.5 QUALIDADE DOS PÃES

#### 3.5.1 Volume e densidade

O volume é uma característica primária que possibilita determinar a excelência dos produtos panificados, que o pão está inserido (Skendi *et al.*, 2010). Em caráter qualitativo, esse detalhe em particular pode ser afetado por uma série de fatores, um dos aspectos que pode induzir uma variação da qualidade é o tamanho das partículas do pericarpo presente na farinha (Rabe, 1999), bem como a proporção de água utilizada ao longo do processo de produção, logo, a estrutura do pão é um fator de múltiplas variações que interfere diretamente o volume apresentado do produto final (Scanlon; Zghal, 2001).

Existem componentes que podem interferir neste aspecto da qualidade, como a adição de hidrocoloides, as condições de processamento e demais ingredientes específicos presentes na formulação, esses componentes, interagem com a água, os compostos não amiláceo, as proteínas, dextrinas, açúcares, emulsificantes e enzimas (Schiraldi *et al.*, 1996; Selomulyo; Zhon, 2007).

É importante destacar que os componentes presentes na massa, podem atuar substituindo as proteínas responsáveis por estruturar a rede gluteica (Mandala *et al.*, 2009), interrompendo a interação glúten-amido e enfraquecendo o potencial de retenção de gás impossibilitando o aumento de volume do pão final, esse efeito é conhecido como diluição do glúten.

### 3. 5. 2 Textura

No contexto dos pães, o atributo textura é de muita valia para medir a qualidade, sendo a firmeza do miolo um dos aspectos mais relevante (Vliet; Primo-Martín, 2011). A textura é uma percepção sensorial resultante da interação com o alimento (Szczesniak, 2002). Nesse contexto, existem métodos de avaliação que procuram desempenhar o papel sensorial de determinar a qualidade de um alimento para o consumidor. Embora os testes sensoriais, como os painéis, sejam amplamente utilizados para essa avaliação, os testes mecânicos têm sido reconhecidos como ferramentas essenciais para avaliar aspectos como a textura (Lawless; Heymann, 2010).

Nesse contexto, a avaliação da textura, a medição dos atributos pode ser feita por meio de análise sensorial (subjetiva) ou instrumental (objetiva) (Chen; Opara, 2013).

As medições de textura podem ser medida por incisão ou aperto, por meio de texturômetro, entretanto ainda sejam comumente utilizados o avanço tecnológico tem permitido o desenvolvimento de mecanismos não invasivos, alguns meios como a espectroscopia de infravermelho e imagem espectral, vem se popularizando como método de avaliação (Chen; Opara, 2013).

#### 3. 5. 2. 1 Perfil de Textura de Pães Tipo Francês: Tecnologia e Funcionamento

A textura e a aparência são aspectos essenciais para avaliar produtos de cereais, como pães tipo francês. A textura é determinada pela interação tátil com o produto, refletindo como o alimento responde à força aplicada, incluindo sua deformação e desintegração. Medições objetivas da textura são baseadas em como o alimento reage a forças aplicadas, e essas medições são feitas considerando variáveis como força, tempo e distância (Blokma, 1990). A estrutura tridimensional do alimento, formada por seus componentes em diferentes escalas, influencia a textura final do produto (Crowley *et al.*, 2002).

A Análise de Perfil de Textura (TPA) é uma técnica amplamente utilizada para avaliar as características texturais de pães tipo francês. Essa técnica mede as propriedades texturais por meio de duas compressões sucessivas na amostra, o que pode causar alterações permanentes no alimento testado (AACC, 2000). As medições geram curvas que representam a força versus a deformação do pão, das quais são extraídos vários parâmetros importantes:

1. **Firmeza:** Mede a força necessária para causar uma deformação inicial no pão. Para pães tipo francês, isso indica a resistência do miolo à compressão e é obtido a partir do pico de força durante a primeira compressão.
2. **Fraturabilidade:** Refere-se à força necessária para romper o pão, que é geralmente registrada como a força máxima após o rompimento do material.
3. **Adesividade:** Avalia a energia necessária para separar o pão da superfície de compressão, refletindo a aderência do pão durante a mastigação.
4. **Elasticidade:** Representa a capacidade do pão de retornar ao seu estado original após a compressão. Este parâmetro é medido pela altura que o pão recupera entre a primeira e a segunda compressão.
5. **Coesividade:** Refere-se à força interna das ligações no pão e a energia necessária para manter a estrutura do produto após a deformação. É calculada pela razão entre a área da segunda compressão e a área da primeira compressão.
6. **Resiliência:** Mede a energia recuperada pelo pão após a compressão, ajudando a entender a capacidade do pão de suportar múltiplas compressões.

Para pães tipo francês, os parâmetros de TPA são ajustados para refletir as características típicas desses produtos. No estudo que está sendo proposto, as velocidades de pré-teste e pós-teste são geralmente ajustadas para 0,5 mm/s, o que ajuda a evitar danos à crosta e garante uma compressão uniforme. A distância de compressão é frequentemente definida em 10 mm, cobrindo cerca de 50% da altura do pão, para avaliar adequadamente tanto a crosta quanto o miolo.

A utilização da TPA para medir a textura dos pães oferece uma análise rápida e precisa das propriedades texturais, essencial para garantir a qualidade do produto e atender às expectativas dos consumidores (Bourne, 1982; Szczesniak, 2002). A curva obtida através da TPA fornece uma visão detalhada da resposta do pão à compressão e permite uma análise aprofundada de suas propriedades texturais, como firmeza, elasticidade e coesividade.

### 3.5.3 Cor

A cor externa de um alimento é comumente associada a um fator primário de qualidade (Pedreschi *et al.*, 2006), e fator fundamental na tomada de decisão do consumidor (Meilgaard *et al.*, 2007), pois os compradores tendem a associar a cor com ao demais atributos do produto, como o sabor, valor nutricional, aroma, frescor e nível de

satisfação, e está ligado à avaliação física, química e sensorial do alimento (Pedreschi *et al.*, 2006).

Durante a etapa de assamento do panificado, ocorre a mudança da cor, conhecido como escurecimento resultado de reações químicas não enzimáticas. Duas reações muito presentes no contexto da panificação, são a reação de Maillard e a caramelização, responsáveis por promoverem o aparecimento de pigmentos coloridos no produto. (Damodaran *et al.*, 2010).

Durante o processo de cozimento, as reações de escurecimento são desencadeadas pela mudança de temperatura e pela atividade da água, o que resulta em mudanças físicas, químicas e bioquímicas na estrutura molecular do alimento, tanto em sua região intrínseca quanto extrínseca. Essas transformações afetam tanto os aspectos sensoriais quanto os nutricionais do produto (Purlis, 2010). Elas se manifestam na variação do volume, na estruturação do miolo pela desnaturação das proteínas, na evaporação da água, na formação da crosta e na gelatinização do amido (Mondal; Datta, 2008).

No caso dos pães, quando ocorre a diminuição da atividade de água para menos de 0,6 e o aumento da temperatura acima de 120 °C, o surgimento de pigmentos escuros pode ser observado no decorrer da fase de assamento (Purlis, 2010). A reação de Maillard, inicia o seu ciclo bioquímico em temperatura acima de 50°C, sendo que, na maioria dos alimentos pode ser incentivada em pH entre 4,0 e 7,0 (Kroh, 1994),

Sua principal característica, situa-se mediante a reações entre um açúcar redutor, por excelência a D-glicose, e um grupo amina primário (uma molécula de proteína com cadeia lateral com grupo aminoácido ou um aminoácido), decomposto e posteriormente condensado (Damodaran *et al.*, 2010), seguido por uma série de rearranjos como os compostos de *amadori*, que são os primeiros intermediários na sequência de reações de escurecimento (Martins *et al.*, 2000; Damodaran *et al.*, 2010), que se caracteriza na formação de melanoidinas e outros polímeros de cor marrom, além de substâncias aromáticas (Martins *et al.*, 2000).

Por sua vez, visivelmente perceptível por um aspecto marrom, comumente denominado de caramelo (Kroh, 1994), a reação de caramelização é distinguida por um complexo conjunto de reações (enolização, desidratação, clivagem, aldolização) que ocorrem quando carboidratos, em específico sacarose e açúcares redutores, são colocados em ambiente de alta temperaturas (>120°C), e livres de compostos nitrogenados (Damodaran *et al.*, 2010), o que resulta em estruturas intermediários conhecidas como

$\alpha$ -dicarbonílicos. Esses novos compostos estimulam a formação de moléculas com ligações duplas ou anéis insaturados, como derivados de furanos (como o hidroximetilfurfural) e polímeros (Kroh, 1994).

Em síntese, o combustível mais importante envolvidos tanto na reação de Maillard quanto na caramelização na fase de assamento, são as reações sofridas de hidrólise do amido e a sacarose que geram açúcares redutores, associados no aparecimento de pigmentos escuros no produto final (Capuano *et al.*, 2008).

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 MATERIAL**

O estudo foi realizado com farinhas de centeio integral (FCI), obtidas a partir do mesmo lote, da safra 2022, da Suprema da Santista Alimentos Ltda - São Paulo, e farinha de trigo branca (FTB) do grupo Orquídea Alimentos Ltda, adquirida em varejo local, cidade de Florianópolis, Santa Catarina - Brasil. As farinhas foram estocadas a 4°C, até o momento das análises. A preparação homogênea seguiu o conceito da elaboração do pão tipo francês, com sal, água e fermento biológico instantâneo seco (FBS) - Fermentos Fleischmann Ltda, adquiridos em comércio local.

Como item melhorador, foi utilizado a Activa STGase-F<sup>®</sup> - preparação enzimática com transglutaminase (TGase) obtida do *Streptomyces mobaraense* - seguindo as orientações do fabricante, indicado para formulações de panificados (Ajinomoto – São Paulo), (figura 6).

Figura 6 – Rotulo comercial da Activa STGase-F®.

**Ajinomoto**

**ACTIVA STG-F**

Preparação enzimática com transglutaminase obtida do *Streptomyces mobaraense*  
 Enzyme preparation with transglutaminase obtained from *Streptomyces mobaraense*

**100g**

**INGREDIENTES:** maltodextrina, proteína hidrolisada de trigo e coadjuvante de tecnologia transglutaminase.  
**INGREDIENTS:** maltodextrin, hydrolyzed wheat protein and processing aid transglutaminase.

**ALÉRGICOS: CONTÉM DERIVADOS DE TRIGO. CONTÉM GLÚTEN.**

**FABRICADO POR/MANUFACTURED BY:** AJINOMOTO DO BRASIL IND E COM. DE ALIMENTOS LTDA. ROD. ANHANGUERA, km 131 - LIMEIRA - SP  
 CNPJ: 46.344.354/0005-88  
 I. E.: 417.325.212.115  
 INDÚSTRIA BRASILEIRA/MADE IN BRASIL

**LOTE/VENCE: VIDE EMBALAGEM**  
**LOT/EXPIRY DATE (DD/MM/YY): ON PACKING**

AMOSTRA GRÁTIS - DISTRIBUIÇÃO GRATUITA. SAMPLE - FREE DISTRIBUTION

Manter em local seco e arejado. Evitar contato direto com luz solar. Após aberta a embalagem, fechar bem e conservar abaixo de 5°C.  
 Keep in a cool and dry place. Avoid direct sunlight. Once opened the individual package, reseal unused product and store below 5°C.

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA:** Transglutaminase ≥ 0,1% **CHEMICAL COMPOSITION:** Transglutaminase ≥ 0.1%

**PERIGO/DANGER**  
 Quando inalado pode provocar sintomas alérgicos, de asma ou dificuldades respiratórias.  
 May cause allergy or asthma symptoms or breathing difficulties if inhaled.

**FRASES DE PRECAUÇÃO/PRECAUTIONARY STATEMENTS:**

- Evite inalar as poeiras/fumos/gases/ névoas/vapores ou aérossóis;  
 - Avoid breathing dust/ fume/ gas/ mist/ vapors or spray;
- Em caso de ventilação inadequada, use equipamento de proteção respiratória;  
 - In case of inadequate ventilation, use respiratory protection equipment;

**EM CASO DE INALAÇÃO:** Remova a pessoa para local ventilado e a mantenha em repouso numa posição que não dificulte a respiração;  
 - IF INHALED: remove the person to fresh air and keep comfortable for breathing:

- Em caso de sintomas respiratórios: Contate um CENTRO DE INFORMAÇÃO TOXICOLÓGICA ou orientação médica.  
 - if experiencing respiratory symptoms: Call a POISON CENTER/doctor.

Telefone de emergência/Emergency phone: +55 (19) 3404-9000

A Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos deste produto pode ser obtida através do telefone (11) 5080-6786.  
 The Safety Data Sheet of this product can be obtained by phone +55 (11) 5080-6786.

**ATEDIMENTO AO CLIENTE / CUSTOMER SERVICE**  
 vendas@br.ajinomoto.com/+55(11)5080-6786/www.ajinomotoof.com.br /FOOD INGREDIENTS

Fonte: Reproduzido por Autor (2024).

## 4.2 MÉTODOS

Um delineamento experimental foi desenvolvido para guiar os testes realizados. Foram preparadas duas configurações distintas de misturas para investigar a formação da massa. A primeira configuração focou em avaliar o comportamento da massa com diferentes concentrações de água, utilizando apenas farinha de trigo branca (FTB) e

farinhas de centeio integral (FCI), sem composição de farinha mista. A segunda com diferentes mesclas de farinha mista, adicionados do composto enzimático (TGase), seguindo o percentual do padeiro (composição de mistura segundo a qual, a quantidade de cada ingrediente é expressa como uma porcentagem da quantidade total de farinha utilizada).

#### 4. 2. 1 Delineamento Experimental

O teste para determinar o melhor percentual de hidratação da mistura foi conduzido seguindo uma formulação simples, composta por farinha de trigo branco (FTB), sal (S), fermento biológico seco (FBS) e água (Ag). A formulação foi planejada conforme as especificações detalhadas na tabela 1, cujos dados não são apresentados neste documento. O objetivo era avaliar a influência da hidratação na qualidade da mistura, ajustando os parâmetros para obter os melhores resultados possíveis em termos de textura aparente e performance da massa. A partir das observações das amostras, ficou definido que a amostra com 57% de hidratação é a que seguiria para os demais testes e análises.

**Tabela 1** - Perfil de hidratação da massa simples

Tratamentos	Ag (%)	S (%)	FBS (%)	Farinha (g)
1A	54			
1B	55			
1C	56			
1D	57	1	1,5	800
1E	58			
1F	60			

Fonte: Autor (2024). Ag: água; S: sal; FBS: Fermento biológico seco.

As concentrações das farinhas mistas foram testadas na presença do componente enzimático. Para isso, tornou-se imprescindível delinear o perfil de aplicação da TGase, utilizando um planejamento fatorial elaborado, que compreendeu um total de dezoito tratamentos com e sem a presença de TGase. As amostras foram identificadas de acordo com porcentagem de cada farinha na mistura, onde FTB0\_FCI100, corresponde a 100% de farinha de centeio, enquanto FTB100\_FCI0, corresponde a 100% da farinha de trigo branca, em três concentrações diferentes, 0 ppm, 85 ppm e 140 ppm. A concentração da enzima seguiu de acordo com orientação do fabricante (de 85 a 140 ppm), conforme a tabela 2.

**Tabela 2** - Delineamento experimental das concentrações de TGase nos percentuais de FTB e FCI.

Grupos (FTB1_FCI)	Tratamentos		
	0PPM	85PPM	140PPM
A FTB0_FCI100	sem enzima	85 ppm	140 ppm
B FTB 60_FCI40	sem enzima	85 ppm	140 ppm
C FTB 70_FCI30	sem enzima	85 ppm	140 ppm
D FTB 80_FCI20	sem enzima	85 ppm	140 ppm
E FTB 90_FCI10	sem enzima	85 ppm	140 ppm
F FTB 100_FCI0	sem enzima*	85 ppm	140 ppm

Fonte: Autor (2024). Adicionados com 57% Ag: água; 1% S: sal; 1,5% FBS: Fermento biológico seco; FTB: Farinha de trigo branco; FCI: Farinha de centeio integral. FTB0\_FCI100: 100% farinha de centeio integral; FTB60\_FCI40: 60% de farinha de trigo branca e 40% de farinha de centeio integral; FTB70\_FCI30: 70% de farinha de trigo branca e 30% de farinha de centeio integral; FTB80\_FCI20: 80% farinha de trigo branca e 20% de farinha de centeio integral; FTB90\_FCI10: 90% da farinha de trigo branca e 10% de farinha de centeio integral; FTB100\_FCI0: 100% de farinha de trigo branca; \*:Controle.

#### 4.2.2 Formulação dos Pães

O teste experimental dos pães elaborados a partir de FTB, FCI e TGase foi conduzido na Usina de Panificação do Centro de Ciências Agrárias (CCA-UFSC), seguindo um delineamento experimental específico (tabela 2). As amostras foram preparadas com base em uma formulação básica para a produção de pão tipo francês, utilizando uma batedeira marca KitchenAid Bowl-Lift de 5,6L, modelo KEC56AV, em pequena escala conforme as descrições de Bressiani *et al.* (2017), Bona *et al.* (2002); Oro (2013). A formulação do pão padrão base seguiu os parâmetros e percentuais estabelecidos de acordo com o percentual do padeiro, conforme indicado na tabela 3.

**Tabela 3-** Formulação básica para pão integral de centeio.

Ingredientes	Peso (g)	%
Farinhas*	800g	100
Água	456g	57
Fermento biológico seco	12g	1,5
Sal fino	8g	1
TGase**	<i>quantum satis</i>	
Rendimento	1.276 g	

Fonte: Myhrvold; Migoya (2017)

\* Farinhas: integral de trigo e/ou centeio

\*\*quantidade seguiu a orientação de acordo com indicação da empresa fornecedora, mínimo de 85 ppm e 140 ppm em relação à quantidade de farinha.



As massas foram submetidas a um processo de mistura em duas etapas. A primeira etapa, de homogeneização, foi realizada durante 8 minutos em baixa velocidade, promovendo a incorporação inicial dos ingredientes. Em seguida, ocorreram uma segunda etapa, destinada ao desenvolvimento da rede de glúten, com duração de 12 minutos em velocidade elevada, otimizando a estrutura da massa. O crescimento de porções (cerca de 1.300g) de massa crua ocorreu em uma câmara de fermentação (Venâncio, 220V modelo AC20T) a  $30\pm 1^{\circ}\text{C}$ , com 85% de umidade relativa, ao longo de 30 minutos. A massa foi laminada três vezes em laminadora e posteriormente foi dividida em partes menores, cada uma pesando 70 g, medida em uma balança semi-analítica. Após a divisão, as massas foram moldadas em modeladora, com exceção da amostra de 100% de FCI que foi moldada manualmente (forma tipo cilindro) e dispostas em formas retangulares de alumínio untadas, dando continuidade à segunda fermentação por 1 hora e 20 minutos.

Ao término do período de fermentação, as pestanas dos pães foram abertas, e os pães seguiram para o processo de assamento. O assamento foi realizado em forno elétrico (Venâncio, trifásico 380 V, modelo FTDE8) a  $160^{\circ}\text{C}$ , por 17 minutos, seguido por um resfriamento de 1 hora em grades metálicas à temperatura ambiente.

### **4. 2. 3 Caracterização da Farinha**

#### *4. 2. 3. 1 Granulometria*

A granulometria caracteriza os diferentes tamanhos de partículas, que influenciam diretamente no volume e na firmeza dos pães. As curvas granulométricas das farinhas integrais foram analisadas mediante a aplicação da técnica de tamisação até atingir peso constante, utilizando peneiras sobrepostas em um peneirador RO-TAP<sup>®</sup>. Uma amostra de 100g da farinha de centeio comercial foi submetida ao processo de tamisação em intervalos de 4 minutos, por meio de um conjunto composto por seis peneiras arredondadas acopladas a um suporte vibratório (modelo D-55743, Fritsch, Alemanha), com taylers de 28, 32, 35, 60, 100 e 200 ABNT, apresentando malhas com aberturas de 0,595 mm, 0,500 mm, 0,425 mm, 0,250 mm, 0,150 mm e 0,075 mm, respectivamente (Germani; Benassi; Carvalho, 1997).

#### *4. 2. 3. 2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)*

As amostras de farinhas foram fixadas em stubs de alumínio, com auxílio de cera e fita carbono dupla face, respectivamente. Elas foram revestidas com duas camadas de

ouro, de 200 A° de espessura cada uma. Para isso, utilizou-se o equipamento Sputtering, marca Baltec, modelo SCD 005 sputter coater. A visualização e fotografia das amostras foram feitas em Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM-6390LV, a uma voltagem de aceleração de 10 kV obtidas com magnitude de 50x a 500x no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da UFSC.

#### 4. 2. 3. 3 *Análise Bromatológica*

A composição físico-química da amostra de farinha do fornecedor e sua respectiva mescla foi avaliada de acordo com os métodos oficiais da AACC (2000), AOAC (1995) e IAL (2008). O teor de umidade e substâncias voláteis das amostras foi determinado por secagem em estufa a 105 °C até peso constante (IAL, 2008, 012/IV). O teor de proteína bruta foi determinado pelo método de Kjeldahl (AOAC, 1995, nº 991). Para converter o valor de nitrogênio total em proteína bruta, foram utilizados os fatores de conversão de 6,25 para as amostras de farinha integral. O teor de lipídeos foi determinado utilizando o método de extração em Soxhlet (IAL, 2008, 032/IV). As fibras alimentares solúvel e insolúvel (AACC, 2000, nº 32-07) e o amido total (AACC, 2000, nº 76-13) foram analisados através de kits enzimáticos (marca Megazyme International Ireland Ltd, Bray, Irlanda).

#### 4. 2. 4 **Análise de Propriedade Reológica da Massa Crua**

##### 4. 2. 4. 1 *Análise Rápida de Viscosidade (RVA- Rapid Visco Analyser)*

As propriedades de pasta das amostras de misturas homogeneizadas de farinha de trigo integral, branca e mista foram realizadas, em equipamento analisador rápido de viscosidade - Rapid Visco Analyser – RVA 4500 – software Thermocline for Windows (TCW), de acordo com manual do equipamento *New Port Scientific – Perten Instruments*, e seguindo método nº 76-21 (AACC, 2000; Walker, *et al*, 1988).

O perfil de viscosidade das amostras foi analisado em duplicata para todos os percentuais de FTB, FCI, com e sem TGase. A umidade das amostras foi previamente determinada e corrigida para 14% (p/p), conforme manual do equipamento, com base na umidade das misturas das farinhas anteriormente determinadas. Foi utilizado o método 76-21.01 (AACCI, 2010d), as farinhas misturadas (4 g; 14% de umidade) foram suspensas em água destilada (25 ml) e analisadas utilizando o perfil Padrão 1 (*Standar I*), isto é, amostras foram mantidas a 50°C por 1 minuto, aquecidas até 95°C em 4:45

minutos e mantidas nesta temperatura durante 7:15 minutos, resfriadas a 50°C até o tempo de 11 minutos e mantidas nesta temperatura até o total de 13 minutos de análise), sendo considerados os parâmetros:

- Viscosidade máxima (*V.Max*) a 95 °C – valor da velocidade máxima obtida durante o aquecimento à temperatura constante de 95 °C;
- viscosidade final (*V.fin*) a 50 °C (cP) – valor da viscosidade máxima, obtida no final do ponto do ciclo de resfriamento, à temperatura de 50 °C;
- viscosidade mínima (*V.min*) a 95 °C (cP) – viscosidade mínima obtida a 95°C;
- quebra (*Q. cP*) – valor máximo de viscosidade atingida durante ou logo após a etapa de aquecimento, menos a viscosidade mínima de 95 °C;
- retrogradação (*T. ret. cP*) – viscosidade final a 50 °C menos a viscosidade mínima a 95 °C; e
- temperatura de pasta (*T.pas. ° C*) – temperatura em ° C que corresponde ao ponto no qual se inicia a formação de curva no gráfico (Walker, *et al*, 1988).

#### 4. 2. 4. 2 Resistência da massa a extensão

Para medir a resistência da massa à extensão, foi usado equipamento Analisador de Textura (TA.XT.2i, Stable Micro Systems, Inglaterra) utilizando uma sonda Kieffer para Extensibilidade de Massa e Glúten (A/KIE). As massas foram elaboradas e moldadas em forma de pequenos filamentos de 4g (fios de massa) preparados manualmente, a análise foi realizada a uma velocidade de teste de 3,0 mm/s e uma distância de 75 mm. Foram realizadas 10 medidas para cada formulação. Para interpretação do gráfico foram analisados os seguintes parâmetros: energia (*A*), resistência à extensão (*Re*), extensibilidade (*E*), (Montenegro; Ormenese, 2008).

- Energia (*A*): É a área total da curva dada em grama vezes milímetro (g.mm). Quanto maior é a área, maior é a energia exercida e maior é a força da massa, portanto, mais forte será a farinha;
- Resistência a Extensão (*Re*): É o valor expresso em gramas. Mede a força máxima obtida durante a extensão da massa. É indicativo da capacidade da massa de reter o gás carbônico (CO<sub>2</sub>), formado durante a fermentação. Esta característica está relacionada com a proteína glutenina, que possui alto peso molecular e tende a formar ligações dissulfídricas intermoleculares e intramoleculares;

- Extensibilidade (*E*): É um valor expresso em mm, obtido através da medida do comprimento do extensograma desde o início até o fim da curva até a ruptura. A extensibilidade da massa nos mostra o quanto ela consegue se esticar, até a ruptura.

#### 4. 2. 4. 3 *Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC - Differential Scanning Calorimetry)*

Calorimetria exploratória diferencial seguiu segundo Andrade (2008) com modificações, em equipamento MCDSC (Multi-Cell DSC) com a submissão de amostras a um ciclo de aquecimento e resfriamento de -15 a 145°C a 2°C/minuto, em 4800 segundos, para determinar início, fim e picos de gelatinização (°C), entalpia (W/g) e outros eventos térmicos que possam ser detectados nos traços de DSC. Utilizando cápsulas de aço Hasteloy fechadas. O experimento foi conduzido em atmosfera dinâmica (25ml/min) com o gás nitrogênio. Foram analisadas as misturas das farinhas com 57% de água, da massa elaborada de acordo com 4. 2. 2, conforme o delineamento experimental (tabela 2).

#### 4. 2. 4. 4 *Reologia de Oscilação - Varredura Frequência*

As massas foram preparadas de acordo com o descrito anteriormente, numa relação farinhas-enzima com água a 57% (p/v), base de farinha em batedeira de gancho marca Kitchen-Aid (Bowl-Lift de 5,6L, modelo KEC56AV), de acordo com o procedimento já descrito (4. 2. 2). Após a mistura, a massa foi deixada em repouso por 1 hora a 25°C, antes de serem testadas no reômetro dinâmico.

A análise reológica dinâmica foi realizada usando um reômetro de estresse controlado (MCR-92, Anton Paar, Áustria) com geometria de placas paralelas (diâmetro de 60 mm). A massa foi colocada entre as placas paralelas, o espaçamento ajustado para 3 mm e o excesso de massa removido. Antes das medições, as massas descansaram por 5 min, para permitir o relaxamento após o manuseio da amostra. Para determinar a região de viscoelasticidade linear da massa, os módulos dinâmicos foram coletados e plotados em função do estresse aplicado. Testes oscilatórios com varredura de frequência de 0,1 a 100 Hz foram realizados a um estresse constante de 0,1 Pa a 25 °C. As propriedades reológicas dinâmicas das amostras foram avaliadas pelo módulo de armazenamento  $G'$  (módulo elástico), módulo de perda  $G''$  (módulo viscoso) e pelo fator de perda ( $\tan \delta$ ), que representa a relação das duas partes do comportamento viscoelástico. Para enfatizar

as diferenças entre os tratamentos enzimáticos, os valores dos módulos dinâmicos e dos fatores de perda obtidos a uma frequência de 1 Hz foram utilizados (Caballero *et al.*, 2005; Martínez-Anaya; Jimenez, 1997).

#### 4. 2. 5 Análise de Qualidade do Pão

##### 4. 2. 5. 1 Cor

A avaliação da cor dos pães foi realizada em colorímetro (modelo Chromo Meter CR 400, marca Minolta, Japão), acoplado a processador DP-100, com iluminante D65 e ângulo de 10°. Foi utilizado sistema de avaliação CIE (Commission Internationale de l'Eclairage, ou Comissão Internacional de Iluminação), com parâmetros de cor:  $L^*$ ,  $a^*$ , e  $b^*$ , onde  $L^*$  corresponde à luminosidade (0 = preto e 100 = branco);  $a^*$  e  $b^*$  são coordenadas de cromaticidade:  $a^*$  corresponde à variação de cor de verde (-60) a vermelho (+60);  $b^*$  corresponde à variação de cor de azul (-60) ao amarelo (+60), com orientações segundo El-Dash (1978).

##### 4. 2. 5. 2 Volume específico e densidade.

O volume dos pães foi determinado seguindo o método nº 10-05 (AACC, 2000), com modificações, onde ao invés de sementes de painço (Kittisuban *et al.*, 2014) foram utilizadas esferas de isopor de 5 mm de diâmetro, medido em recipiente com volume conhecido. Uma proveta graduada de 1L foi completada com as esferas. As esferas eram retiradas, as amostras foram acomodadas no recipiente, cobertas com as esferas. O volume de esferas excluídas foi considerado como o volume do pão. O Volume específico ( $VE$ ) foi calculado de acordo com a equação 1. A densidade ( $D$ ) foi calculada segundo a equação 2, calculada da razão entre o peso ( $P$ ) (g) pelo volume ( $V$ ) ( $cm^3$ ).

$$\text{Volume específico}(Ve): \frac{\text{Volume (cm}^3\text{)}}{\text{Peso (g)}} \quad (1)$$

$$\text{Densidade (D)}: \frac{\text{Peso(g)}}{\text{Volume(cm}^3\text{)}} \quad (2)$$

##### 4. 2. 5. 3 Análise do perfil de textura do pão assado

A textura de pães inteiros foi analisada por meio de Analisador de Textura (TA.XT.2i, Stable Micro Systems, Inglaterra) utilizando uma sonda de alumínio de 75mm

de diâmetro (P75). Análise foi realizada com os seguintes parâmetros: a velocidade de pré-teste foi ajustada para 0,5 mm/s, a velocidade de teste foi mantida em 1,0 mm/s e a velocidade de pós-teste também foi ajustada para 0,5 mm/s. A distância de compressão foi definida em 50% da altura da amostra (50 mm). A força de contato foi ajustada conforme necessário para garantir um contato adequado com a amostra, começando com um valor inicial de 0,5 g. Os parâmetros analisados foram: fraturabilidade (g), firmeza (g), adesividade (g.s), coesividade (adimensional), elasticidade (adimensional) e resiliência (adimensional). Os dados foram coletados utilizando o software "Texture Expert for Windows 1.20".

#### 4.2.6 Análise Estatística

Os dados foram analisados utilizando o programa Past 4.09.32 e Excel. Os valores médios foram comparados ao nível de 5% (ANOVA) de probabilidade utilizando teste de Tukey.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA FARINHA

#### 5.1.1 Granulometria

A Tabela 4, mostra a distribuição do tamanho das partículas da farinha de centeio integral, com porcentagens de retenção em diferentes faixas de tamanho.

**Tabela 4-** Análise granulométrica da FCI.

Taylor	Abertura (mm)	Retenção (%)
< 28 >32	>0,595	14,93
>32	0,500	9,80
>35	0,425	2,96
>60	0,250	21,25
>100	0,150	31,09
>200	0,075	18,35
Bandeja	<0,075	1,61

Fonte: Autor (2024).

A Tabela 4 mostra uma análise granulométrica da farinha de centeio integral (FCI), indicando uma distribuição variada de tamanhos de partículas. As maiores porcentagens de retenção foram observadas em faixas de tamanho menores, especificamente entre 0,250mm e 0,075mm, que representam 70,69% do total. Isso sugere que a FCI possui uma quantidade significativa de partículas finas. Em contraste, as partículas com abertura de peneira maior que 0,595mm apresentaram percentuais de retenção menores, indicando uma menor presença de partículas grossas na farinha.

Estudos anteriores fornecem informações importantes sobre como o tamanho das partículas pode afetar as propriedades da farinha e os produtos finais. Massas elaboradas com farinhas de partículas maiores apresentaram menor teor de glúten, maior grau de retrogradação do amido, menor tempo de relaxamento, maior espessura da rede de glúten e maior cobertura de grânulos de amido. Entretanto, farinhas com partículas menores tendem a produzir pães com maior firmeza de miolo. O aumento no teor de farelo pode resultar em massas com maior competição por água, menor resistência ao glúten e processos de desenvolvimento, relaxamento e retrogradação do amido mais lentos (Sol *et al.*,2023).

Qin *et al.* (2021) relataram que as propriedades da farinha, a reologia da massa e os atributos de qualidade do pão são influenciados pelo tamanho das partículas. Em seu estudo com farinha de arroz, partículas mais finas apresentaram melhores parâmetros de pasta e reologia, contribuindo para uma melhor capacidade de retenção de gases e formação de gel, o que resultou em maior volume específico e coesividade do pão.

Esses estudos destacam a importância de considerar o tamanho das partículas da farinha e o teor de farelo ao ajustar a formulação da massa para alcançar uma qualidade satisfatória em produtos de centeio integral. No presente estudo, a predominância de partículas finas, especialmente aquelas na faixa de 0,075 mm de abertura (200 mesh), é de interesse para a formulação de massas e produtos de panificação. Assim, após as análises de granulometria, apenas as frações maiores que 0,075 mm e menores que 0,150 mm foram utilizadas para o restante da pesquisa, em acordo com Myhrvold; Migoya (2017).

### **5. 1. 2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).**

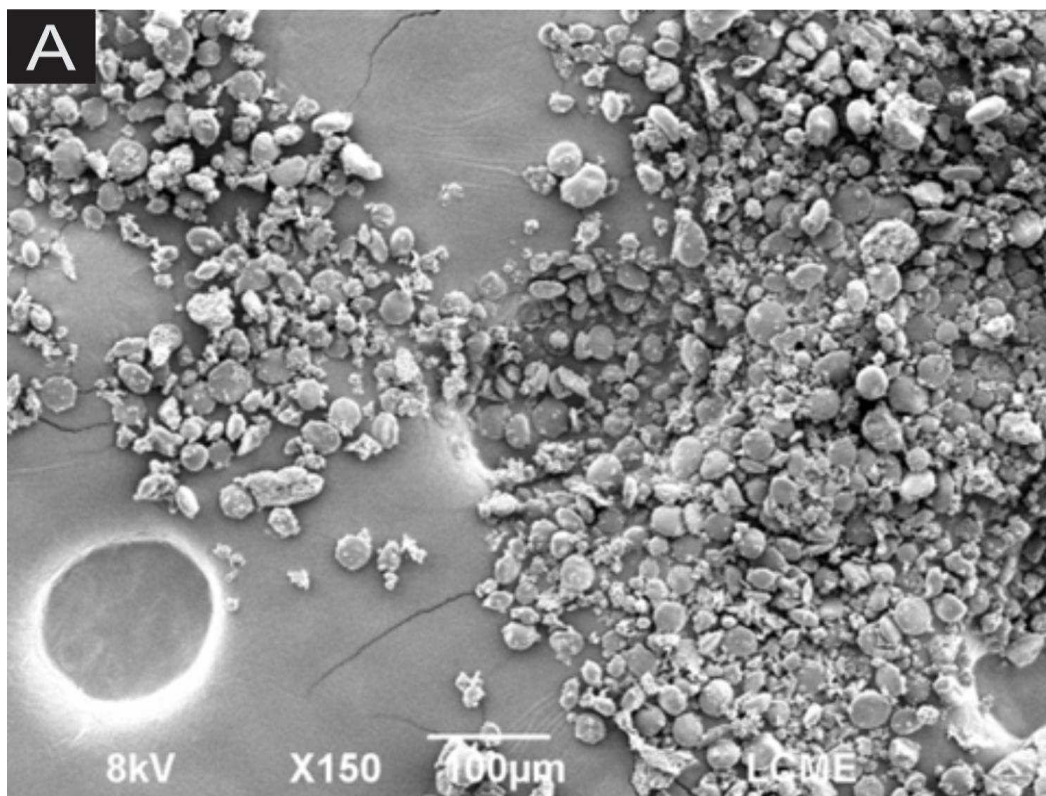
A análise da farinha de centeio integral (FCI) utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou características microestruturais significativas dos grânulos de amido, evidenciadas na Figura 7: (a), (b) e (c). As imagens obtidas fornecem uma visão

detalhada da morfologia dos grânulos de amido, destacando variações notáveis na superfície e no formato dos grânulos, que são influenciadas pela origem e pelo tipo de amido presente na farinha.

