

UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

TESE

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA, FÍSICO-
QUÍMICA E SENSORIAL DE PÃES SEM GLÚTEN
ELABORADOS COM MILHETO (*Pennisetum*
glaucum (L.) R.)**

Bárbara Amorim Silva

2026



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA, FÍSICO-QUÍMICA E
SENSORIAL DE PÃES SEM GLÚTEN ELABORADOS COM
MILHETO (*Pennisetum glaucum* (L.) R.)**

BÁRBARA AMORIM SILVA

Sob a Orientação do Professor D.Sc.
José Luís Ramírez Ascheri

e Co-orientação da Professora Dra.Sc.
Marília Penteado Stephan

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos**, no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Área de Concentração em Tecnologia de Alimentos.

Seropédica - RJ
Março de 2026

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586c SILVA, BÁRBARA AMORIM, 26/06/1974-
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA, FÍSICO-QUÍMICA E
SENSORIAL DE PÃES SEM GLÚTEN ELABORADOS COM MILHETO
(*Pennisetum glaucum* (L.) R.) / BÁRBARA AMORIM SILVA.
RIO DE JANEIRO, 2026.
98 f.: il.

Orientador: JOSÉ LUIS RAMIREZ ASCHERI.
Coorientadora: MARILIA PENTEADO STEPHAN.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE ALIMENTOS/DOCTORADO EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 2026.

1. Produção de pães sem glúten. 2. Farinha integral
de milho Pérola (*Pennisetum glaucum* (L.) R.). 3.
Reologia da massa sem glúten. 4. Análise físico-química
de pães isentos de glúten. 5. Aceitabilidade
sensorial. I. RAMIREZ ASCHERI, JOSÉ LUIS , 1955-,
orient. II. PENTEADO STEPHAN, MARILIA, 1955-,
coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE ALIMENTOS/DOCTORADO EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE ALIMENTOS. IV. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS



TERMO Nº 186/2026 - PPGCTA (12.28.01.00.00.00.41)

Nº do Protocolo: 23083.014969/2026-38

Seropédica-RJ, 01 de abril de 2026.

BÁRBARA AMORIM SILVA

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos, no Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, área de Concentração em Ciência de Alimentos.

TESE APROVADA EM 31/03/2026

JOSÉ LUIS RAMIREZ ASCHERI, (Dr) EMBRAPA (orientador)

JOSE LUCENA BARBOSA JUNIOR, (Dr) UFRRJ

FELIPE MACHADO TROMBETE, (Dr) UFSJ

MANUEL SALVADOR VICENTE PLATA OVIEDO, (Dr) UTFPR

RONEL JOEL BAZAN COLQUE, (Dr)

Documento não acessível publicamente

(Assinado digitalmente em 01/04/2026 09:50)

JOSE LUCENA BARBOSA JUNIOR
COORDENADOR CURS/POS-GRADUACAO - TITULAR
PPGCTA (12.28.01.00.00.00.41)
Matricula: ###550#9

(Assinado digitalmente em 01/04/2026 17:04)

FELIPE MACHADO TROMBETE
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.916-##

(Assinado digitalmente em 01/04/2026 11:53)

RONEL JOEL BAZAN COLQUE
ASSINANTE EXTERNO
Passaporte: ###0165#0

(Assinado digitalmente em 01/04/2026 17:28)

MANUEL SALVADOR VICENTE PLATA OVIEDO
ASSINANTE EXTERNO
Passaporte: ###6919#5

(Assinado digitalmente em 01/04/2026 09:53)

JOSE LUIS RAMIREZ ASCHERI
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.788-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: 186, ano: 2026, tipo: TERMO, data de emissão: 01/04/2026 e o código de verificação: 5f636e3217

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Jeová, o Supremo Criador do universo, fonte de sabedoria, força e conhecimento, cuja orientação e provisão tornam todas as coisas possíveis.

"Levantem os olhos para o céu e vejam. Quem criou essas coisas? Foi aquele que faz sair o exército delas por número; ele chama todas elas por nome. Por causa da sua imensa energia dinâmica e do seu impressionante poder, nenhuma delas está faltando."

— Isaías 40:26, Tradução do Novo Mundo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço pelo apoio institucional e financeiro que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pela oportunidade concedida para a realização deste curso.

Ao Prof. Dr. José Lucena Barbosa Junior, coordenador do Programa de Pós-Graduação, pela dedicação à gestão acadêmica e pelo compromisso com o fortalecimento do programa, assegurando a qualidade da formação discente e promovendo uma estrutura acadêmica pautada no princípio da indissociabilidade entre ensino, pesquisa e extensão.

À Embrapa Agroindústria de Alimentos, pela disponibilização das instalações e da infraestrutura necessárias para a execução deste estudo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Luis Ramírez Ascheri, pela orientação, confiança e valiosos ensinamentos ao longo desta trajetória.

À minha coorientadora, Profa. Dra. Marília Penteado Stephan, pelo ensinamento, apoio constante e disponibilidade durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Wanderlei Piller de Carvalho, a quem expresso minha profunda gratidão pelo apoio fundamental à realização desta pesquisa, pela disponibilização de recursos, equipamentos, infraestrutura e suporte necessários ao desenvolvimento do estudo, bem como pelas valiosas contribuições científicas.

Ao Dr. Jhony William Vargas Solórzano, pelo ensinamento, orientação técnica e pela dedicação em compartilhar seu conhecimento ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização e conclusão deste projeto.

RESUMO GERAL

SILVA, Bárbara Amorim da. **Caracterização tecnológica, físico-química e sensorial de pães sem glúten elaborados com milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R.)**, 2026. 98 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2026.

A crescente demanda por produtos panificados sem glúten, motivada tanto pelo aumento do diagnóstico da doença celíaca quanto pelo consumo por indivíduos não celíacos, tem impulsionado a necessidade de formulações nutricionalmente superiores e tecnologicamente estáveis. Nesta tese, investigou-se a aplicação da farinha integral de milheto como ingrediente-chave para o desenvolvimento de pães sem glúten, integrando avaliação teórica, físico-química e sensorial. No Capítulo 1, realizou-se uma revisão abrangente sobre desafios nutricionais e tecnológicos na panificação sem glúten, destacando o papel central da escolha das matérias-primas, da engenharia do tamanho de partícula e da estruturação alternativa da massa por meio da interação entre amido, proteínas vegetais, fibras e hidrocolóides. O Capítulo 2 apresenta estudo experimental no qual farinhas integrais de milheto foram utilizadas para aprimorar características tecnológicas e sensoriais de pães sem glúten. As formulações com milheto demonstraram melhorias na composição nutricional, maior teor de fibras e compostos bioativos, desempenho físico-químico favorável, além de incremento estrutural, refletido em melhor volume específico, textura equilibrada e miolo mais homogêneo quando comparadas às formulações tradicionais. No Capítulo 3, procede-se à avaliação sensorial dos pães desenvolvidos, considerando aceitabilidade, atributos descritivos, *drivers of liking* e preferências do consumidor, com foco em como propriedades físico-químicas influenciam a percepção sensorial. A integração dos resultados dos três capítulos evidencia que o milheto se apresenta como um cereal estratégico para a formulação de pães sem glúten, permitindo avanços nutricionais, estruturais e sensoriais, e contribuindo para soluções tecnicamente robustas, mais sustentáveis e alinhadas às necessidades dos consumidores.

Palavras-chave: pão sem glúten; farinha de milheto integral; qualidade nutricional; propriedades físicas; aceitabilidade sensorial.

GENERAL ABSTRACT

SILVA, Bárbara Amorim da. **Technological, Physicochemical, and Sensory Characterization of Gluten-Free Breads Made with Millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R.)**. 2026. 98 f. Thesis (Doctorate in Food Science and Technology). Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2026.

The growing demand for gluten-free baked goods, driven by both the increase in celiac disease diagnoses and consumption by non-celiac individuals, has fueled the need for nutritionally superior and technologically stable formulations. This thesis investigated the application of whole millet flour as a key ingredient for the development of gluten-free breads, integrating theoretical, physicochemical, and sensory evaluation. Chapter 1 presents a comprehensive review of nutritional and technological challenges in gluten-free breadmaking, highlighting the central role of raw material selection, particle size engineering, and alternative dough structuring through the interaction between starch, vegetable proteins, fibers, and hydrocolloids. Chapter 2 presents an experimental study in which whole millet flours were used to improve the technological and sensory characteristics of gluten-free breads. Millet-based formulations demonstrated improvements in nutritional composition, higher fiber and bioactive compound content, favorable physicochemical performance, and structural enhancement, reflected in better specific volume, balanced texture, and a more homogeneous crumb when compared to traditional formulations. Chapter 3 presents a sensory evaluation of the developed breads, considering acceptability, descriptive attributes, drivers of liking, and consumer preferences, focusing on how physicochemical properties influence sensory perception. The integration of the results from the three chapters shows that millet presents itself as a strategic cereal for the formulation of gluten-free breads, allowing for nutritional, structural, and sensory advancements, and contributing to technically robust, more sustainable solutions aligned with consumer needs.

Keywords: gluten-free bread; whole millet flour; nutritional quality; physical properties; sensory quality.