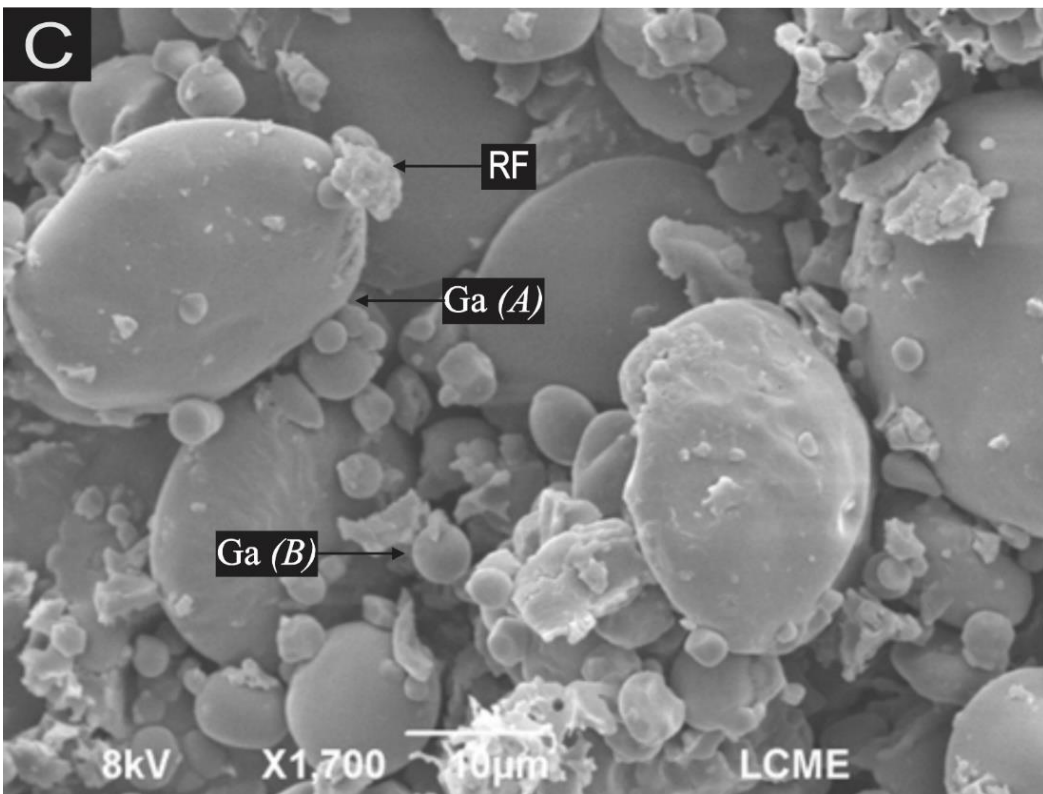
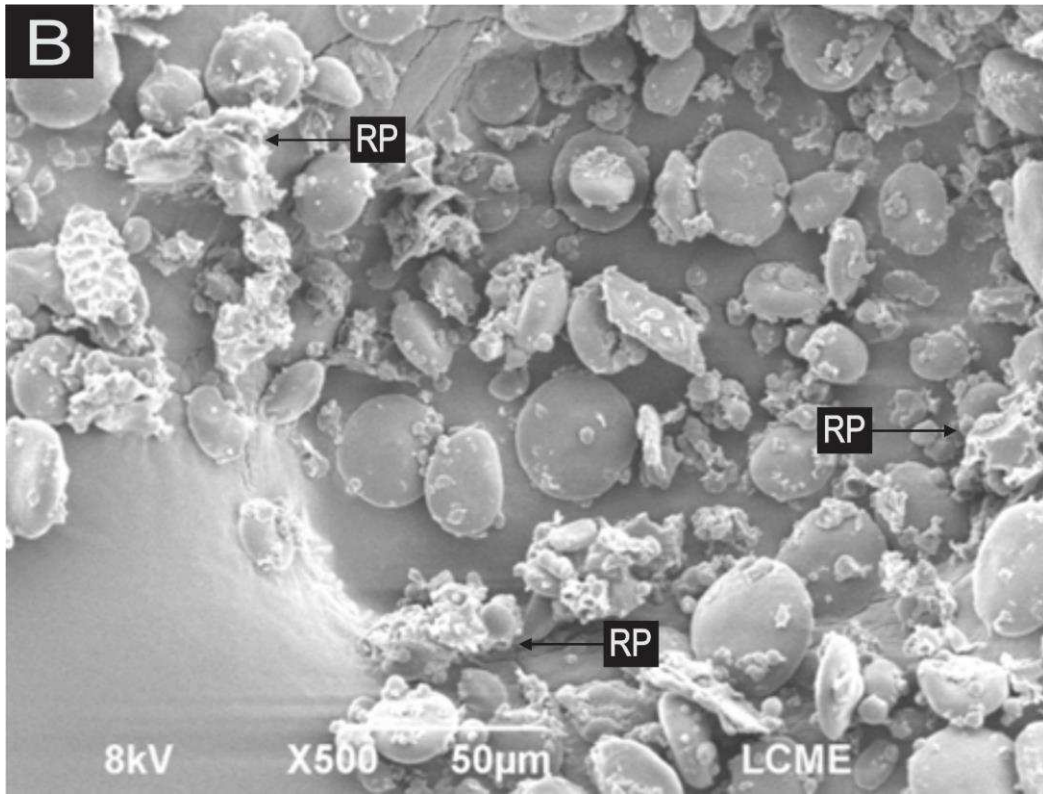
Observa-se uma distinta distribuição dos resíduos de proteínas (RP) (figura 7: b) em meio aos grãos de amido (Ga). Os grânulos de amido de centeio possuem superfícies relativamente lisas, porém estão fortemente envolvidos por resíduos de farelo (RF), conforme ilustrado na figura 7:(c). Esta interação com o farelo pode ter implicações na funcionalidade do amido durante o processamento e armazenamento da farinha. A distribuição dos tamanhos dos grânulos é bimodal, como evidenciado na figura 6:(c), indicando a presença de duas populações distintas de grânulos Ga(A) e Ga(B).

Os grânulos maiores apresentam formatos arredondados e achatados, descritos como lenticulares. Esse formato pode ser associado a propriedades específicas de absorção e gelatinização do amido durante o processamento de alimentos. Em contraste, os grânulos menores apresentam uma morfologia mais irregular, variando entre formas lenticulares e esféricas, figura 7:(c). Esta variação na forma e tamanho dos grânulos pode afetar a textura e as propriedades reológicas da farinha de centeio quando utilizada em formulações alimentícias, como em pães e outros produtos de panificação (Tang *et. al.*, 2022)

**Figura 7: (a), (b), (c)-** Microestrutura eletrônica de varredura da FCI (MEV).







Fonte: Autor (2024). RP: Resíduo de Proteína, RF: resíduo de Farelo, Ga: Grão de amido, (A) e (B): Morfologia do amido.

A morfologia encontrada neste estudo é consistente com a literatura, Tang *et al.* (2022) destacam que, similar a outros grãos de cereais como cevada e trigo, o amido de centeio apresenta distribuição dimensional bimodal dos tipos (A) e (B), que variam em suas características morfológicas, com os grânulos do tipo (A) sendo maiores e lenticulares, enquanto os grânulos do tipo (B) são esféricos. Gomand *et al.* (2011) e Buksa (2018) também descrevem grânulos lenticulares maiores e grânulos esféricos menores.

Um estudo de Aponte *et al.* (2014) explorou o uso de farinha de centeio na microestrutura de massa fermentada à base de farinha de castanha. Eles observaram que todas as massas fermentadas continham grânulos de amido de diferentes tamanhos e formatos (lenticular e esférico), distribuídos por toda a matriz proteica. Como a farinha de centeio não forma glúten, a estrutura observada nas massas fermentadas dependeu do amido, da proteína de alto peso molecular e do alto teor de fibra, para as propriedades da massa.

Segundo, Tang *et al.* (2022), a composição da farinha interfere na formação da rede de proteínas do glúten, resultando em resistência fraca, alta rigidez, baixa capacidade de retenção de ar, poros irregulares e fácil quebra. Portanto, aumenta a firmeza do pão e reduz a sua elasticidade. No processo de panificação, a diluição também afeta a formação de uma rede elástica molecular de glúten reticulada, resultando na fácil destruição da rede de glúten, reduzindo assim o volume específico do pão.

Portanto, para alcançar uma qualidade satisfatória em produtos de centeio integral, é essencial considerar o tamanho das partículas da farinha e o teor de farelo ao ajustar a formulação da massa. A presença de partículas finas, especialmente aquelas na faixa de 0,075mm (200 mesh), é de particular interesse, pois pode influenciar significativamente a textura, coesividade e volume dos produtos finais.

### **5. 1. 3 Análise Bromatológica**

O amido é o principal carboidrato no centeio, impactando diretamente suas propriedades de inchaço e colagem (Buksa, 2018), o poder de inchaço e a capacidade de ligação à água relatados para o amido de centeio variaram entre 6,2–13,8 % e 86,5–141% (Áucio; Eliasson, 2009; Buksa, 2018) essenciais na indústria alimentícia. Os componentes bromatológicos presentes na farinha de centeio integral a base seca, em percentual (%), e está apresentada na tabela 5.

**Tabela 5-** Análise bromatológica da amostra de FCI.

Componentes	%
Amido total	71,4±0,42
Fibra solúvel	0,7±0,28
Fibra insolúvel	11,6±0,0
Fibra total	12,3±0,28
Proteína total	10,12±0,17
Lipídios	1,11±0,03

Fonte: Autor (2024). Valores médios (média ± desvio padrão).

A FCI apresentou um teor de amido total de 71,4%, valor alto e consistente com a faixa de carboidrato de 66- 80%, descrita por Rodehutschord *et al.* (2016). Este valor está acima dos 59,8% encontrados por Czubaszek *et al.* (2021); Kołodziejczyk *et al.* (2018), indicando uma variação potencial devido a diferentes cultivares e métodos de análise.

O teor de fibra total na FCI foi de 12,3%, um valor intermediário comparado a 9,92% - 15,0% (Czubaszek *et al.* 2021); Mihhalevski *et al.* 2013; respectivamente). A fibra insolúvel predominou com 11,6%, enquanto a fibra solúvel foi de 0,7%. A quantidade de fibra insolúvel é consistente com outros estudos da literatura, Mihhalevski *et al.* (2013), 12,0%. As fibras, especialmente a insolúvel, são cruciais para a saúde digestiva, enquanto a fibra solúvel pode influenciar o controle glicêmico (Almeida *et al.*, 2013; Koletta *et al.*, 2014).

A FCI apresentou um teor de lipídios de 1,11%, valor consistente com os encontrados por Cardoso *et al.* (2019) em farinhas de centeio refinada (0,96-1,29%) e integral (1,31-1,73%), e Xhaferaj *et al.* (2023) (1,2%). O teor de lipídios é importante para a qualidade sensorial dos produtos, influenciando sabor e textura, e fornecendo ácidos graxos essenciais (Xhaferaj *et al.*, 2023).

O teor de proteína na FCI foi de 10,12%, alinhando-se com os 9,8% encontrados por Czubaszek *et al.* (2021) e dentro da faixa de 5,2 a 13,2% reportada por Xhaferaj *et al.* (2023). Este valor indica que o centeio é uma boa fonte de proteína, contribuindo para a dieta de forma significativa, similar aos achados de Cardoso *et al.*, (2019) que encontraram teores proteicos variando entre 8,2 e 13,8% em farinhas integrais.

Os dados físico-químicos da farinha de centeio integral indicam uma composição nutricional robusta, com teores de amido e fibra alimentar, além de uma quantidade significativa de proteínas. As variações encontradas em comparação com

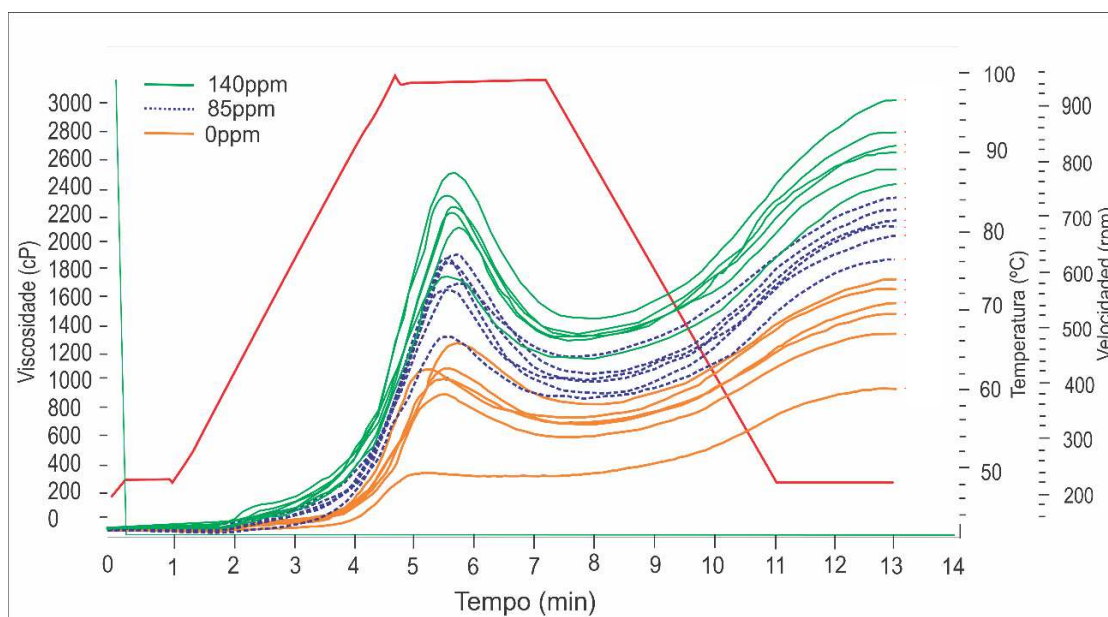
outros estudos podem ser atribuídas a diferenças nos cultivares e metodologias de análise. Esses componentes são fundamentais para a aplicação da farinha de centeio em produtos alimentícios, oferecendo benefícios funcionais e nutricionais valiosos para a elaboração de produtos de qualidade nutricional. Os valores da composição centesimal da farinha de trigo branca, são os informados pelo fabricante na informação nutricional, constando na embalagem do produto. Carboidratos totais 72g/100g; açúcares totais 3,9 g/100g; proteínas 10g/100; gorduras totais 2,1 g/100g; gorduras saturadas 0,6 g/100g; fibras alimentares 3,2 g/100g.

## 5. 2 ANALISE DE PROPRIEDADE REOLÓGICAS DA MASSA

### 5. 2. 1 Análise Rápida de Viscosidade (RVA)

No experimento, o tempo de massa variou entre 2 e 3 minutos, com mínimas diferenças entre as amostras (Gráfico 1). Este resultado contrasta com Zeng *et al.* (1997), que observaram início entre 3 e 5 minutos. Singh *et al.* (2011) relacionam o tempo de massa à temperatura mínima necessária para o início do cozimento. Kohyama *et al.* (2004) explicam que o aquecimento em excesso de água faz com que os compactadores de amido absorvam água, incharem e desorganizarem sua estrutura cristalina.

**Gráfico 1** - Efeito das diferentes concentrações de TGase.



Fonte: Autor (2024).

**Tabela 6** - Análise rápida de viscosidade (RVA) dos tratamentos realizados com FCI, FTB e Transglutaminase.

Grupo	Tratamentos (FTB_FCI_TGase)	<i>T.pas.</i> (°C)	<i>V.máx.</i> (cP)	<i>V.mín.</i> (cP)	<i>Q</i> (cP)	<i>V.fin.</i> (cP)	<i>T. ret.</i> (cP)
A	FTB0_FCI100_0PPM	61,75±0,07 <sup>a</sup>	594,5±4,49 <sup>a</sup>	512±28,28 <sup>a</sup>	82,5±23,33 <sup>a</sup>	1.116,5±6,36 <sup>a</sup>	604,5±21,92 <sup>a</sup>
	FTB0_FCI100_85PPM	<b>65,27±0,81<sup>b</sup></b>	1.361,5±13,43 <sup>b</sup>	937,5±27,57 <sup>b</sup>	424±14,14 <sup>b</sup>	1.865,5±17,67 <sup>b</sup>	928±9,89 <sup>b</sup>
	FTB0_FCI100_140PPM	64,20±0,75 <sup>b</sup>	<b>1.754,5±10,60<sup>c</sup></b>	<b>1.167±24,04<sup>c</sup></b>	<b>587,5±13,43<sup>c</sup></b>	<b>2.344,5±23,33<sup>c</sup></b>	<b>1.177,5±0,70<sup>c</sup></b>
B	FTB60_FCI40_0PPM	64,54±0,21 <sup>b</sup>	1.088,5±6,36 <sup>a</sup>	769,5±9,19 <sup>a</sup>	319±2,82 <sup>a</sup>	1656±19,79 <sup>a</sup>	886,5±10,6 <sup>b</sup>
	FTB60_FCI40_85PPM	<b>64,69±0,22<sup>b</sup></b>	1.731±18,38 <sup>b</sup>	1.041,5±65,76 <sup>b</sup>	689,5±84,14 <sup>b</sup>	2.152±55,15 <sup>b</sup>	1.110,5±120,9 <sup>b</sup>
	FTB60_FCI40_140PPM	64,7±0,72 <sup>b</sup>	<b>2.138,5±6,36<sup>c</sup></b>	<b>1.353,5±12,02<sup>c</sup></b>	<b>785±5,65<sup>b</sup></b>	<b>2.582±57,98<sup>c</sup></b>	<b>1.228,5±45,96<sup>b</sup></b>
C	FTB70_FCI30_0PPM	66,04±1,25 <sup>b</sup>	1.211,5±3,53 <sup>a</sup>	837±2,82 <sup>a</sup>	374,5±6,36 <sup>a</sup>	1739±8,48 <sup>a</sup>	902±11,31 <sup>a</sup>
	FTB70_FCI30_85PPM	65,62±0,53 <sup>b</sup>	1.884±8,48 <sup>b</sup>	1.050,5±24,74 <sup>b</sup>	833,5±16,26 <sup>b</sup>	2.142±39,59 <sup>b</sup>	1.091,5±14,84 <sup>b</sup>
	FTB70_FCI30_140PPM	<b>66,21±0,69<sup>b</sup></b>	<b>2.277,5±9,19<sup>c</sup></b>	<b>1.394,5±0,7<sup>c</sup></b>	<b>883±8,48<sup>b</sup></b>	<b>2.653±26,87<sup>c</sup></b>	<b>1.258,5±26,16<sup>c</sup></b>
D	FTB80_FCI20_0PPM	64,72±0,74 <sup>b</sup>	1.262,5±9,19 <sup>a</sup>	846,5±7,77 <sup>a</sup>	416±1,41 <sup>a</sup>	1.762±11,31 <sup>a</sup>	915,5±3,53 <sup>b</sup>
	FTB80_FCI20_85PPM	64,82±0,26 <sup>b</sup>	1.955,5±14,84 <sup>b</sup>	1.068±43,84 <sup>b</sup>	887,5±58,68 <sup>b</sup>	2.266±53,74 <sup>b</sup>	1.198±97,58 <sup>b</sup>
	FTB80_FCI20_140PPM	<b>65,02±1,97<sup>b</sup></b>	<b>2.284,5±2,12<sup>c</sup></b>	<b>1.338±22,62<sup>c</sup></b>	<b>946,5±20,5<sup>b</sup></b>	<b>2.680±19,79<sup>c</sup></b>	<b>1.342±42,42<sup>b</sup></b>
E	FTB90_FCI10_0PPM	65,71±0,50 <sup>b</sup>	1.331±5,65 <sup>a</sup>	864±14,14 <sup>a</sup>	467±19,79 <sup>a</sup>	1.778±26,87 <sup>a</sup>	914±12,72 <sup>a</sup>
	FTB90_FCI10_85PPM	<b>66,05±0,71<sup>b</sup></b>	1.928,5±4,94 <sup>b</sup>	1.093,5±21,92 <sup>b</sup>	835±26,87 <sup>b</sup>	2.227±1,41 <sup>b</sup>	1.133,5±20,5 <sup>b</sup>
	FTB90_FCI10_140PPM	65,25±0,56 <sup>b</sup>	<b>2.376±15,55<sup>c</sup></b>	<b>1354±33,94<sup>c</sup></b>	<b>1.022±49,49<sup>c</sup></b>	<b>2.707,5±28,99<sup>c</sup></b>	<b>1.353,5±62,93<sup>c</sup></b>
F	FTB100_FCI0_0PPM*	65,1±0,31 <sup>b</sup>	1.241±4,24 <sup>a</sup>	820,5±6,36 <sup>a</sup>	420,5±2,12 <sup>a</sup>	1.659,5±14,84 <sup>a</sup>	839±8,48 <sup>a</sup>
	FTB100_FCI0_85PPM	65,11±0,22 <sup>b</sup>	1.761,5±3,53 <sup>b</sup>	1.248,5±10,6 <sup>b</sup>	513±7,07 <sup>b</sup>	2.336±53,74 <sup>b</sup>	1.087,5±43,13 <sup>b</sup>
	FTB100_FCI0_140PPM	<b>65,43±0,5<sup>b</sup></b>	<b>2.553,5±19,09<sup>c</sup></b>	<b>1.510,5±10,6<sup>c</sup></b>	<b>1.043±29,69<sup>c</sup></b>	<b>2.981,5±64,34<sup>c</sup></b>	<b>1.471±53,74<sup>c</sup></b>

Fonte: Autor (2024). Letras diferentes nas colunas, dentro dos grupos (A, B, C, D, E e F) denotam diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ , ANOVA), expressos como média±desvio padrão. Os maiores valores de cada atributo e dentro de cada grupo estão em negrito (escolha do autor). *T.pas.*: temperatura de pasta; *V.máx.*: viscosidade máxima; *V.mín.*: viscosidade mínima à temperatura constante; *Q.*: quebra (viscosidade máxima menos viscosidade mínima à temperatura constante); *V.fin.*: viscosidade final; *T.ret.*: tendência a retrogradação (viscosidade final menos viscosidade mínima à temperatura constante); cP: centipoise. FTB: farinha de trigo branco. FCI: farinha centeio integral. TGase: transglutaminase, \*: Padrão.

Os resultados apresentados na tabela 6, demonstraram que a temperatura de pasta, situou-se entre 61,75°C - 66,21°C, foi semelhante estatisticamente ( $p > 0,05$ ) entre os grupos (A), (B), (C), (D), (E) e (F), compostos pelos mesmos percentuais de FTB\_FCI com ou sem enzima transglutaminase (TGase). Essa variação está alinhada com a literatura, onde estudos indicam que a temperatura de pasta (*T.pas.*) para diferentes farinhas pode variar dependendo de sua origem. Czubaszek *et al.* (2021) relataram *T.pas.* entre 52,5°C e 65,0°C para farinha de centeio, enquanto Gomand *et al.* (2011) relataram *T.pas.* de até 72°C. Para farinha de trigo integral e refinado, Scheuer (2015); Gomand *et al.* (2011) registraram valores entre 50,22°C e 78°C, respectivamente.

Os dados apresentados na Tabela 6 também evidenciam que há um padrão consistente em todos os grupos em relação ao impacto da adição de transglutaminase (TGase) nas propriedades de viscosidade. Esse padrão sugere que a adição de TGase geralmente aumenta a Viscosidade Máxima (*V.max.*), Viscosidade Mínima (*V. min.*) a Viscosidade Final (*V.fin.*) e a Quebra de Viscosidade (*Q*), ao mesmo tempo que pode aumentar a Tendência à Retrogradação (*T.ret.*), com a magnitude desses efeitos sendo diretamente proporcional à concentração de TGase utilizada. Esse padrão pode ser representado da seguinte forma para todos os parâmetros:

- **Viscosidade Máxima (*V.max.*)** do Grupo A, B, C, D, E, F: Tratamento 0 ppm < Tratamento 85 ppm < Tratamento 140 ppm.
- **Viscosidade Mínima (*V.min.*)** do Grupo A, B, C, D, E, F: Tratamento 0 ppm < Tratamento 85 ppm < Tratamento 140 ppm
- **Quebra de Viscosidade (*Q*)** do Grupo A, B, C, D, E, F: Tratamento 0 ppm < Tratamento 85 ppm < Tratamento 140 ppm.
- **Viscosidade Final (*V.fin.*)** do Grupo A, B, C, D, E, F: Tratamento 0 ppm < Tratamento 85 ppm < Tratamento 140 ppm.
- **Tendência à Retrogradação (*T.ret.*)** do Grupo A, B, C, D, E, F: Tratamento 0 ppm < Tratamento 85 ppm < Tratamento 140 ppm.

Em síntese, a TGase em concentrações de 85 ppm e 140 ppm tem um efeito pronunciado, evidente nos grupos (A), (B), (C), (D), (E) e (F). Apesar das mesmas concentrações de FTB e FCI nos grupos, a maior presença da enzima permitiu uma variação significativa entre os tratamentos, conforme ilustrado no Gráfico 1. Esses resultados sugerem que a TGase promove a uma estruturação proteica que favorece a formação de uma

estrutura de pasta mais robusta e coesa. Isso demonstra a importância da enzima na modificação das propriedades reológicas das pastas de amido, contribuindo para a obtenção de produtos com características específicas desejáveis na indústria de alimentos.

A Viscosidade Máxima (*V.max.*) variou significativamente entre os tratamentos, com o valor mais baixo registrado em 594,5 cP no tratamento FTB0\_FCI100\_0PPM e o mais alto em 2.553,5 cP no tratamento FTB100\_FCI0\_140PPM. A literatura confirma que a Viscosidade Máxima (*V.max.*) é influenciada pelo grau de intumescimento e pelas características de amilopectina do amido. Atwell (2001); Tester; Morrison (1990) destacam que o aumento na Viscosidade Máxima (*V.max.*) pode ser atribuído à maior intumescência do amido e à formação de ligações intermoleculares entre as proteínas. Scheuer (2015); Gomand *et al.* (2011) também relataram uma ampla gama de Viscosidades Máximas (*V.max.*) para diferentes tipos de farinha, corroborando que a TGase e a proporção de FTB afetam significativamente esses valores.

A Viscosidade Mínima (*V.min.*), que indica a estabilidade da viscosidade durante o aquecimento, mostrou um aumento com a adição de TGase. Ragaee; Abdel-Aal (2006) observam que uma maior Viscosidade Mínima (*V.min.*) está associada ao teor de amido e à presença de TGase, que estabiliza a pasta ao formar ligações cruzadas. Isso está em linha com a observação de que os tratamentos com TGase apresentaram Viscosidade Mínima (*V.min.*) mais alta, refletindo uma maior estabilidade das amostras durante o aquecimento.

A Quebra de Viscosidade (*Q*), que mede a desintegração dos grânulos de amido, variou amplamente entre os tratamentos. A menor quebra foi observada no tratamento FTB0\_FCI100\_0PPM (82,5 cP), enquanto a maior foi em FTB100\_FCI0\_140PPM (1.043 cP). Ragaee; Abdel-Aal (2006) indicam que tratamentos com maiores picos de viscosidade geralmente estão associados a uma maior quebra de viscosidade. A maior quebra observada em tratamentos com mais TGase e FTB pode ser atribuída à maior desintegração dos grânulos de amido e maior lixiviação de amilose.

Os tratamentos com TGase mostraram uma tendência clara de aumento da Viscosidade Final (*V.fin.*). O tratamento FTB100\_FCI0\_140PPM, com a maior concentração de TGase (140 ppm), apresentou uma das Viscosidades Finais (*V.fin.*) mais altas (2.981,5 cP). Scheuer (2015) discute que concentrações mais altas de farinha integral e aditivos enzimáticos podem resultar em maiores Viscosidades Finais (*V.fin.*) devido a uma estrutura de pasta mais estável. A adição de TGase contribui para uma estrutura de pasta

mais coesa e menos propensa à retrogradação, o que é refletido nos valores mais altos de Viscosidade Final (*V.fin.*) observados.

A Tendência à Retrogradação (*T.ret.*), medida pela diferença entre a Viscosidade Final (*V.fin.*) e a Viscosidade Mínima (*V.min.*), mostrou variações significativas entre os tratamentos. Os maiores valores de retrogradação foram observados em tratamentos com maior concentração de TGase, indicando uma maior tendência à recristalização do amido após o resfriamento. Scheuer (2015) sugere que valores mais baixos de Viscosidade Final (*V.fin.*) e menor retrogradação estão associados a menores concentrações de amido e aditivos enzimáticos. A concentração de TGase pode, portanto, influenciar a retrogradação do amido, aumentando a formação de ligações cruzadas.

### 5. 2. 2 Resistência da massa a extensão

A tabela 7, apresenta a análise de textura das massas nas amostras FTB e FCI, em concentrações de 85 ppm e 140 ppm e sem a TGase. Foram analisados três parâmetros: Resistência à Extensão (*Re*), Extensibilidade (*E*) e Área (*A*), que são indicativos das propriedades reológicas da massa.

Nos grupos A - C, a Resistência à Extensão (*Re*) apresentou um padrão consistente, com o tratamento de 85 ppm de TGase resultando na maior resistência e redução nos tratamentos com 140 ppm de TGase. Esses resultados são compatíveis com a pesquisa de Dobraszczuk; Morgenstern (2003), que indica que a força do glúten representada pelo trabalho de deformação da massa, é crucial para a panificação devido a sua função reológica. A adição de TGase, especialmente a 85 ppm, favoreceu a formação de ligações cruzadas entre proteínas, fortalecendo a estrutura da massa, conforme observado por Kieliszek; Misiewicz (2014). No entanto, a concentração de 140 ppm pode ter levado à saturação enzimática, reduzindo sua eficácia. Os valores de *Re* observados foram os seguintes, grupo A (FTB0\_FCI100): 85PPM (34,42 g) > 0PPM (28,19 g) > 140PPM (24,29 g) ( $p > 0,05$ ); grupo B (FTB60\_FCI40): 85PPM (67,39 g) > 0PPM (47,82 g) > 140PPM (45 g) ( $p > 0,05$ ). Já no grupo E (FTB70\_FCI30): 85PPM (141,67 g) > 140PPM (77,17 g) > 0PPM (67,28 g) ( $p < 0,05$ ).

A mesma perspectiva pode ser observada nos dados de Extensibilidade (*E*), que também sugere um padrão semelhante, com o tratamento de 85 ppm de TGase melhorando a Elasticidade da massa, não demonstra efeito estatístico significativo entre os tratamentos com 0 ppm e 140 ppm. Isso é observado nos grupos A (FTB0\_FCI100): 140PPM (14,7 mm)



> 0PPM (12,27mm) ( $p>0,05$ ); grupo B (FTB60\_FCI40): 140PPM (23,34 mm) > 0PPM (19,16 mm) ( $p>0,05$ ); grupo C (FTB70\_FCI30): 140PPM (24,37 mm) > 0PPM (22,81 mm) ( $p>0,05$ ); grupo D (FTB80\_FCI20): 0PPM (26,03 mm) > 140PPM (25,84 mm) ( $p>0,05$ ); grupo E (FTB90\_FCI10): 0PPM (29,07 mm) > 140PPM (26,69 mm) ( $p>0,05$ ). De acordo com Fernandes *et al.* (2008), que associam a Extensibilidade (*E*) ao volume da massa, e com Fois *et al.* (2011), que afirmam que a extensibilidade é dependente do conteúdo de proteínas. Assim, é evidente que a adição de TGase a 85 ppm otimizou a elasticidade sem comprometer a estrutura, (Zhu *et al.*,1995; Gerrard *et al.*,1998) com melhor qualidade que 140 ppm.

**Tabela 7-** Análise de textura das massas de farinha de trigo branca e farinha de centeio integral.

Grupo	Tratamentos (FTB_FCI_TGase)	<i>Re</i> (g)	<i>E</i> (mm)	<i>A</i> (g.mm)
A	<b>FTB0_FCI100_0PPM</b>	28,19±14,13 <sup>a</sup>	12,27±1,86 <sup>b</sup>	484,01±50,49 <sup>b</sup>
	<b>FTB0_FCI100_85PPM</b>	<b>34,42±1,91<sup>b</sup></b>	<b>20,27±2,59<sup>a</sup></b>	<b>629,55±108,36<sup>a</sup></b>
	<b>FTB0_FCI100_140PPM</b>	24,29±0,94 <sup>c</sup>	14,7±2,85 <sup>b</sup>	451,88±71,83 <sup>b</sup>
B	<b>FTB60_FCI40_0PPM</b>	47,82±1,15 <sup>a</sup>	19,16±4,65 <sup>b</sup>	943,52±143,01 <sup>b</sup>
	<b>FTB60_FCI40_85PPM</b>	<b>67,39±5,10<sup>b</sup></b>	<b>26,49±2,26<sup>a</sup></b>	<b>1.483,99±199,34<sup>a</sup></b>
	<b>FTB60_FCI40_140PPM</b>	45±2,87 <sup>c</sup>	23,34±2,14 <sup>b</sup>	1.015,6±88,09 <sup>b</sup>
C	<b>FTB70_FCI30_0PPM</b>	48,27±3,21 <sup>a</sup>	22,81±5,51 <sup>b</sup>	789,81±161,32 <sup>a</sup>
	<b>FTB70_FCI30_85PPM</b>	<b>86,81±4,89<sup>b</sup></b>	<b>26,1±2,53<sup>a</sup></b>	<b>1.643,28±317,56<sup>b</sup></b>
	<b>FTB70_FCI30_140PPM</b>	60,23±3,64 <sup>c</sup>	24,37±2,28 <sup>b</sup>	1.093,47±141,45 <sup>c</sup>
D	<b>FTB80_FCI20_0PPM</b>	59,42±7,24 <sup>b</sup>	<b>26,03±5,52<sup>b</sup></b>	1.007,71±161,40 <sup>b</sup>
	<b>FTB80_FCI20_85PPM</b>	<b>130,9±12,39<sup>a</sup></b>	24,7±3,55 <sup>a</sup>	<b>2.069,15±224,33<sup>a</sup></b>
	<b>FTB80_FCI20_140PPM</b>	61,24±6,55 <sup>b</sup>	25,84±3,35 <sup>b</sup>	1.152,17±174,36 <sup>b</sup>
E	<b>FTB90_FCI10_0PPM</b>	77,17±6,78 <sup>a</sup>	<b>29,07±3,81<sup>b</sup></b>	1.561,81±222,87 <sup>b</sup>
	<b>FTB90_FCI10_85PPM</b>	<b>141,67±21,26<sup>b</sup></b>	20,85±2,81 <sup>a</sup>	<b>2.293,32±352,78<sup>a</sup></b>
	<b>FTB90_FCI10_140PPM</b>	67,28±6,17 <sup>c</sup>	26,69±4,31 <sup>b</sup>	1.426,29±174,78 <sup>b</sup>
F	<b>FTB100_FCI0_0PPM*</b>	86,5e±10,96 <sup>a</sup>	19,03±182 <sup>b</sup>	1.657,74±24,84 <sup>b</sup>
	<b>FTB100_FCI0_85PPM</b>	<b>153,9±12,09<sup>b</sup></b>	21,01±3,85 <sup>b</sup>	<b>2.571,13±495,83<sup>a</sup></b>
	<b>FTB100_FCI0_140PPM</b>	111,5±9,89 <sup>c</sup>	<b>26,29±1,97<sup>a</sup></b>	2.122,35±615,08 <sup>b</sup>

Fonte: Autor (2024). Letras diferentes nas colunas, dentro dos grupos (a, b, c, d, e, f) denotam diferença estatística significativa ( $p<0,05$ , ANOVA), expressos como média±desvio padrão. Os maiores valores de cada atributo e dentro de cada grupo estão em negrito (escolha do autor). *Re*: Resistência à extensão; *E*: elasticidade; *A*: área; FTB: farinha de trigo branco. FCI: farinha centeio integral. TGase: transglutaminase, \*: Padrão.

Da mesma forma, a Área ( $A$ ), onde os valores são os seguintes: Grupos A (FTB0\_FCI100): 0PPM (484,01 g.mm) > 140PPM (451,88 g.mm) ( $p > 0,05$ ); grupo B (FTB60\_FCI40): 140PPM (1.015,6 g.mm) > 0PPM (943,52 g.mm) ( $p > 0,05$ ); grupo D (FTB80\_FCI20): 140PPM (1.152,17 g.mm) > 0PPM (1.007,71 g.mm) ( $p > 0,05$ ); grupo E (FTB90\_FCI10): 0PPM (1.561,81 g.mm) > 140PPM (1.426,29 g.mm) ( $p > 0,05$ ); grupo F (FTB100\_FCI0): 140PPM (2.122,35 g.mm) > 0PPM (1.657,74 g.mm) ( $p > 0,05$ ). Assim, a Área ( $A$ ) que reflete a energia necessária para esticar a massa até a ruptura, também demonstrou que o tratamento com 85 ppm de TGase proporcionando o melhor desempenho. Este resultado está alinhado com Montenegro; Ormenese (2008), que afirmam que uma ( $A$ ) maior sugere uma melhor mistura da massa e desempenho reológico. A TGase em 85 ppm demonstrou um aumento eficaz da Área ( $A$ ), e se traduz em uma melhor coesão e elasticidade da massa como descrito por Kuraishi; Yamazaki; Susana (2001).

Pelo que se observa, as diferenças nas propriedades reológicas entre os tratamentos com transglutaminase (TGase) estão de acordo com a literatura, que aponta que concentrações moderadas dessa enzima são mais eficazes na melhoria das características da massa (Kuraishi *et al.*, 2001). Além disso, a TGase pode otimizar a elasticidade da massa sem comprometer sua estrutura (Zhu *et al.*, 1995; Gerrard *et al.*, 1998). Um aspecto relevante é o impacto significativo da TGase na área ( $A$ ), sugerindo melhorias na estrutura da massa (Kieliszek; Misiewicz, 2014). Entretanto, concentrações mais elevadas de TGase, como 140 ppm, não mostraram os mesmos benefícios, possivelmente devido a efeitos de saturação enzimática, conforme também observado por Kieliszek e Misiewicz (2014).

De acordo com Dobraszcyk e Morgenstern (2003) a força do glúten, representada pelo trabalho de deformação da massa, é crucial para a panificação, pois determina a resistência ao esforço mecânico necessário para expandir as bolhas de gás até a ruptura. Costa (2003) complementa, destacando que a Resistência à Extensão ( $Re$ ) está diretamente relacionada à força das ligações entre as moléculas de proteína.

Nesse sentido, a TGase tem um efeito mais notável em concentrações intermediárias, especialmente quando se trata da estrutura proteica presente na mistura de farinha de trigo branca (FTB) como evidenciado pelos parâmetros  $Re$  e  $A$ . A Extensibilidade, que Fernandes *et al.* (2008) associam ao volume da massa, também foi influenciada pelas proporções de FTB, além da adição de TGase. Como a extensibilidade depende do conteúdo de proteínas, a presença da TGase pode otimizar a elasticidade da massa na presença de FTB, sem comprometer sua integridade estrutural (Zhu *et al.*, 1995; Gerrard *et al.*, 1998).

Por isso, é válido afirmar que o fortalecimento da massa de centeio no tratamento com 85 ppm, foi eficiente, e tem relação considerável com reações de reticulação adequada das proteínas do centeio utilizando transglutaminase (TGase), através da catálise da reação de transferência de acila entre o grupo  $\gamma$ -carboxamida de resíduos de glutamina ligados a peptídeos (doador de acila) e uma variedade de resíduos primários (*acceptores de acila*) (Jaros *et al.*, 2006), até a formação de uma ligação isopeptídica com o grupo amina livre (por exemplo, resíduos de lisina ligados a proteínas ou peptídeos), formando uma rede de polimérica mais estruturados de alto peso molecular (De Jong; Koppelman, 2002), semelhante ao que é encontrado no trigo propriamente dito.

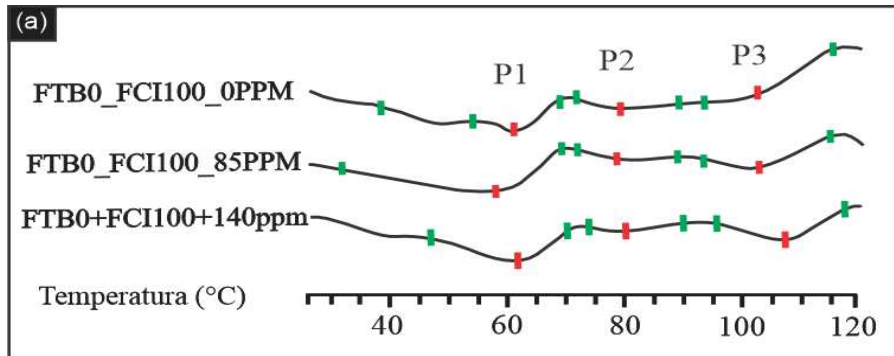
Vale salientar que a presença de fibras insolúveis na FCI, como mencionado por Borges *et al.* (2011), interfere na formação do glúten, resultando em menor Extensibilidade (*E*) e Resistência à Extensão (*Re*). Dominguez *et al.* (2003) também apontam que o aumento do conteúdo de fibras pode afetar negativamente o volume e a textura do pão, o que é corroborado pelos resultados observados na menor Extensibilidade (*E*) e Resistência à Extensão (*Re*) das misturas com alta proporção de FCI, haja vista que o desempenho da farinha de centeio (*Secale cereale L.*) na panificação baseia-se principalmente nas propriedades de intumescimento dos pentosanos endógenos (Delcour *et al.*, 1991; Vinkx; Delcour, 1996), tornando a massa mais viscosa e menos elástica. Cabe salientar que os valores dos atributos de Resistência à Extensão, Extensibilidade e Energia sempre foram superiores quanto maior a proporção de farinha de trigo branca nas misturas, e que adição da TGase foi positiva, aumentando os valores numéricos dos atributos.

### **5. 2. 3 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)**

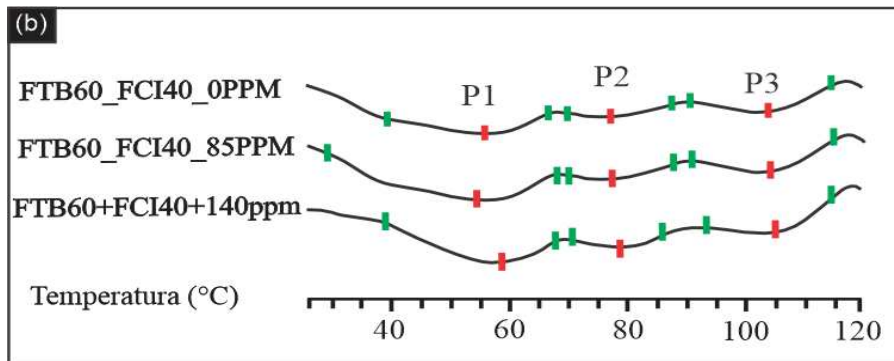
O estado e comportamento do amido, já foi amplamente estudado, Liu; Lelièvre (1992), certificam que as posições dos picos endotérmicos nos traços de DSC são governadas pela fusão de grânulos de diferentes estabilidades em diferentes frações volumétricas de diluente. Com o propósito de investigar o comportamento da enzima transglutaminase no comportamento térmico da massa de pão, o DSC foi utilizado para determinar as temperaturas de entalpia das transições térmicas do amido na presença de 57% de água e 1% de sal (p/p total), três concentrações de enzima (sem enzima, 85 ppm e 140 ppm) e 6 mesclas de misturas de farinha de trigo branca e farinha de centeio integral. Nesse sentido, três picos endotérmicos foram identificados denotadas como P1 (pico 1),

P2 (pico 2) e P3 (pico 3), foram observados em posições diferentes quando investigadas na faixa de 20 - 120°C, figura 8: (a), (b), (c), (d), (e) e (f), a seguir:

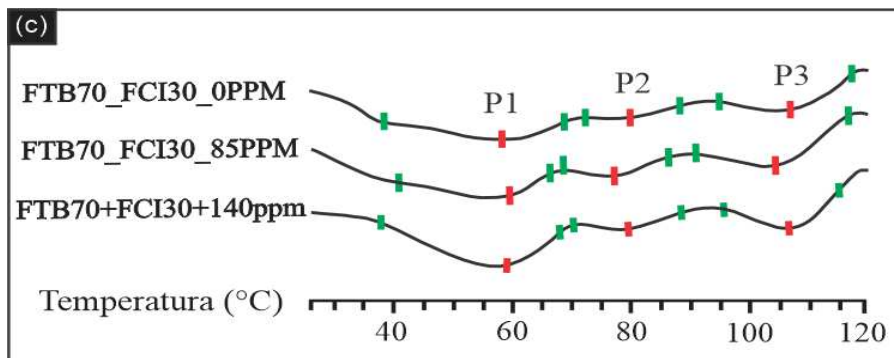
**Figura 8: (a) (b) (c) (d) (e) (f) - Traços calorimétricos das massas de pão com 57% água.**



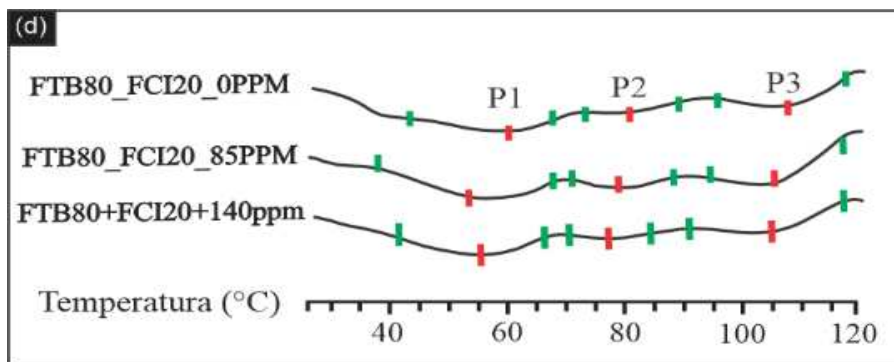
a) Amostras com 0% de farinha de trigo branco e 100% de farinha de centeio integral.



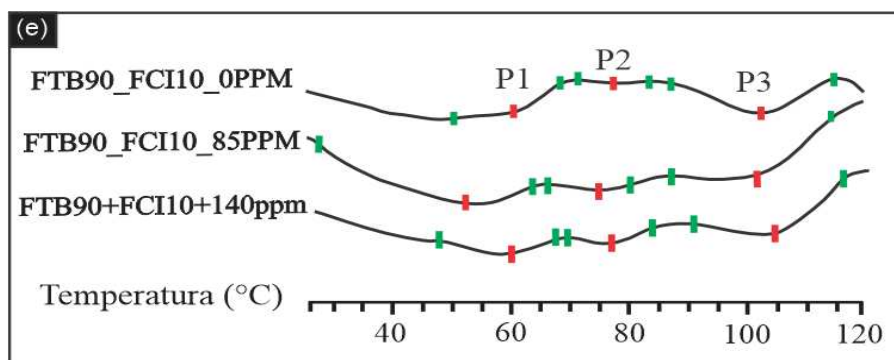
b) Amostras com 60% de farinha de trigo branco e 40% de farinha de centeio integral.



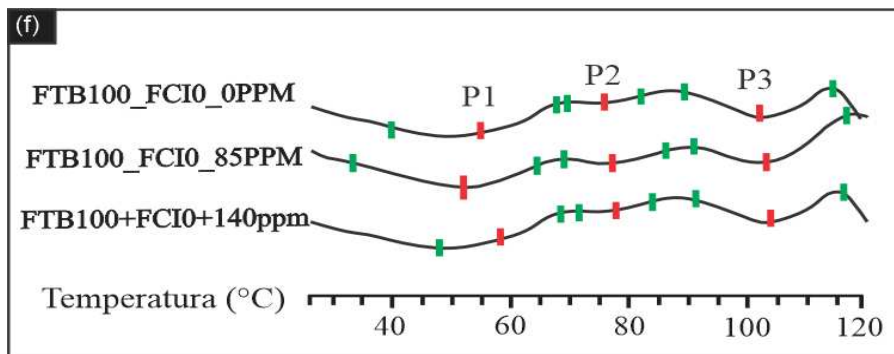
c) Amostras com 70% de farinha de trigo branco e 30% de farinha de centeio integral.



d) Amostras com 80% de farinha de trigo branco e 20% de farinha de centeio integral.



e) Amostras com 90% de farinha de trigo branco e 10% de farinha de centeio integral.



f) Amostras com 100% de farinha de trigo branco e 0% de farinha de centeio integral.

Fonte: Autor (2024).

Liu; Lelièvre (1992) investigaram as transições de fusão DSC em amidos de trigo e arroz, e foi relatado que amido controle suspenso a 30% de solvente, ocorreu um único pico, enquanto que o amido de trigo foi registrado a 10°C mais baixa do que para o amido de arroz. Estudos mais recentes de Bondt *et.al.* (2020), avaliaram as proporções de água de 45%-75%, e concentrações de farelo de trigo (0-30%) com um perfil de aquecimento representativo para o cozimento de pão (0-130°C a 4 °C/min), e foi registrado a formação de dois picos endotérmicos em concentrações entre 45-60% de água.

Esse efeito é descrito por Liu; Lelièvre (1992), segundo o qual, se o conteúdo de água da suspensão for elevado, ao escoar, cada grânulo absorve água sem restrição e um único pico endotérmico é formada, Donovan, (1979) por sua vez descreve que essa característica é aparente a cerca de 65% do peso. Em ambientes mais restritos ocorre competição entre os grânulos pela água levando aos grânulos menos estáveis a escoar primeiro, absorvendo a água livre e esgotando as partículas de amido mais estáveis de diluente. As partículas mais estáveis fundem a uma temperatura mais alta em parte porque são mais estáveis e em parte porque a fração volumétrica efetiva de diluente é reduzida. Segundo o mesmo autor, o pico endotérmico ocorre na forma de uma onda de arrasto no primeiro pico (Liu; Lelièvre 1992), o qual, segundo Biliaderis, (2009) é frequentemente conhecida como endotérmica de gelatinização. E ambos os picos (1) e (2) são associados ao complexo de gelatinização do amido.

As temperaturas de P2 estão situadas entre, 77,04 - 84,44°C (dados não apresentados) embora existam desvios dos valores médios. Segundo Burt; Russell, (1983); Donovan, (1979) o segundo pico endotérmico (P2) está associada à fusão dos cristalitos de amido restantes e começa a aparecer como uma onda ao primeiro pico, movendo-se em direção a temperaturas mais altas. Em estudos realizados por Fukuoka *et al.*, (2002), foram identificados a mesma característica de traços em formato sigmoide começando em 50 °C e terminando em cerca de 90°C. O mesmo autor ao recalculas as temperaturas de gelatinização, usando dados publicados por Da Silva *et al.*, (1996), identificou uma inclinação suave na faixa de 80 a 130 °C. semelhantes ao apresentado em traços de DSC da figura 7: (a), (b), (c), (d), (e) e (f), que apresenta as transições de fase entre 50-70°C do presente estudo, indicando que o registrado está de acordo com a literatura.

Esta transição é causada principalmente pela perda da ordem helicoidal molecular do amido quando o amido é aquecido na presença de água (Cooke; Gidley, 1992). Assim, no processo de gelatinização real, o amido é transformado no estado de gel amorfo por uma dissociação hélice-hélice seguida por uma transição hélice-espiral que em excesso de água, a dissociação hélice-hélice e a transição hélice-bobina acontecem quase simultaneamente, produzindo apenas uma endotérmica em DSC, enquanto que em condições intermediárias de água, as duas transições podem ser observadas separadamente como duas endotérmicas em DSC (Waigh *et al.*, 2000).

Os resultados de P3, registrados entre 102,05-107,79°C, (dados não mostrados), semelhantes aos encontrados por Zaidul *et al.*, (2008), cujas transições endotérmicas do

complexo amilose-lipídio ocorreram dentro de 100 a 105°C a 10% a 50% das misturas testados no seu estudo.

Liu; Lelièvre, (1992), destaca que a temperatura do primeiro pico endotérmico surge unicamente da transição de fusão dos grânulos de amido, logo nosso principal alvo de interesse. Nesse sentido, a temperatura do pico de gelatinização registrado P1 (tabela 8), é a manifestação atribuída ao comportamento amiláceo em porcentagens intermediárias de água (57%).

O primeiro pico endotérmico (P1) é crucial porque representa o ponto em que ocorrem mudanças significativas na estrutura do amido devido ao aumento da temperatura. A compreensão detalhada das características térmicas associadas ao pico P1 fornece insights valiosos sobre a eficácia da gelatinização e a formação da estrutura da massa, o que impacta diretamente a qualidade do pão.

A tabela 8, apresenta uma descrição detalhada dos traços observados no calorímetro diferencial de variação (DSC) durante o primeiro pico endotérmico (P1). A análise dos traços do DSC é fundamental para correlacionar as mudanças térmicas observadas com as propriedades práticas da massa de panificação, oferecendo uma visão mais abrangente sobre o impacto do primeiro pico endotérmico na qualidade do produto final.

**Tabela 8** – Registros térmicos análise de DSC pico 1

Grupo	Tratamentos (FTB_FCI_TGase)	Início (°C)	Pico (°C)	Final (°C)	$\Delta H$ W/g
A	FTB0_FCI100_0PPM	55,74±0,89 <sup>a</sup>	62,05±0,24 <sup>b</sup>	69,02±1,15 <sup>a</sup>	-0,0017±0,0 <sup>a</sup>
	FTB0_FCI100_85PPM	<b>32,30±0,14<sup>b</sup></b>	<b>56,01±1,65<sup>a</sup></b>	<b>68,72±0,96<sup>a</sup></b>	<b>-0,0027±0,0<sup>b</sup></b>
	FTB0_FCI100_140PPM	48,16±0,34 <sup>c</sup>	62,01±1,20 <sup>b</sup>	69,98±1,08 <sup>a</sup>	-0,0014±0,0 <sup>c</sup>
B	FTB60_FCI40_0PPM	40,34±0,25 <sup>b</sup>	57,33±0,71 <sup>b</sup>	<b>66,50±0,33<sup>a</sup></b>	-0,0014±0,0 <sup>a</sup>
	FTB60_FCI40_85PPM	<b>28,89±0,33<sup>a</sup></b>	<b>54,97±0,0<sup>a</sup></b>	68,66±0,49 <sup>b</sup>	<b>-0,0025±0,0<sup>b</sup></b>
	FTB60_FCI40_140PPM	39,92±0,25 <sup>b</sup>	58,17±0,0 <sup>b</sup>	68,64±0,01 <sup>b</sup>	-0,0021±0,0 <sup>b</sup>
C	FTB70_FCI30_0PPM	39,44±0,33 <sup>b</sup>	59,33±0,71 <sup>a</sup>	69,37±0,61 <sup>a</sup>	-0,0014±0,0 <sup>b</sup>
	FTB70_FCI30_85PPM	40,59±0,01 <sup>a</sup>	58,35±0,0 <sup>b</sup>	69,60±0,52 <sup>a</sup>	-0,0016±0,0 <sup>b</sup>
	FTB70_FCI30_140PPM	<b>38,26±0,28<sup>b</sup></b>	<b>58,17±0,0<sup>b</sup></b>	<b>68,45±2,19<sup>a</sup></b>	<b>-0,0017±0,0<sup>b</sup></b>
D	FTB80_FCI20_0PPM	47,37±0,33 <sup>a</sup>	59,33±0,71 <sup>a</sup>	67,61±0,27 <sup>a</sup>	-0,0010±0,0 <sup>a</sup>
	FTB80_FCI20_85PPM	<b>37,66±0,69<sup>b</sup></b>	56,66±0,0 <sup>b</sup>	68,31±0,15 <sup>a</sup>	<b>-0,0018±0,0<sup>b</sup></b>
	FTB80_FCI20_140PPM	40,07±0,09 <sup>c</sup>	<b>55,34±1,17<sup>b</sup></b>	<b>66,61±0,80<sup>a</sup></b>	-0,0018±0,0 <sup>b</sup>
E	FTB90_FCI10_0PPM	54,50±0,52 <sup>a</sup>	61,88±0,0 <sup>b</sup>	68,17±0,07 <sup>a</sup>	-0,0008±0,0 <sup>a</sup>
	FTB90_FCI10_85PPM	<b>27,87±0,59<sup>b</sup></b>	<b>51,67±0,24<sup>a</sup></b>	<b>66,43±0,78<sup>a</sup></b>	<b>-0,0028±0,0<sup>b</sup></b>
	FTB90_FCI10_140PPM	49,75±0,26 <sup>c</sup>	58,50±0,0 <sup>b</sup>	67,59±0,56 <sup>a</sup>	-0,0016±0,0 <sup>c</sup>
F	FTB100_FCI0_0PPM*	42,53±0,48 <sup>a</sup>	<b>53,43±0,0<sup>b</sup></b>	66,13±0,14 <sup>a</sup>	-0,0011±0,0 <sup>b</sup>
	FTB100_FCI0_85PPM	<b>39,16±0,93<sup>b</sup></b>	54,00±0,71 <sup>b</sup>	65,48±0,71 <sup>a</sup>	<b>-0,0016±0,0<sup>a</sup></b>
	FTB100_FCI0_140PPM	47,55±0,88 <sup>c</sup>	57,50±0,0 <sup>a</sup>	<b>65,19±0,11<sup>a</sup></b>	-0,001±0,0 <sup>b</sup>

Fonte: Autor (2024). Letras diferentes nas colunas, dentro dos grupos (A, B, C, D, E, F) denotam diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ , ANOVA), expressos como média±desvio padrão. Início – temperatura de início da gelatinização; Pico – pico de gelatinização; Final – temperatura final de gelatinização;  $\Delta H$  (W/g) – entalpia do processo de gelatinização. \*: Padrão.

Nos grupos A - F, a influência da enzima sobre a gelatinização do amido é evidente e varia de acordo com a concentração da enzima e a proporção das farinhas. No tratamento FTB0\_FCI100\_0PPM, que utilizou 100% de FCI sem enzima, as temperaturas de início, pico e final da gelatinização foram 55,74°C, 62,05°C e 69,02°C, com uma entalpia de -0,0017 W/g.

Esses valores indicam alta resistência térmica e baixa energia de transição. A adição de 85 ppm de enzima no tratamento FTB0\_FCI100\_85PPM reduziu as temperaturas de início



e pico para 32,30°C e 56,01°C, enquanto a temperatura final foi 68,72°C. A entalpia aumentou para -0,0027 W/g, sugerindo que a enzima acelera a gelatinização ao reduzir a resistência térmica, mas o aumento da entalpia indica a presença de uma interação intermolecular entre seus componentes, devido que uma maior energia é requerida para quebrar/remover/libertar cadeias poliméricas de sua estrutura rígida para o estado fundido ou gelatinizado.

No tratamento FTB0\_FCI100\_140PPM, com 140 ppm de enzima, as temperaturas de início e pico foram 48,16°C e 62,01°C, e a temperatura final foi 69,98°C, com uma entalpia de -0,0014 W/g. Esses resultados mostram que uma maior concentração de enzima ainda facilita a gelatinização, mas com um efeito menos pronunciado do que com 85 ppm.

No grupo B, a adição de enzima também trouxe efeitos distintos. No tratamento FTB60\_FCI40\_0PPM, com 60% FTB e 40% FCI sem enzima, as temperaturas de início, pico e final da gelatinização foram 40,34°C, 57,33°C e 66,50°C, com uma entalpia de -0,0014 W/g, indicando resistência térmica moderada e baixa energia de transição. A adição de 85 ppm de enzima no tratamento FTB60\_FCI40\_85PPM reduziu as temperaturas de início e pico para 28,89°C e 54,97°C, enquanto a temperatura final foi 68,66°C. A entalpia aumentou para -0,0025 W/g, indicando que a enzima acelera a gelatinização e aumenta a resistência térmica. No tratamento FTB60\_FCI40\_140PPM, com 140 ppm de enzima, as temperaturas de início e pico foram 39,92°C e 58,17°C, e a temperatura final foi 68,64°C, com uma entalpia de -0,0021 W/g. Aqui, a maior concentração de enzima facilitou a gelatinização, mas com um efeito semelhante ao observado com 85 ppm.

Nos grupos C, a adição de enzima resultou em efeitos mais moderados. No tratamento FTB70\_FCI30\_0PPM, com 70% FTB e 30% FCI sem enzima, as temperaturas de início, pico e final da gelatinização foram 39,44°C, 59,33°C e 69,37°C, com uma entalpia de -0,0014 W/g. A adição de 85 ppm de enzima no tratamento FTB70\_FCI30\_85PPM reduziu as temperaturas de início e pico para 40,59°C e 58,35°C, enquanto a temperatura final foi 69,60°C. A entalpia aumentou para -0,0016 W/g, indicando que a enzima aumenta a resistência térmica das estruturas formadas, mas com um efeito menos pronunciado do que em outros grupos. No tratamento FTB70\_FCI30\_140PPM, com 140 ppm de enzima, as temperaturas de início e pico foram 38,26°C e 58,17°C, e a temperatura final foi 68,45°C. A entalpia foi -0,0017 W/g, mostrando que a maior concentração de enzima ainda acelera a gelatinização, mas de forma similar ao observado com 85 ppm.

Nos grupos D, a adição de enzima seguiu um padrão claro. No tratamento FTB80\_FCI20\_0PPM, com 80% FTB e 20% FCI sem enzima, as temperaturas de início, pico e final foram 47,37°C, 59,33°C e 67,61°C, com uma entalpia de -0,0010 W/g. A adição de 85 ppm de enzima no tratamento FTB80\_FCI20\_85PPM reduziu as temperaturas de início e pico para 37,66°C e 56,66°C, enquanto a temperatura final foi 68,31°C. A entalpia aumentou para -0,0018 W/g, sugerindo que a enzima aumenta resistência térmica e acelera a gelatinização. No tratamento FTB80\_FCI20\_140PPM, com 140 ppm de enzima, as temperaturas de início e pico foram 40,07°C e 55,34°C, com a temperatura final em 66,61°C. A entalpia foi -0,0018 W/g, indicando que a concentração mais alta de enzima facilita a gelatinização por uma temperatura de pico menor, mas aumenta a resistência térmica, com um valor mais alto de entalpia, com um efeito similar ao observado com 85 ppm.

Nos grupos E, a adição de enzima teve um impacto significativo. No tratamento FTB90\_FCI10\_0PPM, com 90% FTB e 10% FCI sem enzima, as temperaturas de início, pico e final foram 54,50°C, 61,88°C e 68,17°C, com uma entalpia de -0,0008 W/g. A adição de 85 ppm de enzima no tratamento FTB90\_FCI10\_85PPM reduziu as temperaturas de início e pico para 27,87°C e 51,67°C, enquanto a temperatura final foi 66,43°C. A entalpia aumentou para -0,0028 W/g, indicando que a enzima aumenta a resistência térmica e acelera a gelatinização. No tratamento FTB90\_FCI10\_140PPM, com 140 ppm de enzima, as temperaturas de início e pico foram 49,75°C e 58,50°C, com a temperatura final em 67,59°C. A entalpia foi -0,0016 W/g, mostrando que a maior concentração de enzima ainda facilita a gelatinização, mas com um efeito menos pronunciado comparado ao tratamento FTB90\_FCI10\_85PPM.

Nos grupos F, os efeitos da enzima sobre a gelatinização do amido variaram. No tratamento FTB100\_FCI0\_0PPM, com 100% FTB e sem enzima, as temperaturas de início, pico e final foram 42,53°C, 53,43°C e 66,13°C, com uma entalpia de -0,0011 W/g. A adição de 85 ppm de enzima no tratamento FTB100\_FCI0\_85PPM reduziu as temperaturas de início e pico para 39,16°C e 54,00°C, enquanto a temperatura final foi 65,48°C. A entalpia aumentou para -0,0016 W/g, indicando que a enzima aumenta a resistência térmica e acelera a gelatinização. No tratamento FTB100\_FCI0\_140PPM, com 140 ppm de enzima, as temperaturas de início e pico foram 47,55°C e 57,50°C, com a temperatura final em 65,19°C. A entalpia foi -0,0010 W/g, mostrando que a concentração mais alta de enzima ainda facilita a gelatinização, mas com um efeito semelhante ao observado com 85 ppm.

A ação da transglutaminase (TGase) nas propriedades funcionais das proteínas, como descrito por Kieliszek; Misiewicz (2014), contribui para as mudanças ocorridas no processo de endotérmico. Além disso, a interação entre água e componentes do farelo de trigo, conforme evidenciado por Motoki; Seguro (1998); Perry; Donald (2002); De Bondt *et al.* (2020), Day; Fayet; Homera (2013), desempenha um papel significativo na modulação da gelatinização do amido, afetando tanto as temperaturas quanto a entalpia do processo.

Os resultados indicam que a adição de enzima interfere na gelatinização do amido, de forma direta e/ou indireta ao reduzir a resistência térmica e aumentar a energia necessária para a transição, em virtude da nova estrutura reticulada da proteína. A entalpia de fusão aumenta na presença de interação intermolecular entre os componentes da mistura (De Bondt *et al.*, 2020). Isso ocorre porque é necessária mais energia para quebrar essas ligações e liberar as cadeias poliméricas de suas estruturas rígidas ou cristalinas para alcançar o estado de fusão.

#### **5. 2. 4 Reologia de Oscilação - Varredura de Frequência**

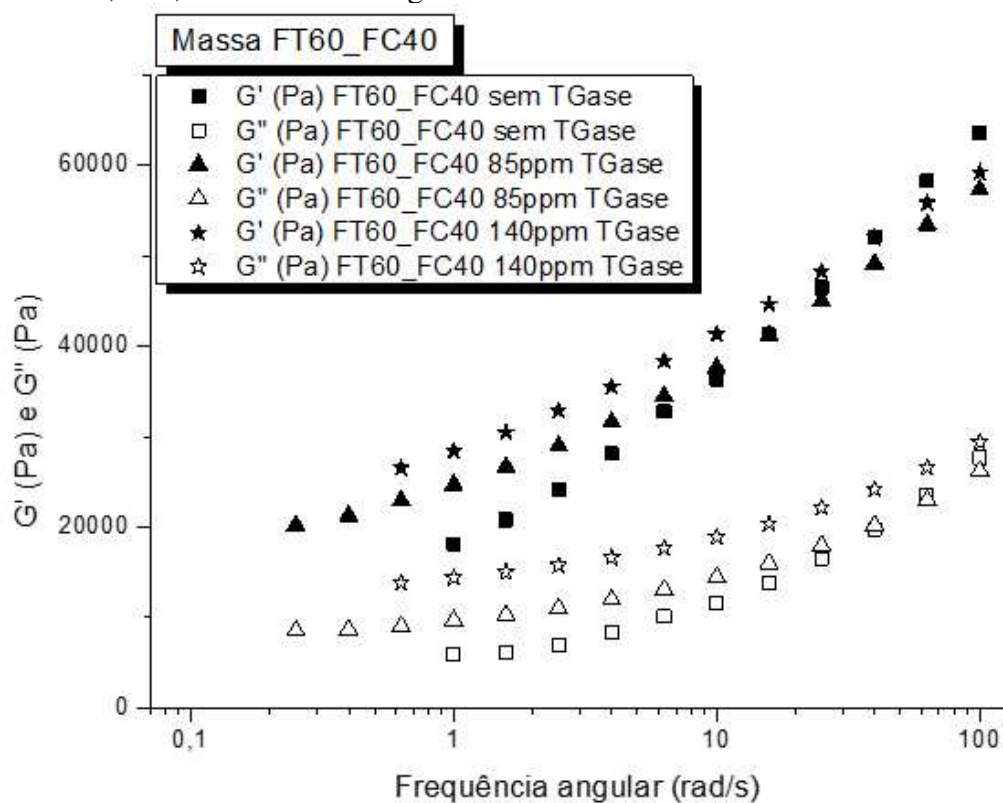
Em todas as amostras de massas, verificou-se que o módulo elástico ( $G'$ ) era superior ao módulo viscoso ( $G''$ ), indicando um comportamento firme e elástico. Devido à sua capacidade de induzir ligações cruzadas isopeptídicas, esperava-se que a TGase (transglutaminase) afetasse a estrutura da proteína presentes na farinha de centeio e de trigo e, conseqüentemente, suas propriedades viscoelásticas. Isso foi refletido pelo aumento dos valores de  $G'$  (Pa) e  $G''$  (Pa).

Dentro de cada grupo A, B, C, D, E e F, os valores dos módulos elástico ( $G'$ ) e viscoso ( $G''$ ) foram maiores quanto maior a concentração de enzima transglutaminase (TGase) adicionada. O efeito do aumento da concentração da enzima (85 ppm e 140 ppm) é mostrado no gráfico 2, para cada um dos sistemas de amostras. Esse ganho de elasticidade ( $G'$ ) foi relacionado a uma fase proteica interconectada (Gujral; Rosell, 2004). Resultados semelhantes foram relatados anteriormente em massa de trigo (Larre *et al.*, 2000) e foram relacionados à formação de ligações isopeptídicas  $\epsilon$ -( $\gamma$ -Gln)-Lys nas moléculas de glúten. De acordo com Caballero *et al.*, (2005) a adição de TGase em massas de farinha de trigo mostrou um aumento muito maior de nos módulos  $G'$  e  $G''$ , a uma frequência de 1 Hz após 60 minutos de descanso (Caballero *et al.*, 2005). Portanto, a fonte proteica, assim como o sistema de massa, parece ter um grande impacto na taxa de ligação cruzada. Além disso, em massas sem glúten (amaranto, trigo sarraceno, quinoa), que não possuem as propriedades

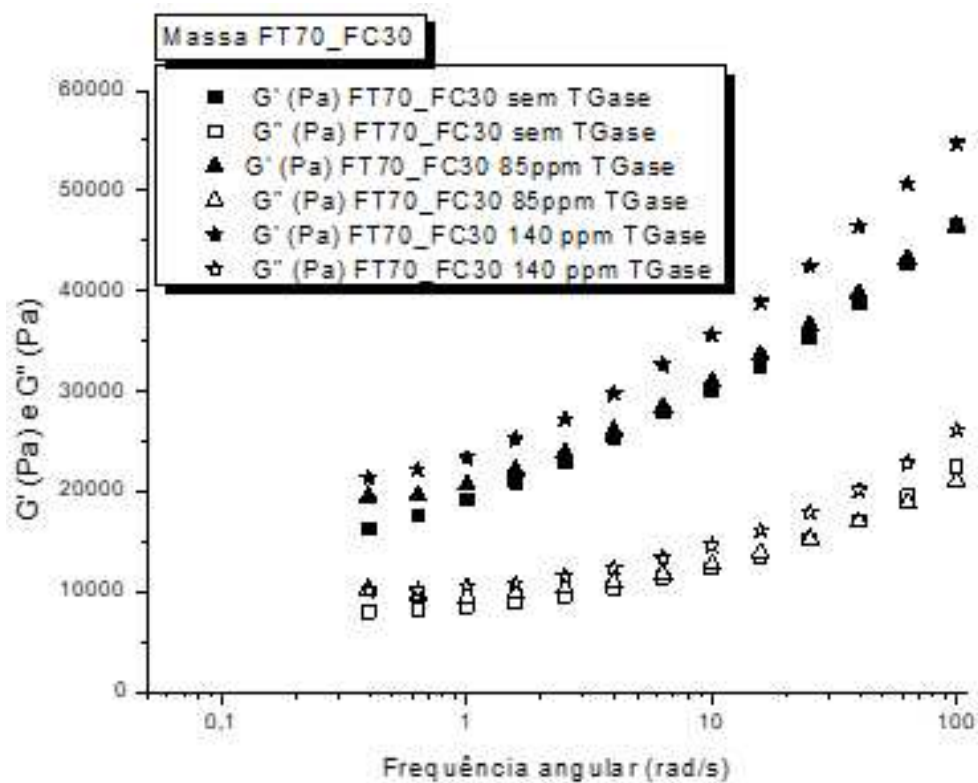
viscoelásticas únicas do glúten de trigo, a TGase induz uma melhoria na estrutura da rede proteica (Moore *et al.*, 2006). Possíveis razões para o aumento da firmeza da massa podem ser (1) causadas pela geração de novas ligações covalentes inter- e intramoleculares ou agregação entre proteínas, e (2) devido a proteínas de centeio estruturalmente modificadas, a capacidade específica de retenção de água da massa também pode ter aumentado. Além disso, foi relatado que a desamidação induzida pela TGase de resíduos de glutamina para ácido glutâmico pode aumentar ainda mais a consistência da massa. Devido ao aumento do número de resíduos de ácido glutâmico e, assim, com o aumento do número de grupos carregados negativamente, a capacidade das proteínas do centeio de ligar água é aumentada (Gujral; Rosell, 2004).

Valores mais altos de  $G'$  indicam que amostras de massa mais tenazes ou mais difíceis de deformar são formadas. Os valores de  $G'$ , para as amostras sem adição de enzima, tiveram o seguinte comportamento: FCI > FTB; FTB60\_FCI40 > FTB70\_FCI30 > FTB80\_FCI20 > FTB90\_FCI10. E esse comportamento se mantém quando analisamos estas amostras com a mesma concentração de enzima TGase. Um aumento de  $G'$  ou  $G''$  com o aumento dos níveis transglutaminase indica que uma estrutura de massa mais coesa é formada nas amostras com  $G'$  (Pa) maior. O que dificultou a expansão das células de gás na massa, uma vez que o volume teve um comportamento oposto ao do módulo elástico, onde o volume específico dos pães foi: FTB90\_FCI10 > FTB80\_FCI20 > FTB60\_FCI40 > FTB70\_FCI30. Resultado semelhante foi encontrado por Joyce; Nirmala (2023).