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 1. Produção de trigo em milhões de toneladas: Ranking dos principais países (2015–2024).....	9
Tabela 2. Composição nutricional de grão de cereais.	11
Tabela 3. Aminoácidos limitantes das proteínas de alguns cereais (mg de aminoácido/g).....	11
Tabela 4. Composição nutricional de milhetos comuns por 100 g (com nomenclatura científica)	12
Tabela 5. Compostos fenólicos de grãos cereais integrais.	13
Tabela 6. Composição nutricional dos pseudocereais (quinoa, amaranto e trigo sarraceno) ..	14
Tabela 7. Comparação entre o moinho de martelo e o moinho de rolos.	16
Tabela 8. Comparação dos parâmetros de textura (TPA) de diferentes formulações de pães com e sem glúten.	22
Tabela 9. Overall acceptance § of gluten-free breads and according to participants' segmentation by profile and consumption habits.	48
Tabela 10. Formulação dos pães sem glúten com diferentes níveis de substituição por farinha de milheto (g).....	58
Tabela 11. Médias de expectativa e aceitação das amostras de pães sem glúten elaboradas com diferentes níveis de farinha de milheto.....	60
Tabela 12. Resultados do teste Q de Cochran para diferentes amostras e atributos de pão. ...	61

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama do princípio de funcionamento dos moinhos. (a) moinho martelo (b) moinho de rolos.	17
Figura 2. Representação esquemática da Análise de Perfil de Textura (TPA) obtida por meio de ensaio de dupla compressão.....	21
Figure 3. Preparation of whole-grain pearl milled flour (PMF) for gluten-free bread making.	35
Figura 4. Pasting and hydration responses of a starch-based flour blend as affected by whole-grain pearl millet flour (PMF) incorporation. (a) RVA viscosity profiles; (b) pasting properties: peak viscosity (PV), gelation viscosity (GV), breakdown viscosity (BV), and setback viscosity (SV); (c) hydration properties: water solubility index (WSI) and water absorption index (WAI).	41
Figura 5. Physical changes before and during fermentation of doughs and after cooling of breads. Viscoelastic properties of doughs before fermentation; specific volume of doughs and breads: as a function of time and (c) as a function of PMF incorporation; (d) bread moisture distribution. PMF: whole-grain pearl millet flour, WB: wheat bread.	43
Figure 6. Scanned images and crumb micrographs for wheat bread (WB) and gluten-free breads (GFB) as affected by whole-grain pearl millet flour incorporation (in %).	44
Figure 7. (a) Texture profiles of gluten-free bread (GFB) crumbs as affected by whole-grain pearl millet flour incorporation (PMF, %); (b) change in texture parameters: hardness (HA), chewiness (CH), cohesiveness (CO), and springiness (SP).....	46
Figure 8. Internal preference map. (a) Gluten-free breads (GFBs) as affected by whole-grain pearl millet flour incorporation (PMF, %). C: commercial; (b) consumers segmented by preference profile (cluster (1); cluster (2)) and by prior consumption (Yes; No).	49
Figura 9. Mapa fatorial da Análise de correspondência obtido a partir dos dados do teste CATA, mostrando a associação entre as amostras de pães e os descritores sensoriais.	62
Figura 10. Análise de penalidade dos atributos sensoriais obtidos a partir dos dados do teste Check-All-That-Apply (CATA) para as amostras de pães sem glúten com diferentes níveis de milho. Valores positivos indicam aumento da aceitação quando o atributo é percebido, enquanto valores negativos indicam redução da aceitação média associada à presença do atributo.....	64
Figura 11. Impacto dos atributos de aparência na aceitação dos pães sem glúten, avaliado por análise de penalidade baseada nos dados do teste Check-All-That-Apply (CATA).....	65
Figura 12. Impacto dos atributos de aroma e sabor na aceitação dos pães sem glúten, avaliado por análise de penalidade baseada nos dados do teste Check-All-That-Apply (CATA).....	66

LISTA DE ABREVIATURAS

CAPÍTULO I

TPA	Análise de Perfil de Textura
FDA	Food and Drug Administration
GAE	Equivalente de ácido gálico
FAO	Food and Agriculture Organization

CAPÍTULO II

PMF	Whole-grain pearl millet flour
BF	Base flour
BRM	Breaking roller mill
RRM	Reduction roller mill
HM	Hammer mill
D	Discarded fraction
F	Fibrous fraction
P	Milled product
PT	Pasting temperature
PV	Peak viscosity
TV	Trough viscosity
GV	Gelation viscosity
BV	Breakdown viscosity
SV	Setback viscosity
WSI	Water solubility index
WAI	Water absorption index
MD	Starch granule mean diameter
G'	Elastic modulus
G''	Viscous modulus
DSV	Dough specific volume
BSV	Bread specific volume
HA	Crumb hardness
CO	Crumb cohesiveness
SP	Crumb springiness
CH	Crumb chewiness
BT	Bread type
GFB	Gluten-free bread
GFB-C	Commercial gluten-free bread
WB	Wheat bread
ANOVA	Analyses of variance
PCA	Principal component analysis

CAPÍTULO III

CATA	Check-All-That-Apply
PB	Pão base
PC	Pão comercial

SUMÁRIO

RESUMO GERAL

GENERAL ABSTRACT

INTRODUÇÃO GERAL 1

CAPÍTULO I.....3

RESUMO.....4

1.1. Introdução6

1.2. Doença celíaca e restrição ao glúten.....6

1.2.1. Definição e implicações da doença celíaca.....6

1.2.2. Restrição permanente ao glúten e implicações alimentares.....6

1.2.3. Impactos nutricionais da dieta sem glúten7

1.3. Mercado de produtos sem glúten e demandas do consumidor7

1.3.1. Expansão do mercado de produtos sem glúten.....7

1.3.2. Consumo por não celíacos8

1.3.3. Necessidade de produtos sem glúten nutricionalmente melhorados8

1.3.4. Dependência de trigo e o papel de culturas alternativas na segurança alimentar9

1.4. Fontes alternativas para panificação sem glúten.....10

1.4.1. Cereais10

1.4.2. Pseudocereais.....13

1.4.3. Pulses14

1.5. Moagem15

1.6. Formação e comportamento da massa e do pão sem glúten17

1.6.1. Papel do glúten na formação da massa panificável18

1.6.2. Função do amido na estruturação da massa sem glúten18

1.6.3. Sistemas estruturais substitutos ao glúten na massa18

1.6.4. Propriedades reológicas da massa sem glúten18

1.6.5. Processamento térmico da massa (fornecimento).....19

1.7. Propriedades físicas dos pães sem glúten19

1.7.1. Volume específico e estrutura do miolo19

1.7.2. Perfil de Textura21

1.8. Conclusão.....23

CAPÍTULO II31

2.1. Introduction.....32

2.2. Materials and Methods.....33

2.2.1. Materials33

2.2.2. Preparation of Whole-Grain Pearl Millet Flour34

2.2.3. Preparation of Base Flour Blends	35
2.2.4. Pasting and Hydration Properties of Base Flours	35
2.2.5. Preparation of Functional Additives and Yeast Activation	36
2.2.6. Mixing Procedure and Dough Formation	36
2.2.7. Dough Rheological Properties	36
2.2.8. Fermentation and Baking Procedures	37
2.2.9. Determination of Dough and Bread Specific Volume	37
2.2.10. Determination of Bread Moisture Content	37
2.2.11. Proximate Composition Analysis of Bread	38
2.2.12. Crumb Structure and Microstructural Analysis	38
2.2.13. Crumb Texture Profile Analysis	38
2.2.14. Crumb Color Measurement	39
2.2.15. Consumer Acceptance Test	39
2.2.16. Experimental Design and Statistical Analysis	39
2.3. Results and Discussion	40
2.3.1. Pasting and Hydration Properties of Base Flour	40
2.3.2. Dough Viscoelastic Properties	42
2.3.3. Physical Changes During Fermentation and Baking	42
2.3.4. Structure and Microstructure of Breads	45
2.3.5. Texture Profile Analysis	46
2.3.6. Consumer Acceptance Results	47
2.4. Conclusions	49
CAPÍTULO III	54
3.1. INTRODUÇÃO	57
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.2.1. Amostras	57
3.2.2. Seleção dos atributos sensoriais	58
3.2.3. Consumidor	58
3.2.4. Avaliação sensorial com consumidores	58
3.2.5. Análise estatística	59
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
3.3.1. Comparação da Expectativa de Aceitação	59
3.3.2. Check-All-That-Apply (CATA)	60
3.3.3. Análise de penalidade baseados no CATA	63
3.3.4. Penalidade dos atributos de aparência	64
3.3.5. Penalidade dos atributos de aroma e sabor	66
3.4. CONCLUSÃO	67

CONCLUSÃO GERAL74
ANEXOS.....76

INTRODUÇÃO GERAL

A doença celíaca constitui uma enteropatia autoimune desencadeada pela ingestão de glúten em indivíduos geneticamente predispostos, caracterizando-se por inflamação crônica da mucosa do intestino delgado, atrofia das vilosidades e prejuízos severos na absorção de nutrientes. A única terapêutica atualmente eficaz consiste na exclusão total e permanente do glúten da dieta (DOYLE et al., 2025).

Nas últimas décadas, a combinação entre maior acurácia diagnóstica, ampliação de políticas de vigilância alimentar e crescente conscientização da população resultou em aumento significativo no número de indivíduos que dependem de alimentos isentos de glúten para garantir saúde e bem-estar. Paralelamente, um contingente crescente de consumidores não celíacos passou a adotar produtos “*gluten-free*” motivados por percepções de saúde, digestibilidade ou estilo de vida, consolidando um mercado global em franca expansão (ZERBINI et al., 2024).

Apesar do crescimento econômico e comercial, grande parte dos produtos panificados sem glúten disponíveis apresenta limitações nutricionais e tecnológicas relevantes. Formulações convencionais tendem a basear-se em amidos refinados, féculas de baixa densidade nutricional e sistemas estabilizantes que, embora permitam certa funcionalidade, não restauram integralmente as propriedades estruturantes conferidas pelo glúten. O resultado são produtos com menor valor nutritivo, textura frequentemente indesejável, menor volume específico, envelhecimento acelerado e desempenho sensorial inferior aos equivalentes derivados do trigo (DIEZ-SAMPEDRO et al., 2019; CALIFANO et al., 2025).

Tais limitações ressaltam a necessidade de abordagens mais robustas, fundamentadas em matérias-primas alternativas e processos capazes de promover redes estruturais que compensem a ausência do glúten e ofereçam ao consumidor produtos seguros, nutritivos e sensorialmente atrativos (FRY et al., 2018; MYHRSTAD et al., 2021). Diante disso, o milho, especialmente o *Pennisetum glaucum*, emerge como um cereal de grande potencial para aplicação na panificação sem glúten. Reconhecido por sua elevada resistência agrônômica, densidade nutricional, teores expressivos de fibras, minerais e compostos bioativos e ausência natural de glúten, o milho representa uma das fontes vegetais mais promissoras para formulações que buscam conciliar estabilidade estrutural, melhoria tecnológica e enriquecimento nutricional (CHANDRASEKARA ; SHAHIDI, 2011b; OLIVEIRA et al., 2022).