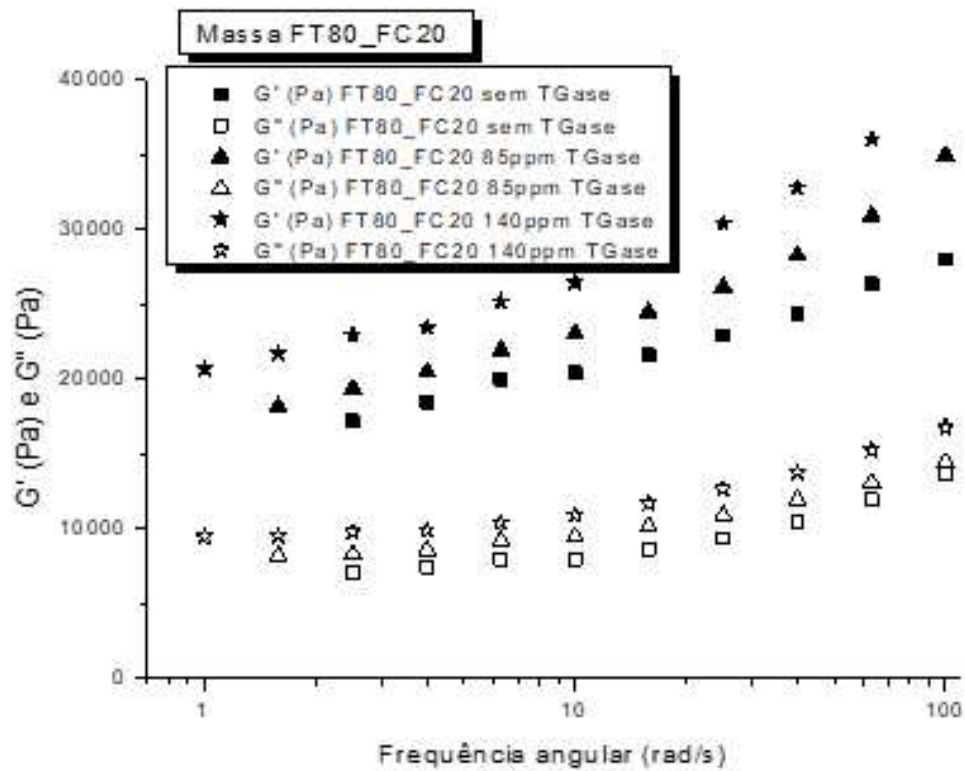
**Gráficos 2** - Reologia do modulo alástico ( $G'$ ), e viscoso ( $G''$ ), dos tratamentos de FTB, FCI, com e sem Transglutaminase.



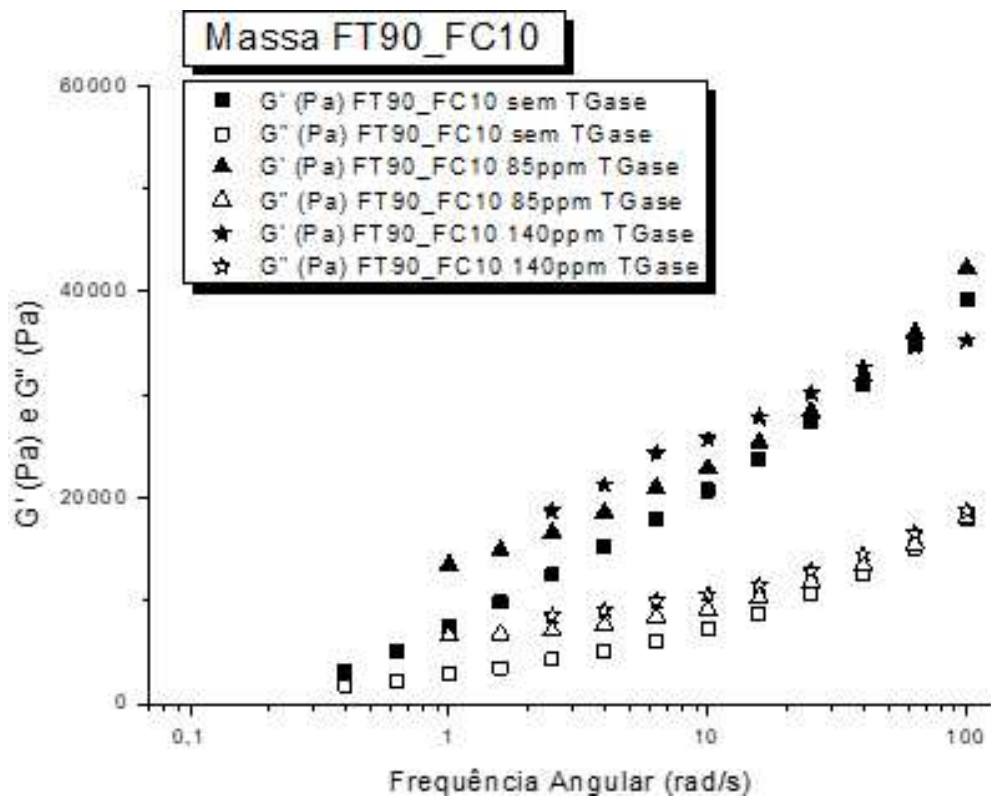
a) Massas com 60% farinha de trigo branca e 40% farinha de centeio integral.



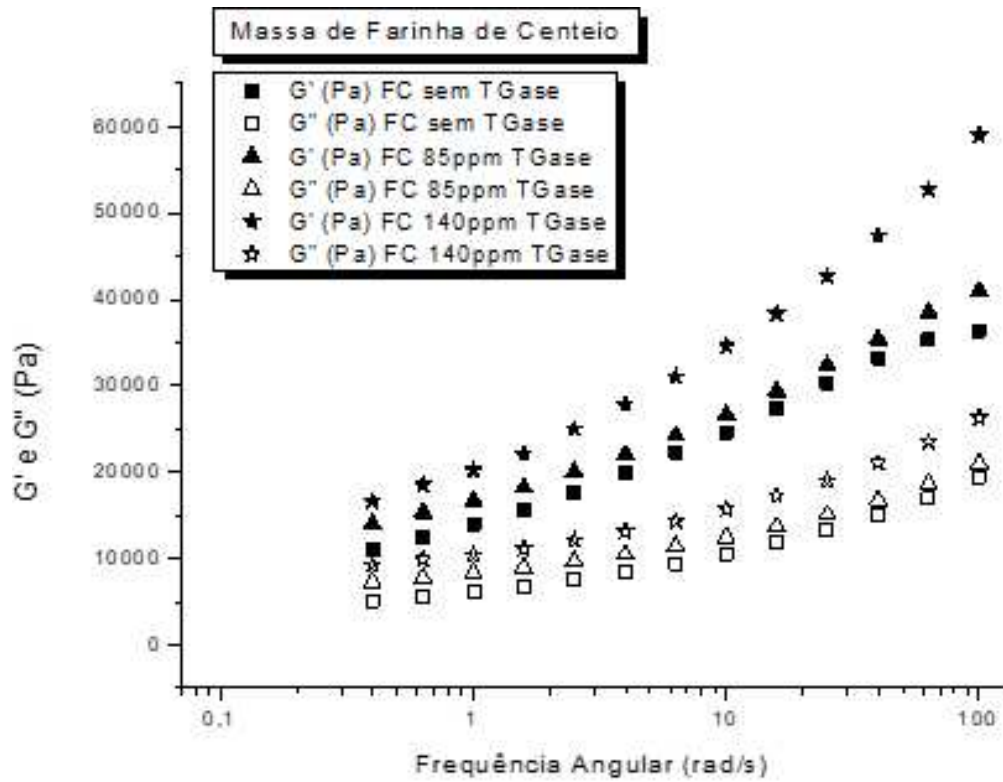
b) Massas com 70% farinha de trigo branca e 30% farinha de centeio integral.



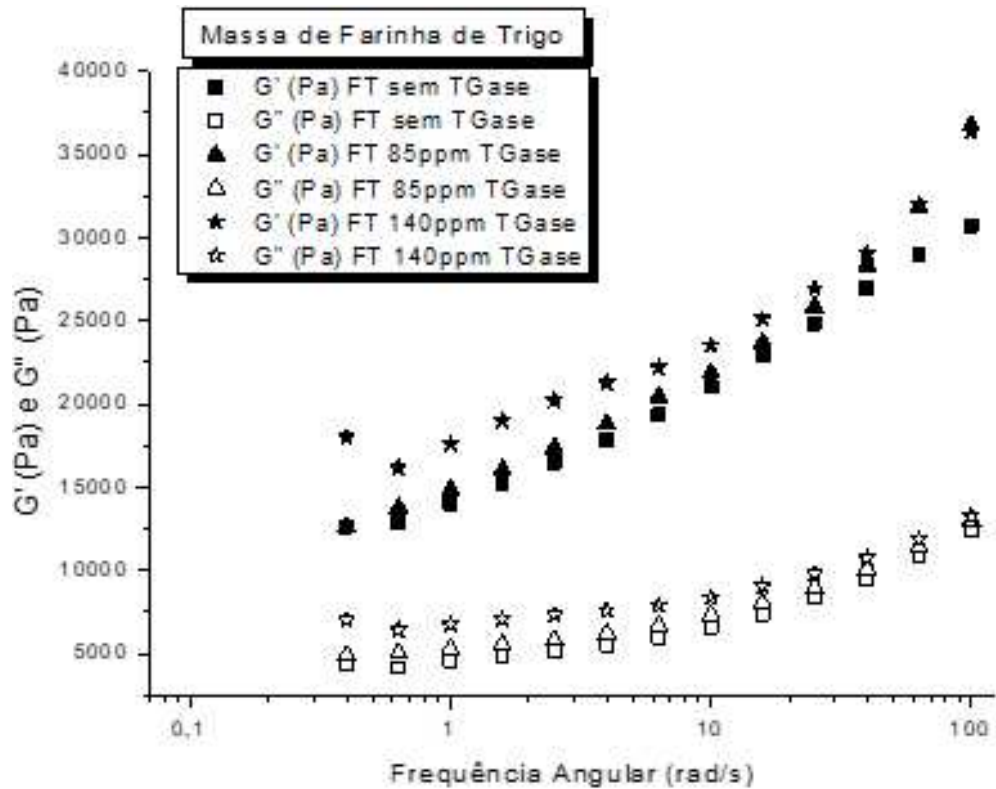
c) Massas com 80% farinha de trigo branca e 20% farinha de centeio integral.



d) Massas com 90% farinha de trigo branca e 10% farinha de centeio integral.



e) Massas de farinha de centeio integral.



f) Massas de farinha de trigo branca.

Fonte: Autor (2024)

A tabela 9, revela que o efeito no aumento dos valores do módulo elástico foi mais pronunciado na concentração de 140 ppm de transglutaminase, apontando para uma estrutura com comportamento do tipo sólido-elástico.

**Tabela 9-** Dados de  $G'$  (Pa) a 1 Hz de frequência de oscilação.

Grupos	ppm de TGase	Aumento percentual de $G'$ com adição de Transglutaminase (TGase)				
		0 ppm	85 ppm	140 ppm	0 ppm-85 ppm	0 ppm-140 ppm
<b>FTB_100</b>	<b><math>G'</math> (Pa)</b>	19350	20413	22165	5,49%	14,55%
<b>FCI_100</b>	<b><math>G'</math> (Pa)</b>	22315	24282	31061	8,81%	39,19%
<b>FTB90_FCI10</b>	<b><math>G'</math> (Pa)</b>	18003	20957	24351	16,41%	35,26%
<b>FTB80_FCI20</b>	<b><math>G'</math> (Pa)</b>	20020	21920	25190	9,49%	25,82%
<b>FTB70_FCI30</b>	<b><math>G'</math> (Pa)</b>	27928	28411	32618	1,73%	16,79%
<b>FTB60_FCI40</b>	<b><math>G'</math> (Pa)</b>	32765	34486	38348	5,25%	17,04%

Fonte: Autor (2024).

Weipert (1990) argumenta que curvas de fluxo de massa de farinha de trigo irão, normalmente, seguir a Lei da Potência (equação 3), onde  $\tau = k.D^n$  onde,  $\tau$  é tensão tangencial (Pa),  $k$  (Pa.s<sup>n</sup>) é o coeficiente de viscosidade,  $D$  (s<sup>-1</sup>) é a taxa de deformação e  $n$  (adimensional) é o índice de fluxo.

No presente trabalho as massas de farinha de trigo branca, farinha de centeio integral e das misturas dessas farinhas (FTB90\_FCI10; FTB80\_FCI20; FTB70\_FCI30 e FTB60\_FCI40), o comportamento reológico foi avaliado com os módulos de armazenamento (elástico) em função da frequência angular, ou seja,  $G'(\omega)$ , e foram caracterizados usando um modelo de lei de potência.

$$G'(\omega) = k \omega^n \quad (3)$$

Onde  $k$  (Pa.s<sup>n</sup>) é o intercepto, enquanto  $n$  (adimensional) é a inclinação para o modelo de Lei da Potência.

De acordo com Jin *et al* (2020), que aplicou a Lei da Potência tanto para o módulo elástico ( $G'$ ) como para o módulo viscoso ( $G''$ ), os valores de  $K'$  ( $G'$ ) e  $K''$  ( $G''$ ) das massas diminuiu com o aumento do conteúdo de farelo, indicando uma massa menos elástica e menos viscosa induzida pela adição de fibras. O modelo de lei de potência também foi usado para descrever os valores de  $G'(\omega)$  e  $G''(\omega)$  da massa de farinha de trigo integral preparada



pela adição de xilanase em trabalho de Ghoshal *et al* (2017). Comparada às massas de farinha de trigo integral sem xilanase as massas com xilanase tinham valores maiores dos parâmetros do modelo de lei de potência  $K'$ ,  $K''$ ,  $n'$  e  $n''$ , sugerindo que a adição de xilanase levou a um aumento na força da massa de farinha de trigo integral (Ghoshal et al., 2017).

No presente estudo os valores de  $k$  (Pa.s<sup>n</sup>), segundo a Lei da Potência, apresentaram um aumento com o teor da enzima transglutaminase. Seguindo a mesma tendência para os valores de  $G'$ ,  $G''$  e dos resultados de viscosidade pela análise RVA (Rapid Visco Amylograph) já discutidos e apresentados. Os valores de  $k$  (Pa.s<sup>n</sup>) foram maiores na farinha de centeio integral do que na farinha de trigo branca e com a seguinte sequência para os valores de  $k$  (Pa.s<sup>n</sup>): FTB60\_FCI40 > FTB70\_FCI30 > FTB80\_FCI20 > FTB90\_FCI10. O mesmo comportamento se repete na concentração de 85 ppm da enzima transglutaminase e para a concentração de 140 ppm. Nesse estudo, foi possível observar que, quanto maior a proporção de farinha de centeio integral nos sistemas, maior a consistência e maior a viscosidade. O mesmo se reflete dentro dos sistemas com a adição da enzima transglutaminase.

O que se deduz é que há um efeito aditivo ou sinérgico para a consistência da massa quando a farinha de centeio integral é misturada em maior quantidade à farinha de trigo branca, e, principalmente, quando a enzima transglutaminase é adicionada. Sendo esse efeito ainda mais acentuado na maior concentração de TGase, isto é, 140 ppm. De acordo com Beck *et al* (2011), o aumento da firmeza da massa pode ser (1) causado pela geração de novas ligações covalentes isopeptídicas inter e intramoleculares ou agregação entre moléculas de proteínas, pela ação da enzima transglutaminase; ou, (2) devido às proteínas modificadas estruturalmente estarem ligando mais água e, por consequência, estarem formando uma rede mais firme. Isso é devido ao alto teor de ácido glutâmico e grupos carregados negativamente, as proteínas do centeio têm uma maior capacidade de reter ou ligar água. Os resultados dos valores de  $k$  e  $n$ , para cada sistema, são apresentados na tabela 10 que apresenta os valores para esses parâmetros.

**Tabela 10** – Constantes de Lei da Potência para os sistemas de massas de farinhas de trigo branco, centeio integral e suas misturas.

Sistemas	$R^2$	$N$ (Adimensional)	$K$ (Pa.s <sup>n</sup> )
Farinha de Trigo Branca			
Sem adição de TGase	0,9983	0,1704	14207
85 ppm de TGase	0,9883	0,1832	14723
140 ppm TGase	0,9607	<b>0,1340</b>	<b>17948</b>
Farinha de Centeio Integral			
Sem adição de TGase	0,9830	0,2255	14167
85 ppm de TGase	0,9984	<b>0,1995</b>	16779
140 ppm TGase	0,9998	0,2298	<b>20326</b>
FTB90_FCI10			
Sem adição de TGase	0,995	0,3042	10017
85 ppm de TGase	0,9949	0,2418	13279
140 ppm TGase	0,9702	<b>0,1722</b>	<b>16941</b>
FTB80_FCI20			
Sem adição de TGase	0,9923	<b>0,1274</b>	15394
85 ppm de TGase	0,9808	0,1495	16628
140 ppm TGase	0,9687	0,1409	<b>19843</b>
FTB70_FCI30			
Sem adição de TGase	0,9990	0,1894	19315
85 ppm de TGase	0,9797	<b>0,1538</b>	21687
140 ppm TGase	0,9950	0,1756	<b>23805</b>
FTB60_FCI40			
Sem adição de TGase	0,9964	0,2884	18515
85 ppm de TGase	0,9982	0,1792	24973
140 ppm TGase	0,9998	<b>0,1639</b>	<b>28381</b>

Fonte: Autor (2024).  $R^2$ : Coeficiente de Determinação (indica o quão bem os dados se ajustam ao modelo da Lei da Potência).  $N$  (Adimensional): Exponente da Lei da Potência (descreve o comportamento da viscosidade em função do tempo ou taxa de deformação).  $K$  (Pa.s<sup>n</sup>): Constante de Lei da Potência (representa a viscosidade do sistema).

De acordo com Iacovino *et al* (2024), quanto menor os valores de  $n$  (índice de fluxo da Lei da Potência) maior a dependência de  $G'$  (Pa) com a frequência de oscilação, indicando uma alta estabilidade do sistema estudado, o qual é menos afetado pela frequência aplicada na amplitude de deformação. Em geral, dentro dos sistemas ou das faixas de misturas, os menores valores de  $n$  foram encontrados onde havia adição de TGase.

Os valores de fator de perda ( $\tan \delta$ ) para todas as formulações de massa foram menores do que 1. Comportamento similar foram observados previamente para massas de farinha de trigo e farinha de centeio, isoladamente (Beck, et al., 2011; Lazaridou et al., 2007; Skendi et al., 2009; Joyce; Nirmala, 2023). Os valores dos fatores de perda dentro dos grupos

(A, B, C, D, E e F) aumentaram com o aumento da concentração de enzima, o que pode ser devido a dois fatores, um pela maior formação da rede tridimensional por ação enzimática. O outro fator é que nos grupos B, C, D e E há uma maior concentração de farinha de centeio, que tem um comportamento viscoso ( $G''$ ) mais acentuado. Uma vez que o fator de perda é um balanço ( $G''/G'$ ) (equação 4) entre os dois comportamentos, portanto, quando o numerador aumenta, aumenta o quociente. Quanto maior a teor de enzima, dentro de cada grupo, maior é o valor do fator de perda ( $\tan \delta$ ). Weipert (1990) demonstrou que massas de pães com fator de perda pequenos ( $<1$ ) reflete um material mais rígido e duro, enquanto massas caracterizadas como úmidas e flexíveis possuíam valores de fator de perda ( $\tan \delta$ ) mais altos do que aquelas descritas como tendo uma textura curta e superfície seca. Por outro lado, Edwards et al. (1999) não encontraram correlação significativa entre os valores de fator de perda ( $\tan \delta$ ) e a força da massa de trigo duro, conforme medido por métodos empíricos, enquanto os valores de  $G'$  se correlacionaram fortemente com a força da massa.

$$\tan \delta = G''/G' \quad (4)$$

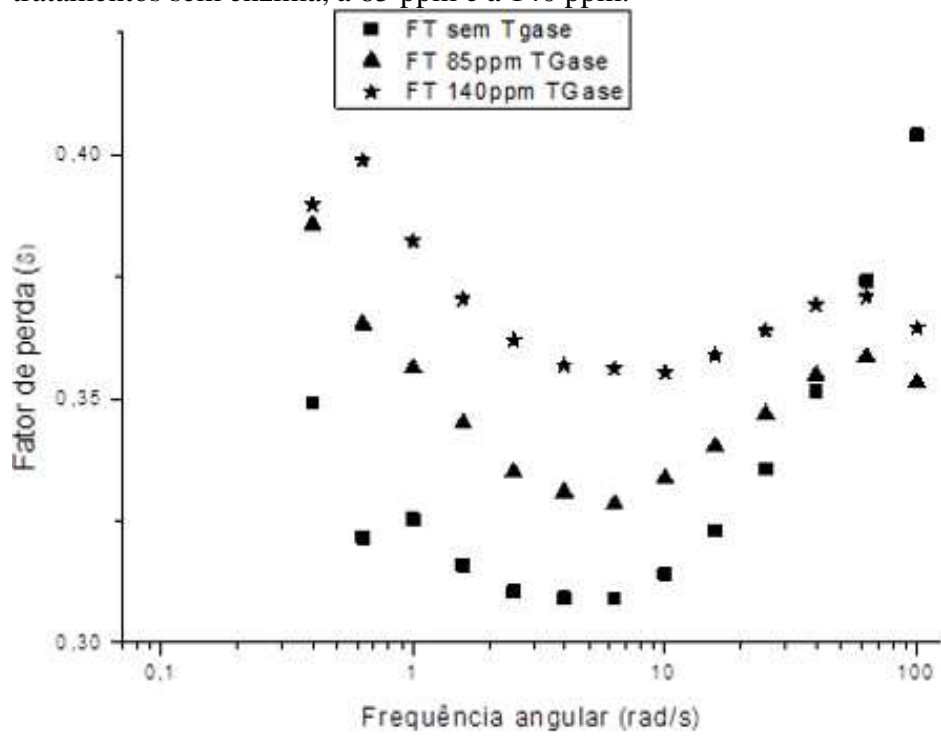
Todas as amostras de massas analisadas, em todos os grupos (A, B, C, D, E e F) apresentaram, nos gráficos de fator de perda ( $\tan \delta$ ) versus frequência angular, valores mais altos nos extremos de frequência, e valores mínimos entre 1 e 10 rad/s. Joyce; Nirmala (2023), ao estudarem os efeitos de fibra solúvel de cevada no comportamento reológico de massas de farinha de trigo, encontraram este mesmo comportamento. Em baixas e altas frequência há um comportamento mais do tipo líquido-viscoso, enquanto em frequências intermediárias o comportamento é mais de sólido-elástico. A tabela 11 apresenta os dados de fator de perda ( $\tan \delta$ ), a 1Hz de frequência de oscilação, juntamente com os gráficos 3, a seguir:

**Tabela 11** - Dados de fator de perda ( $\tan \delta$ ), a 1Hz de frequência de oscilação.

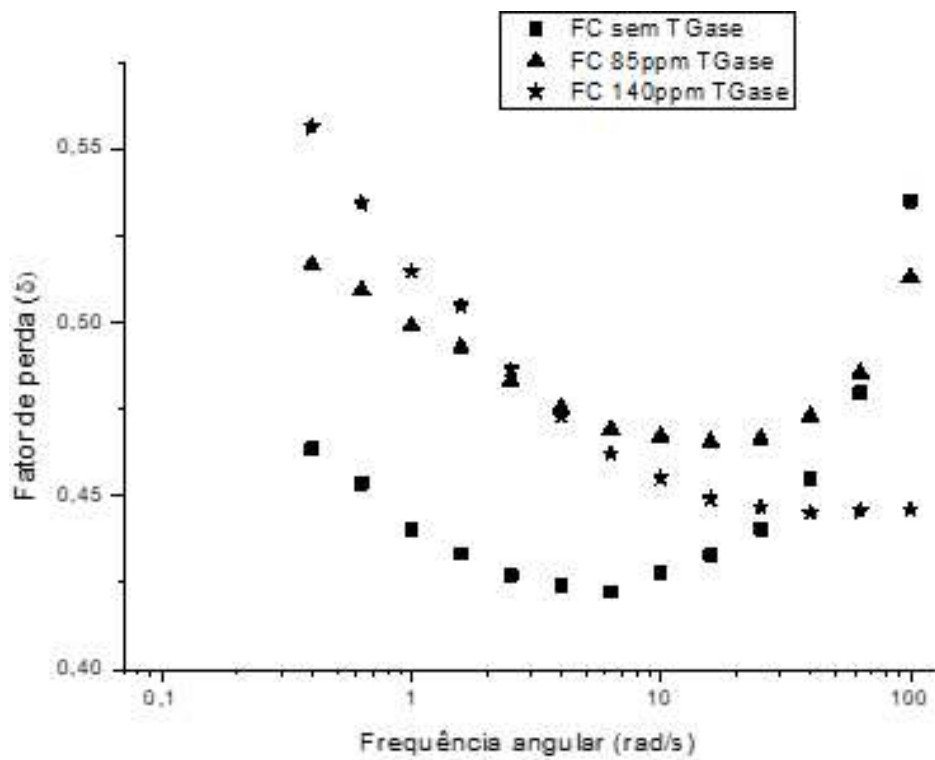
Grupos	Fator de perda ( $\tan \delta$ )			Aumento percentual do fator de perda ( $\tan \delta$ ) com	
	ppm TGase			adição de Transglutaminase (TGase)	
	0	85	140	0-85	0-140
<b>FTB_100</b>	0,3090	0,3284	0,3562	6,28%	15,26%
<b>FCI_100</b>	0,4224	0,4692	0,4622	11,11%	9,41%
<b>FTB90_FCI10</b>	0,3366	0,4036	0,4095	19,91%	21,65%
<b>FTB80_FCI20</b>	0,3975	0,4203	0,4139	5,72%	4,11%
<b>FTB70_FCI30</b>	0,40076	0,4125	0,4090	1,21%	0,36%
<b>FTB60_FCI40</b>	0,3092	0,3787	0,4603	22,46%	48,87%

Fonte: Autor (2024).

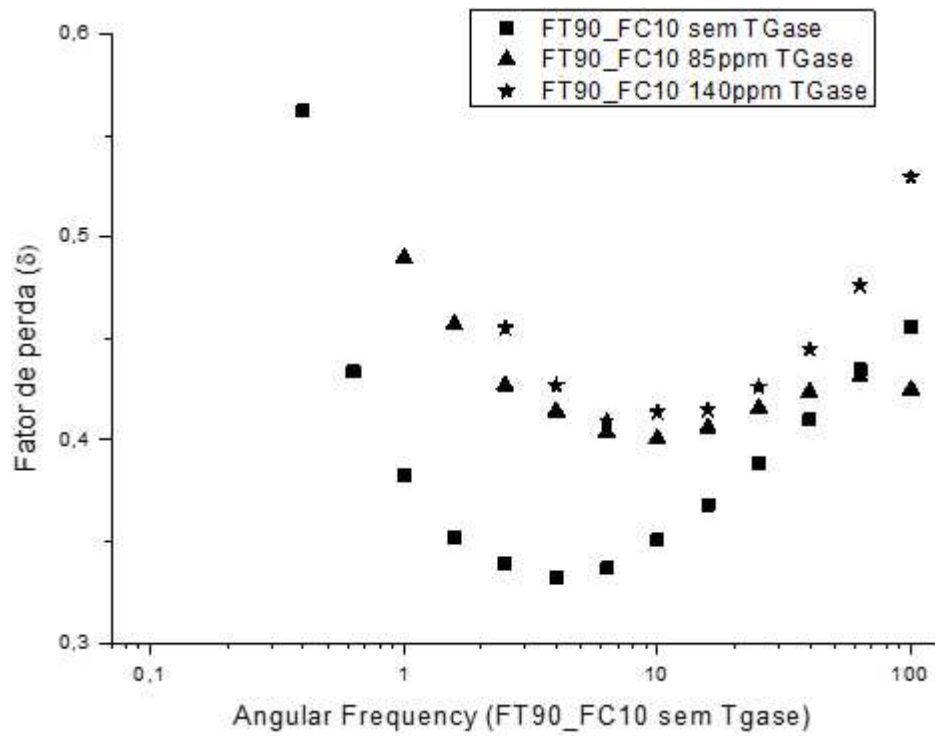
**Gráficos 3** - Fator de perda ( $\tan \delta$ ) versus frequência angular dos tratamentos sem enzima, a 85 ppm e a 140 ppm.



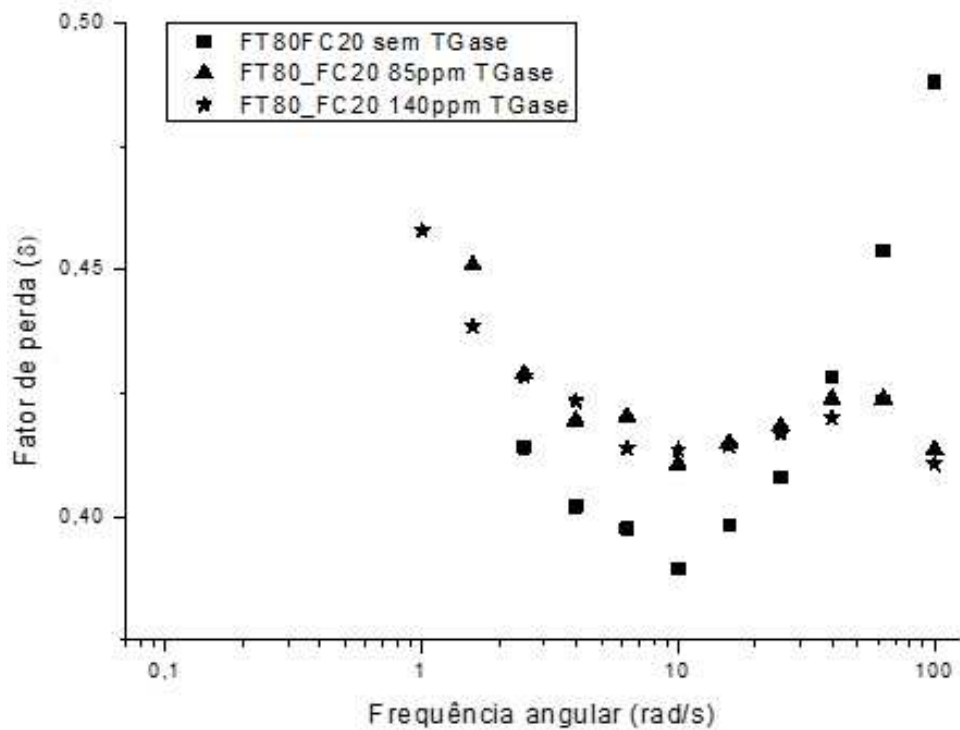
a) Massas de farinha de trigo branca.



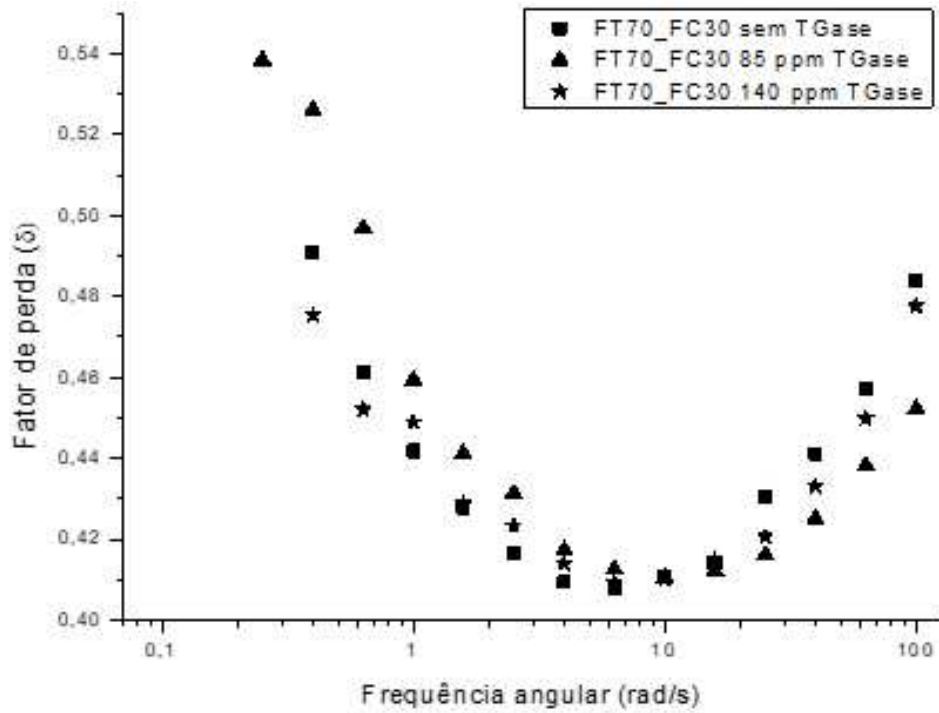
b) Massas de farinha de centeio integral.



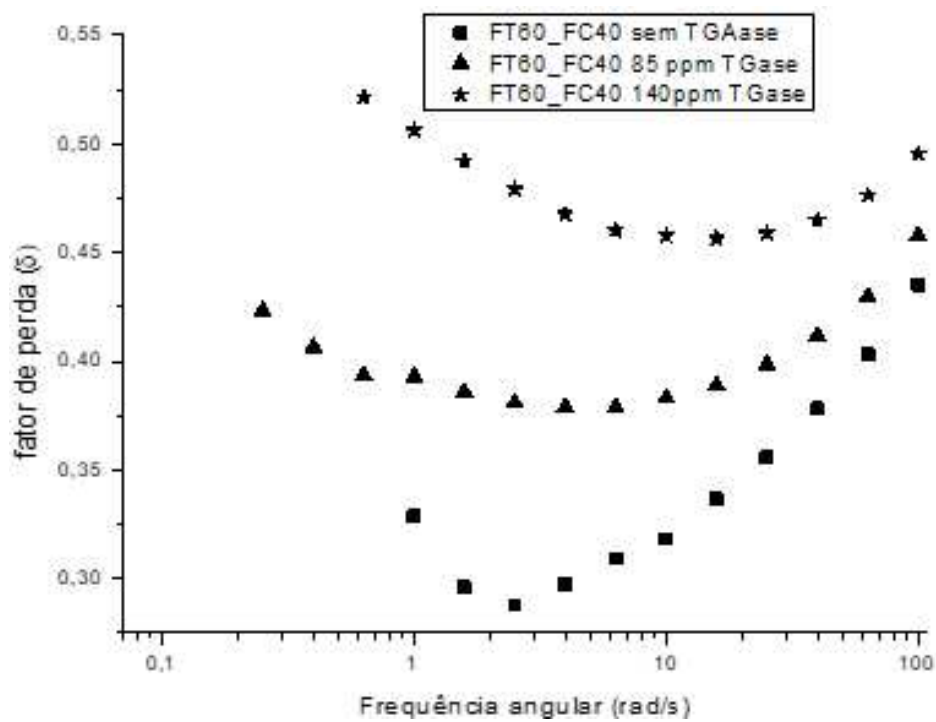
c) Massas com 90% de farinha de trigo branca e 10% de farinha de centeio integral.



d) Massas com 80% de farinha de trigo branca e 20% de farinha de centeio integral.



e) Massas com 70% de farinha de trigo branca e 30% de farinha de centeio integral.



f) Massas com 60% de farinha de trigo branca e 40% de farinha de centeio integral.

Fonte: Autor (2024)

Os resultados sugerem que a origem das proteínas (trigo ou centeio), assim como a composição dos sistemas das massas preparadas com diferentes proporções das duas farinhas, tem um impacto diferente na taxa e densidade das ligações covalentes induzidas pela enzima transglutaminase. A FCI, cujo teor de pentosanas é alto, o que acaba refletindo em diferentes propriedades reológicas, seja por oscilação ou rotacional (caso da análise de RVA) ou unidirecional (caso da célula de Kiffer, no texturômetro). A presente pesquisa aponta para a necessidade de estudos reológicos mais aprofundados sobre as interações entre as proteínas dos dois cereais e das fibras solúveis com a enzima transglutaminase, em especial em pães elaborados com estes dois cereais.

### 5.3 ANÁLISE DE QUALIDADE DO PÃO

#### 5.3.1 Cor

Os valores obtidos nas coordenadas de cromaticidade  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  que denotam as posições de luminosidade ao longo dos eixos verde-vermelho e amarelo-azul, respectivamente, podem ser observados na tabela 12 e nas figuras 9 e 10.