Nesse contexto, estudos recentes indicam que a utilização do milho pode aumentar o teor de fibras nas formulações, favorecer maior retenção de água, promover melhorias na estrutura do miolo e ampliar atributos sensoriais, indicando possível vantagem competitiva frente a outros cereais tradicionalmente empregados (DE AGUIAR et al., 2024). Para além da composição química, a funcionalidade tecnológica do milho é fortemente dependente de fatores como tipo de moagem, distribuição granulométrica, grau de dano ao amido, teor de lipídios, natureza das proteínas e interação com hidrocoloides (THOMAS et al., 2012; DE LA HERA et al., 2013). A engenharia do tamanho de partícula, em especial, exerce influência direta sobre a absorção de água, gelatinização do amido, retenção gasosa e estabelecimento da matriz estrutural durante mistura, fermentação e forneamento — pontos críticos na panificação sem glúten (TIAN et al., 2022). Compreender essas interações é fundamental para orientar o desenvolvimento de produtos mais estáveis e tecnologicamente eficientes.

Ao mesmo tempo, qualquer avanço tecnológico deve ser suportado por evidências sensoriais, pois a aceitabilidade do consumidor é o fator determinante para o sucesso comercial dos produtos. A avaliação sensorial, seja por análise descritiva ou por testes de aceitação, permite identificar atributos-chave que influenciam a preferência e os chamados *drivers of liking*. Considerando que produtos sem glúten frequentemente apresentam textura mais firme,

cor diferenciada, sabor mais pronunciado de grãos integrais e características de mastigabilidade alteradas, a investigação sensorial torna-se imprescindível para correlacionar ajustes tecnológicos à percepção do consumidor (ALENCAR et al., 2021; VOUČKO et al., 2024).

Diante desse cenário, esta tese foi estruturada em três capítulos complementares, articulados de forma a construir uma visão abrangente e integrada sobre o potencial do milho como ingrediente estruturante na panificação sem glúten. O Capítulo 1 apresenta uma revisão crítica da literatura, discutindo desafios tecnológicos e nutricionais inerentes ao desenvolvimento de pães sem glúten, bem como o papel da engenharia de matérias-primas e dos processos na estruturação da massa. O Capítulo 2 descreve resultados físico-químicos e tecnológicos provenientes da incorporação de farinha integral de milho em formulações de pães sem glúten, avaliando desempenho, composição e características estruturais. Por fim, o Capítulo 3 aborda a avaliação sensorial dos pães formulados, estabelecendo relações entre a estrutura físico-química, os atributos sensoriais e a aceitação do consumidor.

A integração entre esses três componentes — revisão, estudo experimental e análise sensorial — permite uma compreensão aprofundada sobre como matérias-primas alternativas podem superar limitações tradicionais da panificação sem glúten. Os resultados obtidos oferecem subsídios para o avanço científico, orientam práticas industriais e contribuem para a formulação de alimentos mais nutritivos, estruturados e alinhados às expectativas de consumidores celíacos e não celíacos. Assim, esta tese busca não apenas ampliar o conhecimento acadêmico, mas também oferecer base técnica e científica para o desenvolvimento de produtos sem glúten inovadores, sustentáveis e sensorialmente superiores.

CAPÍTULO I

DESAFIOS TECNOLÓGICOS E NUTRICIONAIS NA FORMULAÇÃO DE PRODUTOS PANIFICADOS SEM GLÚTEN: MATÉRIAS-PRIMAS, PROCESSAMENTO E ESTRUTURA DA MASSA

RESUMO

A doença celíaca é uma enteropatia autoimune desencadeada pela ingestão de glúten em indivíduos geneticamente predispostos, para os quais a exclusão permanente dessa proteína constitui o único tratamento eficaz. O crescimento contínuo do mercado de produtos sem glúten intensificou a necessidade de formulações tecnologicamente estáveis e nutricionalmente superiores, visto que muitos produtos comerciais apresentam baixos teores de proteínas e fibras, além de limitações estruturais associadas à ausência da rede viscoelástica do glúten. Nessas matrizes, o desempenho da massa depende das interações entre amido, proteínas não glutênicas e hidrocoloides, tornando a seleção de ingredientes e o controle da moagem fatores determinantes. Cereais alternativos, pseudocereais e pulses têm sido incorporados às formulações visando elevar a densidade nutricional; entretanto, o maior teor de fibras e as diferenças na funcionalidade proteica afetam a hidratação, a reologia da massa, a retenção gasosa e a organização do miolo. Parâmetros como distribuição granulométrica, dano ao amido e capacidade de absorção de água influenciam diretamente a gelatinização, a consolidação térmica e a estrutura final do pão. Esta revisão sintetiza os principais desafios nutricionais e tecnológicos associados à panificação sem glúten, destacando a influência das matérias-primas, da moagem e dos mecanismos de formação da massa na qualidade do produto.

Palavras-chave: panificação sem glúten; estrutura da massa; matérias-primas alternativas; moagem; gelatinização do amido.

ABSTRACT

Celiac disease is an immune-mediated enteropathy triggered by gluten ingestion in genetically predisposed individuals, for whom lifelong dietary exclusion of gluten is the only effective treatment. The continuous expansion of the gluten-free market has intensified the demand for products with improved nutritional and technological quality, as many commercial formulations remain limited in protein, fiber, structural stability, and overall performance. In the absence of gluten, dough structure depends on the functional interactions among starch, non-gluten proteins and hydrocolloids, making the selection of raw materials and the control of milling parameters critical. Alternative cereals, pseudocereals and pulses have emerged as promising ingredients to enhance the nutritional density of gluten-free breads; however, their higher fiber content and distinct protein functionality significantly affect hydration, dough rheology, gas retention and crumb structure. Moreover, particle size distribution, starch damage and water absorption capacity strongly influence gelatinization, thermal setting and crumb formation. This review synthesizes the main technological, nutritional and structural challenges associated with gluten-free breadmaking, emphasizing ingredient selection, milling processes, dough formation mechanisms and their impact on volume, texture and microstructure.

Keywords: gluten-free baking; dough structure; alternative raw materials; milling; starch gelatinization.

1.1. INTRODUÇÃO

A exclusão do glúten da dieta é essencial para indivíduos com doença celíaca, condição autoimune caracterizada por inflamação intestinal, atrofia das vilosidades e prejuízo da absorção de nutrientes. O aumento do diagnóstico, aliado ao consumo por indivíduos não celíacos, tem impulsionado o mercado de produtos sem glúten, o qual, embora crescente, permanece limitado quanto à qualidade nutricional e tecnológica (LEONARD et al., 2017).

A principal dificuldade na panificação sem glúten decorre da ausência da rede viscoelástica formada pelas gliadinas e gluteninas do trigo, responsáveis pela coesão, retenção de gases e expansão da massa. Em sistemas isentos de glúten, a estrutura do pão depende majoritariamente das propriedades físico-químicas do amido, do teor e natureza das proteínas vegetais e da ação de hidrocolóides que auxiliam na formação de uma matriz contínua (PRIETO-VÁZQUEZ DEL MERCADO et al., 2022).

A utilização de cereais alternativos, pseudocereais e pulses tem se destacado como estratégia para aumentar o teor proteico, a fração fibrosa e os compostos bioativos das formulações. Entretanto, tais ingredientes apresentam características funcionais distintas, podendo comprometer a hidratação, a viscosidade e a estabilidade estrutural, exigindo ajustes na moagem, no tamanho de partícula e nos parâmetros de processamento (COMETTANT-RABANAL et al., 2021; AGUIAR et al., 2022).

Dessa forma, compreender os efeitos das matérias-primas e das estratégias tecnológicas na formação da massa e na qualidade do pão é fundamental para superar as limitações da panificação sem glúten.

1.2. Doença celíaca e restrição ao glúten

1.2.1. Definição e implicações da doença celíaca

Seu primeiro registro histórico remonta a Aretaeus da Capadócia, no século I d.C., que descreveu um quadro de diarreia crônica e má absorção intestinal denominado koiliakos. Somente no século XX, especialmente durante a Segunda Guerra Mundial, estabeleceu-se a relação causal entre o consumo de trigo e a manifestação clínica da doença, quando a escassez de pão levou à melhora significativa dos sintomas em crianças celíacas (LOSOWSKY, 2008).

O glúten é um complexo proteico composto por prolaminas — proteínas solúveis em etanol — presentes no trigo, centeio, cevada e seus híbridos. Essas prolaminas (gliadinas, secalinas e hordeínas) constituem o principal gatilho da resposta imunológica caracterizada na doença celíaca, embora também estejam associadas a outras condições relacionadas ao glúten, como sensibilidade ao glúten não celíaca, ataxia do glúten e dermatite herpetiforme (EL KHOURY et al., 2018).

A resposta imunológica anômala observada na doença celíaca provoca inflamação crônica da mucosa do intestino delgado, resultando em atrofia das vilosidades e prejuízo na absorção de macro e micronutrientes. Esse processo é acompanhado pela produção de autoanticorpos específicos, utilizados como marcadores diagnósticos. Trata-se, portanto, de uma desordem sistêmica, cujas manifestações variam amplamente, desde sintomas gastrointestinais até comprometimentos hematológicos, ósseos, hepáticos e neurológicos (DOYLE et al., 2025).

1.2.2. Restrição permanente ao glúten e implicações alimentares

Para indivíduos acometidos pela doença celíaca, a exclusão total do glúten da dieta permanece, até o momento, como a única abordagem terapêutica eficaz.

O desenvolvimento da doença depende de predisposição genética, estando fortemente associado à presença dos haplótipos HLA-DQ2 e/ou HLA-DQ8¹, responsáveis por apresentar fragmentos do glúten às células do sistema imune. Assim, embora o consumo de glúten seja o fator desencadeante, a doença manifesta-se apenas em indivíduos geneticamente suscetíveis, nos quais a resposta imunológica resulta em lesão intestinal persistente e comprometimento da absorção de macro e micronutrientes (LEONARD et al., 2017).