**Tabela 12** - Parâmetros de cor dos pães elaborados com FTB\_FCI com e sem transglutaminase.

Grupo	Tratamento (FTB_FCI_TGase)	L*		a*		b*	
		Casca	Miolo	Casca	Miolo	Casca	Miolo
A	FTB0_FCI100_0PPM	53,66±0,06 <sup>a</sup>	52,52±0,10 <sup>a</sup>	<b>9,84±0,05<sup>b</sup></b>	<b>6,1±0,01<sup>a</sup></b>	29,13±0,01 <sup>a</sup>	<b>22,04±0,05<sup>a</sup></b>
	FTB0_FCI100_85PPM	<b>55,05±0,03<sup>b</sup></b>	<b>55,72±0,08<sup>b</sup></b>	9,82±0,07 <sup>b</sup>	5,1±0,03 <sup>b</sup>	<b>30,66±0,01<sup>b</sup></b>	19,52±0,04 <sup>b</sup>
	FTB0_FCI100_140PPM	53,31±0,04 <sup>c</sup>	54,23±0,03 <sup>c</sup>	9,83±0,11 <sup>b</sup>	5,55±0,09 <sup>c</sup>	29,61±0,12 <sup>c</sup>	20,17±0,06 <sup>c</sup>
B	FTB60_FCI40_0PPM	57,19±0,34 <sup>a</sup>	57,21±2,3 <sup>a</sup>	<b>12,55±0,12<sup>a</sup></b>	<b>3,14±0,08<sup>a</sup></b>	<b>38,16±0,15<sup>a</sup></b>	<b>18,97±0,31<sup>a</sup></b>
	FTB60_FCI40_85PPM	<b>82,85±0,02<sup>b</sup></b>	61,27±0,09 <sup>b</sup>	5,72±0,06 <sup>b</sup>	2,36±0,04 <sup>b</sup>	29,28±0,01 <sup>b</sup>	17,79±0,03 <sup>b</sup>
	FTB60_FCI40_140PPM	64,26±0,06 <sup>c</sup>	<b>64,16±0,01<sup>c</sup></b>	5,57±0,09 <sup>b</sup>	2,49±0,02 <sup>b</sup>	29,24±0,02 <sup>b</sup>	18,34±0,06 <sup>c</sup>
C	FTB70_FCI30_0PPM	63,29±1,25 <sup>a</sup>	59,21±0,57 <sup>a</sup>	<b>8,12±0,92<sup>a</sup></b>	<b>2,23±0,01<sup>a</sup></b>	<b>34,52±1,49<sup>a</sup></b>	17,35±0,28 <sup>b</sup>
	FTB70_FCI30_85PPM	<b>69,76±0,01<sup>b</sup></b>	62,29±0,08 <sup>b</sup>	3,43±0,06 <sup>b</sup>	1,84±0,00 <sup>b</sup>	26,35±0,01 <sup>b</sup>	17,08±0,01 <sup>b</sup>
	FTB70_FCI30_140PPM	67,67±0,01 <sup>c</sup>	<b>63,53±0,08<sup>c</sup></b>	3,65±0,09 <sup>c</sup>	1,77±0,11 <sup>b</sup>	26,07±0,01 <sup>c</sup>	<b>17,62±0,12<sup>b</sup></b>
D	FTB80_FCI20_0PPM	66,19±1,94 <sup>a</sup>	63,14±2,6 <sup>a</sup>	<b>6,50±1,56<sup>a</sup></b>	<b>1,39±0,18<sup>b</sup></b>	<b>33,67±2,41<sup>a</sup></b>	<b>16,75±0,59<sup>b</sup></b>
	FTB80_FCI20_85PPM	<b>71,66±0,01<sup>b</sup></b>	63,97±0,02 <sup>b</sup>	2,55±0,08 <sup>b</sup>	1,15±0,01 <sup>b</sup>	25,26±0,01 <sup>b</sup>	16,66±0,14 <sup>b</sup>
	FTB80_FCI20_140PPM	70,42±0,01 <sup>c</sup>	<b>67,64±0,01<sup>c</sup></b>	2,43±0,08 <sup>b</sup>	0,79±0,01 <sup>a</sup>	24,23±0,01 <sup>c</sup>	16,24±0,06 <sup>b</sup>
E	FTB90_FCI10_0PPM	69,29±2,03 <sup>a</sup>	59,54±0,94 <sup>a</sup>	<b>3,67±0,19<sup>a</sup></b>	<b>0,32±0,15<sup>a</sup></b>	<b>29,28±0,47<sup>a</sup></b>	<b>15,97±0,77<sup>b</sup></b>
	FTB90_FCI10_85PPM	<b>74,41±0,01<sup>b</sup></b>	<b>71,90±0,09<sup>b</sup></b>	1,18±0,03 <sup>b</sup>	0,03±0,01 <sup>b</sup>	25,87±0,02 <sup>b</sup>	15,64±0,04 <sup>b</sup>
	FTB90_FCI10_140PPM	74,24±0,03 <sup>c</sup>	71,59±0,05 <sup>c</sup>	1,03±0,03 <sup>c</sup>	0,05±0,01 <sup>b</sup>	24,00±1,00 <sup>c</sup>	15,39±0,06 <sup>b</sup>
F	FTB100_FCI0_0PPM*	74,35±0,05 <sup>a</sup>	70,86±0,11 <sup>a</sup>	<b>0,923±0,00<sup>a</sup></b>	<b>1,8±0,26<sup>b</sup></b>	<b>27,88±0,00<sup>a</sup></b>	13,54±0,12 <sup>a</sup>
	FTB100_FCI0_85PPM	<b>79,83±0,09<sup>b</sup></b>	<b>72,55±0,09<sup>b</sup></b>	0,79±0,02 <sup>b</sup>	1,37±0,03 <sup>a</sup>	25,18±0,02 <sup>b</sup>	<b>16,58±0,07<sup>b</sup></b>
	FTB100_FCI0_140PPM	73,77±0,18 <sup>c</sup>	70,22±0,02 <sup>c</sup>	0,14±0,01 <sup>c</sup>	1,68±0,01 <sup>b</sup>	22,12±0,01 <sup>c</sup>	15,62±0,04 <sup>c</sup>

Fonte: Autor (2024). Letras diferentes nas colunas, dentro dos grupos (A, B, C, D, E, F) denotam diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ , ANOVA), expressos como média±desvio padrão. Os maiores valores de cada atributo e dentro de cada grupo estão em negrito (escolha do autor). L\*: luminosidade, a\*: eixo (-)verde-(+)vermelho, b\*: eixo (-)azul-(+)amarelo. \*: Controle.



**Figura 9** – Cor da crosta dos pães formulados



Fonte: Autor (2024). Tratamentos - 1A: FTB0\_FCI100\_0PPM, 1B: FTB60\_FCI40\_0PPM, 1C: FTB70\_FCI30\_0PPM, 1D: FTB80\_FCI20\_0PPM, 1E: FTB90\_FCI10\_0PPM, 1F: FTB100\_FCI0\_0PPM, 2A: FTB0\_FCI100\_85PPM, 2B: FTB60\_FCI40\_85PPM, 2C: FTB70\_FCI30\_85PPM, 2D: FTB80\_FCI20\_85PPM, 2E: FTB90\_FCI10\_85PPM, 2F: FTB100\_FCI0\_85PPM, 3A: FTB0\_FCI100\_140PPM, 3B: FTB60\_FCI40\_140PPM, 3C: FTB70\_FCI30\_140PPM, 3D: FTB80\_FCI20\_140PPM, 3E: FTB90\_FCI10\_140PPM, 3F: FTB100\_FCI0\_140PPM. \*: Controle.

**Figura 10** - Cor do miolo dos pães formulados.



Fonte: Autor (2024). Tratamentos - 1A: FTB0\_FCI100\_0PPM, 1B: FTB60\_FCI40\_0PPM, 1C: FTB70\_FCI30\_0PPM, 1D: FTB80\_FCI20\_0PPM, 1E: FTB90\_FCI10\_0PPM, 1F: FTB100\_FCI0\_0PPM, 2A: FTB0\_FCI100\_85PPM, 2B: FTB60\_FCI40\_85PPM, 2C: FTB70\_FCI30\_85PPM, 2D: FTB80\_FCI20\_85PPM, 2E: FTB90\_FCI10\_85PPM, 2F: FTB100\_FCI0\_85PPM, 3A: FTB0\_FCI100\_140PPM, 3B: FTB60\_FCI40\_140PPM, 3C: FTB70\_FCI30\_140PPM, 3D: FTB80\_FCI20\_140PPM, 3E: FTB90\_FCI10\_140PPM, 3F: FTB100\_FCI0\_140PPM. \*: Controle.

A análise dos parâmetros de cor dos pães elaborados com diferentes tratamentos de FTB, FCI e transglutaminase revelou diferenças significativas na Luminosidade e Cromaticidade. O grupo A (FTB0\_FCI100), cujo tratamento com 0 ppm de transglutaminase, mostrou uma luminosidade ( $L^*$ ) de 53,66 na crosta e 52,52 no miolo, quando foi adicionado 85 ppm de transglutaminase (FTB0\_FCI100\_85PPM) a luminosidade tendeu a aumentar para 55,05 na crosta e 55,72 no miolo, enquanto que, com 140 ppm de transglutaminase (FTB0\_FCI100\_140PPM) reduziu a luminosidade para 53,31 na crosta e 54,23 no miolo ( $p < 0,05$ ). No eixo verde-vermelho ( $a^*$ ), os valores não mudaram significativamente ( $p > 0,05$ ) entre os tratamentos, mantendo-se em torno de 9,84 para FTB0\_FCI100\_0PPM; 9,82 para FTB0\_FCI100\_85PPM e 9,83 para FTB0\_FCI100\_140PPM na região da casca, mas foram significativamente diferentes no miolo ( $p < 0,05$ ), com destaque para FTB0\_FCI100\_0PPM (6,1) indicando o efeito da FCI no aspecto vermelho no miolo. No eixo azul-amarelo ( $b^*$ ), o tratamento FTB0\_FCI100\_85PPM (30,66) apresentou maior

tendência ao amarelo em comparação com os tratamentos FTB0\_FCI100\_0PPM e FTB0\_FCI100\_140PPM, enquanto que no miolo essa tendência foi no tratamento FTB0\_FCI100\_0PPM.

No grupo B (60FTB\_40FCI), O tratamento FTB60\_FCI40\_0PPM sem transglutaminase, apresentou uma luminosidade de 57,19 na casca e 57,21 no miolo. A adição de 85 ppm de transglutaminase (FTB60\_FCI40\_85PPM) aumentou a luminosidade para 82,85 na casca, enquanto a adição de 140 ppm (FTB60\_FCI40\_140PPM) para 64,26 ( $p < 0,05$ ). No miolo, os valores de luminosidade mais expressivo foi 64,16 em FTB60\_FCI40\_140PPM, pronunciando o efeito da TGase em ambas as regiões. No eixo verde-vermelho ( $a^*$ ) e azul -amarelo ( $b^*$ ) os valores mais evidentes corresponde ao tratamento FTB60\_FCI40\_0PPM, sem a TGase, o que indica que esses parâmetros são mais influenciados pela concentração de FCI que pela enzima, tal percepção pode ser verificada nos demais grupos.

No grupo C (FTB70\_FCI30), o tratamento sem transglutaminase (FTB70\_FCI30\_0PPM) teve uma luminosidade baixa para a casca e o miolo, entretanto como já foi registrado a adição de 85 ppm de transglutaminase (FTB70\_FCI30\_85PPM) proporcionou o aumento da luminosidade para 69,76 na casca e 63,53 no miolo, e a redução da luminosidade no tratamento com 140 ppm (FTB70\_FCI30\_140PPM) reduziu a luminosidade para 67,67 na casca e 62,29 no miolo. No eixo verde-vermelho ( $a^*$ ) os valores foram menores para as amostras sem enzima, tanto na crosta como no miolo e no eixo azul -amarelo ( $b^*$ ) os resultados apresentaram maiores valores na crosta, enquanto no miolo não houve diferença estatística significativa.

De forma geral como já foi discutido e no que é observado nos demais grupos, a saber, D (80FTB\_20FCI), E (90FTB\_10FCI) e F (100FTB\_0FCI), a Luminosidade ( $L^*$ ), por via da adição de transglutaminase tende a aumentar até uma concentração de 85 ppm, seguida por uma leve redução com a concentração de 140 ppm. Demonstrando também que os tratamentos com maior teor de FCI mostraram uma diminuição de  $L^*$ , enquanto que, a concentração de FTB aumenta, esse resultado pode ser observado nas figuras 9 e 10.

Nesse estudo, a luminosidade indicada por um valor alto de  $L^*$  (aproximando de 100), indica que a cor tem um aspecto mais claro e mais brilhante, mostra que o teor de FCI define o parâmetro luminosidade em relação a FTB, caracterizando que maiores concentrações de farinha de centeio integral nas amostras irão forçar um aspecto mais escuro e com cromaticidades mais elevadas.

Um detalhe que merece destaque com vista na comparação dos tratamentos com enzima (85 ppm e 140 ppm), é que (1): apresentaram uma redução no aspecto de intensidade que tendiam ao (+) vermelho e um aumento com relação ao (-) verde, destacando que a concentração da enzima demonstra relação com um aspecto menos intenso de vermelho, haja vista que este tende a diminuir com o aumento da concentração da enzima, o qual é majoritariamente influenciado pelo teor do centeio na mostra. (2): quando há a redução do centeio nos tratamentos, e comum apresentar o aumento do (-) verde nas amostras (pouco expressivo). Cujo efeito também é comum a cromaticidade de  $b^*$  (azul -amarelo), com mesmo efeito de redução do aspecto amarelo e tendencia ao azul (pouco perceptível).

Portanto, quando o teor de FCI aumenta ou diminui, o teor de enzima se manifesta na  $L^*$  de forma proporcional às concentrações de FTB, e afeta a intensidade (valores na tabela 12) dos tratamentos (0ppm, 85ppm e 140ppm) levando as amostras com transglutaminase serem mais claras (figuras 9 e 10).

É interessante destacar que a variação da intensidade de cromaticidade de  $a^*$  e  $b^*$  se mostra como o resultado do efeito físico que descreve a mudança na percepção da cromaticidade (cores) em relação à luminosidade. Especificamente, o aumento da  $L^*$  pode levar a uma redução na intensidade da cromaticidade, pois à medida que a luminosidade aumenta, as cores podem parecer menos saturadas. Isso significa que, em níveis mais altos de luminosidade, a percepção da intensidade da cor (cromaticidade) pode diminuir. (Chaibub, 2017).

A redução na luminosidade do miolo pode estar relacionada ao efeito da fonte de fibra e no teor de umidade do miolo (maior umidade, menor luminosidade), semelhante ao observado por Fendri *et al.*, (2016). Nesse sentido, a cor mais escura, observada na crosta dos tratamentos com maiores percentuais de FCI é uma característica que pode ser intensificada devido a da reação de Maillard que é atribuída ao grau de polimerização e à presença de açúcares de baixo peso molecular na formulação e ao nível de sua contribuição na receita (Juszczak *et al.*, 2012; Peressini; Sensidoni, 2009 ). Ao contrário da crosta, a cor do pão no miolo depende principalmente da cor das matérias-primas utilizadas, uma vez que as reações de Maillard e de caramelização são mais lentas no interior do produto devido à menor temperatura e maior atividade de água do que na superfície (Levent *et al.*, 2021).

### **5. 3. 2 Volume específico e densidade**

A Tabela 13 a seguir, apresenta os resultados para o volume específico ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) e densidade. ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

**Tabela 13-** Resultados das análises experimentais dos pães formulados a partir de FCI, FTB e TGase.

Grupo	Tratamento (FTB_FCI_TGase)	Vol. Específico (cm <sup>3</sup> /g)	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )
A	FTB0_FCI100_0PPM	3,45±0,3 <sup>a</sup>	0,29±0,02 <sup>a</sup>
	<b>FTB0_FCI100_85PPM</b>	<b>5,91±0,38<sup>b</sup></b>	<b>0,16±0,01<sup>b</sup></b>
	FTB0_FCI100_140PPM	5,63±0,28 <sup>b</sup>	0,17±0,00 <sup>b</sup>
B	FTB60_FCI40_0PPM	2,04±0,09 <sup>a</sup>	0,48±0,02 <sup>a</sup>
	<b>FTB60_FCI40_85PPM</b>	<b>6,41±0,38<sup>b</sup></b>	<b>0,15±0,00<sup>b</sup></b>
	FTB60_FCI40_140PPM	5,89±0,33 <sup>c</sup>	0,17±0,00 <sup>c</sup>
C	FTB70_FCI30_0PPM	3,23±0,37 <sup>a</sup>	0,31±0,04 <sup>a</sup>
	<b>FTB70_FCI30_85PPM</b>	<b>6,29±0,54<sup>b</sup></b>	<b>0,15±0,01<sup>b</sup></b>
	FTB70_FCI30_140PPM	6,09±0,44 <sup>b</sup>	0,16±0,01 <sup>b</sup>
D	FTB80_FCI20_0PPM	5,22±0,58 <sup>a</sup>	0,19±0,01 <sup>a</sup>
	<b>FTB80_FCI20_85PPM</b>	<b>8,11±0,48<sup>b</sup></b>	<b>0,12±0,00<sup>b</sup></b>
	FTB80_FCI20_140PPM	7,45±0,42 <sup>c</sup>	0,13±0,00 <sup>c</sup>
E	FTB90_FCI10_0PPM	5,22±0,5 <sup>a</sup>	0,19±0,01 <sup>a</sup>
	<b>FTB90_FCI10_85PPM</b>	<b>8,64±0,48<sup>b</sup></b>	<b>0,11±0,00<sup>b</sup></b>
	FTB90_FCI10_140PPM	8,12±0,62 <sup>c</sup>	0,12±0,01 <sup>c</sup>
F	FTB100_FCI0_0PPM*	4,48±0,36 <sup>a</sup>	0,22±0,01 <sup>a</sup>
	FTB100_FCI0_85PPM	5,11±0,7 <sup>b</sup>	0,19±0,00 <sup>b</sup>
	<b>FTB100_FCI0_140PPM</b>	<b>5,4±0,43<sup>b</sup></b>	<b>0,18±0,01<sup>b</sup></b>

Fonte: Autor (2024). Tratamentos comparados dentro do mesmo grupo. Valores na mesma coluna seguidos por letras diferentes, diferem significativamente entre si (p<0,05). Resultados expressos como média±desvio padrão. \*Padrão.

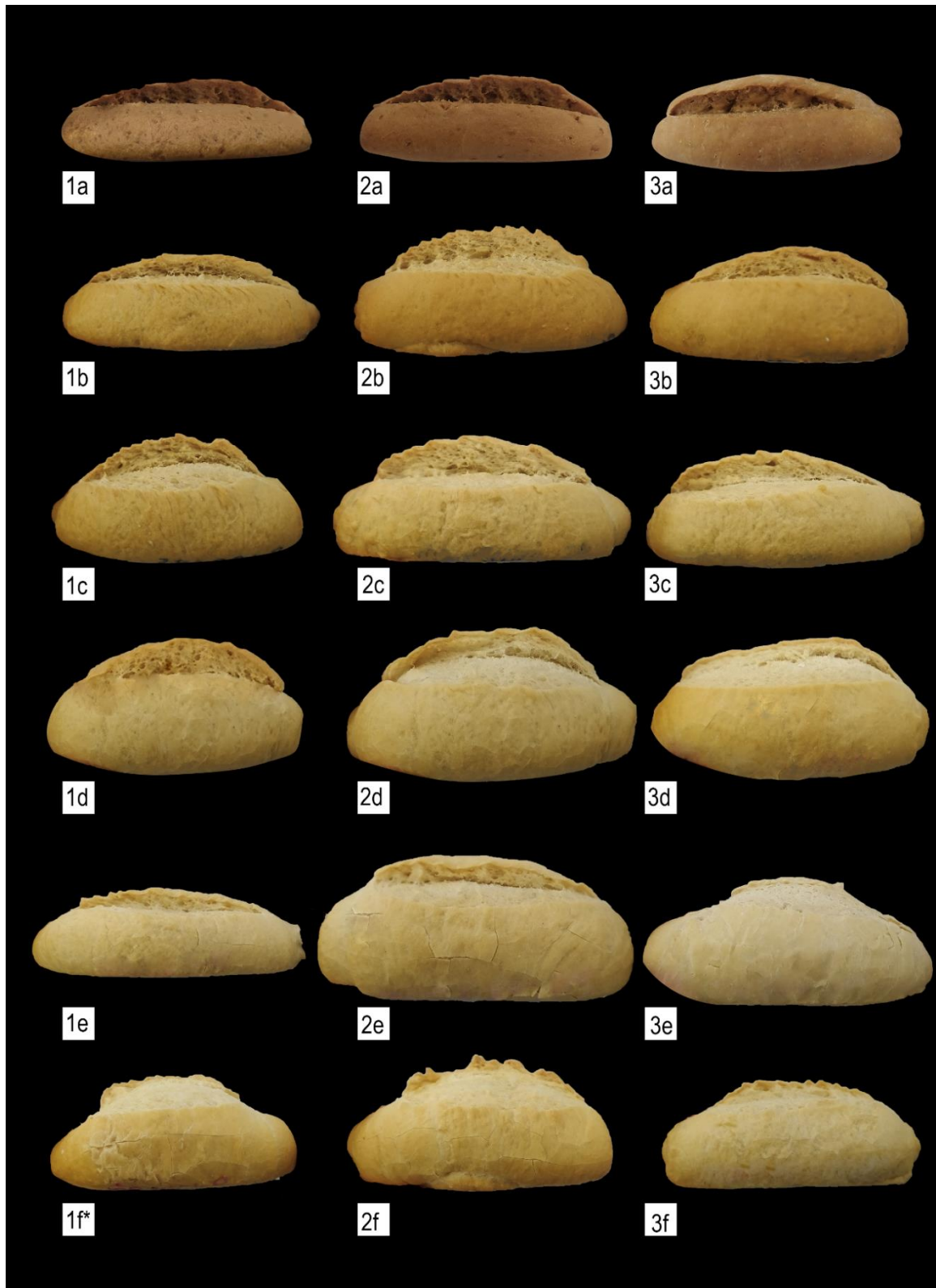
A análise estatística dentro dos grupos A, B, C, D, E e F mostrou que a adição da enzima transglutaminase aumentou o volume dos pães e conseqüentemente diminuiu a densidade dos mesmos. Os pães elaborados com a mistura FTB0\_FCI100\_0PPM e FTB60\_FCI40\_0PPM foram que apresentaram a maior densidade (0,29 e 0,48g/cm<sup>3</sup>), indicando que a farinha de centeio integral apresenta um efeito redutor de volume, devido ao seu maior teor de fibras, pentosanas e menor teor de proteínas capazes de formar uma rede tridimensional forte e elástica o suficiente para reter o gás durante a expansão causada pelo aquecimento durante o cozimento. Esses resultados podem ser observados nas figuras 11 e 12 a seguir:

**Figura 11** – Vista aérea do pão formulado



Fonte: Autor (2024). Tratamentos - 1A: FTB0\_FCI100\_0PPM, 1B: FTB60\_FCI40\_0PPM, 1C: FTB70\_FCI30\_0PPM, 1D: FTB80\_FCI20\_0PPM, 1E: FTB90\_FCI10\_0PPM, 1F: FTB100\_FCI0\_0PPM, 2A: FTB0\_FCI100\_85PPM, 2B: FTB60\_FCI40\_85PPM, 2C: FTB70\_FCI30\_85PPM, 2D: FTB80\_FCI20\_85PPM, 2E: FTB90\_FCI10\_85PPM, 2F: FTB100\_FCI0\_85PPM, 3A: FTB0\_FCI100\_140PPM, 3B: FTB60\_FCI40\_140PPM, 3C: FTB70\_FCI30\_140PPM, 3D: FTB80\_FCI20\_140PPM, 3E: FTB90\_FCI10\_140PPM, 3F: FTB100\_FCI0\_140PPM. \*: Controle.

**Figura 12** – Vista lateral do pão formulado.



Fonte: Autor (2024). Tratamentos - 1A: FTB0\_FCI100\_0PPM, 1B: FTB60\_FCI40\_0PPM, 1C: FTB70\_FCI30\_0PPM, 1D: FTB80\_FCI20\_0PPM, 1E: FTB90\_FCI10\_0PPM, 1F: FTB100\_FCI0\_0PPM, 2A: FTB0\_FCI100\_85PPM, 2B: FTB60\_FCI40\_85PPM, 2C: FTB70\_FCI30\_85PPM, 2D: FTB80\_FCI20\_85PPM, 2E: FTB90\_FCI10\_85PPM, 2F: FTB100\_FCI0\_85PPM, 3A: FTB0\_FCI100\_140PPM, 3B: FTB60\_FCI40\_140PPM, 3C: FTB70\_FCI30\_140PPM, 3D: FTB80\_FCI20\_140PPM, 3E: FTB90\_FCI10\_140PPM, 3F: FTB100\_FCI0\_140PPM. \*: Controle

Quando se trata de aspectos de qualidade a constituição proteica é o principal fator que interfere nos resultados, haja vista que as proteínas do centeio e do trigo apresentam diferenças qualitativas e quantitativas distintas. Essa diferença é clara na estrutura que compõem suas proteínas. O glúten do trigo é composto por subunidades de glúten de alto peso molecular (HMW) e de baixo peso molecular (LMW) estabilizadas por ligações dissulfeto intermoleculares (Wieser; Kieffer, 2001), enquanto as proteínas do centeio não possuem subunidades de glúten de baixo peso molecular. Embora o centeio também contenha subunidades HMW (secalinas HMW), a capacidade de formar ligações dissulfeto intermoleculares é inferior em comparação com as subunidades de glúten HMW do trigo (Köhler; Wieser, 2000).

Assim, o desempenho da farinha de centeio (*Secale cereale*L.) é limitado levando o seu desempenho na panificação basear-se principalmente nas propriedades de intumescimento dos pentosanas endógenas (Delcour *et al.*, 1991, Vinkx; Delcour, 1996). Em circunstâncias específicas, as pentosanas são capazes de ligar a água e aumentar a viscosidade da massa, melhorando assim as suas propriedades de fluidez e a sua forma durante a fermentação e a cozimento. Entretanto, apesar desse desempenho, segundo Wang, (2003) a massa formada a partir do centeio também forma uma camada semelhante a gel nas partículas de farinha, dificultando a agregação das proteínas.

De acordo com Noort *et al.* (2010), a presença de farelo adicionado ou integral em massas, tende a causar leve efeito negativo no volume de pães, indicando que o efeito de diluição da rede de glúten é um fator que ocorre associado aos efeitos negativos da granulometria do farelo no volume de pães.

Neste estudo foi verificado um alto teor de fibras no constituinte da FCI o qual é majoritariamente constituído por fibras insolúveis (tabela 5). De acordo com Chen, (1988) irá causar um efeito negativo à massa do pão aumentando a densidade do pão enquanto que o volume vai diminuído à medida que as concentrações de material fibroso aumentam. Em estudos de Huang, *et al.*, (2018), com adição de farelo, este resultado está relacionado com o efeito de interferência nas propriedades de agregação do glúten que pode ser alterada por interações hidrofóbicas e/ou eletrostáticas induzidas por componentes do farelo, como fibra alimentar insolúvel.

Por sua vez, a adição de enzima transglutaminase consegue contornar as barreiras constitucionais. A grande maioria dos tratamentos tiveram melhoras consideráveis e proporcionaram maiores valores no Volume Específico e Densidade. O volume teve aumento máximo de 89,67% e a densidade reduziu em 50% (FTB90\_FCI10\_ 85PPM)

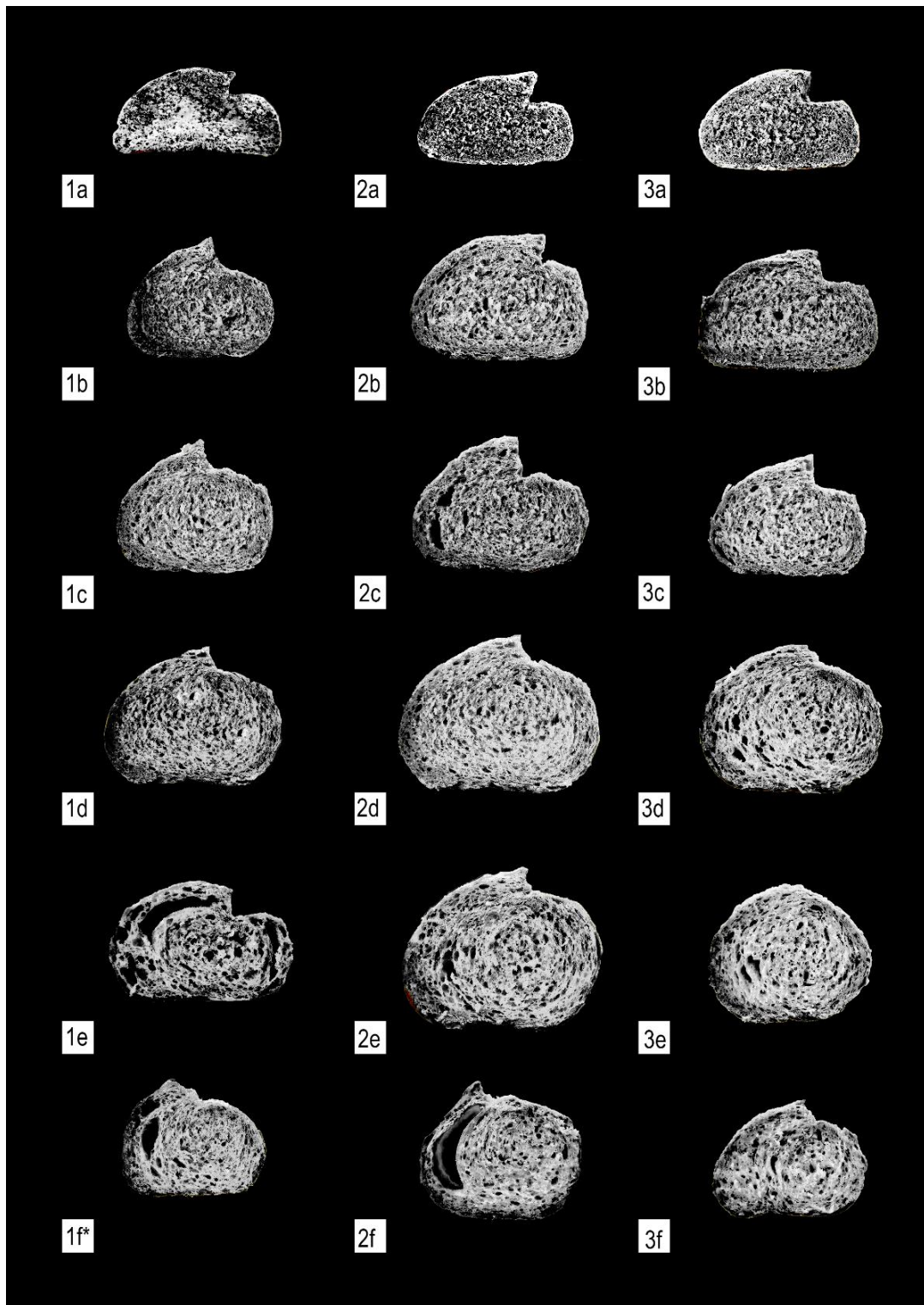
devido a sua estrutura mais porosa. Foi perceptível a presença de craquelado em tratamentos com a enzima e percentuais de 20% e 10% de FCI, a abertura de pestanas também foi otimizada, bem abertas e parentes (figura 11 e 12).

As características citadas estão de acordo a estudos realizados Motoki; Seguro (1998); Bauer *et al.*, 2003; Beck *et. al.*, (2011), afirmam que atributo de qualidade como o volume do pão poderia ser melhorado pela ação da enzima transglutaminase, como resultado da reestruturação proteica através da formação da rede intra e intermolecular, capaz de suportar a dilatação da massa quando da fermentação e cozimento.

Os efeitos da formação da rede tridimensional e sua promoção de uma fortificação significativa da massa elaborada, resulta em melhor retenção de CO<sub>2</sub>. Isso leva a um tamanho e distribuição mais homogêneos das células de gás no interior da massa, como evidenciado na figura 13. Esses efeitos foram mais expressivos nos tratamentos com teor de 85 ppm.



**Figura 13** - Corte transversal dos pães formulados com redução do brilho, aumento de contraste e redução dos tons de amarelo e vermelho.



Fonte: Autor (2024). 1A: FTB0\_FCI100\_0PPM, 1B: FTB60\_FCI40\_0PPM, 1C: FTB70\_FCI30\_0PPM, 1D: FTB80\_FCI20\_0PPM, 1E: FTB90\_FCI10\_0PPM, 1F: FTB100\_FCI0\_0PPM, 2A: FTB0\_FCI100\_85PPM, 2B: FTB60\_FCI40\_85PPM, 2C: FTB70\_FCI30\_85PPM, 2D: FTB80\_FCI20\_85PPM, 2E: FTB90\_FCI10\_85PPM, 2F: FTB100\_FCI0\_85PPM, 3A: FTB0\_FCI100\_140PPM, 3B: FTB60\_FCI40\_140PPM, 3C: FTB70\_FCI30\_140PPM, 3D: FTB80\_FCI20\_140PPM, 3E: FTB90\_FCI10\_140PPM, 3F: FTB100\_FCI0\_140PPM. \*: Controle .

A adição de TGase (85 ppm e 140 ppm) resulta em pães com volumes significativamente maiores e densidades menores comparados aos pães sem TGase. Isso indica que a TGase melhora a estrutura da massa, permitindo maior expansão e formação de uma rede mais estável durante o cozimento.

A análise dos dados revela que a combinação de diferentes proporções de farinha de trigo branca e farinha de centeio integral, junto com a adição de TGase, tem um impacto significativo na qualidade dos pães. A TGase melhora consideravelmente o volume ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) e a densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) dos pães, especialmente em proporções mais altas de FTB. Esses resultados sugerem que a TGase pode ser um aditivo valioso na produção de pães, melhorando sua estrutura e propriedades reológicas.

As formulações com 85 ppm e 140 ppm de TGase, especialmente aquelas com 80% e 90% de FTB, produziram pães com as melhores características em termos de volume e densidade, destacando o potencial da TGase para otimizar a qualidade dos pães. O uso de enzimas, em especial a transglutaminase, para a substituição total ou parcial de aditivos na indústria alimentícia pode ser expandido, pois ainda há aplicações pouco exploradas.

### **5.3.3 Análise do perfil de textura do pão assado.**

A Tabela 14 apresenta uma análise abrangente do perfil de textura dos pães assados, conforme os tratamentos aplicados aos grupos A, B, C, D, E, F. A tabela examina os atributos de Firmeza, Fraturabilidade, Adesividade, Elasticidade, Coesividade e Resiliência. Os dados são apresentados para cada grupo de tratamento, permitindo uma comparação detalhada das alterações texturais resultantes das diferentes combinações de FTI, FCI e enzima transglutaminase. Esta análise é fundamental para entender como as variações nos tratamentos influenciam as propriedades sensoriais e funcionais dos pães assados.