O diagnóstico apresenta elevada complexidade e baseia-se na associação de testes sorológicos, que devem ser realizados enquanto o paciente mantém consumo de glúten. Os principais marcadores incluem os anticorpos anti-transglutaminase tecidual (anti-tTG IgA) e anti-endomísio (EMA IgA), além da dosagem de IgA total. A confirmação diagnóstica envolve avaliação histológica da mucosa duodenal por meio de biópsia obtida durante endoscopia digestiva alta, com análise da presença de atrofia das vilosidades, hiperplasia das criptas e aumento de linfócitos intraepiteliais. Em situações específicas, a análise genética, com pesquisa dos alelos HLA-DQ2 e HLA-DQ8 pode ser indicada, sendo que sua ausência praticamente exclui o diagnóstico (AL-TOMA et al., 2025).

A necessidade de eliminação total do glúten impõe restrições alimentares severas, que afetam o comportamento alimentar, a socialização e a qualidade de vida. Além disso, a contaminação cruzada e a presença de glúten em produtos processados constituem dificuldades adicionais na adesão à dieta (KOWALCZUK ; MOOR, 2025).

1.2.3. Impactos nutricionais da dieta sem glúten

As manifestações clínicas da doença celíaca incluem sintomas gastrointestinais e complicações sistêmicas como anemia por deficiência de ferro, osteopenia/osteoporose por má absorção de cálcio e vitamina D, fadiga crônica, alterações neurológicas e manifestações dermatológicas. Em adultos, formas paucissintômicas podem dificultar o diagnóstico (CAIO et al., 2019).

Embora a dieta sem glúten promova melhora clínica e recuperação das vilosidades, a composição nutricional de muitos produtos sem glúten disponíveis comercialmente é inadequada, frequentemente caracterizada por baixo teor de proteínas, reduzido teor de fibras, maior teor de lipídios e de sódio, formulações pobres em micronutrientes. Essas deficiências derivam principalmente da substituição do trigo por amidos refinados (arroz, milho, mandioca), utilizados pela capacidade de conferir leveza e cor clara, mas com impacto limitado na qualidade nutricional. Assim, a dieta isenta de glúten, quando baseada em produtos industrializados, pode contribuir para desequilíbrios nutricionais e maior risco metabólico, reforçando a importância do desenvolvimento de produtos tecnologicamente aprimorados e nutricionalmente densos.

1.3. Mercado de produtos sem glúten e demandas do consumidor

1.3.1. Expansão do mercado de produtos sem glúten

O mercado global de produtos sem glúten tem apresentado crescimento expressivo, impulsionado pelo aumento do diagnóstico da doença celíaca, pela ampliação do acesso a informação e pela adesão crescente de consumidores não celíacos. As estimativas projetam que o setor evolua de 8,5 bilhões para 13,7 bilhões de dólares entre 2025 e 2030, consolidando o segmento como um dos mais dinâmicos no mercado de alimentos especiais (FACT.MR, 2025).

¹ Os haplótipos HLA-DQ2 e HLA-DQ8 são variantes genéticas do sistema imunológico humano, especificamente do complexo principal de histocompatibilidade (MHC), que desempenha papel fundamental na regulação da resposta imune. O que significam: HLA-DQ2 e HLA-DQ8 são moléculas da superfície celular que ajudam o sistema imunológico a reconhecer fragmentos de proteínas (antígenos). Eles estão fortemente associados à doença celíaca, uma condição autoimune desencadeada pela ingestão de glúten. Aproximadamente 95% das pessoas com doença celíaca possuem o haplótipo HLA-DQ2, e a maioria das restantes apresenta o HLA-DQ8.

A panificação é o principal motor dessa expansão, respondendo por aproximadamente 30% da participação global. A alta demanda por pães e produtos de consumo diário requer formulações sensorialmente aceitáveis, seguras e com desempenho tecnológico similar aos equivalentes com glúten. Supermercados e hipermercados configuram-se como os maiores canais de distribuição, dada a combinação entre acessibilidade, variedade e confiança do consumidor.

Regionalmente, América do Norte e Europa continuam liderando o mercado, mas países da Ásia, América do Sul e Oriente Médio apresentam potencial crescente. Projeções apontam taxas elevadas de crescimento anual até 2035 para Alemanha (11,6%), Índia (11,4%), Estados Unidos (11,2%), China (11,0%), Reino Unido (10,8%), Japão (10,5%) e Brasil (10,2%), impulsionadas pela maior preocupação com saúde, fortalecimento da vigilância sanitária e expansão do varejo especializado (FACT.MR, 2025). O desenvolvimento do setor acompanha também a consolidação de regulamentações que buscam padronizar, certificar e garantir a segurança dos consumidores. Normativas como o Regulamento Europeu 609/2013 e as diretrizes da Food and Drug Administration (FDA) estabelecem limite máximo de 20 ppm de glúten para o uso da denominação “*gluten-free*”, representando marco regulatório essencial para confiança do consumidor e padronização da indústria (WIESER et al., 2021).

Além da panificação, outros segmentos têm crescido, como alternativas lácteas, bebidas funcionais, snacks proteicos, formulações esportivas e produtos enriquecidos com fibras ou proteínas vegetais. A crescente incorporação de ingredientes de alto valor nutricional — como pseudocereais e leguminosas — e a adoção de tecnologias de processamento mais avançadas ampliam a competitividade e diversificação do setor (KAUR et al., 2025).

1.3.2. Consumo por não celíacos

Embora a demanda por produtos sem glúten esteja diretamente relacionada à doença celíaca, observa-se um crescimento substancial do consumo por indivíduos não diagnosticados. Este fenômeno é fortemente influenciado por percepções subjetivas de bem-estar, crenças sobre digestibilidade e estratégias de marketing associadas ao conceito de alimentação saudável. Segundo ZERBINI et al. (2024), a adoção de produtos sem glúten por indivíduos sem condições clínicas relacionadas ocorre, em grande parte, devido à crença de que tais produtos promovem melhora da saúde geral. Os autores destacam que essa percepção atua como moderador comportamental, podendo levar ao consumo habitual ou até compulsivo, configurando uma “dependência simbólica” sustentada por narrativas de saúde, mais do que por evidências científicas.

1.3.3. Necessidade de produtos sem glúten nutricionalmente melhorados

Apesar da expansão do mercado, estudos demonstram que muitos produtos sem glúten apresentaram desempenho nutricional inferior quando comparados aos equivalentes com glúten. De modo geral: possuem menores teores de proteínas e fibras; apresentam maior quantidade de gorduras e sódio, usados como compensação tecnológica; exibem baixa densidade mineral e vitamínica; não apresentam benefícios clínicos para indivíduos não celíacos.

Essas constatações são consistentes com os achados de DIEZ-SAMPEDRO et al. (2019); (AGUIAR et al., 2023); CALIFANO et al. (2025); FRY et al. (2018), que apontam que produtos sem glúten frequentemente baseiam-se em amidos refinados e féculas de baixo valor nutricional como matriz principal — especialmente arroz, milho e mandioca. Além da carência nutricional, a ausência de glúten provoca deficiências tecnológicas, como: baixa retenção gasosa; menor volume específico; textura mais firme; envelhecimento acelerado.

Diante desse cenário, a reformulação se torna imprescindível. A incorporação de cereais integrais, pseudocereais e pulses é uma alternativa para aumentar proteínas, fibras e compostos bioativos, promovendo produtos sem glúten mais completos, equilibrados e alinhados às demandas de saúde e nutrição modernas.

1.3.4. Dependência de trigo e o papel de culturas alternativas na segurança alimentar

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é um dos principais cereais consumidos no mundo, constituindo a base para produção de produtos como pães, massas e biscoitos. No Brasil, a produção nacional atende aproximadamente 50–60% da demanda interna, sendo o volume restante suprido por importações, principalmente provenientes de países como Argentina, Estados Unidos e Canadá. Essa dependência expõe o país a fatores externos que impactam diretamente a disponibilidade e o custo desse insumo (TADESSE et al., 2017; MEENU et al., 2025).

Em escala global, a produção de trigo apresenta elevada concentração em poucos países, com destaque para China, Índia e Rússia, que consistentemente ocupam as primeiras posições no ranking mundial, enquanto o Brasil mantém participação relativa reduzida, ainda que com tendência de crescimento ao longo do período analisado (FAO, 2024).

Tabela 1. Produção de trigo em milhões de toneladas: Ranking dos principais países (2015–2024).

Ano	1°	2°	3°	4°	5°	6°
	China	Índia	Rússia	EUA	Ucrânia	Brasil
2015	130	86	61	55	26,5	5,5
2020	134	107	85	50	24,9	6,3
2023	137	111	92	49	21,6	8,0
2024	138	112	90	48	23,0	9,0

Fonte: Adaptado de FAO (2024).

Além disso, o mercado internacional de trigo tem sido significativamente impactado por instabilidades geopolíticas recentes, especialmente o conflito entre Rússia e Ucrânia, importantes exportadores do cereal. A desarticulação parcial das cadeias logísticas na região do Mar Negro, associada à redução da capacidade produtiva e à imposição de restrições comerciais, tem contribuído para a volatilidade da oferta global e dos preços internacionais (GLAUBER et al., 2023).

Nesse contexto, observa-se elevada volatilidade no mercado de trigo, resultante da interação entre fatores geopolíticos, variabilidade climática e níveis de produção global. Como consequência, intensifica-se o risco de insegurança alimentar, particularmente em países dependentes da importação de cereais, uma vez que a elevação e a instabilidade dos preços comprometem o acesso a alimentos básicos. No Brasil, essa vulnerabilidade se reflete no aumento dos custos da cadeia produtiva, particularmente na produção de pão e demais produtos de panificação, com impactos diretos no preço final ao consumidor (SHARMA et al., 2024).