**Tabela 14** - Análise do perfil de textura dos pães assados e tratamentos dos grupos (a), (b), (c), (d) e (e).

Grupos	Tratamentos (FTI FCI TGase)	Firmeza (g)	Fraturabilidade (g)	Adesividade (g.s)	Elasticidade (adim)	Coesividade (adim)	Resiliência (adim)
A	FTB0_FCI100_0PPM	31.906,73 ± 4.089,35 <sup>a</sup>	20.292,57 ± 355,60	<b>-1,55 ± 1,53<sup>a</sup></b>	0,88 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,69 ± 0,01 <sup>a,b</sup>	0,36 ± 0,02 <sup>a</sup>
	FTB0_FCI100_85PPM	33.727,82 ± 5.518,16 <sup>a</sup>	ausente	-1,01 ± 0,42 <sup>a,b</sup>	0,89 ± 0,00 <sup>a</sup>	0,69 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,38 ± 0,01 <sup>b</sup>
	FTB0_FCI100_140PPM	<b>37.136,02 ± 3.759,15<sup>a</sup></b>	ausente	-1,08 ± 0,68 <sup>b</sup>	<b>0,89 ± 0,01<sup>b</sup></b>	<b>0,70 ± 0,01<sup>b</sup></b>	<b>0,39 ± 0,01<sup>b</sup></b>
B	FTB60_FCI40_0PPM	14.528,50 ± 1.621,78 <sup>a</sup>	5.954,27 ± 37,52	-0,45 ± 0,15 <sup>a,b</sup>	<b>0,92 ± 0,01<sup>a</sup></b>	0,62 ± 0,00 <sup>a</sup>	0,25 ± 0,00 <sup>a</sup>
	FTB60_FCI40_85PPM	18.306,65 ± 1.908,53 <sup>b</sup>	ausente	<b>-0,97 ± 0,77<sup>a</sup></b>	0,91 ± 0,00 <sup>a</sup>	<b>0,64 ± 0,02<sup>b</sup></b>	0,24 ± 0,01 <sup>b</sup>
	FTB60_FCI40_140PPM	<b>22.566,89 ± 3.971,71<sup>c</sup></b>	ausente	-0,73 ± 0,38 <sup>b</sup>	0,92 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,64 ± 0,01 <sup>c</sup>	<b>0,25 ± 0,00<sup>c</sup></b>
C	FTB70_FCI30_0PPM	6.275,03 ± 794,12 <sup>a</sup>	ausente	-1,72 ± 0,33 <sup>a</sup>	0,90 ± 0,07 <sup>a</sup>	0,70 ± 0,03 <sup>a</sup>	0,29 ± 0,02 <sup>a</sup>
	FTB70_FCI30_85PPM	<b>7.993,04 ± 980,48<sup>b</sup></b>	ausente	-1,54 ± 0,67 <sup>b</sup>	<b>0,90 ± 0,06<sup>b</sup></b>	0,68 ± 0,01 <sup>b</sup>	0,28 ± 0,01 <sup>b</sup>
	FTB70_FCI30_140PPM	6.378,65 ± 947,11 <sup>c</sup>	ausente	<b>-2,43 ± 1,24<sup>b</sup></b>	0,89 ± 0,09 <sup>a</sup>	<b>0,71 ± 0,03<sup>c</sup></b>	<b>0,30 ± 0,03<sup>c</sup></b>
D	FTB80_FCI20_0PPM	4.126,78 ± 334,69 <sup>a</sup>	1.606,50 ± 316,80 <sup>a</sup>	-0,65 ± 0,29 <sup>a</sup>	<b>0,91 ± 0,04<sup>a</sup></b>	<b>0,69 ± 0,03<sup>a</sup></b>	<b>0,27 ± 0,03<sup>a</sup></b>
	FTB80_FCI20_85PPM	3.859,77 ± 586,78 <sup>b</sup>	1.509,27 ± 13,33 <sup>b</sup>	<b>-0,66 ± 0,56<sup>b</sup></b>	0,90 ± 0,05 <sup>a</sup>	0,68 ± 0,03 <sup>b</sup>	0,27 ± 0,03 <sup>b</sup>
	FTB80_FCI20_140PPM	<b>4.239,96 ± 845,22<sup>c</sup></b>	<b>2.656,81 ± 425,63<sup>c</sup></b>	-0,50 ± 0,23 <sup>a,b</sup>	0,89 ± 0,04 <sup>b</sup>	0,63 ± 0,03 <sup>c</sup>	0,24 ± 0,02 <sup>c</sup>
E	FTB90_FCI10_0PPM	3.701,58 ± 393,96 <sup>a</sup>	2.606,23 ± 479,72 <sup>a</sup>	<b>-2,58 ± 0,74<sup>a</sup></b>	0,87 ± 0,03 <sup>a</sup>	0,55 <sub>aq</sub> ± 0,04 <sup>a</sup>	0,19 ± 0,02 <sup>a</sup>
	FTB90_FCI10_85PPM	<b>4.064,74 ± 372,29<sup>b</sup></b>	<b>3.109,53 ± 800,83<sup>b</sup></b>	-2,22 ± 1,34 <sup>a</sup>	0,88 ± 0,02 <sup>b</sup>	0,52 ± 0,02 <sup>b</sup>	0,16 ± 0,02 <sup>b</sup>
	FTB90_FCI10_140PPM	4.030,13 ± 529,69 <sup>c</sup>	2.623,47 ± 321,78 <sup>a,b</sup>	-1,01 ± 0,07 <sup>a</sup>	<b>0,91 ± 0,01<sup>a,b</sup></b>	<b>0,58 ± 0,01<sup>c</sup></b>	<b>0,21 ± 0,01<sup>c</sup></b>
F	FTB100_FCI0_0PPM	3.420,96 ± 376,39 <sup>a</sup>	1.378,13 ± 242,12 <sup>a</sup>	-0,58 ± 0,43 <sup>a</sup>	<b>0,91 ± 0,01<sup>a</sup></b>	<b>0,61 ± 0,01<sup>a</sup></b>	<b>0,24 ± 0,01<sup>a</sup></b>
	FTB100_FCI0_85PPM	<b>4.990,43 ± 421,58<sup>b</sup></b>	4.206,34 ± 467,22 <sup>b</sup>	<b>-0,84 ± 0,37<sup>a</sup></b>	0,84 ± 0,04 <sup>b</sup>	0,45 ± 0,03 <sup>b</sup>	0,15 ± 0,02 <sup>b</sup>
	FTB100_FCI0_140PPM	4.150,24 ± 323,54 <sup>c</sup>	<b>4.255,95 ± 407,21<sup>b</sup></b>	-0,37 ± 0,23 <sup>a</sup>	0,89 ± 0,02 <sup>c</sup>	0,57 ± 0,02 <sup>c</sup>	0,21 ± 0,01 <sup>c</sup>

Fonte: Autor (2024).

Os pães do Grupo A, isto é, pães formulados apenas com farinha integral de centeio, o pão que apresentou a maior Firmeza foi o do tratamento FTB0\_FCI100 com 140 ppm de transglutaminase, apresentando 37.136,02 g, que indica uma textura muito robusta e resistente ao ser comprimido, seguido do FTB0\_FCI100\_85PPM e FTB0\_FCI100\_0PPM. Nesse atributo sensorial não houve diferença estatística significativa entre as amostras ( $p > 0,05$ ).

Neste caso, fraturabilidade é indicada como "ausente" para os tratamentos FTB0\_FCI100, onde houve adição de transglutaminase em 85 ppm e 140 ppm, respectivamente. A ausência de fraturabilidade sugere que a massa não quebrou facilmente sob pressão, o que é um indicativo de pouca crocância.

Para adesividade do Grupo A (FTB0\_FCI100), o maior valor reportado foi do tratamento sem TGase, com -1,55 g.s (o sinal é negativo porque a força é de retirada da sonda da amostra e não mais de compressão). Isso demonstra o que já se via na elaboração dos pães, uma massa muito "pegajosa", com muita aderência nas superfícies dos equipamentos e utensílios. Essa adesividade se manteve nos pães assados. As outras amostras (FTB0\_FCI100\_85PPM e FTB0\_FCI100\_140PPM) não apresentaram diferença significativa entre si ( $P > 0,05$ ).

A maior elasticidade, e relacionada à capacidade da massa de voltar à sua forma original após a deformação, foi consistentemente alta em todos os tratamentos do grupo A, com maior valor para a amostra FTB0\_FCI100 com 140 ppm de TGase, as outras amostras não apresentaram valores de elasticidade com diferença significativa entre si.

Já a coesividade, que mede a extensão na qual o pão pode ser deformado antes de se romper, teve por valor mais alto, 0,70 no tratamento FTB0\_FCI100\_140PPM, indicando uma boa capacidade de o pão manter-se unido quando submetido a tensão. As outras amostras (FTB0\_FCI100\_0PPM e FTB0\_FCI100\_85PPM) não apresentaram diferença significativa entre si ( $p > 0,05$ ).

Por sua vez, a maior resiliência, que mede a capacidade do pão de absorver energia antes de se deformar permanentemente, foi também do tratamento FTB0\_FCI100 com 140 ppm de transglutaminase, com 0,39, sugerindo uma melhor capacidade de recuperação da forma após a compressão.

Estes resultados destacam como a adição de transglutaminase em maior quantidade (140 ppm) em pães de centeio integral pode significativamente melhorar várias propriedades mecânicas, contribuindo para um produto de maior qualidade em termos de textura e

integridade estrutural. Como já apresentado nas propriedades de Volume Específico e Densidade.

Ao se avaliar as propriedades de textura do Grupo B, isto é (FTB60\_FCI40), com ou sem adição de TGase, existe um aumento progressivo na firmeza com o aumento da concentração da TGase. As três amostras (sem TGase, 85 ppm de TGase e 140ppm de TGase) apresentaram diferença significativa ( $p < 0,05$ ). Isso sugere que a enzima contribui significativamente para fortalecer a estrutura da massa, possivelmente promovendo ligações cruzadas entre as proteínas do trigo e do centeio, o que resulta em uma textura mais robusta.

Por sua vez, sabendo que a fraturabilidade mede a crocância do pão, então a presença deste parâmetro pode indicar um exterior crocante, que muitos consumidores apreciam, especialmente em pães artesanais ou rústicos. Nesse sentido, a introdução de transglutaminase na mistura de FTB e FCI parece ter um impacto direto na diminuição da crocância do pão, como evidenciado pela ausência de fraturabilidade nos tratamentos com adição de enzima, e esse efeito pode ser visto como um instrumento na melhoria na integridade estrutural do pão, entretanto, é importante considerar as preferências do consumidor por características sensoriais específicas, como a crocância, que pode ser valorizada em certos tipos de pão.

A adesividade por sua vez, aumenta para 0,97 g.s, com a primeira adição de enzima no grupo B (85 ppm) e depois diminui um pouco para 0,73 g.s, com uma dose ainda maior (140 ppm). E menor ainda na amostra sem adição de TGase. Isso pode refletir mudanças na viscosidade e tensão superficial da massa cozida, que afeta a interação do pão com a superfície que o comprime.

A coesividade das três amostras apresentara diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ), com a amostra com 85 ppm de TGase com o maior valor de coesividade (0,64) e o menor valor a amostra sem adição da enzima TGase (0,62).

Já o atributo resiliência foi maior para a amostra com 140 ppm de TGase (0,25) e o menor valor para a amostra com 85 ppm de TGase (0,24), as três amostras apresentaram diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ).

Esses resultados mostram que a adição de transglutaminase a uma mistura de farinhas de trigo e centeio, na proporção de 60% para farinha de trigo branca e 40% de farinha de centeio integral, altera favoravelmente as propriedades mecânicas do pão, aumentando especialmente a firmeza e melhorando a integridade estrutural, o que é desejável em produtos de panificação para melhorar a textura e a experiência sensorial.

Em relação ao Grupo C (FTB70\_FCI30), no atributo firmeza, o valor mais alto é observado no tratamento FTB70\_FCI30 com 85 ppm de enzima (7993,04 g), sugerindo uma textura mais firme neste ponto de adição de enzima, enquanto que, a ausência de fraturabilidade em todos os tratamentos indica que a adição de transglutaminase não favoreceu a crocância externa do pão. Já a maior adesividade esteve presente no tratamento FTB70\_FCI30 com 140 ppm de TGase, seguido da amostra sem adição da enzima e com 85 ppm de TGase.

A amostra com maior elasticidade foi com adição de 85 ppm (0,90) de TGase, seguido da amostra sem enzima (0,90) e, subsequentemente, da amostra com 140 ppm de TGase (0,89). Os resultados são muito próximos, embora tenham apresentado diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ).

Nos atributos coesividade e resiliência, as amostras apresentaram comportamento semelhante, sendo maior coesividade na amostra com 140 ppm (0,71) de TGase, seguido da amostra sem enzima (0,70) e da amostra com 85 ppm (0,68). Já para resiliência os valores foram 0,30 (140ppm de TGase), 0,29 (sem adição de TGase) e 0,28 (85 ppm de TGase). Nesses dois atributos houve uma diferença estatística significativa.

A adição de transglutaminase em pães com 70% de farinha de trigo e 30% de centeio integral influencia significativamente todos os atributos de textura do teste TPA (Análise do Perfil de Textura), a exceção da fraturabilidade (crocância), que esteve ausente nas três amostras (sem TGase, 85 ppm e 140 ppm). Isso sugere que a transglutaminase aumenta a pegajosidade, firmeza, elasticidade, coesividade e resiliência sem promover características desejadas de crocância.

Em relação ao Grupo D (FTB80\_FCI20), os maiores valores de elasticidade, coesividade e resiliência foram para as amostras sem adição de enzima, onde, aparentemente, a enzima TGase, que mesmo com indícios de formação de rede proteica inter e intramolecular não afetou positivamente esses atributos.

A firmeza mostra uma leve redução com a adição de 85 ppm (3859,77 g), quando comparada a amostra sem enzima (4126,78 g) de enzima, mas aumenta novamente com 140 ppm (4239,96 g), com as três amostras apresentando uma diferença estatística significativa. Isso indica que a transglutaminase tem um efeito positivo na firmeza nesta composição específica de farinhas.

Há um aumento notável na fraturabilidade com 140 ppm de enzima, indicando uma casca mais crocante neste nível de adição. Este é o maior valor de fraturabilidade observado neste grupo, sugerindo que uma maior quantidade de enzima pode promover uma textura

mais desejável em termos de crocância para alguns consumidores, nesta composição do sistema de farinhas.

A adesividade é mais alta (mais pegajosa, maior tensão superficial) sem a adição de enzima em 85 ppm, diminui com 140 ppm e volta a subir na amostra sem adição de TGase, mostrando uma tendência de menor adesão à sonda de compressão à medida que a concentração de enzima é maior (140 ppm).

Nos atributos elasticidade, coesividade e resiliência, essas propriedades diminuem levemente com o aumento da concentração de enzima. A redução na elasticidade e coesividade pode indicar uma rede de glúten ligeiramente menos flexível e menos coesa com mais enzima adicionada.

Os pães formulados do grupo D (FTB80\_FCI20), mostram uma resposta interessante à adição de transglutaminase, especialmente na fraturabilidade, onde uma maior concentração de enzima promoveu uma crocância significativamente maior. A firmeza e a adesividade também são influenciadas pela enzima, mas de maneira menos pronunciada, indicando que a transglutaminase pode ser utilizada para ajustar essas propriedades de forma mais controlada. A diminuição na elasticidade, coesividade e resiliência sugere que nessa composição de farinhas não há um efeito positivo nessas propriedades dos pães assados.

Em relação ao Grupo E (FTB90\_FCI10), o qual é grupo com menor proporção de farinha de centeio integral (10% apenas), o sistema com 85 ppm de TGase apresenta uma maior firmeza e Fraturabilidade, seguido do sistema com 140 ppm e sem adição de enzima. Isso indica que a adição de transglutaminase tem um efeito estabilizador na firmeza do pão assado. Indicando, também, uma casca mais crocante neste nível de adição. No entanto, ela diminui novamente com 140 ppm (2.623,47 g), sugerindo que há um ponto ótimo para a adição de transglutaminase que maximiza a crocância.

No adesividade, os valores maiores foram para a amostra sem adição de enzima, embora as três amostras não tenham mostrado uma diferença estatística significativa entre elas.

A elasticidade por sua vez, aumenta com a adição de transglutaminase, com o valor mais alto em 140 ppm (0,91), sugerindo que o pão assado se torna mais elástico e capaz de retornar à sua forma original após compressão.

A coesividade diminui ligeiramente com 85 ppm (0,52) de enzima, mas aumenta novamente com 140 ppm (0,58), indicando que o pão assado se mantém mais unido com maior adição de transglutaminase. Com a amostra sem adição de enzima mostrando um valor intermediário (0,55).

A resiliência diminui ligeiramente com 85 ppm (0,16) de enzima, mas aumenta novamente com 140 ppm (0,21), o que sugere que a capacidade do pão de recuperar sua forma após compressão melhora com a maior adição de enzima. Com a amostra sem adição de enzima mostrando um valor intermediário (0,19).

Os pães do grupo E com 90% de farinha de trigo e 10% de centeio integral apresentam variações nas propriedades mecânicas com a adição de transglutaminase. A firmeza e a elasticidade aumentam ligeiramente com a adição da enzima, enquanto a adesividade diminui, tornando o pão menos pegajoso ao ser comprimido. A fraturabilidade atinge seu pico com 85 ppm de enzima, sugerindo uma casca mais crocante nesse nível de adição. A coesividade, elasticidade e resiliência melhoram com 140 ppm de enzima, indicando um pão mais unido e resiliente.

Em relação ao Grupo F (FTB100\_FCI0), isto é, o grupo de amostras produzidas com farinha de trigo branca apenas, a firmeza aumenta significativamente com a adição de 85 ppm de enzima (4.990,43 g), e diminui ligeiramente com 140 ppm de enzima (4.150,24 g), mas ainda é maior do que sem enzima. Isso sugere que a transglutaminase fortalece a estrutura do pão, tornando-o mais firme.

A fraturabilidade, que indica crocância, aumenta substancialmente com a adição de enzima, especialmente em 140 ppm (4.255,95 g). Isso sugere que a transglutaminase pode melhorar a crocância da casca do pão.

A adesividade é maior no tratamento com 85 ppm de TGase (0,84), menor no sistema com 140 ppm (0,37) e com um valor intermediário nas amostras sem enzima. Isso indica que o pão se torna menos aderente à sonda de compressão com a adição de transglutaminase em 140 ppm.

A elasticidade diminui com a adição de enzima, sendo a mais baixa com 85 ppm (0,84 adim) e recupera ligeiramente com 140 ppm (0,89 adim). A amostra tem maior Elasticidade sem adição de enzima. Isso sugere que a transglutaminase pode tornar a massa menos elástica.

A coesividade e a resiliência mostram comportamento similar à Elasticidade, com maiores valores para as amostras sem adição de TGase, valores intermediários com 85 ppm e menores valores com níveis de 140 ppm de TGase.

Os pães mostram uma resposta clara à adição de transglutaminase, com aumento significativo na firmeza e fraturabilidade (crocância). Adesividade é maior na amostra com 85 ppm de enzima. A elasticidade, coesividade e resiliência são maiores nas amostras sem adição de enzima.



Após analisar todos os grupos de pães com diferentes composições de farinha de trigo branca e centeio integral em diferentes níveis de adição de transglutaminase, se conclui que os maiores valores de firmeza são encontrados nos pães com maior proporção de farinha de centeio (100%, 40% e 30%), enquanto os pães com proporção de farinha de trigo branca, na ordem de 100%, 90% e 80% apresentaram valores muito próximos em todos os atributos de textura instrumental avaliados por TPA. Isso indica que a combinação de centeio integral, que é naturalmente mais denso e menos elástico devido ao baixo teor de glúten, com a enzima que promove ligações cruzadas entre proteínas, resulta em um pão extremamente mais firme e sem fraturabilidade (crocância), enquanto os pães com maiores teores de farinha de trigo branca apresentaram esse atributo. A farinha de trigo, rica em glúten, proporciona uma estrutura que beneficia a ação da transglutaminase, resultando em uma casca mais crocante.

A elasticidade mais alta foi observada em pães com uma mistura de trigo e centeio, tanto com 0 ppm quanto com 140 ppm de transglutaminase. Isso sugere que a combinação de trigo e centeio com transglutaminase pode otimizar a elasticidade do pão, ajudando-o a retornar à forma após deformação.

A maior coesividade foi observada em pães com 70% de trigo e 30% de centeio, com a adição máxima de transglutaminase. Isso indica que esta combinação proporciona uma massa que se mantém bem unida, possivelmente devido à formação de uma rede de proteínas mais forte e coesa.

A maior resiliência foi observada em pães feitos exclusivamente com farinha de centeio integral e a adição máxima de transglutaminase. A Resiliência reflete a capacidade do pão de recuperar sua forma após compressão, e a presença de centeio integral combinada com a ação da enzima parece promover essa característica.

A adição de transglutaminase tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas de pães feitos com diferentes composições de farinha de trigo e centeio. Para pães mais firmes e crocantes, a combinação de farinha de trigo com transglutaminase é ideal. Para pães com maior resiliência e firmeza, a farinha de centeio integral combinada com transglutaminase oferece os melhores resultados. A escolha da combinação de farinhas e adição de enzima deve ser ajustada conforme as propriedades de textura desejadas no produto.

A adição de TGase demonstrou melhorias significativas na estabilidade e coesão da massa dos pães. A TGase promove a formação de ligações cruzadas entre proteínas, fortalecendo a rede de glúten e proporcionando uma massa mais elástica e coesa. Esse efeito

é observado na análise de RVA, onde é especialmente evidente nos aumentos das viscosidades máxima, final e mínima, particularmente em formulações com maiores proporções de FTI.

De acordo com Tebben, *et al.*, (2018), a enzima transglutaminase desempenha um papel fundamental na melhoria das propriedades da massa e do pão integral de centeio, especialmente ao catalisar a formação de ligações cruzadas entre proteínas, o que reforça a rede de glúten. Estudos indicam que a transglutaminase pode melhorar as características sensoriais e texturais do pão, especialmente quando combinada com  $\alpha$ -amilase. Essa combinação mostrou aumentar o volume do pão, e diminuição da firmeza. No entanto, os efeitos benéficos são mais pronunciados no pão branco do que no pão integral. A adição isolada de transglutaminase ao pão integral de centeio resultou em aumento da firmeza inicial, redução do volume do pão e da Elasticidade, embora outras características sensoriais tenham sido melhoradas. A enzima também mostrou efeitos benéficos na diminuição da taxa de envelhecimento (*staling*) no pão branco de trigo, mas esses efeitos não foram observados no pão integral de centeio (Tebben *et al.*, 2018).

Em consonância com Bagdi *et al.* (2016), adição de farinha rica em aleurona (ARF) em produtos de panificação resulta em alterações significativas na qualidade do produto final, como redução do volume do pão, coloração mais escura do miolo e alterações na textura, tornando-a mais dura e menos coesa. A transglutaminase pode ser utilizada para criar ligações cruzadas entre proteínas, melhorando a rede de glúten e, conseqüentemente, a textura e volume do pão. Esse estudo mostrou que a transglutaminase tem efeitos positivos na qualidade reológica da massa, permitindo transformar um glúten muito fraco em um mais forte, o que pode compensar alguns dos efeitos negativos da adição de farinha rica em aleuron (fibras solúveis).

Gerrard *et al.*, (2004) afirmam que a enzima transglutaminase influencia positivamente as propriedades texturais e o envelhecimento do pão de trigo sarraceno e centeio. A enzima promoveu a formação de ligações cruzadas entre proteínas, resultando em uma rede de glúten mais forte e coesa. Isso melhorou a textura do pão, tornando-o mais macio e menos propenso ao endurecimento durante o armazenamento. A adição de transglutaminase também ajudou a manter a qualidade sensorial do pão por mais tempo.

## 6 CONCLUSÃO

Neste estudo, o efeito da TGase sobre as propriedades físicas do centeio, como substituto parcial do trigo, pôde ser aprofundado. A enzima otimiza o desempenho da massa em decorrência da reticulação das proteínas que compõem as farinhas. A reticulação aumenta com o conteúdo proteico presente na mistura, cujo potencial de reticulação se define pelo balanço das farinhas utilizadas, especialmente na presença de FTB.

O efeito de reestruturação das proteínas foi observado durante o processo de aquecimento e resfriamento em excesso de água, por RVA, que demonstrou que a coesão e a estabilidade da pasta foram intensificadas pelo aumento da interação entre as proteínas reticuladas e os componentes poliméricos dos grânulos de amido dispersos no meio.

Os testes de oscilação por varredura de frequência mostram que as massas têm um caráter sólido-elástico mais pronunciado em comparação ao perfil líquido-viscoso nas faixas de frequência. Segundo a Lei da Potência, apresentaram um aumento com o teor da enzima transglutaminase que afeta o coeficiente da viscosidade ( $k$ ), seguindo a mesma tendência para os valores de do módulo elástico ( $G'$ ) e reflete o fortalecimento da rede de glúten.

Os testes de textura da massa crua, por extensão, mostram que concentrações de enzima (85 ppm) apresentam melhores resultados de resistência à extensão, elasticidade e energia, quando comparadas a concentrações mais elevadas. É verificado em DSC que esse comportamento, está vinculado a presença de uma maior massa molecular de caráter intermolecular, estabilizada covalentemente que necessita de mais energia térmica para alterar sua estabilidade. Por outro lado, altas concentrações (140 ppm) se sobrepõem ao quantitativo de proteínas. Nesse caso, devido ao excesso de sítios ativos livres, a reticulação ocorre de forma intramolecular mais intensa e/ou mais de uma vez em uma mesma molécula, já catalisada ou não, resultando no enclausuramento interno da molécula, e impede a formação de uma rede proteica mais aberta e ramificada, que regredi o efeito de coesão da massa.

A qualidade e quantidade da reestruturação proteica a tratamentos com 85 ppm foi confirmada nos testes experimentais dos pães assados (TPA, Volume Específico e Densidade). As características físicas foram aprimoradas, tais como crocância, firmeza, resiliência e coesividade, somadas a estrutura mais porosa e bem distribuída que proporcionam pães mais volumosos e menos densos. A formulação com 90% de farinha de trigo e 10% de farinha de centeio tratados com 85 ppm de TGase, se destaca com aumento de 89,7% do volume específico e redução de 50% da densidade. A TGase também

influenciou positivamente a coloração dos pães, minimizando o aspecto escurecido causado pelo excesso de fibras, que reduzem a luminosidade, conferindo um aspecto visual mais próximo ao dos pães de trigo tradicionais.

Assim, O uso da FCI como substituto parcial da FTB, aliado à aplicação de transglutaminase na faixa de 85 ppm, mostra-se promissor para desenvolver um produto rico em fibras com características sensoriais otimizadas. No entanto, a escolha das proporções de farinhas e da concentração de TGase deve ser ajustada para alcançar as características texturais desejadas, visando melhorar a qualidade e atender às necessidades do nicho de mercado escolhido. É importante destacar que mais estudos são necessários para entender melhor o comportamento das enzimas e seus efeitos em meio a outros componentes melhoradores para a otimização de aspectos de qualidade de pães, destinados a pesquisas futuras.

## REFERÊNCIAS

- AACC International Approved Methods of Analysis, 10th Ed. **Approved November 8, 2000. AACC International**, St. Paul, MN, U.S.A.
- AKBARI, Mehdi; RAZAVI, Seyed Hadi; KIELISZEK, Marek. Recent advances in microbial transglutaminase biosynthesis and its application in the food industry. **Trends in Food Science & Technology**, v. 110, p. 458-469, 2021.
- AKHARUME, Felix U.; ALUKO, Rotimi E.; ADEDEJI, Akinbode A. Modification of plant proteins for improved functionality: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 1, p. 198-224, 2021.
- ALKUWARI, Asma *et al.* Occurrence of mycotoxins and toxigenic fungi in cereals and application of yeast volatiles for their biological control. **Toxins**, v. 14, n. 6, p. 404, 2022.
- ALMEIDA, Eveline Lopes; CHANG, Yoon Kil; STEEL, Caroline Joy. Dietary fibre sources in bread: Influence on technological quality. **LWT-Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 545-553, 2013.
- Alvarez-Jubete, L., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2010). Quality characteristics of gluten-free bread as affected by the addition of dairy powders. **European Food Research and Technology**, 231, 437-445.
- ALVAREZ-JUBETE, Laura *et al.* Baking properties and microstructure of pseudocereal flours in gluten-free bread formulations. **European Food Research and Technology**, v. 230, p. 437-445, 2010.
- AMARAL, Olga *et al.* Resistant starch production in wheat bread: effect of ingredients, baking conditions and storage. **European Food Research and Technology**, v. 242, p. 1747-1753, 2016.
- ANDERSSON, Annica AM *et al.* Alkylresorcinols in wheat and rye flour and bread. **Journal of food composition and analysis**, v. 23, n. 8, p. 794-801, 2010.
- ANDERSSON, Roger *et al.* Content and molecular-weight distribution of dietary fiber components in whole-grain rye flour and bread. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 5, p. 2004-2008, 2009..
- ANDO, Hiroyasu, et al. "Purification and characteristics of a novel transglutaminase derived from microorganisms." **Agricultural and biological chemistry** 53.10 (1989): 2613-2617.
- ANDRADE, Hilzette PC *et al.* Cure behavior of epoxy adhesive containig mercaptan group evaluated by infrared spectroscopy (MIR/NIR) and differential scanning calorimetry (DSC). **Polímeros**, v. 18, p. 359-365, 2008.
- ANDREASEN, Mette F. *et al.* Antioxidant effects of phenolic rye (*Secale cereale* L.) extracts, monomeric hydroxycinnamates, and ferulic acid dehydrodimers on human low-density lipoproteins. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, n. 8, p. 4090-4096, 2001.
- APOLINÁRIO, Alexandra Conceição et al. Inulin-type fructans: A review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. **Carbohydrate polymers**, v. 101, p. 368-378, 2014.
- APONTE, Maria *et al.* Effects of fermentation and rye flour on the microstructure and volatile compounds of chestnut flour-based sourdoughs. **LWT - Food Science and Technology**, v. 2, p. 387-395, 2014.
- APRODU, Iuliana; BANU, Iuliana. Comparative analyses of physicochemical and technological properties of triticale, rye and wheat. **The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI-Food Technology**, v. 40, n. 2, p. 31-39, 2016.
- ARENDDT, Elke K.; ZANNINI, Emanuele. **Cereal grains for the food and beverage industries**. Elsevier, 2013.
- AREPALLY, Divyasree *et al.* Biscuit baking: A review. **Lwt**, v. 131, p. 109726, 2020.
- Association of Official Analytical Chemists International - AOAC. **Official Methods of Analysis**. 15th edition. Washington, D.C., 1995. p.1141.
- ATWELL, W. A. Wheat flour: practical guide for the food industry. **St. Paul: American Association of Cereal Chemists**, 2001.
- ÁUCIO, Karin; ELIASSON, Ann-Charlotte. Oat starch. In: **Starch**. Academic Press, 2009. p. 589-599.
- AURA, A.-M. *et al.* Interrelationships between carbohydrate type, phenolic acids and initial pH on in vitro conversion of enterolactone from rye lignans. In: **Dietary fibre components and functions**. Wageningen Academic, 2007. p. 235-245.
- AZUDIN, N. The Milling process. In: POPPER, Lutz; SCHÄFER, Werner; FREUND, Walter (Ed.). **Future of flour: A compendium of flour improvement**. AgriMedia, 2006.

BAIER, A. C. Centeio. Passo Fundo: **EMBRAPA** - CNPT, 1996. 29p. (EMBRAPA CNPT - documento, 15).

BAJERSKA, Joanna *et al.* Effect of rye bread enriched with tomato pomace on fat absorption and lipid metabolism in rats fed a high-fat diet. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 9, p. 1918-1924, 2015b.

BAJERSKA, Joanna; MILDNER-SZKUDLARZ, Sylwia; WALKOWIAK, Jarosław. Effects of rye bread enriched with green tea extract on weight maintenance and the characteristics of metabolic syndrome following weight loss: a pilot study. **Journal of medicinal food**, v. 18, n. 6, p. 698-705, 2014a.

BALCEREK, Maria *et al.* Fermentation results and chemical composition of agricultural distillates obtained from rye and barley grains and the corresponding malts as a source of amylolytic enzymes and starch. **Molecules**, v. 21, n. 10, p. 1320, 2016.

BALL, Steven *et al.* From glycogen to amylopectin: a model for the biogenesis of the plant starch granule. **Cell**, v. 86, n. 3, p. 349-352, 1996.

BANKS, W. *et al.* Physicochemical studies on starches. Part 63. The molecular size and shape of amylopectin. **Starch-Stärke**, v. 24, n. 8, p. 245-251, 1972.

BANU, Iuliana; VASILEAN, Ina; APRODU, Iuliana. Quality evaluation of the sourdough rye breads. The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. **Fascicle VI-Food Technology**, v. 35, n. 2, p. 94-105, 2011.

BAUER, Nicole *et al.* Studies on effects of microbial transglutaminase on gluten proteins of wheat. I. Biochemical analysis. **Cereal Chemistry**, v. 80, n. 6, p. 781-786, 2003.

BECK, M. *et al.* Rheological properties and baking performance of rye dough as affected by transglutaminase. **Journal of Cereal Science**, v. 54, n. 1, p. 29-36, 2011.

Beck, M., Jekle, M., Selmair, P. L., Koehler, P., & Becker, T. (2011). Rheological properties and baking performance of rye dough as affected by transglutaminase. **Journal of Cereal Science**, 54(1), 29-36.

BECK, Margit; JEKLE, Mario; BECKER, Thomas. Impact of sodium chloride on wheat flour dough for yeast-leavened products. I. Rheological attributes. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 92, n. 3, p. 585-592, 2012a.

BECKER, T.; JUNG, E.; TEUBER, R.; ENGELHARDT, H. Effects of transglutaminase on textural properties of rye dough and buckwheat-rye bread formulations. **Journal of Cereal Science**, v. 54, n. 1, p. 50-56, 2011.

BECKER, T.; JUNG, E.; TEUBER, R.; ENGELHARDT, H. Effects of transglutaminase on textural properties of rye dough and buckwheat-rye bread formulations. **Journal of Cereal Science**, v. 54, n. 1, p. 50-56, 2011.

BENKEBLIA, Noureddine. Fructooligosaccharides and fructans analysis in plants and food crops. **Journal of Chromatography A**, v. 1313, p. 54-61, 2013.

BERRY, C. P.; D'APPOLONIA, B. L.; GILLES, K. A. The characterization of triticale starch and its comparison with starches of rye, durum and HRS wheat. 1971.

BERTOFT, Eric; MANELIUS, Robin; QIN, Zhu. Studies on the Structure of Pea Starches. Part 1: Initial Stages in  $\alpha$ -Amylolysis of Granular Smooth Pea Starch. **Starch-Stärke**, v. 45, n. 7, p. 215-220, 1993.

BIAGI, J. D.; BERTOL, R.; CARNEIRO, M. C. Secagem de grãos para unidades centrais de armazenamento. **Armazenagem de grãos**, v. 1, 2002.

BILIADERIS, Costas G. Structural transitions and related physical properties of starch. In: **Starch**. Academic Press, 2009. p. 293-372.

BIRCH, Anja N. *et al.* Influence of commercial baker's yeasts on bread aroma profiles. **Food research international**, v. 52, n. 1, p. 160-166, 2013.

BLEKAS, Georgios. **Food additives: classification, uses and regulation**. Academic Press; Elsevier, 2016.

BLOKSMA, A. H. Rheology of the breadmaking process. **Cereal Foods World**, v. 35, p. 237-244, 1990.

BOBROW-STRAIN, Aaron. **White bread: a social history of the store-bought loaf**. Beacon Press, 2012.

BOCK, J. E.; WRIGLEY, C. W.; WALKER, C. E. **Bakeries: the source of our unique wheat-based food**, bread. 2016.

BOLLAÍN, C.; COLLAR, C. Dough viscoelastic response of hydrocolloid/enzyme/surfactant blends assessed by uni-and bi-axial extension measurements. **Food hydrocolloids**, v. 18, n. 3, p. 499-507, 2004.

BONA, Sarita de *et al.* Estudos da viabilidade da produção de pão francês a partir da massa congelada. 2002.

BORGES, JOÃO TOMAZ DA SILVA *et al.* Caracterização físico-química e reológica de farinhas mistas de trigo e linhaça. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 29, n. 2, 2011.

BOUKID, Fatma *et al.* A compendium of wheat germ: Separation, stabilization and food applications. **Trends in Food Science & Technology**, v. 78, p. 120-133, 2018.

BOUKID, Fatma *et al.* Pulses for bread fortification: A necessity or a choice?. **Trends in Food Science & Technology**, v. 88, p. 416-428, 2019.

BOURNE, M. C. Texture, viscosity and food. In: **Food texture and viscosity**. Concept and measurement. Academic Press, New York, p. 1–23, 1982.

BRANDOLINI, Andrea; HIDALGO, Alyssa. Wheat germ: not only a by-product. **International journal of food sciences and nutrition**, v. 63, n. sup1, p. 71-74, 2012.

BRANLARD, Gerard *et al.* Genetic diversity of wheat storage proteins and bread wheat quality. **Euphytica**, v. 119, n. 1, p. 59-67, 2001.

BRASIL. **INSTRUÇÃO NORMATIVA - Nº 211, DE 1º DE MARÇO DE 2023**. Estabelece as funções tecnológicas, os limites máximos e as condições de uso para os aditivos alimentares e os coadjuvantes de tecnologia autorizados para uso em alimentos. 2023e. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-in-n-211-de-1-de-marco-de-2023-468509746>. Acesso em: 10 mar. 2023.

BRASIL. **PORTARIA Nº 2.914, DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 2011a. Disponível em: [https://bvsm.sau.gov.br/bvs/sau/legis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html#:~:text=qualidade%20da%20%C3%A1gua.-,Art.,vigil%C3%A2ncia%20da%20qualidade%20da%20%C3%A1gua](https://bvsm.sau.gov.br/bvs/sau/legis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html#:~:text=qualidade%20da%20%C3%A1gua.-,Art.,vigil%C3%A2ncia%20da%20qualidade%20da%20%C3%A1gua). Acesso em: 04 jan. 2024.

BRASIL. **RESOLUÇÃO - RDC Nº 728, DE 1º DE JULHO DE 2022**. Dispõe sobre as enzimas e as preparações enzimáticas para uso como coadjuvantes de tecnologia na produção de alimentos destinados ao consumo humano. 2022d. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-728-de-1-de-julho-de-2022-413366697>. Acesso em: 10 mar. 2023.

BRASIL. **RESOLUÇÃO - RDC Nº 778, DE 1º DE MARÇO DE 2023**. Dispõe sobre os princípios gerais, as funções tecnológicas e as condições de uso de aditivos alimentares e coadjuvantes de tecnologia em alimentos. 2023c. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-rdc-n-778-de-1-de-marco-de-2023-468499613>. Acesso em: 10 mar. 2023.

BRASIL. **Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 711, de 1º de julho de 2022**. Dispõe sobre os requisitos sanitários dos amidos, biscoitos, cereais integrais, cereais processados, farelos, farinhas, farinhas integrais, massas alimentícias e pães. 2022b. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-711-de-1-de-julho-de-2022-413244942>. Acesso em: 04 mai. 2024.

BREDARIOL, Priscila; DE CARVALHO, Rosemary Aparecida; VANIN, Fernanda Maria. The effect of baking conditions on protein digestibility, mineral and oxalate content of wheat breads. **Food Chemistry**, v. 332, p. 127399, 2020.

BRESSIANI, Joseane *et al.* 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.

BUKSA, Krzysztof *et al.* Arabinoxylan-starch-protein interactions in specially modified rye dough during a simulated fermentation process. **Food Chemistry**, v. 253, p. 156-163, 2018.

BUKSA, Krzysztof *et al.* Characterization of water and alkali extractable arabinoxylan from wheat and rye under standardized conditions. **Journal of food science and technology**, v. 53, p. 1389-1398, 2016.