O mercado brasileiro de trigo apresenta forte dependência de importações, principalmente da Argentina, principal fornecedora do cereal ao Brasil. Em termos de preços, observa-se que o trigo nacional tem sido comercializado em torno de R\$ 63,90 por saca de 60 kg no Paraná. Já o trigo importado apresenta valores superiores, variando conforme a origem: o trigo argentino apresenta custo de aproximadamente US\$ 275 por tonelada (cerca de R\$ 1.260 a R\$ 1.300/t, equivalente a R\$ 75 a R\$ 78 por saca), enquanto o trigo dos Estados Unidos atinge cerca de US\$ 246,61 por tonelada (aproximadamente R\$ 1.570 a R\$ 1.670/t, ou R\$ 94 a R\$

100 por saca, considerando custos de importação) (CEPEA, 2026). Embora dados específicos do Canadá variem conforme qualidade e mercado, esse país segue padrão semelhante ao dos Estados Unidos, com preços mais elevados devido ao maior teor de proteína e qualidade tecnológica superior. Essa diferença de preços evidencia que o trigo importado, apesar de mais caro, é amplamente utilizado pela indústria moageira para melhorar a qualidade das farinhas, sendo frequentemente misturado ao trigo nacional. Dessa forma, fatores como câmbio, custos logísticos e origem do produto exercem influência direta sobre a competitividade entre o trigo nacional e o importado no Brasil (CEREALS, 2025; CONAB, 2026).

1.4. Fontes alternativas para panificação sem glúten

A utilização de fontes alternativas na panificação sem glúten constitui uma estratégia promissora não apenas para superar limitações nutricionais e tecnológicas desses produtos, mas também para mitigar os impactos decorrentes da instabilidade do mercado global de cereais. Diante da dependência de matérias-primas tradicionais e da volatilidade associada a fatores geopolíticos, torna-se relevante a diversificação das fontes utilizadas na formulação de produtos de panificação. Nesse contexto, a substituição de grãos convencionalmente empregados em dietas sem glúten, como o arroz, por grãos alternativos, farinhas integrais e subprodutos vegetais, pode resultar em produtos com melhor perfil nutricional, maior teor de fibras, proteínas e compostos bioativos. Embora a ausência do glúten represente desafios tecnológicos importantes, avanços nas formulações e no uso de ingredientes funcionais têm permitido melhorias nas propriedades reológicas e sensoriais, favorecendo o desenvolvimento de produtos mais estáveis e de maior qualidade (LEE et al., 2009).

Considerando o regionalismo alimentar brasileiro, diversas preparações tradicionais utilizam matérias-primas naturalmente isentas de glúten, especialmente derivados de mandioca e milho, amplamente presentes na alimentação regional do país (CIPRIANI et al., 2023; NORONHA et al., 2023). A mandioca, em particular, constitui uma das principais bases alimentares brasileiras e representa importante herança indígena, sendo empregada em diferentes preparações ao longo do território nacional. Nesse contexto, destacam-se o pão de queijo, típico da região Sudeste e elaborado à base de polvilho de mandioca, bem como a tapioca e o beiju, consumidos nas regiões Norte e Nordeste, além de produtos à base de milho, como broas e cuscuz. Esses exemplos evidenciam o uso consolidado de ingredientes alternativos ao trigo e demonstram que sua substituição não se limita a uma estratégia tecnológica recente, mas corresponde a uma prática culturalmente estabelecida (DÓRIA, 2021). Dessa forma, reforça-se o potencial de aproveitamento de ingredientes regionais no desenvolvimento de produtos de panificação sem glúten, sendo a incorporação de grãos como o milheto compreendida como uma extensão dessas práticas, associando inovação tecnológica à valorização da biodiversidade e da identidade alimentar brasileira (DIAS-MARTINS et al., 2018).

1.4.1. Cereais

Os cereais, pertencentes à família *Poaceae*, representam importantes fontes de energia, carboidratos, proteínas e fibras, compondo a base da alimentação mundial. Estima-se a existência de cerca de 650 gêneros e 9.000 espécies adaptadas a diferentes zonas climáticas, o que contribui para ampla diversidade genética e composicional (MEZA et al., 2025).

Globalmente, esses grãos são responsáveis por aproximadamente 45% da ingestão energética e 20% da ingestão proteica diária. Entre as espécies mais consumidas destacam-se arroz, trigo e milho — este último com elevado volume destinado à alimentação humana (IKRAM et al., 2021).

Apesar da variabilidade entre espécies, os cereais apresentam composições nutricionais semelhantes, com amido como principal reserva energética e proporções variadas de proteínas e fibras (WRIGLEY, 2010).

A Tabela 2 apresenta a variação da composição centesimal, em base seca, de diferentes cereais, evidenciando ampla variação nos teores de proteínas (7–25%), fibras (2–38%) e lipídios (0,4–9,5%). Essa variabilidade reflete a influência de fatores genéticos, condições ambientais e práticas de processamento. As proteínas dos cereais são classificadas em quatro frações, de acordo com sua solubilidade: albuminas (solúveis em água), globulinas (solúveis em soluções salinas), prolaminas (solúveis em etanol 70–80%) e glutelinas (solúveis em soluções ácidas ou alcalinas).

Tabela 2. Composição nutricional de grão de cereais.

Cereal	Carboidratos	Proteínas	Fibra alimentar	Lipídios	Minerais
Arroz	74,1–87,6	8,9–10,5	2,9–11,8	0,4–2,5	0,2–0,6
Trigo	60,0–70,0	8,0–20,0	10,0–15,0	1,5–2,5	0,8–1,0
Milho	65,0–75,0	7,0–9,0	10,0–12,0	3,0–5,0	1,0–2,0
Cevada	78,1–83,4	10,2–25,1	11,5–34,3	1,0–3,0	1,0–3,0
Aveia	47,8–69,2	7,4–21,5	13,7–38,0	2,1–9,5	0,9–1,6
Centeio	66,0–80,0	8,0–15,0	15,0–25,0	2,0–3,0	1,0–2,0
Sorgo	70,0–80,0	7,0–10,0	7,0–10,0	2,0–4,0	1,0–2,0

Valores expresso g/100g em base seca. Adaptado de MEZA et al. (2025)

As diferenças entre classes e suas proporções conferem características funcionais e tecnológicas específicas (MILLS et al., 2020). Na maioria dos cereais, a lisina é o aminoácido limitante, enquanto treonina, isoleucina e triptofano (Tabela 3) também se apresentam em quantidades reduzidas. O uso complementar de leguminosas — ricas em lisina — é uma estratégia amplamente reconhecida para melhorar o perfil proteico das formulações (SILVA et al., 2021; FLORES FERNÁNDEZ et al., 2022).

Tabela 3. Aminoácidos limitantes das proteínas de alguns cereais (mg de aminoácido/g).

Cereais	Lisina*	Metionina e cisteína	Treonina	triptofano
Arroz polido	226	229	207	84
Aveia	232	272	207	79
Centeio	212	210	209	46
Cevada	216	246	207	96
Farinha de trigo	130	250	168	67
Flocos de milho	167	217	225	38
Sorgo	126	218	198	63

Lisina* - aminoácido limitante do trigo, arroz e centeio

Além disso, cereais integrais contêm diversos compostos bioativos, como carotenoides, antocianinas e fenólicos, que exercem funções antioxidantes. Contudo, fatores antinutricionais como saponinas, taninos e ácido fítico podem reduzir a biodisponibilidade de alguns nutrientes, sendo parcialmente removidos por processos térmicos ou fermentativos (SOFI et al., 2019; SAMTIYA et al., 2020).

- Milheto como cereal estratégico para produtos sem glúten

Entre os cereais alternativos, o milheto vem ganhando destaque por sua adaptabilidade agronômica, densidade nutricional e ausência natural de glúten. O milheto é um cereal pertencente à família *Poaceae*, amplamente cultivado em regiões tropicais e semiáridas devido à sua elevada tolerância à seca, altas temperaturas e solos de baixa fertilidade (KHAN et al., 2025)

O milheto é um cereal de grande relevância para a segurança alimentar em regiões tropicais e semiáridas, devido à sua elevada tolerância à seca e adaptação a sistemas de produção de dupla finalidade, nos quais fornece grãos para consumo humano e forragem para alimentação animal, especialmente durante períodos de estiagem. A espécie mais cultivada globalmente teve origem na África Ocidental, de onde se disseminou para diversas regiões do mundo, destacando-se por sua rusticidade e versatilidade agronômica (SALEH et al., 2013).

No Brasil, a espécie *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. destaca-se como o principal milheto cultivado, sendo representada por cultivares como BRS 1501, BRS 1502 e BRS 1503. A cultura é utilizada predominantemente como forrageira e planta de cobertura em sistemas de rotação e plantio direto, sendo empregada na produção de pastagem, silagem e biomassa. A semeadura ocorre, em geral, entre outubro e fevereiro, conforme a região e o sistema produtivo, e estimativas técnicas indicam sua utilização em mais de 5 milhões de hectares, sobretudo no Cerrado, em função da adaptação a solos de baixa fertilidade e condições de déficit hídrico (OLIVEIRA et al., 2022; FERREIRA et al., 2024).

Do ponto de vista nutricional, o milheto integral apresenta composição centesimal típica de cereais, com predomínio de carboidratos e teores relevantes de proteínas, lipídios e fibras alimentares, conforme apresentado na Tabela 4. Além disso, constitui fonte importante de minerais essenciais, como ferro, zinco, magnésio e fósforo, bem como de compostos fenólicos com atividade antioxidante. De modo geral, quando comparado a cereais refinados amplamente consumidos, como arroz polido ou milho comum, o milheto apresenta maior densidade mineral e maior concentração de compostos bioativos, o que reforça seu potencial nutricional e funcional (CHANDRASEKARA ; SHAHIDI, 2011a; SALEH et al., 2013; DEVI et al., 2014).

Tabela 4. Composição nutricional de milhetos comuns por 100 g (com nomenclatura científica)

Nome científico	Nome comum	Proteína (g)*	Carboidratos (g)*	Lipídios (g)*	Fibra bruta (g)*	Cinzas (g)*
<i>Pennisetum glaucum</i>	Milheto-perola	11,6	67,5	5,0	1,2	2,3
<i>Eleusine coracana</i>	Milheto-dedo	7,3	72,0	1,3	3,6	2,7
<i>Panicum miliaceum</i>	Milheto-proso	12,5	70,4	1,1	2,2	1,9
<i>Setaria italica</i>	Milheto-rabo-de-raposa	12,3	60,9	4,3	8,0	3,3
<i>Paspalum scrobiculatum</i>	Milheto-kodo	8,3	65,9	1,4	9,0	2,6
<i>Panicum sumatrense</i>	Milheto-pequeno	8,7	75,7	5,3	8,6	1,7
<i>Echinochloa frumentacea</i>	Milheto-barnyard (japones/indiano)	11,6	74,3	5,8	14,7	4,7
<i>Oryza sativa</i>	Arroz	7,9	76,0	2,7	1,0	1,3
<i>Triticum aestivum</i>	Trigo	11,6	71,0	2,0	2,0	1,6

* Os valores de composição nutricional são expressos em base úmida, conforme apresentado por Saleh et al. (2013).

Por ser naturalmente isento de glúten, o milheto tem sido amplamente reconhecido como matéria-prima promissora para o desenvolvimento de produtos de panificação sem glúten, contribuindo para o enriquecimento nutricional e a diversificação desses produtos (TAYLOR ; EMMAMBUX, 2008). Estudos recentes têm destacado o potencial do milheto na formulação

de pães sem glúten, tanto sob o aspecto nutricional quanto tecnológico. HERCULANO (2023) observou melhorias no perfil nutricional e nas características tecnológicas de pães elaborados com farinha integral de milho. Mais recentemente, DE AGUIAR et al. (2024) demonstraram que formulações com farinha integral de milho resultaram em pães sem glúten nutricionalmente mais densos e com boa aceitação sensorial, enquanto VOUČKO et al. (2024) relataram aumento do teor de fibras e compostos fenólicos com a adição de farelo de milho. Esses resultados reforçam o potencial do milho como alternativa para o desenvolvimento de pães sem glúten com melhor qualidade nutricional.

Os valores de compostos fenólicos totais em milhetos e cereais convencionais, apresentados na tabela 5, evidenciam a maior concentração desses compostos nos milhetos, conforme relatado por diferentes autores (ADOM ; LIU, 2002; CHANDRASEKARA ; SHAHIDI, 2011a; DEVI et al., 2014; KHAN et al., 2025).

Tabela 5. Compostos fenólicos de grãos cereais integrais.

Cereal / milho	Fenólicos totais (mg GAE/100)
Milho-perola	150–300
Milho-dedo	300–800
Milho-proso	100–250
Milho-rabo-de-raposa	200–500
Milho-kodo	500–1.200
Milho-barnyard	400–900
Arroz integral	100–300
Milho (integral)	150–350
Trigo integral	200–400

Equivalente de ácido gálico (GAE/100 g).

Apesar da ampla utilização dos cereais isentos de glúten na panificação, limitações nutricionais e tecnológicas associadas a essas matérias-primas têm impulsionado a incorporação de pseudocereais como alternativas promissoras.

1.4.2. Pseudocereais

Os pseudocereais são sementes comestíveis pertencentes a dicotiledôneas e se assemelham aos cereais, que são monocotiledôneas pela aparência e por possuírem alto teor de amido. As espécies mais importantes são a quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*), amaranto (*Amaranthus sp.*) e trigo sarraceno (*Fagopyrum sp.*). A quinoa e o amaranto são originários da região andina na América do Sul, já o trigo sarraceno é nativo do Centro-Oeste da China (ALVAREZ-JUBETE et al., 2010). Segundo o Codex Alimentarius (2017), pseudocereais são plantas não gramíneas com usos semelhantes aos cereais, geralmente agrupadas com esses grãos para fins de classificação e regulamentação.

Os pseudocereais são uma tendência atual na dieta humana, pois são grãos isentos de glúten e possuem excelente valor nutricional e nutracêutico. A FAO (*Food and Agriculture Organization*) considera os pseudocereais como os grãos do século devido ao seu alto valor nutricional, por serem ricos em proteínas de alto valor biológico, fibras e compostos bioativos que melhoram a saúde. (FAO, 2011).

Segundo, MARTÍNEZ-VILLALUENGA et al. (2020), a composição em lipídios e proteínas dos pseudocereais (quinoa, amaranto e trigo sarraceno) é superior à dos cereais (Tabela 6).

Tabela 6. Composição nutricional dos pseudocereais (quinoa, amaranto e trigo sarraceno)

Composição*	Quinoa	Amaranto	Trigo sarraceno
Carboidrato	48.5–77.0	63.1–70.0	63.1–82.1
Proteína	9.1–16.7	13.1–21.5	5.7–14.2
Lipídio	4.0–7.6	5.6–10.9	0.7–7.4
Fibra insolúvel	78	78.0–86.0	70.3
Fibra solúvel	22	14.0–22.0	16

* Expressado em % de base seca.

Fonte: Adaptada de MARTINEZ-VILLALUENGA 2020.

Os óleos desses pseudocereais são de alta qualidade nutricional por apresentarem ácidos graxos insaturados. O teor de ácidos graxos insaturados na quinoa varia de 71–84,5% do total de lipídios, no amaranto, 61,0–87,3% do total de lipídios, e no trigo sarraceno, 80,1–80,9% do total de lipídios, representados pelos ácidos linoleico (C18:2, ω -6) e α -linolênico (C18:3, ω -3) (VERA et al., 2019).

A maioria dos compostos minerais presentes nos grãos de pseudocereais estão localizados no farelo, portanto, os grãos de pseudocereais inteiros são boas fontes de fibras e minerais. O amaranto contém a maior quantidade de minerais, seguido por quinoa e trigo sarraceno (PONGRAC et al., 2013).

Os carboidratos são os principais componentes nutricionais dos grãos de pseudocereais, principalmente por possuir alto teor de amido resistente. O amido resistente é considerado benéfico para a saúde, pois não pode ser digerido e absorvido no intestino delgado. Ao atingir o cólon, é lentamente fermentado por microrganismos para produzir ácidos graxos de cadeia curta. Para ter esse benefício, os alimentos devem conter 14% de amido resistente em uma base total de amido. O trigo sarraceno tem maior teor de amido resistente entre os pseudocereais (27–33,5%), sendo considerado um grão de alto poder nutricional (MARTÍNEZ-VILLALUENGA et al., 2020).

Considerando as limitações proteicas das matrizes à base de cereais e pseudocereais, os *pulses* emergem como fontes promissoras de proteínas, fibras e compostos bioativos na panificação sem glúten. Esses grãos, apresentam elevado teor proteico e perfil de aminoácidos mais equilibrado, contribuindo para complementar as deficiências nutricionais típicas de formulações isentas de glúten. (AGUIAR et al., 2022).

1.4.3. Pulses

Pulses são o nome dado às sementes de leguminosas com baixa umidade usadas para alimentação tanto humana quanto animal. No Brasil, os pulses são representados principalmente por feijão, grão-de-bico, lentilha e ervilha. Segundo a definição da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), as sementes oleaginosas e as vagens colhidas imaturas para a alimentação não são consideradas pulses (FAO, 2019).

Os *pulses* apresentam diversos benefícios à saúde em função de sua composição nutricional, caracterizada por elevados teores de fibra alimentar, proteínas, vitaminas, minerais e compostos fitoquímicos antioxidantes, como ácidos fenólicos, flavonoides e isoflavonas. O teor proteico dessas leguminosas varia, em geral, de 15% a 30%, com alto conteúdo de lisina, aminoácido limitante em cereais (ZHANG et al., 2021)

Além do valor nutricional, as leguminosas apresentam compostos bioativos responsáveis por atividades antioxidantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas, como taninos, flavonoides e ácidos fenólicos. Estudos indicam que o consumo regular de leguminosas cozidas

está associado à redução do risco de doenças crônicas não transmissíveis (DCNTs) (ZHANG et al., 2021)

Por outro lado, algumas substâncias naturalmente presentes nas leguminosas podem reduzir a digestibilidade e a biodisponibilidade de nutrientes, por inibirem enzimas digestivas. Esses compostos são conhecidos como fatores antinutricionais e incluem fitatos, inibidores de enzimas (como inibidores de tripsina, quimotripsina e α -amilase), polifenóis, lectinas e saponinas (SINGH, 2017). Processos tecnológicos como cocção, fermentação, germinação e extrusão têm sido reportados como eficientes na redução desses compostos, contribuindo para o aumento da digestibilidade proteica e do valor nutricional de farinhas utilizadas em produtos panificáveis (BOUKID et al., 2019; GALLO et al., 2022).

Estudos com pães contendo leguminosas demonstram a influência desses ingredientes na digestibilidade dos nutrientes. GALLO et al. (2022) eles avaliaram pães enriquecidos com farinha de lentilha e observaram aumento do teor de proteína, além de maior digestibilidade do amido à medida que a concentração da leguminosa na formulação foi elevada. De forma complementar, (WU et al., 2017) avaliaram a digestibilidade proteica *in vitro* de pães elaborados com diferentes farinhas e verificaram que a digestibilidade aumentou durante a fermentação, mas diminuiu após a cocção. Os autores também observaram que pães com maiores teores de fibra e compostos fenólicos apresentaram menor digestibilidade proteica, evidenciando o efeito de componentes associados a fatores antinutricionais sobre a utilização das proteínas.

Em termos de composição, as leguminosas também apresentam elevado teor de carboidratos, variando de 60% a 65%, sendo o amido a principal fração. Essa composição, aliada à alta estabilidade ao cisalhamento mecânico e ao calor, confere às farinhas de leguminosas importantes propriedades tecnológicas, favorecendo sua aplicação em diferentes produtos alimentícios (TIWARI ; SINGH, 2012).

Nesse contexto, buscando melhorar o valor nutricional de pães sem glúten, SILVA et al. (2021) avaliaram a substituição de até 30% das fontes amiláceas por farinha integral de feijão-caupi. Os resultados demonstraram aumento dos teores de proteína e fibra alimentar, com incrementos de 2,42% e 5,05%, respectivamente, sem prejuízo dos parâmetros tecnológicos. O aumento de fibra não alterou significativamente a textura, enquanto o maior teor proteico contribuiu para a maciez do miolo. Além disso, a combinação das farinhas proporcionou melhor balanço aminoacídico, resultante da mistura do arroz, cereal deficiente em lisina e rico em metionina e cisteína, com o feijão, leguminosa rica em lisina e deficiente nesses aminoácidos sulfurados, evidenciando o potencial da farinha integral de feijão para melhorar simultaneamente os aspectos nutricionais, funcionais e tecnológicos de pães sem glúten.