BUKSA, Krzysztof *et al.* Isolation, modification and characterization of soluble arabinoxylan fractions from rye grain. **European Food Research and Technology**, v. 235, p. 385-395, 2012.

BUKSA, Krzysztof. Extraction and characterization of rye grain starch and its susceptibility to resistant starch formation. **Carbohydrate polymers**, v. 194, p. 184-192, 2018.

BURRELL, M. M. Starch: the need for improved quality or quantity—an overview. **Journal of experimental Botany**, v. 54, n. 382, p. 451-456, 2003.

BURT, D. J.; RUSSELL, P. L. Gelatinization of low water content wheat starch—water mixtures. A combined study by differential scanning calorimetry and light microscopy. **Starch-Stärke**, v. 35, n. 10, p. 354-360, 1983.

BUSHUK, W. Rye production and uses worldwide. **Cereal Foods World**, v. 46, n. 2, p. 70-73, 2001a.

BUSHUK, W. Rye: production, chemistry, and technology. 2001.

BUTARDO JR, Vito M.; SREENIVASULU, Nese. Tailoring grain storage reserves for a healthier rice diet and its comparative status with other cereals. **International review of cell and molecular biology**, v. 323, p. 31-70, 2016.

CABALLERO, P.A.; GÓMEZ, M.; ROSSELL, C.M. Improvement of dough rheology, bread quality and bread shelf-life by enzymes combination. *Journal of Food Engineering*, v. 81, n. 1, p. 42-53, 2007.

CALDERÓN-DOMÍNGUEZ, Georgina *et al.* Structural and farinographic changes during mixing of a yeast sweet dough. **Food/Nahrung**, v. 47, n. 5, p. 312-319, 2003.

CALLEJO, Maria Jesus. Present situation on the descriptive sensory analysis of bread. **Journal of Sensory Studies**, v. 26, n. 4, p. 255-268, 2011.

CAMPBELL, G. M. Bread aeration. In: CAUVAIN, S. P. *Breadmaking: improving quality*. Cambridge: Woodhead, 2003. p. 352-374.

CAMPBELL, Grant M. *et al.* Modelling wheat breakage during roller milling using the Double Normalised Kumaraswamy Breakage Function: Effects of kernel shape and hardness. **Journal of cereal science**, v. 55, n. 3, p. 415-425, 2012.

CAO, Yanfei *et al.* Influence of the fermentation time and potato pulp addition on the technological properties and volatile compounds of wheat dough and steamed bread. **Lwt**, v. 128, p. 109377, 2020.

CAPPELLI, Alessio *et al.* Effects of wheat tempering and stone rotational speed on particle size, dough rheology and bread characteristics for a stone-milled weak flour. **Journal of Cereal Science**, v. 91, p. 102879, 2020d.

CAPPELLI, Alessio *et al.* Improving whole wheat dough tenacity and extensibility: A new kneading process. **Journal of Cereal Science**, v. 90, p. 102852, 2019a.

CAPPELLI, Alessio; BETTACCINI, Lorenzo; CINI, Enrico. The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies. **Trends in Food Science & Technology**, v. 104, p. 91-101, 2020a.

CAPPELLI, Alessio; CANESSA, Jessica; CINI, Enrico. Effects of CO<sub>2</sub> snow addition during kneading on thermoregulation, dough rheological properties, and bread characteristics: A focus on ancient and modern wheat cultivars. **International Journal of Refrigeration**, v. 117, p. 52-60, 2020b.

CAPPELLI, Alessio; CINI, Enrico. Challenges and opportunities in wheat flour, pasta, bread, and bakery product production chains: A systematic review of innovations and improvement strategies to increase sustainability, productivity, and product quality. **Sustainability**, v. 13, n. 5, p. 2608, 2021.

CAPPELLI, Alessio; MUGNAINI, Marco; CINI, Enrico. Improving roller milling technology using the break, sizing, and reduction systems for flour differentiation. **LWT**, v. 133, p. 110067, 2020e.

CAPPELLI, Alessio; OLIVA, Noemi; CINI, Enrico. 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, 2020g.

CAPUANO, Edoardo *et al.* Characterization of the Maillard reaction in bread crisps. **European Food Research and Technology**, v. 228, p. 311-319, 2008.

CARDOSO, Rossana VC *et al.* Physicochemical and microbiological characterization of wheat and rye flours. **Food Chemistry**, v. 280, p. 123-129, 2019.

CARLSON, MARIAN. Regulation of sugar utilization in *Saccharomyces* species. **Journal of Bacteriology**, v. 169, n. 11, p. 4873-4877, 1987.

CARR, Neil O.; DANIELS, Norman WR; FRAZIER, Peter J. Lipid interactions in breadmaking. **Critical Reviews in Food Science & Nutrition**, v. 31, n. 3, p. 237-258, 1992.

CAUVAIN, S. P. Breadmaking. In: Gavin Owens. **Cereals Processing Technology**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2001.

CAUVAIN, S. P.; YOUNG, L. S. **Tecnologia da panificação**. Barueri, São Paulo: Manole, 2009. 440 p.

CAUVAIN, Stanley P. (Ed.). **Breadmaking: improving quality**. Elsevier, 2012.

CEREDA, Marney Pascoli. Sour starch, a lactic fermented starch with heat expansion properties: innovations and patents. In: **Starch Industries: Processes and Innovative Products in Food and Non-Food Uses**. Academic Press, 2024. p. 155-190.

CHAIBUB, Thiago. **A Experiência e o Ensino da Cor: apontamentos teóricos e práticos**. 2017.

CHANDRA, Dinesh *et al.* Review of Finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn): A power house of health benefiting nutrients. *Food Science and Human Wellness*, v. 5, n. 3, p. 149-155, 2016.



- CHEN, G.; LI, C.; CHEN, K. Fructooligosaccharides: a review on their mechanisms of action and effects. **Studies in natural products chemistry**, v. 48, p. 209-229, 2016.
- CHEN, Guo; ZHANG, Bin. Hydrolysis of granular corn starch with controlled pore size. **Journal of cereal science**, v. 56, n. 2, p. 316-320, 2012.
- CHEN, H. *et al.* Chemical, physical, and baking properties of apple fiber compared with wheat and oat bran. **Cereal chem**, v. 65, n. 3, p. 244-247, 1988.
- CHEN, Lan; OPARA, Umezurike Linus. Texture measurement approaches in fresh and processed foods—A review. **Food research international**, v. 51, n. 2, p. 823-835, 2013.
- CHIAVARO, Emma (Ed.). **Differential scanning calorimetry: Applications in fat and oil technology**. CRC Press, 2014.
- CHIEH, C. Water. In: HUI Y. H. **Bakery products: science and technology**. Blackwell Publishing, 2006. p. 211-232.
- CHIKMAWATI, Tatik *et al.* Rye (*Secale cereale* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) simple sequence repeat variation within *Secale* spp.(Poaceae). **HAYATI Journal of Biosciences**, v. 20, n. 4, p. 163-170, 2013.
- CHINMA, Chiemela Enyinnaya *et al.* Evaluation of fermented African yam bean flour composition and influence of substitution levels on properties of wheat bread. **Journal of Food Science**, v. 85, n. 12, p. 4281-4289, 2020.
- CHINMA, Chiemela Enyinnaya *et al.* Properties of cereal brans: A review. **Cereal Chemistry**, v. 92, n. 1, p. 1-7, 2015.
- CHIOTELLI, Eleni; PILOSIO, Giorgio; LE MESTE, Martine. Effect of sodium chloride on the gelatinization of starch: A multimeasurement study. **Biopolymers: Original Research on Biomolecules**, v. 63, n. 1, p. 41-58, 2002.
- CHOROMAŃSKA, Anna *et al.* Anticancer activity of oat  $\beta$ -glucan in combination with electroporation on human cancer cells. **Acta poloniae pharmaceutica**, v. 74, n. 2, 2017.
- CIMINI, Sara *et al.* Fructans: Physiology and Development in Plants. In: **The Book of Fructans**. Academic Press, 2023. p. 91-108.
- COLLAR, Concepción; BOLLAÍN, Clara. Impact of microbial transglutaminase on the viscoelastic profile of formulated bread doughs. **European Food Research and Technology**, v. 218, p. 139-146, 2004.
- COLONNA, P.; BULÉON, A. New insights on starch structure and properties. In: **9. International cereal and bread congress., Paris (France), 1-5 Jun 1992**. INRA., 1992.
- COMINO, Penny *et al.* Characterisation of soluble and insoluble cell wall fractions from rye, wheat and hull-less barley endosperm flours. **Food Hydrocolloids**, v. 41, p. 219-226, 2014.
- CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira: 2º Levantamento Grãos Safra 2023/24**. ISSN 2318-6852. Brasília, DF, v. 11, n. 2, p. 1111, novembro de 2023.
- COOKE, David; GIDLEY, Michael J. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinisation: origin of the enthalpic transition. **Carbohydrate research**, v. 227, p. 103-112, 1992.
- COPELAND, Les *et al.* Form and functionality of starch. **Food hydrocolloids**, v. 23, n. 6, p. 1527-1534, 2009.
- COSTA, M. G. Qualidade funcional da farinha obtida do grão de trigo nacional e importado. 2003. 59 p. **Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Centro de Ciências da Saúde, Universidade Federal de Pernambuco**, Recife, 2003.
- CRESPO-HERRERA, Leonardo A.; GARKAVA-GUSTAVSSON, Larisa; ÅHMAN, Inger. A systematic review of rye (*Secale cereale* L.) as a source of resistance to pathogens and pests in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Hereditas**, v. 154, p. 1-9, 2017.
- CROWLEY, P.; SCHÖBER, T. J.; CLARKE, C. I.; ARENDT, E. K. The effect of storage time on textural and crumb grain characteristics of sourdough wheat bread. **European Food Research Technology**, v. 214, p. 489–496, 2002.
- CZUBASZEK, Anna *et al.* Baking properties of flour and nutritional value of rye bread with brewer's spent grain. **LWT**, v. 150, p. 111955, 2021.
- CZUCHAJOWSKA, Z.; POMERANZ, Y.; JEFFERS, H. C. Water activity and moisture content of dough and bread. **Cereal Chemistry**, v. 66, n. 2, p. 128-132, 1989.
- DA SILVA, CE Mendes *et al.* Starch gelatinization measured by pulsed nuclear magnetic resonance. **Cereal chemistry**, v. 73, n. 3, p. 297-301, 1996.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de alimentos de Fennema**, Quarta Ed., Porto Alegre: Artmed, 2010. 900 p.

DAMODARAN, Srinivasan; PARKIN, Kirk L. **Química de alimentos de Fennema**. Artmed editora, 2018.

DAY, Li; FAYET, Claire; HOMER, Stephen. Effect of NaCl on the thermal behaviour of wheat starch in excess and limited water. **Carbohydrate polymers**, v. 94, n. 1, p. 31-37, 2013.

DE BONDT, Yamina *et al.* The impact of wheat (*Triticum aestivum* L.) bran on wheat starch gelatinization: A differential scanning calorimetry study. **Carbohydrate polymers**, v. 241, p. 116262, 2020.

DE VRESE, Michael *et al.* Protein-bound D-amino acids, and to a lesser extent lysinoalanine, decrease true ileal protein digestibility in minipigs as determined with <sup>15</sup>N-labeling. **The Journal of nutrition**, v. 130, n. 8, p. 2026-2031, 2000.

DEJONG, G. A. H.; KOPPELMAN, S. J. Transglutaminase catalyzed reactions: impact on food applications. **Journal of food science**, v. 67, n. 8, p. 2798-2806, 2002.

DELCOUR, J. A.; VANHAMEL, S.; HOSENEY, R. C. Physicochemical and functional properties of rye nonstarch polysaccharides. II. Impact of a fraction containing water-soluble pentosans and proteins on gluten-starch loaf volumes. **Cereal chemistry**, v. 68, n. 1, p. 72-76, 1991.

DELEU, Lomme J. *et al.* The major constituents of rye (*Secale cereale* L.) flour and their role in the production of rye bread, a food product to which a multitude of health aspects are ascribed. **Cereal Chemistry**, v. 97, n. 4, p. 739-754, 2020.

Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., & Sahin, S. (2010). Utilization of transglutaminase to increase the quality of rice bread. **Journal of Food Engineering**, 96, 151-158.

DERVILLY-PINEL, G. *et al.* Water-extractable arabinoxylan from pearled flours of wheat, barley, rye and triticale. Evidence for the presence of ferulic acid dimers and their involvement in gel formation. **Journal of Cereal Science**, v. 34, n. 2, p. 207-214, 2001.

DEVU, S. Suparna *et al.* Recent advancements in baking technologies to mitigate formation of toxic compounds: A comprehensive review. **Food Control**, v. 135, p. 108707, 2022.

DIAS-MARTINS, Amanda M. *et al.* Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food security, processing, health benefits and nutritional products. **Food research international**, v. 109, p. 175-186, 2018.

DING, Junzhou *et al.* Enhancement of  $\gamma$ -aminobutyric acid, avenanthramides, and other health-promoting metabolites in germinating oats (*Avena sativa* L.) treated with and without power ultrasound. **Food chemistry**, v. 283, p. 239-247, 2019.

DOBRA SZCZYK, B. J.; MORGENSTERN, M. P. Rheology and the breadmaking process. **Journal of cereal Science**, v. 38, n. 3, p. 229-245, 2003.

DOBRA SZCZYK, B. J.; ROBERTS, C. A. Strain hardening and dough gas cell-wall failure in biaxial extension. **Journal of cereal science**, v. 20, n. 3, p. 265-274, 1994.

DONOVAN, J. W.; LORENZ, K.; KULP, K. Differential scanning calorimetry of heat-moisture. **Cereal Chem**, v. 60, n. 5, p. 381-387, 1983.

DONOVAN, John W. Phase transitions of the starch–water system. **Biopolymers: Original Research on Biomolecules**, v. 18, n. 2, p. 263-275, 1979.

DÖRING, Clemens; JEKLE, Mario; BECKER, Thomas. Technological and analytical methods for arabinoxylan quantification from cereals. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 56, n. 6, p. 999-1011, 2016.

DUARTE, Lovaine *et al.* Transglutaminases: part I—origins, sources, and biotechnological characteristics. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 36, p. 1-18, 2020.

EDWARDS, W.P.; LILLEY, T.H.; HEDDERLEY, D.; JACKSON, E.L. The correlation between dough rheology and baking performance. **Food Chemistry**, v. 67, n. 3, p. 205-210, 1999.

EL DASH, A. A. Standardized mixing and fermentation procedure for experimental baking test [Quality, wheat, flour]. **Cereal chemistry**, v. 55, 1978.

ELIAS, M. C. *et al.* Operações de pré-armazenamento, armazenamento e conservação de grãos. **Pós-colheita de arroz: secagem, armazenamento e qualidade. Pelotas: UFPel**, p. 147-244, 2007.

ELIASSON, A.-C. Differential scanning calorimetry studies on wheat starch—gluten mixtures: I. Effect of gluten on the gelatinization of wheat starch. **Journal of Cereal Science**, v. 1, n. 3, p. 199-205, 1983.

ELLEUCH, Mohamed *et al.* Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review. **Food chemistry**, v. 124, n. 2, p. 411-421, 2011.

EMULZINT. ADITIVOS ALIMENTARES INDÚSTRIA E COMÉRCIO. **Apostila de panificação**. Campinas: ITAL, p. 92. 1985.

ENGLYST, Hans N.; HUDSON, Geoffrey J. The classification and measurement of dietary carbohydrates. **Food chemistry**, v. 57, n. 1, p. 15-21, 1996.

ENGLYST, Klaus N.; ENGLYST, Hans N. Carbohydrate bioavailability. **British journal of nutrition**, v. 94, n. 1, p. 1-11, 2005.

FADEL, Abdulmannan *et al.* Health-related effects and improving extractability of cereal arabinoxylans. **International journal of biological macromolecules**, v. 109, p. 819-831, 2018.

FAERGEMAND, M.; KROG, N. Using emulsifiers to improve food texture. 2003.

FAHY, Eoin *et al.* A comprehensive classification system for lipids1. **Journal of lipid research**, v. 46, n. 5, p. 839-861, 2005.

FALOLA, A. *et al.* Determinants of commercial production of wheat in Nigeria: a case study of Bakura Local Government Area, Zamfara State. **Trakia Journal of Sciences**, v. 15, n. 4, 2017.

FAO. **World food and agriculture statistical yearbook 2022**. FAO, 2022.

FENDRI, Lilia Belghith *et al.* Wheat bread enrichment by pea and broad bean pods fibers: Effect on dough rheology and bread quality. **Lwt**, v. 73, p. 584-591, 2016.

FERNANDES, A. F.; PEREIRA, J.; GERMANI, R.; OIANO-NETO, J. Effect of partial replacement of wheat flour with potato peel flour (*Solanum Tuberosum* Lineu). **Food Science and Technology**, v. 28, p. 56-65, 2008.

FINNIE, S. M.; JEANNOTTE, R.; FAUBION, J. M. Quantitative characterization of polar lipids from wheat whole meal, flour, and starch. **Cereal Chemistry**, v. 86, n. 6, p. 637-645, 2009.

FOIS, S.; SANNA, M.; STARA, Giuseppe; ROGGIO, T.; CATZEDDU, P. Rheological Properties and baking quality of commercial durum wheat meals used to make flat crispy bread. **European Food Research Technology**, n. 232, p. 713-722, 2011.

FOLK, J. E. Transglutaminases. *Annual review of biochemistry*, v. 49, n. 1, p. 517-531, 1980.

FRESNO, Teresa *et al.* Aided phytostabilisation over two years using iron sulphate and organic amendments: Effects on soil quality and rye production. **Chemosphere**, v. 240, p. 124827, 2020.

FRØLICH, Wenche; ÅMAN, Per; TETENS, Inge. Whole foods and health – a Scandinavian perspective. **Food and Nutrition Research**, v. 1, p. 18503, 2013.

FUKUOKA, Mika; OHTA, Ken-ichi; WATANABE, Hisahiko. Determination of the terminal extent of starch gelatinization in a limited water system by DSC. **Journal of Food Engineering**, v. 53, n. 1, p. 39-42, 2002.

GAN, Z. *et al.* Effect of the outer bran layers on the loaf volume of wheat bread. **Journal of Cereal Science**, v. 15, n. 2, p. 151-163, 1992.

GELLRICH, Claudia; SCHIEBERLE, Peter; WIESER, Herbert. Biochemical characterization and quantification of the storage protein (secalin) types in rye flour. **Cereal chemistry**, v. 80, n. 1, p. 102-109, 2003.

GERITS, Lien R. *et al.* Lipases and their functionality in the production of wheat-based food systems. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 13, n. 5, p. 978-989, 2014.

GERMANI, R.; BENASSI, V.T.; CARVALHO, J.L.V. Métodos de avaliação de grão e farinha de trigo. **Rio de Janeiro: EMBRAPA-CTAA**, 1997. 84 p. (EMBRAPA-CTAA, Documentos, n. 28).

GERRARD, J. A. *et al.* Dough properties and crumb strength of white pan bread as affected by microbial transglutaminase. **Journal of Food Science**, v. 63, n. 3, p. 472-475, 1998.

GERRARD, J. A. *et al.* Effects of microbial transglutaminase on the wheat proteins of bread and croissant dough. **Journal of Food Science**, v. 66, n. 6, p. 782-786, 2001.

GERRARD, J.A.; FAYLE, S.E.; BROWN, P.A.; SUTTON, K.H.; SIMMONS, L.; RASIAH, I. Effects of microbial transglutaminase on the wheat proteins of bread and croissant dough. **Journal of Food Science**, v. 66, n. 6, p. 782-787, 2001.

GERRARD, JA *et al.* Dough properties and strength of white sliced bread crumb affected by microbial transglutaminase. **Journal of Food Science**, vol. 63, n. 3, p. 472-475, 1998.

GHAFOOR, Kashif *et al.* Nutritional composition, extraction, and utilization of wheat germ oil: A review. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 119, n. 7, p. 1600160, 2017.

GHOSHAL, G.; SHIVHARE, U.S.; BANERJEE, U.C. Rheological properties of dough and quality of bread prepared from whole wheat flour containing xylanase. **Food Chemistry**, v. 237, p. 207-214, 2017.

GIBSON, Glenn R. *et al.* Selective stimulation of bifidobacteria in the human colon by oligofructose and inulin. **Gastroenterology**, v. 108, n. 4, p. 975-982, 1995.

GIOIA, L. C., Ganancio, J. R., & Steel, C. J. (2017). Food Additives and Processing Aids used in Breadmaking. **Food Additives**. doi:10.5772/intechopen.70087.

GO, Eun-Jeong; SONG, Kyung Bin. Antioxidant properties of rye starch films containing rosehip extract and their application in packaging of chicken breast. **Starch-Stärke**, v. 71, n. 11-12, p. 1900116, 2019.

GOESAERT, Hans *et al.* Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. **Trends in food science & technology**, v. 16, n. 1-3, p. 12-30, 2005.

GOMAND, S. V. *et al.* Structural and physicochemical characterisation of rye starch. **Carbohydrate research**, v. 346, n. 17, p. 2727-2735, 2011.

GONELLI, André Luís Duarte *et al.* Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Food Science and Technology**, v. 27, p. 135-140, 2007.

GÓRECKA, Danuta *et al.* Raspberry pomace as a potential fiber source for cookies enrichment. **Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria**, v. 9, n. 4, p. 451-461, 2010.

GOUS, Peter W.; FOX, Glen P. Amylopectin synthesis and hydrolysis—Understanding isoamylase and limit dextrinase and their impact on starch structure on barley (*Hordeum vulgare*) quality. **Trends in food science & technology**, v. 62, p. 23-32, 2017.

GRAÇA, Carla *et al.* Impact of *Chlorella vulgaris* on the rheology of wheat flour dough and bread texture. **LWT**, v. 89, p. 466-474, 2018.

GRAGNANI, Marco Antonio Lefèvre. Produção e avaliação de pão de forma com triticale e enzima transglutaminase microbiana. **Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos. Campinas**, 2010.

GRAS, P. W.; CARPENTER, H. C.; ANDERSSON, R. S. Modelling the developmental rheology of wheat-flour dough using extension tests. **Journal of Cereal Science**, v. 31, n. 1, p. 1-13, 2000.

GREFFEUILLE, V. *et al.* Differences in the aleurone layer fate between hard and soft common wheats at grain milling. **Cereal chemistry**, v. 82, n. 2, p. 138-143, 2005.

GRIST, D. H. The rice diagram has appeared. 3. ed. **Longmans**, London, 1959.

Grossmann, L., Zhou, Y., Henschke, J., Schmidt, S., & Becker, T. (2016). Combined use of xylanase and transglutaminase for wheat gluten: effects on dough rheology and bread structure. **Journal of Cereal Science**, 70, 1-8.

GUJRAL, Hardeep Singh; ROSELL, Cristina M. Functionality of rice flour modified with a microbial transglutaminase. **Journal of Cereal Science**, v. 39, p. 225-230, 2004.

GUO, Xin *et al.* UPLC-MS-MS-based lipidomics for the evaluation of changes in lipids during dry-cured mutton ham processing. **Food Chemistry**, v. 377, p. 131977, 2022.

GUPTA, Rachna; MEGHWAL, Murlidhar; PRABHAKAR, Pramod K. Bioactive compounds of pigmented wheat (*Triticum aestivum*): Potential benefits in human health. **Trends in food science & technology**, v. 110, p. 240-252, 2021.

HÄDÄRUGÄ, Daniel I. *et al.* Differentiation of rye and wheat flour as well as mixtures by using the kinetics of Karl Fischer water titration. **Food chemistry**, v. 195, p. 49-55, 2016.

HADBAOUI, Zineb *et al.* Fatty acid, tocopherol composition and the antioxidant activity of the lipid extract from the sorghum grains growing in Algeria. **Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism**, v. 3, n. 3, p. 215-220, 2010.

HAN, Lihong; ZHANG, Jiajia; CAO, Xiaohong. Effects of orange peel powder on rheological properties of wheat dough and bread aging. **Food Science & Nutrition**, v. 9, n. 2, p. 1061-1069, 2021.

HANHINEVA, Kati *et al.* Identification of novel lignans in the whole grain rye bran by non-targeted LC-MS metabolite profiling. **Metabolomics**, v. 8, p. 399-409, 2012.

HANSEN, Hanne B. *et al.* Grain characteristics, chemical composition, and functional properties of rye (*Secale cereale* L.) as influenced by genotype and harvest year. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 52, n. 8, p. 2282-2291, 2004.

HANSEN, Hanne Boskov *et al.* Effects of genotype and harvest year on content and composition of dietary fibre in rye (*Secale cereale* L) grain. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 83, n. 1, p. 76-85, 2003.

HARGIN, Kevin D.; MORRISON, William R. The distribution of acyl lipids in the germ, aleurone, starch and non-starch endosperm of four wheat varieties. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 31, n. 9, p. 877-888, 1980.

HE, Yijie *et al.* Effects of konjac glucomannan on the water distribution of frozen dough and corresponding steamed bread quality. **Food Chemistry**, v. 330, p. 127243, 2020.

HEINIÖ, Raija-Liisa *et al.* Relationship between sensory perception and flavour-active volatile compounds of germinated, sourdough fermented and native rye following the extrusion process. **LWT-Food Science and Technology**, v. 36, n. 5, p. 533-545, 2003.

HENRION, Muriel *et al.* Cereal B-glucans: The impact of processing and how it affects physiological responses. **Nutrients**, v. 11, n. 8, p. 1729, 2019.

HENRY, Robert J. A comparison of the non-starch carbohydrates in cereal grains. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 36, n. 12, p. 1243-1253, 1985.

HERNÁNDEZ, Lázaro; PLOU, Francisco J. Fructanos: terminología. In: The book of fructans. **Academic Press**, 2023. p. 3-10.

HEW, C. L.; UNRAU, A. M. Investigation of the starch components of a synthetic cereal species. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 18, n. 4, p. 657-662, 1970.

HINCHA, Dirk K. *et al.* Fructans from oat and rye: composition and effects on membrane stability during drying. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes**, v. 1768, n. 6, p. 1611-1619, 2007.

HOEHNEL, Andrea *et al.* Enhancing the nutritional profile of regular wheat bread while maintaining technological quality and adequate sensory attributes. **Food & function**, v. 11, n. 5, p. 4732-4751, 2020.

HOLLAND, Jonathan *et al.* Over winter cover crops provide yield benefits for spring barley and maintain soil health in northern Europe. **European Journal of Agronomy**, v. 130, p. 126363, 2021.

HOLSCHER, Hannah D. Dietary fiber and prebiotics and the gastrointestinal microbiota. **Gut microbes**, v. 8, n. 2, p. 172-184, 2017.

HOSENEY, R. Carl *et al.* Principles of cereal science and technology. **A general reference on cereal foods**. American association of cereal chemists, Inc., 1986.

HOSENEY, R. Carl. Principios de Ciencia y Tecnología de Cereales. Ed. Acribia. **Zaragoza, España**, p. 269-274, 1991.

HRUŠKOVÁ, M.; ŠVEC, I.; JIRSA, O. Correlation between milling and baking parameters of wheat varieties. **Journal of food engineering**, v. 77, n. 3, p. 439-444, 2006.

HSEIN-CHIH, Harold Wu; SARKO, Anatole. The double-helical molecular structure of crystalline B-amylose. **Carbohydrate Research**, v. 61, n. 1, p. 7-25, 1978.

HUANG, Chunying *et al.* Analysis of lipidomics profile of *Carya cathayensis* nuts and lipid dynamic changes during embryonic development. **Food Chemistry**, v. 370, p. 130975, 2022.

HUANG, Lianyan *et al.* Interactions between dietary fiber and ferulic acid changed the aggregation of gluten in a whole wheat model system. **Lwt**, v. 91, p. 55-62, 2018.

HÜBNER, Marlen *et al.* Hybrid rye performance under natural drought stress in Europe. **Theoretical and applied genetics**, v. 126, p. 475-482, 2013.

HUI, Yiu Hin *et al.* (Ed.). **Bakery products: science and technology**. John Wiley & Sons, 2008.

IACOVINO, P.; BERTOLINI, A.C.; LIMBO, S. Effect of transglutaminase on the rheological properties of dough and quality of bread. **Journal of Food Science**, v. 89, n. 2, p. 110-120, 2024.

ICEKSON, I., & APELBAUM, A. (1987). Evidence for transglutaminase activity in plant tissue. **Plant physiology**, 84(4), 972-974.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Analytical Standards of the Instituto Adolfo Lutz. v. 1: **Chemical and physical methods for food analysis**, 3rd ed. São Paulo: IMESP, 1985.

ISAKSSON, Hanna. **Satiating effects of rye foods**. Swedish University of Agricultural Sciences, 2011.

IZYDORCZYK, M. S.; DEXTER, J. E. Barley  $\beta$ -glucans and arabinoxylans: Molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products—a Review. **Food Research International**, v. 41, n. 9, p. 850-868, 2008.

JANE, J. L. *et al.* Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. **Cereal chemistry**, v. 76, n. 5, p. 629-637, 1999.

JAROS, Doris *et al.* Transglutaminase in dairy products: chemistry, physics, applications. **Journal of texture studies**, v. 37, n. 2, p. 113-155, 2006.

JAYARAM, Vinay B. *et al.* Mapping of *Saccharomyces cerevisiae* metabolites in fermenting wheat straight-dough reveals succinic acid as pH-determining factor. **Food Chemistry**, v. 136, n. 2, p. 301-308, 2013.

JIANG, Yongzhi; WANG, Tong. Phytosterols in cereal by-products. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 82, p. 439-444, 2005.

JONSSON, Karin *et al.* Rye and health-Where do we stand and where do we go?. **Trends in Food Science & Technology**, v. 79, p. 78-87, 2018.

JOYCE, B.; NIRMALA, M. Effects of enzyme modification on the functional properties of cereal flours. **Journal of Cereal Science**, v. 112, p. 103-115, 2023.

JUSZCZAK, Lesław *et al.* Effect of inulin on rheological and thermal properties of gluten-free dough. **Carbohydrate polymers**, v. 90, n. 1, p. 353-360, 2012.

KAMAL-ELDIN, Afaf *et al.* Physical, microscopic and chemical characterisation of industrial rye and wheat brans from the Nordic countries. **Food & Nutrition Research**, v. 53, n. 1, p. 1912, 2009.

KARILUOTO, Susanna *et al.* Effect of baking method and fermentation on folate content of rye and wheat breads. **Cereal Chemistry**, v. 81, n. 1, p. 134-139, 2004.

KARPPINEN, Sirpa *et al.* Fructan content of rye and rye products. **Cereal Chemistry**, v. 80, n. 2, p. 168-171, 2003.

KATAPODIS, Petros *et al.* Enzymic production of a feruloylated oligosaccharide with antioxidant activity from wheat flour arabinoxylan. **European journal of nutrition**, v. 42, p. 55-60, 2003.

KATINA, Kati *et al.* Fermentation-induced changes in the nutritional value of native or germinated rye. **Journal of Cereal Science**, v. 46, n. 3, p. 348-355, 2007.

KAUR, Pinderpal *et al.* Rye: A wonder crop with industrially important macromolecules and health benefits. **Food Research International**, v. 150, p. 110769, 2021.

KAUR, Ramandeep; SHARMA, Minaxi. Cereal polysaccharides as sources of functional ingredient for reformulation of meat products: A review. **Journal of functional foods**, v. 62, p. 103527, 2019.

KIDA, Kaichi *et al.* An immunopotentiator of  $\beta$ -1, 6; 1, 3 D-glucan prevents diabetes and insulinitis in BB rats. **Diabetes research and clinical practice**, v. 17, n. 2, p. 75-79, 1992.

KIELISZEK, Marek; MISIEWICZ, Anna. Microbial transglutaminase and its application in the food industry. **A review. Microbiological Folia**, v. 59, p. 241-250, 2014.

KIRCHHOFF, Eva; SCHIEBERLE, Peter. Determination of key aroma compounds in the crumb of a three-stage sourdough rye bread by stable isotope dilution assays and sensory studies. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, n. 9, p. 4304-4311, 2001.

KITTISUBAN, Phatcharee; RITTHIRUANGDEJ, Pitiporn; SUPHANTHARIKA, Manop. Optimization of hydroxypropylmethylcellulose, yeast  $\beta$ -glucan, and whey protein levels based on physical properties of gluten-free rice bread using response surface methodology. **LWT-Food Science and Technology**, v. 57, n. 2, p. 738-748, 2014.

KLUCINEC, Jeffrey D.; THOMPSON, Donald B. Fractionation of high-amylose maize starches by differential alcohol precipitation and chromatography of the fractions. **Cereal Chemistry**, v. 75, n. 6, p. 887-896, 1998.

KNUDSEN, Knud Erik Bach; LAERKE, Helle Nygaard. Rye arabinoxylans: Molecular structure, physicochemical properties and physiological effects in the gastrointestinal tract. **Cereal chemistry**, v. 87, n. 4, p. 353-362, 2010.

KOCOT, Aleksandra Maria; JAROCKA-CYRTA, Elżbieta; DRABIŃSKA, Natalia. Overview of the importance of probiotics in gut barrier integrity. **International journal of molecular sciences**, v. 23, n. 5, p. 2896, 2022.

KODRE, K. V. *et al.* Differential scanning calorimetry: A review. **Research and Reviews: Journal of Pharmaceutical Analysis**, v. 3, n. 3, p. 11-22, 2014.

KOEHLER, Peter; WIESER, Herbert. Chemistry of cereal grains. In: **Handbook on sourdough biotechnology**. New York, NY: Springer US, 2012. p. 11-45.

KÖHLER, P.; WIESER, H. Comparative studies of high MrSubunits of Rye and Wheat. III. localisation of cysteine residues. **Journal of Cereal Science**, v. 32, n. 2, p. 189-197, 2000.

KOHYAMA, K. *et al.* A differential thermal analysis of the gelatinization and retrogradation of wheat starches with different amylopectin chain lengths. **Carbohydrate Polymers**, v. 58, p. 71-77, 2004.

KOLETTA, Pelagia *et al.* Physicochemical and technological properties of highly enriched wheat breads with non-wheat whole flours. **Cereal Science Journal**, v. 3, p. 561-568, 2014.

KOŁODZIEJCZYK, Piotr *et al.* Chemical and nutritional characteristics of high-fibre rye milling fractions. **Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria**, v. 17, n. 2, p. 149-157, 2018.

KOPEĆ, A. *et al.* Effects of sourdough and dietary fibers on the nutritional quality of breads produced by bake-off technology. **Journal of Cereal Science**, v. 54, n. 3, p. 499-505, 2011.

KORZUN, Viktor; PONOMAREVA, Mira L.; SORRELLS, Mark E. Economic and academic importance of rye. **The Rye Genome**, p. 1-12, 2021.

KOTTMANN, Lorenz; WILDE, Peer; SCHITTENHELM, Siegfried. How do timing, duration, and intensity of drought stress affect the agronomic performance of winter rye?. **European Journal of Agronomy**, v. 75, p. 25-32, 2016.

KROH, Lothar W. Caramelisation in food and beverages. **Food chemistry**, v. 51, n. 4, p. 373-379, 1994.

KULICHOVÁ, Katarína *et al.* Phenolic compounds and biological activities of rye (*Secale cereale* L.) grains. **Open Chemistry**, v. 17, n. 1, p. 988-999, 2019.

KURASHI, Chiya; YAMAZAKI, Katsutoshi; SUSA, Yasuyuki. Transglutaminase: its utilization in the food industry. **Food reviews international**, v. 17, n. 2, p. 221-246, 2001.

LAFIANDRA, Domenico; RICCARDI, Gabriele; SHEWRY, Peter R. Improving cereal grain carbohydrates for diet and health. **Journal of cereal science**, v. 59, n. 3, p. 312-326, 2014.

LAHNE, Jacob *et al.* Bourbon and rye whiskeys are legally distinct but are not discriminated by sensory descriptive analysis. **Journal of food science**, v. 84, n. 3, p. 629-639, 2019.

LANG, Tim; MCKEE, Martin. The reinvasion of Ukraine threatens global food supplies. **bmj**, v. 376, 2022.

LARRE, C.; DENERY-PAPINI, S.; POPINEAU, Y.; DESHAYES, G.; DESSERME, C.; LEFEBVRE, J. Biochemical analysis and rheological properties of gluten modified by transglutaminase. **Cereal Chemistry**, v. 77, n. 1, p. 32-38, 2000.

LAWLESS, Harry T.; HEYMANN, Hildegard. **Sensory evaluation of food: principles and practices**. Springer Science & Business Media, 2010.

LAZARIDOU, A.; DUTA, D.; PAPAGEORGIOU, M.; BELC, N.; BILIADERIS, C.G. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 3, p. 1033-1047, 2007.

LEVENT, Hacer; SAYASLAN, Abdulvahit; YEŞİL, Saliha. Physicochemical and sensory quality of gluten-free cakes supplemented with grape seed, pomegranate seed, poppy seed, flaxseed, and turmeric. **Journal of food processing and preservation**, v. 45, n. 2, p. e15148, 2021.

LINDSAY, Megan P.; SKERRITT, John H. The glutenin macropolymer of wheat flour doughs: structure–function perspectives. **Trends in Food Science & Technology**, v. 10, n. 8, p. 247-253, 1999.

LIU, H.; LELIEVRE, J. A differential scanning calorimetry study of melting transitions in aqueous suspensions containing blends of wheat and rice starch. **Carbohydrate polymers**, v. 17, n. 2, p. 145-149, 1992.

LIU, Huifang *et al.* Ultrasonication-mediated formation of V-type lotus seed starch for subsequent complexation with butyric acid. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 236, p. 124000, 2023.

LIU, Rui Hai. Whole grain phytochemicals and health. **Journal of cereal science**, v. 46, n. 3, p. 207-219, 2007.

Liukkonen, K. H., Heinio, R. L., Salmenkallio-Marttila, M., Autio, K., Katina, K., & Poutanen, K. (2006). Rye. In: *Bakery Products: Science and Technology*. Blackwell Publishing: Oxford, UK, pages 109-122.

LOCKYER, S.; SPIRO, A. The role of bread in the UK diet: An update. **Nutrition Bulletin**, v. 45, n. 2, p. 133-164, 2020.

LOPES, Maria; CAVALEIRO, Carlos; RAMOS, Fernando. Sodium reduction in bread: A role for glasswort (*Salicornia ramosissima* J. Woods). **Comprehensive reviews in food science and food safety**, v. 16, n. 5, p. 1056-1071, 2017.

LUCAS, 2014. Baking. **Bakery products science and technology**, 2014 pp. 335–354 in: HUI, Yiu Hin *et al.* (Ed.). **Bakery products: science and technology**. John Wiley & Sons, 2008.

LUCAS, Tainara Alves da Luz. **Produtividade e qualidade da cultura do centeio (secale cere-ale l.) sob quatro sistemas de produção: "BDOKC" biodinâmico, orgânico, convencional agroquímico e controle (testemunha)**. 2022.

LYNCH, E. J. *et al.* Fundamental studies on the reduction of salt on dough and bread characteristics. **Food Research International**, v. 42, n. 7, p. 885-891, 2009.

MACARTHUR, L. A.; D'APPOLONIA, B. L. Comparison of oat and wheat carbohydrates. I. Sugars. **Cereal Chem**, v. 56, n. 5, p. 455-457, 1979.

MAES, C.; DELCOUR, J. A. Alkaline hydrogen peroxide extraction of wheat bran non-starch polysaccharides. **Journal of Cereal Science**, v. 34, n. 1, p. 29-35, 2001.

MAJCHER, Małgorzata A. *et al.* Formation of key aroma compounds during preparation of pumpnickel bread. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 68, n. 38, p. 10352-10360, 2019.

MANDALA, I.; POLAKI, A.; YANNIOTIS, S. Influence of frozen storage on bread enriched with different ingredients. **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 2, p. 137-145, 2009.

MARTÍNEZ-ANAYA, M.A.; JIMENEZ, T. Effects of enzymes on dough rheology and bread quality. **Food Chemistry**, v. 60, n. 2, p. 209-216, 1997.

MARTÍNEZ-VILLALUENGA, Cristina; FRÍAS, Juana. Production and bioactivity of oligosaccharides in plant foods. **Food oligosaccharides: production, analysis and bioactivity**, p. 35-54, 2014.

MARTINS, Sara IFS; JONGEN, Wim MF; VAN BOEKEL, Martinus AJS. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. **Trends in food science & technology**, v. 11, n. 9-10, p. 364-373, 2000.

MAYR, Sabrina *et al.* Brotweg — a bread path in an alpine environment: new mechanical solutions for grain processing on steep mountain slopes. In: **Innovative Biosystems Engineering for Sustainable Agriculture, Forestry and Food Production: 2019 International Mid-term Conference of the Italian Agricultural Engineering Association (AIIA)**. Springer International Publication, 2020. p. 449-456.

MCCANN, Thu H.; DAY, Li. Effect of sodium chloride on gluten network formation, dough microstructure and rheology in relation to breadmaking. **Journal of cereal science**, v. 57, n. 3, p. 444-452, 2013.

MEEUS, Yannick *et al.* The role of arabinoxylan in determining the non-linear and linear rheology of bread doughs made from blends of wheat (*Triticum aestivum* L.) and rye (*Secale cereale* L.) flour. **Food Hydrocolloids**, v. 120, p. 106990, 2021.

MEILGAARD, Morten C.; CARR, B. Thomas; CIVILLE, Gail Vance. **Sensory evaluation techniques**. CRC press, 1999.

MICHALSKA, Anna *et al.* Effect of bread making on formation of Maillard reaction products contributing to the overall antioxidant activity of rye bread. **Journal of cereal science**, v. 48, n. 1, p. 123-132, 2008.

MICHALSKA, Anna; CEGLIŃSKA, Alicja; ZIELIŃSKI, Henryk. Bioactive compounds in rye flours with different extraction rates. **European Food Research and Technology**, v. 225, p. 545-551, 2007.

MIHHALEVSKI, Anna *et al.* Stability of B vitamins and dietary fiber during the production of rye sourdough bread. **Cereal Science Journal**, v. 57, n. 1, p. 30-38, 2013.

MILDNER-SZKUDLARZ, Sylwia *et al.* Use of grape by-product as a source of dietary fibre and phenolic compounds in sourdough mixed rye bread. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 46, n. 7, p. 1485-1493, 2011.

MILLS, E. N. C. *et al.* Bubble formation and stabilization in bread dough. **Food and bioproducts processing**, v. 81, n. 3, p. 189-193, 2003.

MITA, Tomoyoshi; ISHIDA, Etsuko; MATSUMOTO, Hiroshi. Physicochemical studies on wheat protein foams. II. Relationship between bubble size and stability of foams prepared with gluten and gluten components. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 64, n. 1, p. 143-153, 1978.

MOHAMED, Abdellatif A.; RAYAS-DUARTE, Patricia. The effect of mixing and wheat protein/gluten on the gelatinization of wheat starch. **Food Chemistry**, v. 81, n. 4, p. 533-545, 2003.

MONDAL, Arpita; DATTA, A. K. Bread baking—A review. **Journal of food engineering**, v. 86, n. 4, p. 465-474, 2008.

MONTENEGRO, F. M.; ORMENESE, R. C. S. C. Avaliação da qualidade tecnológica da farinha de trigo. **Campinas: Cereal Chocotec ITAL**, 2008.

MOORE, M.M.; SCHOBBER, T.J.; DOUGHERTY, M.P.; ARNTFIELD, S.D. Network formation in gluten-free bread with application of transglutaminase. **Cereal Chemistry**, v. 83, n. 1, p. 28-36, 2006.



MOREAU, Lydie *et al.* Influence of sodium chloride on colour, residual volatiles and acrylamide formation in model systems and breakfast cereals. **International journal of food science & technology**, v. 44, n. 12, p. 2407-2416, 2009.

MORRISON, W. R. Wheat lipid composition. 1978.

MORRISON, William R.; MANN, David L.; COVENTRY, Wong Soon Anne M. Selective extraction and quantitative analysis of non-starch and starch lipids from wheat flour. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 26, n. 4, p. 507-521, 1975.

MOTOKI, M.; SEGURO, K1. Transglutaminase and its use for food processing. *Trends in food science & technology*, v. 9, n. 5, p. 204-210, 1998.

MOTOKI, Masao, et al. "Glutamine-specific deamidation of  $\alpha$  S1-casein by transglutaminase." **Agricultural and Biological Chemistry** 50.12 (1986): 3025-3030.

MYHRVOLD, Nathan; MIGOYA, Francisco. *Modernist Bread: The Art and Science*. Volume 2: Ingredients. 1. ed. Bellevue, WA: The Cooking Lab, 2017.

NAGULESWARAN, Sabaratnam *et al.* The susceptibility of large and small granules of waxy, normal and high-amylose genotypes of barley and corn starches toward amylolysis at sub-gelatinization temperatures. **Food Research International**, v. 51, n. 2, p. 771-782, 2013.

NASCIMENTO JUNIOR, Alfredo do. EMBRAPA: Centeio. Parque Estação Biológica - PqEB, s/nº, Brasília, DF. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/centeo/pre-producao/socioeconomia>>. Acesso em: 03 fev. 2024.

NELSON, David L.; COX, Michel M. *Principios de Bioquímica de Lehninger*. In: **Principios de Bioquímica de Lehninger**. 2011. p. 1273-1273.

NEMATOLLAHI, Amene; MEYBODI, Neda Mollakhalili; KHANEGHAH, Amin Mousavi. An overview of the combination of emerging technologies with conventional methods to reduce acrylamide in different food products: Perspectives and future challenges. **Food Control**, v. 127, p. 108144, 2021.

NÉMETH, R.; TÖMÖSKÖZI, S. Rye: Current state and future trends in research and applications. **Acta Alimentaria**, v. 50, n. 4, p. 620-640, 2021.

NI, Dawei *et al.* Insight into the effects and biotechnological production of kestoses, the smallest fructooligosaccharides. **Critical reviews in biotechnology**, v. 41, n. 1, p. 34-46, 2021.

NOORT, M. W. J.; HAASTER, D. V.; HEMERY, Y.; SCHOLS, H. A.; HAMER, R. J. The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality – evidence for fibre – protein interactions. **Journal of Cereal Science**, v. 52, p. 59-64, 2010.

NOVOTNI, Dubravka *et al.* Glycemic index and firming kinetics of partially baked frozen gluten-free bread with sourdough. **Journal of Cereal Science**, v. 55, n. 2, p. 120-125, 2012.

NOWOTNA, Anna *et al.* Characteristics of carbohydrate fraction of rye varieties. **Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria**, v. 5, n. 1, p. 87-96, 2006.

NYSTROM, Laura *et al.* Phytochemicals and dietary fiber components in rye varieties in the HEALTHGRAIN diversity screen. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 56, n. 21, p. 9758-9766, 2008.

OATES, Christopher G. Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis. **Trends in Food Science & Technology**, v. 8, n. 11, p. 375-382, 1997.

OBADI, Mohammed; SUN, Jun; XU, Bin. Highland barley: Chemical composition, bioactive compounds, health effects, and applications. **Food Research International**, v. 140, p. 110065, 2021.

OELKE, E. A. *et al.* Alternative field crops manual. **University of Wisconsin Cooperative Extension Service, University of Minnesota Extension Service, Centre for Alternative Plant and Animal Products**, 1992. Disponível em: <<https://hort.purdue.edu/newcrop/afcm/rye.html>>. Acessado em: 18 de jan. de 2024.

OEST, Marie *et al.* Rye bread defects: analysis of composition and further influence factors as determinants of dry-baking. **Foods**, v. 9, n. 12, p. 1900, 2020.

OFREDEDE, G. Produção de pão com recurso a pré-fermentos, desenvolvimento de produtos numa unidade de panificação. 2015.

OLAGUNJU, Aderonke I.; OLUWAJUYITAN, Timilehin D.; OYELEYE, Sunday I. Multigrain bread: dough rheology, quality characteristics, in vitro antioxidant and antidiabetic properties. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 15, p. 1851-1864, 2021.

ORO, Tatiana. **Adaptação de métodos para avaliação da qualidade tecnológica de farinha de trigo integral**. 2013. Tese (Doutorado) – UFSC.

OZBUN, T. STATISTA: **Pão e produtos de cereais 2023**. Disponível em: <<https://www.statista.com/outlook/cmo/food/bread-cereal-products/americas>>. Acesso em: 15 jan. 2024.

PAGANI, M. A.; MARTI, Alessandra; BOTTEGA, Gabriella. Wheat milling and flour quality evaluation. **Bakery products science and technology**, p. 17-53, 2014.

PALLARÉS, M. G.; LEÓN, A. E.; ROSELL, C. M. Trigo. In: LEÓN, Alberto Edel *et al.* De tales harinas, tales panes. **Granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica**. ISEKI-Food, 2007.

PAREYT, Bram *et al.* Lipids in bread making: Sources, interactions, and impact on bread quality. **Journal of Cereal Science**, v. 54, n. 3, p. 266-279, 2011.

PEDRESCHI, Franco *et al.* Development of a computer vision system to measure the color of potato chips. **Food research international**, v. 39, n. 10, p. 1092-1098, 2006.

PEJ CZ, Ewa; SPYCHAJ, Radosław; GIL, Zygmunt. Technological methods for reducing the content of fructan in rye bread. **European Food Research and Technology**, v. 246, p. 1839-1846, 2020.

PERESSINI, Donatella; SENSIDONI, Alessandro. Effect of soluble dietary fibre addition on rheological and breadmaking properties of wheat doughs. **Journal of cereal Science**, v. 49, n. 2, p. 190-201, 2009.

PERRY, P. A.; DONALD, A. M. The effect of sugars on the gelatinisation of starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 49, n. 2, p. 155-165, 2002.

PETERSSON, Anneli *et al.* Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean. **Biomass and bioenergy**, v. 31, n. 11-12, p. 812-819, 2007.

PICKRELL, D. The Rise and Fall and Rise of Rye. A History of the United States Seen Through the Eyes of Rye Whiskey. CRAFT by UMH. 2018.

PIHLAVA, Juha-Matti *et al.* Flavonoids, anthocyanins, phenolamides, benzoxazinoids, lignans and alkylresorcinols in rye (*Secale cereale*) and some rye products. **Journal of Cereal Science**, v. 79, p. 183-192, 2018.

POOLE, Nigel; DONOVAN, Jason; ERENSTEIN, Olaf. Agri-nutrition research: Revisiting the contribution of maize and wheat to human nutrition and health. **Food Policy**, v. 100, p. 101976, 2021.

POONIA, Amrita *et al.* Detection of adulteration in milk: A review. **International journal of dairy technology**, v. 70, n. 1, p. 23-42, 2017.

POPPER, Lutz; SCHÄFER, Werner; FREUND, Walter (Ed.). **Future of flour: A compendium of flour improvement**. AgriMedia, 2006.

POUTANEN, Kaisa S. *et al.* Grains—a major source of sustainable protein for health. **Nutrition Reviews**, v. 80, n. 6, p. 1648-1663, 2022.

PRABHASANKAR, P. *et al.* Distribution of free lipids and their fractions in wheat flour milled streams. **Food Chemistry**, v. 71, n. 1, p. 97-103, 2000.

PRASAD, Balasubramaniam Jaya; SHARAVANAN, Pazhaniyandi Subramania; SIVARAJ, Rengaraj. RETRACTED: Health benefits of black rice—A review. **Grain & Oil Science and Technology**, v. 2, n. 4, p. 109-113, 2019.

PUREWAL, Sukhvinder Singh *et al.* Solid-state fermentation of pearl millet with *Aspergillus oryzae* and *Rhizopus azygosporus*: Effects on bioactive profile and DNA damage protection activity. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 14, p. 150-162, 2020.

PURLIS, Emmanuel. Browning development in bakery products—A review. **Journal of Food Engineering**, v. 99, n. 3, p. 239-249, 2010.

QIN, Wanyu *et al.* Influence of particle size on the properties of rice flour and quality of gluten-free rice bread. **Lwt**, v. 151, p. 112236, 2021.

QUAGLIA, Giovanni *et al.* Ciencia y tecnología de la panificación. 1991.

RABE, Eckhard. Effect of processing on dietary fiber in foods. In: **Complex carbohydrates in foods**. CRC Press, 1999. p. 1089-1103.

RAGAE, S. M. *et al.* Extractability, Structure and Molecular Weight of  $\beta$ -Glucan from Canadian Rye (*Secale cereale* L.) Whole Meal. **Cereal chemistry**, v. 85, n. 3, p. 283-288, 2008.

RAGAE, Sanaa; ABDEL-AAL, El-Sayed M. Pasting properties of starch and protein in selected cereals and quality of their food products. **Food chemistry**, v. 95, n. 1, p. 9-18, 2006.

RAHEEM, Dele; LIU, Aiping; LI, Cheng. Textural and sensory characteristics of oven baked and steamed bread. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, p. 580-586, 2019.

RAHIM, Muhammad Abdul *et al.* Functional and nutraceutical properties of fructo-oligosaccharides derivatives: A review. **International Journal of Food Properties**, v. 24, n. 1, p. 1588-1602, 2021.

RAKHA, A.; ÅMAN, P.; ANDERSSON, R. Characterisation of dietary fibre components in rye products. **Food Chemistry**, v. 119, n. 3, p. 859-867, 2010.

RAVISANKAR, Shreeya; QUEIROZ, Valeria AV; AWIKA, Joseph M. Rye flavonoids–Structural profile of the flavones in diverse varieties and effect of fermentation and heat on their structure and antioxidant properties. **Food chemistry**, v. 324, p. 126871, 2020.

REDANT, Lore *et al.* Extractability and chromatographic separation of rye (*Secale cereale* L.) flour proteins. **Journal of Cereal Science**, v. 73, p. 68-75, 2017.

REDONDO-CUENCA, Araceli *et al.* Inulin extraction from common inulin-containing plant sources. **Industrial Crops and Products**, v. 170, p. 113726, 2021.

RENZETTI, Stefano; DAL BELLO, Fabio; ARENDT, Elke K. Microstructure, fundamental rheology and baking characteristics of batters and breads from different gluten-free flours treated with a microbial transglutaminase. **Journal of Cereal Science**, v. 48, n. 1, p. 33-45, 2008.

REVEDIN, ANNA; ARANGUREN. B; BECATTINI. R; FAR AWAY. L; MARCONI. AND; LIPPI. MM; SVOBODA. J. Evidence from thirty thousand years of plant food processing. Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 107, no. 44, p. 18815-18819, 2010.

RHOWELL JR, N. Tiozon *et al.* Metabolomics based inferences to unravel phenolic compound diversity in cereals and its implications for human gut health. **Trends in Food Science & Technology**, v. 127, p. 14-25, 2022.

RODEHUTSCORD, Markus *et al.* Variation in chemical composition and physical characteristics of cereal grains from different genotypes. **Archives of animal nutrition**, v. 70, n. 2, p. 87-107, 2016.

RODRIGUES, M.; Coelho, C.; FARIAS, R. *et al.* **ITPC: Instituto Tecnológico da Panificação e Confeitaria: Desempenho das Empresas de Panificação e Confeitaria em 2022 e Perspectivas para 2023.** Ano 2023. Acessado em: 29/04/2024. Disponível em: <<http://institutoitpc.org.br/indicadores-do-setor/>>. Acesso em 04/04/2024.

ROJAS, Lineth J. Vega *et al.* Physicochemical properties of nixtamalized corn flours with and without germ. **Food chemistry**, v. 220, p. 490-497, 2017.

ROKHSARTALAB-AZAR, Shadi *et al.* A new rye-based beverage with high polyphenols and amino acids: Production and study of physicochemical and sensory properties. **Journal of food processing and preservation**, v. 44, n. 3, p. e14349, 2020.

RONDANELLI, Mariangela *et al.* Rice germ macro-and micronutrients: A new opportunity for the nutraceuticals. **Natural Product Research**, v. 35, n. 9, p. 1532-1536, 2021.

ROSELL, Cristina M. *et al.* Wholemeal wheat bread: A comparison of different breadmaking processes and fungal phytase addition. **Journal of Cereal Science**, v. 50, n. 2, p. 272-277, 2009.

ROSELL, Cristina M.; SANTOS, Eva. Impact of fibers on physical characteristics of fresh and staled bake off bread. **Journal of Food Engineering**, v. 98, n. 2, p. 273-281, 2010.

RÓŻYŁO, Renata *et al.* Effect of adding fresh and freeze-dried buckwheat sourdough on gluten-free bread quality. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 50, n. 2, p. 313-322, 2015.

RUIBAL-MENDIETA, Nike L. *et al.* Spelt (*Triticum spelta* L.) and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) wholemeals have similar sterol profiles, as determined by quantitative liquid chromatography and mass spectrometry analysis. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 52, n. 15, p. 4802-4807, 2004.

SADOWSKA, A.; DIOWKSZ, A. Effect of transglutaminase on specific volume and crumb porosity of gluten-free buckwheat bread. **Żywn Nauka Technol. Jakość**, v. 27, p. 74-84, 2020.

SALAMON, A. *et al.* Sposoby zagospodarowania odpadów produkcyjnych przemysłu piwowarskiego. **Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych**, n. 558, 2011.

SALMANOWICZ, Bolesław P.; LANGNER, Monika; KUBICKA-MATUSIEWICZ, Helena. Variation of high-molecular-weight secalin subunit composition in Rye (*Secale cereale* L.) inbred lines. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 62, n. 43, p. 10535-10541, 2014.

SALT, L. J. *et al.* Composition and surface properties of dough liquor. **Journal of Cereal Science**, v. 43, n. 3, p. 284-292, 2006.

SANDVIK, Pernilla *et al.* Characterization of commercial rye bread based on sensory properties, fluidity index and chemical acidity. **Journal of Sensory Studies**, v. 31, n. 4, p. 283-295, 2016.

SAOUSSEM, Harrabi *et al.* Fatty acid accumulation in the different fractions of the developing corn kernel. **Food chemistry**, v. 117, n. 3, p. 432-437, 2009.

SCANLON, M. G.; ZGHAL, M. C. Bread properties and crumb structure. **Food research international**, v. 34, n. 10, p. 841-864, 2001.

SCHALK, Kathrin *et al.* Isolation and characterization of gluten protein types from wheat, rye, barley and oats for use as reference materials. **PloS one**, v. 12, n. 2, p. e0172819, 2017.

SCHEUER, Patrícia Matos *et al.* Quality of whole wheat breads made with fat substitute. 2015.

SCHIRALDI, A.; PIAZZA, L.; RIVA, M. Bread staling: a calorimetric approach. **Cereal Chemistry**, v. 73, n. 1, p. 32-39, 1996.

SEBRAE. **Estudo de mercado, indústria: Panificação, 2017.** Disponível em: <https://sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/BA/Anexos/Ind%C3%BAstria%20da%20panifica%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em 29 de abril de 2024.

SELOMULYO, Vania Octaviani; ZHOU, Weibiao. Frozen bread dough: Effects of freezing storage and dough improvers. **Journal of Cereal Science**, v. 45, n. 1, p. 1-17, 2007.

SGARBIERI, V. C. Proteínas em Alimentos Protéicos. **Propriedades–Degradações–Modificações. Livraria Varela, Sao Paulo**, 1996.

SHAHBANDEH, M., STIPP, H. **Leading countries in rye production in 2019/2020 (2023).** Statista. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/190489/rye-production-in-specified-countries/>. Accessed em 20th Mar 2023.

SHAHRBABKI, Parvin Eslami *et al.* Probabilistic non-carcinogenic and carcinogenic risk assessments (Monte Carlo simulation method) of the measured acrylamide content in Tah-dig using QuEChERS extraction and UHPLC-MS/MS. **Food and chemical toxicology**, v. 118, p. 361-370, 2018.

SHEWRY, Peter R. *et al.* Effects of genotype and environment on the content and composition of phytochemicals and dietary fiber components in rye in the HEALTHGRAIN diversity screen. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 58, n. 17, p. 9372-9383, 2010.

SHEWRY, Peter R.; LAFIANDRA, Domenico. Wheat glutenin polymers 1. structure, assembly and properties. **Journal of Cereal Science**, v. 106, p. 103486, 2022.

SHRIVASTAVA, Chandrima; CHAKRABORTY, Snehasis. Bread from wheat flour partially replaced by fermented chickpea flour: Optimizing the formulation and fuzzy analysis of sensory data. **LWT**, v. 90, p. 215-223, 2018.

SINGH, R. S.; SINGH, Taranjeet; LARROCHE, Christian. Biotechnological applications of inulin-rich feedstocks. **Bioresource technology**, v. 273, p. 641-653, 2019.

SINGH, S. *et al.* Relationship of polymeric proteins with pasting, gel dynamic- and dough empirical-rheology in different Indian wheat varieties. **Food Hydrocolloids**, v. 25, p. 19-24, 2011.

SKENDI, A. *et al.* Effects of two barley  $\beta$ -glucan isolates on wheat flour dough and bread properties. **Food chemistry**, v. 119, n. 3, p. 1159-1167, 2010.

SOL, Xinyang *et al.* The effects of wheat cultivar, flour particle size, and bran content on the rheology and microstructure of dough and the texture of whole wheat bread and pasta. **Food Chemistry**, v. 410, p. 135447, 2023.

SONG, Yihu; ZHENG, Qiang. Dynamic rheological properties of wheat flour dough and proteins. **Trends in food science & technology**, v. 18, n. 3, p. 132-138, 2007.]

SOYCAN, Gulden *et al.* Composition and content of phenolic acids and avenanthramides in commercial oat products: Are oats an important polyphenol source for consumers?. **Food chemistry: X**, v. 3, p. 100047, 2019.

SPIES, Ronald. Application of rheology in the bread industry. In: **Dough rheology and baked product texture**. Boston, MA: Springer US, 1990. p. 343-361.

SROAN, Baninder S.; BEAN, Scott R.; MACRITCHIE, Finlay. Mechanism of gas cell stabilization in bread making. I. The primary gluten–starch matrix. **Journal of cereal science**, v. 49, n. 1, p. 32-40, 2009b.

SROAN, Baninder S.; MACRITCHIE, Finlay. Mechanism of gas cell stabilization in breadmaking. II. The secondary liquid lamellae. **Journal of Cereal Science**, v. 49, n. 1, p. 41-46, 2009a.

SRUTHI, N. U. *et al.* An overview of conventional and emerging techniques of roasting: Effect on food bioactive signatures. **Food Chemistry**, v. 348, p. 129088, 2021.

STOJCESKA, Valentina *et al.* A comparison of the ability of several small and large deformation rheological measurements of wheat dough to predict baking behaviour. **Journal of food engineering**, v. 83, n. 4, p. 475-482, 2007.

STROP, Pavel. Versatility of microbial transglutaminase. **Bioconjugate chemistry**, v. 25, n. 5, p. 855-862, 2014.

SUN, Xinyang *et al.* The effects of wheat cultivar, flour particle size and bran content on the rheology and microstructure of dough and the texture of whole wheat breads and noodles. **Food Chemistry**, v. 410, p. 135447, 2023.

SUN, Xinyang; WU, Simiao; KOKSEL, Filiz; XIE, Minhao; FANG, Yong. Effects of ingredient and processing conditions on the rheological properties of whole wheat flour dough during breadmaking - A review. **Food Hydrocolloids**, v. 135, 2023, p. 108123.

SUN, Yulin *et al.* Characterization of an alkylresorcinol synthase that forms phenolics accumulating in the cuticular wax on various organs of rye (*Secale cereale*). **The Plant Journal**, v. 102, n. 6, p. 1294-1312, 2020.

SZAKÁCS, Éva *et al.* Addition of chromosome 4R from Hungarian rye cultivar Lovaspatonai confers resistance to stripe rust and outstanding end-use quality in wheat. **Journal of cereal science**, v. 71, p. 204-206, 2016.

SZCZESNIAK, A. S. Texture is a sensory property. **Food Quality and Preference**, v. 13, p. 215 – 225, 2002.

TAGGART, P.; MITCHELL, J. R. Starch. **Handbook of hydrocolloids**, p. 108-141, 2009.

TAKEDA, Yasuhito; TOMOOKA, Shinji; HIZUKURI, Susumu. Structures of branched and linear molecules of rice amylose. **Carbohydrate Research**, v. 246, n. 1, p. 267-272, 1993.

TANG, Shuying *et al.* Impact of wheat flour substitution by lychee juice by-products on bread quality characteristics and microstructure. **LWT**, v. 113696, 2022.

TATHAM, Arthur S.; SHEWRY, Peter R. The S-poor prolamins of wheat, barley and rye. **Journal of Cereal Science**, v. 22, n. 1, p. 1-16, 1995.

TESTER, F.; MORRISON, W.R. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of Amylopectin, amylose, and lipids. **Cereal Chemistry**, v. 67, p. 551, 1990.

THEWISSEN, Bert G. *et al.* Foaming properties of wheat gliadin. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 59, n. 4, p. 1370-1375, 2011.

THOMAS, D. J.; ATWELL, W. A. In *Starches: Practical guides for the food industry* (pp. 19–22). **St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists**, 1999.

TIWARI, U. *et al.* Probabilistic methodology for assessing changes in the level and molecular weight of barley  $\beta$ -glucan during bread baking. **Food chemistry**, v. 124, n. 4, p. 1567-1576, 2011.

TRAN, Thao *et al.* Lexicon development for the sensory description of rye bread. **Journal of sensory studies**, v. 34, n. 1, p. e12474, 2019.

TRIAL, Distillery. The Distiller/Farmer 5 Year Study Results Are In–Rye Variety Determines Flavor. Distillery Trial <https://www.distillerytrail.com/blog/the-distillerfarmer-5-year-study-results-are-in-rye-variety-determines-flavor>, 2021.

TRINIDAD-CALDERON, Plinio A. *et al.* Maize bioactive peptides: From structure to human health. **Journal of Cereal Science**, v. 100, p. 103232, 2021.

TRUMBO, Paula *et al.* Dietary reference intakes for energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein and amino acids.(Commentary). **Journal of the american dietetic association**, v. 102, n. 11, p. 1621-1631, 2002.

TSEN, Cho C. Amino acid composition and biological value of cereal germs. In: *Amino Acid Composition and Biological Value of Cereal Proteins: Proceedings of the International Association for Cereal Chemistry Symposium on Amino Acid Composition and Biological Value of Cereal Proteins Budapest, Hungary, May 31–June 1, 1983*. **Springer Netherlands**, 1985. p. 453-466.

TUCK, Gill *et al.* The potential distribution of bioenergy crops in Europe under present and future climate. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 3, p. 183-197, 2006.

UR REHMAN, Muhammad Zia *et al.* Effect of acidified biochar on bioaccumulation of cadmium (Cd) and rice growth in contaminated soil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 19, p. 101015, 2020.

US DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES *et al.* **Dietary guidelines for Americans 2005**. Disponível em :<<http://www.health.gov/dietaryguidelines/dga2005/document/default.htm>> 2005. Visto em 12 de jan. 2024.

VAMADEVAN, Varatharajan; BERTOFT, Eric. Structure-function relationships of starch components. **Starch-Stärke**, v. 67, n. 1-2, p. 55-68, 2015.

VAN HUNG, Pham; MAEDA, Tomoko; MORITA, Naofumi. Dough and bread qualities of flours with whole waxy wheat flour substitution. **Food research international**, v. 40, n. 2, p. 273-279, 2007.

VAN LAERE, André; VAN DEN ENDE, Wim. Inulin metabolism in dicots: chicory as a model system. **Plant, Cell & Environment**, v. 25, n. 6, p. 803-813, 2002.

VAN VLIET, T. O. N.; PRIMO-MARTÍN, CRISTINA. Interplay between product characteristics, oral physiology and texture perception of cellular brittle foods. **Journal of Texture Studies**, v. 42, n. 2, p. 82-94, 2011.

VEREGIN, R. P. *et al.* Characterization of the crystalline A and B starch polymorphs and investigation of starch crystallization by high-resolution carbon-13 CP/MAS NMR. **Macromolecules**, v. 19, n. 4, p. 1030-1034, 1986.

VERMA, Deepak Kumar; SRIVASTAV, Prem Prakash. Bioactive compounds of rice (*Oryza sativa* L.): Review on paradigm and its potential benefit in human health. **Trends in Food Science & Technology**, v. 97, p. 355-365, 2020.

VERSLUYS, Maxime *et al.* A novel chicory fructanase can degrade common microbial fructan product profiles and displays positive cooperativity. **Journal of Experimental Botany**, v. 73, n. 5, p. 1602-1622, 2022.

VERSPREET, Joran *et al.* Cereal grain fructans: structure, variability and potential health effects. **Trends in Food Science & Technology**, v. 43, n. 1, p. 32-42, 2015.

VERWIMP, Tiny *et al.* Isolation and characterisation of rye starch. **Journal of cereal science**, v. 39, n. 1, p. 85-90, 2004.

VIJN, Irma; SMEEKENS, Sjef. Fructan: more than a reserve carbohydrate?. **Plant physiology**, v. 120, n. 2, p. 351-360, 1999.

VINKX, C. J. A.; DELCOUR, J. A. Rye (*Secale cereale*L.) arabinoxylans: A critical review. **Journal of Cereal Science**, v. 24, n. 1, p. 1-14, 1996.

VUHOLM, Stine *et al.* Whole-grain rye and wheat affect some markers of gut health without altering the fecal microbiota in healthy overweight adults: a 6-week randomized trial. **The Journal of nutrition**, v. 147, n. 11, p. 2067-2075, 2017.

WAIGH, Thomas A. *et al.* The phase transformations in starch during gelatinisation: a liquid crystalline approach. **Carbohydrate Research**, v. 328, n. 2, p. 165-176, 2000.

WALKER, C. E. *et al.* Accelerated starch-paste characterization with the Rapid Visco-Analyzer. **Cereal Foods World**, v. 33, n. 6, p. 491-494, 1988.

WANG, L. Z.; WHITE, P. J. from Oats with Different Lipid Contents'. **Cereal Chem**, v. 71, n. 5, p. 443-450, 1994.

WANG, Mingwei. Effect of pentosans on gluten formation and properties. **Wageningen University and Research**, 2003.

WANG, Y. J. *et al.* Amylopectin and Intermediate Materials in Starches from Mutant Genotypes. **Cereal Chem**, v. 70, n. 5, p. 521-525, 1993.

WANG, Yujuan *et al.* Micro-malting for the quality evaluation of rye (*Secale cereale*) genotypes. **Fermentation**, v. 4, n. 3, p. 50, 2018.

WEIPERT, D. The benefits of basic rheometry in studying dough rheology. **Cereal Chemistry**, v. 67, n. 4, p. 311-317, 1990.

WELLNER, Nikolaus *et al.* Changes in protein secondary structure during gluten deformation studied by dynamic Fourier transform infrared spectroscopy. **Biomacromolecules**, v. 6, n. 1, p. 255-261, 2005.

WIESER, H.; KIEFFER, R. Correlations of the amount of gluten protein types to the technological properties of wheat flours determined on a micro-scale. **Journal of Cereal Science**, v. 34, n. 1, p. 19-27, 2001.

WIESER, Herbert. Chemistry of gluten proteins. **Food microbiology**, v. 24, n. 2, p. 115-119, 2007.

WOOD, Peter J. Cereal  $\beta$ -glucans in diet and health. **Journal of cereal science**, v. 46, n. 3, p. 230-238, 2007.

WOOD, Peter J. Oat and rye  $\beta$ -glucan: properties and function. **Cereal Chemistry**, v. 87, n. 4, p. 315-330, 2010.

WRIGLEY, Colin (Ed.). **Cereal grains: assessing and managing quality**. Elsevier, 2010.

XHAFERAJ, Majlinda *et al.* Characterization of rye flours and their potential as reference material for gluten analysis. **Food Chemistry**, v. 408, p. 135148, 2023.

- YASUEDA, H., KUMAZAWA, Y., & MOTOKI, M. (1994). Purification and characterization of a tissue-type transglutaminase from red sea bream (*Pagrus major*). **Bioscience, biotechnology, and biochemistry**, 58(11), 2041-2045.
- YONEMOTO, Patrícia Guedes; CALORI-DOMINGUES, Maria Antonia; FRANCO, Celia Maria Landi. Effect of granule size on the structural and physicochemical characteristics of wheat starch. **Food Science and Technology**, v. 27, p. 761-771, 2007.
- YOON, Jae-Wook; LIM, Seung-Taik. Molecular fractionation of starch by density-gradient ultracentrifugation. **Carbohydrate research**, v. 338, n. 7, p. 611-617, 2003.
- ZAIDUL, I. S. M. *et al.* Thermal analysis of mixtures of wheat flour and potato starches. **Food Hydrocolloids**, v. 22, n. 4, p. 499-504, 2008.
- ZEEMAN, Samuel C.; KOSSMANN, Jens; SMITH, Alison M. Starch: its metabolism, evolution, and biotechnological modification in plants. **Annual review of plant biology**, v. 61, p. 209-234, 2010.
- ZENG, M. *et al.* Sources of variation for starch gelatinization, pasting, and gelation properties in wheat. **Cereal Chemistry**, v. 74, n. 1, p. 63-71, 1997.
- ZHU, Fan. Glycemic control in Chinese steamed bread: Strategies and opportunities. **Trends in Food Science & Technology**, v. 86, p. 252-259, 2019.
- ZHU, Ke-Xue; ZHOU, Hui-Ming; QIAN, Hai-Feng. Proteins extracted from defatted wheat germ: nutritional and structural properties. **Cereal Chemistry**, v. 83, n. 1, p. 69-75, 2006.
- Zhu, Y. *et al.* Microbial transglutaminase - a review of its production and application in food processing. **Applied microbiology and biotechnology**, vol. 44, p. 277-282, 1995.
- ZOBEL, H. F. Molecules to granules: a comprehensive starch review. **Starch-Stärke**, v. 40, n. 2, p. 44-50, 1988.
- ZYS, Angelika; GARNCAREK, Zbigniew. Jakość pieczywa gryczanego z dodatkiem mąk bezglutenowych. **Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu**, n. 494, p. 255-268, 2017.