1.5. Moagem

A moagem constitui uma etapa determinante no processamento de grãos para panificação sem glúten, pois controla parâmetros essenciais como tamanho de partícula, dano ao amido, área superficial disponível para hidratação e capacidade de absorção/ligação de água — fatores diretamente relacionados ao comportamento da massa e à formação da estrutura do pão. No contexto dos produtos sem glúten, em que a rede viscoelástica formada pelo glúten está ausente, a funcionalidade da farinha depende quase totalmente da engenharia do tamanho de partícula e da integridade do amido, tornando a moagem um ponto crítico de controle tecnológico (SHEWRY ; HALFORD, 2002).

O processo de moagem inicia-se com a limpeza dos grãos, removendo impurezas por peneiras, fluxo de ar e separadores magnéticos. Em seguida, ocorre o condicionamento (temperagem), onde se ajusta a umidade do grão para favorecer a separação do endosperma e reduzir a fragmentação indesejada do farelo. A etapa subsequente envolve a fragmentação mecânica propriamente dita, que pode ser realizada por impacto ou compressão, gerando farinhas com

características tecnológicas distintas. Moinhos de martelo: impacto, fragmentação intensa e maior dano ao amido. Nos moinhos de martelos, a redução do tamanho é promovida por impactos sucessivos entre martelos rotativos e o grão. Esse mecanismo gera: partículas menores D50 (diâmetro mediano das partículas, no qual 50% da distribuição apresenta tamanho inferior a esse valor) $\approx 100\text{--}400\ \mu\text{m}$; distribuição granulométrica mais ampla; maior dano ao amido, especialmente em moagem fina; maior geração de finos e heterogeneidade estrutural (KOCH, 1996; THOMAS et al., 2012).

O maior dano ao amido aumenta a absorção de água, favorecendo viscosidade, mas pode comprometer a expansão caso haja ruptura excessiva, levando a massas densas e com instabilidade gasosa — efeito particularmente crítico em sistemas sem glúten, onde a matriz depende primariamente da gelatinização do amido. Estudos como o de DIOP et al. (2024), mostram que aumentar o número de martelos e a velocidade de rotação reduz ainda mais o tamanho de partícula, mas aumenta o consumo energético e o dano granular, reforçando a necessidade de otimização. Moinhos de rolos: compressão controlada, partículas mais uniformes e menor dano ao amido. Por outro lado, moinhos de rolos fragmentam os grãos por compressão e cisalhamento, operando em velocidades mais baixas (100–300 rpm), com pressões específicas de 50–200 N/mm² e espaçamento ajustável entre rolos. Produzem: partículas maiores (D50 $\approx 300\text{--}800\ \mu\text{m}$), porém mais uniformes; menor proporção de finos; menor dano ao amido, para a mesma faixa granulométrica; maior integridade estrutural da fibra e proteínas (THOMAS et al., 2018; LYU et al., 2020). Na Tabela 7, são apresentados um comparativo dos moinhos de martelo e rolos e seus efeitos na moagem. O menor dano ao amido tende a aumentar a capacidade de retenção de água, uma vez que grânulos íntegros incham mais durante a gelatinização, contribuindo para maior estabilidade estrutural. Estudos recentes (TIAN et al., 2022) confirmam que farinhas de milho obtidas por rolos apresentam: menor dano ao amido ($\approx 2,46\%$ vs. $2,51\%$ no martelo); maior capacidade de retenção de água ($\approx 95,19\%$ vs. $88,85\%$); maior estabilidade estrutural durante o processamento.

Tabela 7. Comparação entre o moinho de martelo e o moinho de rolos.

	Moinho martelo	Moinho de rolos
Mecanismo	Impacto e atrito	Compressão e cisalhamento
Materiais processados	Cereais inteiros, duros, com casca (milho, arroz, sorgo, milheto)	Cereais limpos, com baixo teor de fibras; pré-quebra e moagem por estágios
Tamanho de partícula (D50)	Geralmente menor: 100–400 μm	Geralmente maior: 300–800 μm
Distribuição granulométrica	Ampla, maior fração de finos	Mais uniforme, menor fração de finos
Taxa de redução	Alta: $\approx 5\text{--}6$	Moderada: $\approx 1,5\text{--}3,0$
Dano ao amido	Maior, especialmente em moagem fina	Menor para mesma faixa granulométrica

Fonte: adaptado de Koch (2002); Thomas et al. (2012); Vukmirović et al. (2017); Van der Poel et al. (2018); Thomas et al. (2018).

Tamanho de partícula, constitui um dos principais determinantes tecnológicos, na moagem dos grãos e posterior utilização na elaboração de pães sem glúten. A distribuição granulométrica determina área superficial, taxa de hidratação e formação da matriz estrutural. Em farinhas sem glúten as partículas finas ($<100\ \mu\text{m}$), possibilitam o aumento da absorção de água; favorecem formação de matrizes contínuas; promovem maior volume específico; melhoram a retenção gasosa; reduzem dureza do miolo. Esse comportamento foi evidenciado em farinhas de arroz por DE LA HERA et al. (2013), que obtiveram maiores volumes

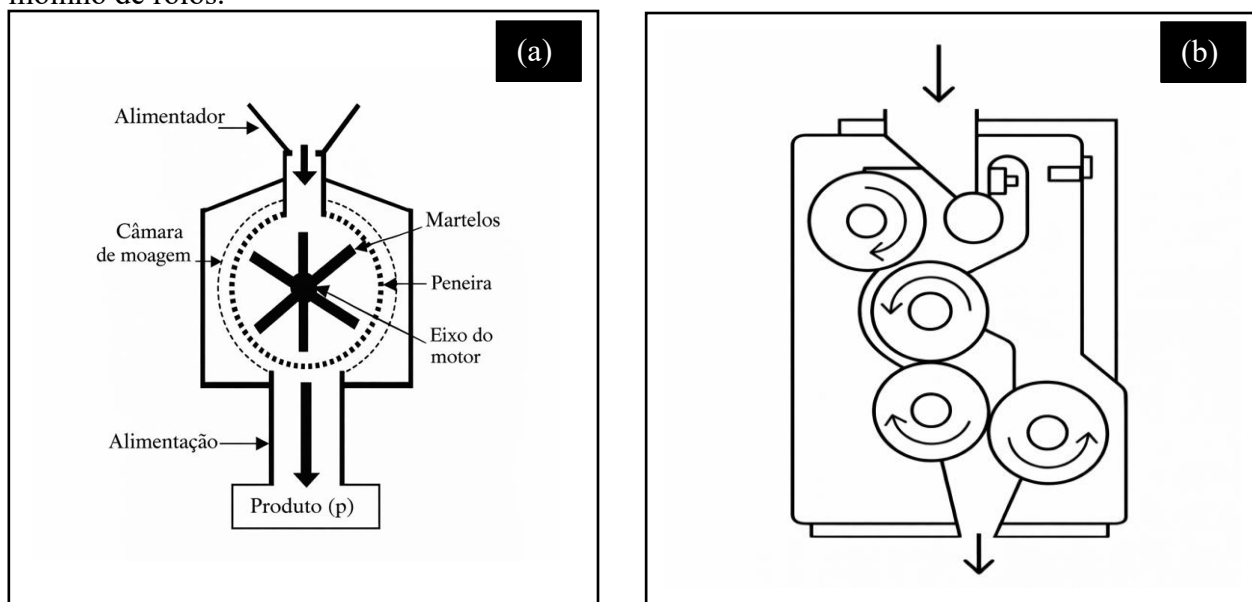
específicos e menor firmeza com $D_{50} \approx 80 \mu\text{m}$. Partículas grossas ($>200 \mu\text{m}$): atuam como pontos de descontinuidade; reduzem expansão; aumentam a firmeza; comprometem a uniformidade do miolo (SCANLON ; ZGHAL, 2001).

Em milho, granulometrias grossas ($500\text{--}1000 \mu\text{m}$) estão associadas a menor retenção gasosa e baixa aptidão panificável (MAKTOUF et al. (2016). Relevância para sistemas sem glúten: ligação água-amido-hidrocoloides. Como o glúten não está presente, a estrutura do pão sem glúten depende totalmente: da absorção uniforme de água; da área superficial de contato amido-água; da viscosidade gerada durante a gelatinização; da coesão conferida por hidrocoloides. Assim, a engenharia da moagem controla essencialmente a formação da rede estruturante alternativa. Uma farinha com partículas finas e homogêneas favorece: hidratação rápida e uniforme; formação de gel contínuo de amido; melhor interação com hidrocoloides (xantana, HPMC, psyllium); maior retenção de gás e melhor volume.

Métodos de determinação de granulometria.

A determinação da granulometria da farinha é principalmente realizada pelos métodos como difração a laser (D_{10} , D_{50} , D_{90}) e peneiramento por malhas padronizadas. Esses métodos separam e classificam de acordo com o tamanho de partículas, permitindo ajustar formulações, em produtos para otimizar absorção de água e prever desempenho da massa (DZIKI et al., 2024). Para a obtenção da farinha, os grãos são levados a uma etapa de moagem. Na figura 1, são apresentados esquemas de moinhos de facas (a) e de rolos (b), para a obtenção de farinhas finas.

Figura 1. Diagrama do princípio de funcionamento dos moinhos. (a) moinho martelo (b) moinho de rolos.



Fonte: Adaptado de DIOP et al. (2024) (a) e VARGAS SOLÓRZANO (2019) (b)

1.6. Formação e comportamento da massa e do pão sem glúten

A formação da massa e a estruturação do pão sem glúten diferem profundamente do sistema tradicional à base de trigo. Na ausência da rede viscoelástica conferida pelo glúten, o desenvolvimento da massa depende da interação entre amido, proteínas não glutênicas, fibras e hidrocoloides, além das condições de mistura, hidratação e forneamento. Nesses sistemas, a funcionalidade dos ingredientes e a engenharia da matriz desempenham papel crítico na retenção de gases, no volume específico e na textura final do miolo.

1.6.1. Papel do glúten na formação da massa panificável

No trigo, o glúten (composto pelas proteínas gliadina e glutenina) forma após hidratação e amassamento uma rede tridimensional extensível e elástica. As gliadinas conferem viscosidade e extensibilidade, enquanto as gluteninas, com subunidades de alto e baixo peso molecular, formam grandes polímeros estabilizados por ligações dissulfeto, responsáveis pela elasticidade e pela estabilidade da massa (HOSENEY, 1986; WIESER, 2007).

Essa rede retém o dióxido de carbono gerado durante a fermentação, garantindo expansão adequada e estrutura alveolar uniforme. Em contrapartida, proteínas de cereais sem glúten como orizina (arroz), zeína (milho), kafirina (sorgo) e panicina (milheto) possuem menor teor de cisteína e não formam polímeros de alto peso molecular. Por isso, não desenvolvem uma rede coesiva capaz de reter gás, resultando em massas menos estáveis e com baixa capacidade de expansão (SHEWRY et al., 2002; TAYLOR ; EMMAMBUX, 2008; ARENDT ; DAL BELLO, 2011).

1.6.2. Função do amido na estruturação da massa sem glúten

A ausência de glúten desloca o protagonismo estrutural para o amido, cujo comportamento durante o aquecimento definirá grande parte da arquitetura interna do pão. O desempenho do amido depende de: origem botânica (arroz, milho, mandioca, batata, etc.); tamanho dos grânulos (2–8 µm no arroz; até 100 µm na batata); integridade dos grânulos (grau de dano); capacidade de inchamento e retrogradação.

Pontos críticos na panificação sem glúten: amidos com grânulos pequenos (ex.: arroz) hidratam rapidamente, mas são mais suscetíveis ao dano mecânico durante a moagem; amidos de alta capacidade de inchamento (ex.: batata) favorecem retenção de gás e maior volume; níveis moderados de amido danificado aumentam a disponibilidade de água e açúcares fermentescíveis; excesso de dano gera massas densas, colapsadas e com menor expansão (TESTER et al., 2004; QIN et al., 2021; ŠMÍDOVÁ ; RYSOVÁ, 2022). Assim, a gelatinização do amido durante o forneamento é o principal mecanismo de consolidação estrutural da massa sem glúten

1.6.3. Sistemas estruturais substitutos ao glúten na massa

A ausência da rede proteica do trigo exige a formação de arranjos macromoleculares alternativos, compostos pela combinação de: amido gelatinizado (matriz contínua), proteínas desnaturadas e agregadas, fibras insolúveis e solúveis, hidrocoloides (goma xantana, HPMC, goma guar, psyllium), lipídios estruturantes. Durante o aquecimento, ocorre: desorganização das regiões cristalinas do amido; lixiviação da amilose; formação de uma matriz gelificada; desnaturação e agregação proteica, reforçando a estrutura; fixação do volume durante a transição sol–gel (ARENDT ; DAL BELLO, 2011). Os hidrocoloides desempenham papel essencial ao: aumentar viscosidade da fase contínua, reforçar as paredes das células gasosas, evitar colapso estrutural antes da gelatinização do amido.

1.6.4. Propriedades reológicas da massa sem glúten

As massas sem glúten se comportam mais como *batters* espessos do que como massas tradicionais. São sistemas predominantemente viscosos, com baixa elasticidade e dependência elevada da hidratação e da viscosidade aparente. Características reológicas típicas: alta viscosidade inicial; ausência de propriedades elásticas extensíveis; maior sensibilidade à velocidade e ao tempo de mistura; dependência da geometria dos misturadores para incorporação de ar.

Estudos recentes mostram que a aeração da massa durante a mistura exerce influência decisiva no volume final do pão. A geometria das pás, a intensidade de cisalhamento e o tempo de mistura determinam a inclusão e a distribuição das bolhas de ar, que não podem ser redistribuídas posteriormente, pois massas sem glúten não passam por etapas subsequentes de modelagem (PAULIK et al., 2021). Hidrocoloides melhoram a estabilidade estrutural ao: reter água, aumentar viscosidade, reduzir mobilidade da fase líquida, estabilizar bolhas antes e durante a fermentação. Entretanto, alto teor de fibras (de cereais integrais, pseudocereais ou pulses) pode competir por água e interromper a continuidade da matriz, resultando em massas mais densas e menos expansíveis.

1.6.5. Processamento térmico da massa (forneamento)

O forneamento é a etapa decisiva para a consolidação estrutural do pão sem glúten. O processo ocorre em três fases principais: (1) Expansão inicial (*oven spring*); o aquecimento causa expansão dos gases incorporados e aumento de vapor de água, resultando no crescimento inicial do volume. (2) Gelatinização do amido + desnaturação proteica, entre 60 e 80 °C, o amido gelatiniza, formando uma matriz contínua, enquanto proteínas desnaturam e se agregam, reforçando a estrutura. Este é o ponto em que o volume é fixado. (3) Formação da crosta: a evaporação da água na superfície acelera a preparação da crosta, enquanto o interior permanece úmido até redistribuição pós-forneamento (KOBÝLAŇSKI et al., 2004; ŠMÍDOVÁ ; RYSOVÁ, 2022).

Envelhecimento e retrogradação. - Após o resfriamento, a reorganização parcial da amilose e amilopectina promove endurecimento do miolo, processo mais acentuado em produtos sem glúten devido à dependência estrutural do amido (SALEHI, 2019; WAZIIROH et al., 2021).

1.7. Propriedades físicas dos pães sem glúten

As propriedades físicas dos pães sem glúten constituem importantes indicadores da qualidade estrutural e tecnológica do produto final. Esses parâmetros permitem avaliar a eficiência das formulações em reproduzir características desejáveis, como adequado volume específico, desenvolvimento estrutural durante o forneamento e formação de miolo com alvéolos pequenos e uniformemente distribuídos, associados a uma textura elástica. Tais atributos estão diretamente relacionados à integridade da matriz formada, influenciando a percepção de qualidade e a aceitação do produto pelo consumidor (GALLAGHER et al., 2004; ARENDT ; DAL BELLO, 2011; AKIN et al., 2024).

1.7.1. Volume específico e estrutura do miolo

O volume específico é definido como a relação entre o volume do pão e sua massa ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$), é um dos principais indicadores da expansão e da qualidade estrutural de produtos panificados. O volume do pão é comumente determinado por métodos de deslocamento de sementes de granulometria padronizada, conforme o método 10-05 da AACC International (2010), sendo o volume específico posteriormente calculado pela razão entre o volume obtido e a massa do produto.

Assim, durante o processo de panificação, o dióxido de carbono gerado pela fermentação promove a formação e o crescimento das células gasosas na massa. Contudo, o aumento do volume não depende apenas da produção de gás, mas principalmente da capacidade do sistema em retê-lo e manter a integridade das paredes celulares ao longo da fermentação e do forneamento, estando diretamente associado à resistência da massa ao colapso durante a expansão térmica. Em pães de trigo o volume específico varia entre 3,5 a 5,5 cm^3/g (DE ERIVE et al., 2020; MONTEIRO et al., 2021).

Em sistemas sem glúten, o desenvolvimento estrutural da massa depende da interação entre amidos, proteínas não glutênicas e hidrocoloides, responsáveis por aumentar a viscosidade da fase contínua e fornecer suporte às células gasosas. Assim, diferenças na matriz farinácea influenciam diretamente o volume específico obtido por HAGER ; ARENDT (2013) verificaram que pães elaborados com farinha de arroz apresentaram volumes específicos próximos de 3,0 a 3,5 cm³ g⁻¹, enquanto formulações à base de trigo-sarraceno e teff apresentaram valores inferiores (2,0–2,8 cm³ g⁻¹), evidenciando o efeito da matriz na retenção gasosa. De forma complementar, PICO et al. (2019) observaram que a incorporação de proteínas de ervilha, soro e clara de ovo em formulações contendo farinha de arroz e amido de milho elevou o volume específico de aproximadamente 2,4 para valores superiores a 3,2 cm³ g⁻¹, indicando que o reforço promovido pela interação proteína-amido favorece a expansão e a manutenção da estrutura durante o forneamento.

Embora o volume específico represente uma medida quantitativa da expansão do pão, esse parâmetro não descreve completamente a organização interna responsável por esse comportamento. Valores semelhantes podem resultar de estruturas de miolo distintas, tornando necessária a avaliação da microestrutura para compreender os mecanismos envolvidos na retenção gasosa e na estabilidade do produto final (GALLAGHER, 2009; SCIARINI et al., 2012).

A distribuição, o tamanho e a uniformidade dos alvéolos constituem importantes indicadores da qualidade estrutural do pão, refletindo a eficiência da retenção gasosa durante o processamento. HAGER ; ARENDT (2013) demonstraram que amostras com maiores volumes específicos apresentaram células gasosas menores e mais uniformemente distribuídas, enquanto pães com menor expansão exibiram alvéolos grandes e irregulares, associados à coalescência de bolhas e ao colapso parcial da estrutura. Estudos posteriores confirmam que a formação de uma estrutura alveolar fina e homogênea está relacionada à maior estabilidade da massa e à melhoria do volume específico em pães sem glúten (WITCZAK et al., 2017; ZIEMICHÓD et al., 2019; FRATELLI et al., 2021).

Milheto e desempenho estrutural – em sistemas contendo farinhas integrais entrudadas, COMETTANT-RABANAL et al. (2021) observaram volumes específicos entre 1,04 e 1,42 cm³ g⁻¹ em pães produzidos com diferentes matrizes integrais extrusadas, sendo que formulações à base de arroz apresentaram colapso significativo das células gasosas internas, enquanto pães contendo milho e sorgo exibiram melhor distribuição alveolar e maior estabilidade do miolo. Resultados semelhantes foram observados por DE AGUIAR et al. (2024), que avaliaram pães sem glúten elaborados com diferentes proporções de farinha integral de milho pérola e níveis de hidratação, reportando volumes específicos variando entre 1,39 e 1,90 cm³ g⁻¹. Os autores verificaram que o aumento da proporção de milho favoreceu a expansão do pão, enquanto níveis excessivos de água resultaram em redução do volume específico e comprometimento da estrutura do miolo, indicando menor estabilidade das células gasosas durante o forneamento. Esses resultados reforçam que o equilíbrio entre composição da matriz farinácea e hidratação da massa exerce papel determinante na retenção gasosa e na formação de estruturas alveolares estáveis em pães sem glúten.

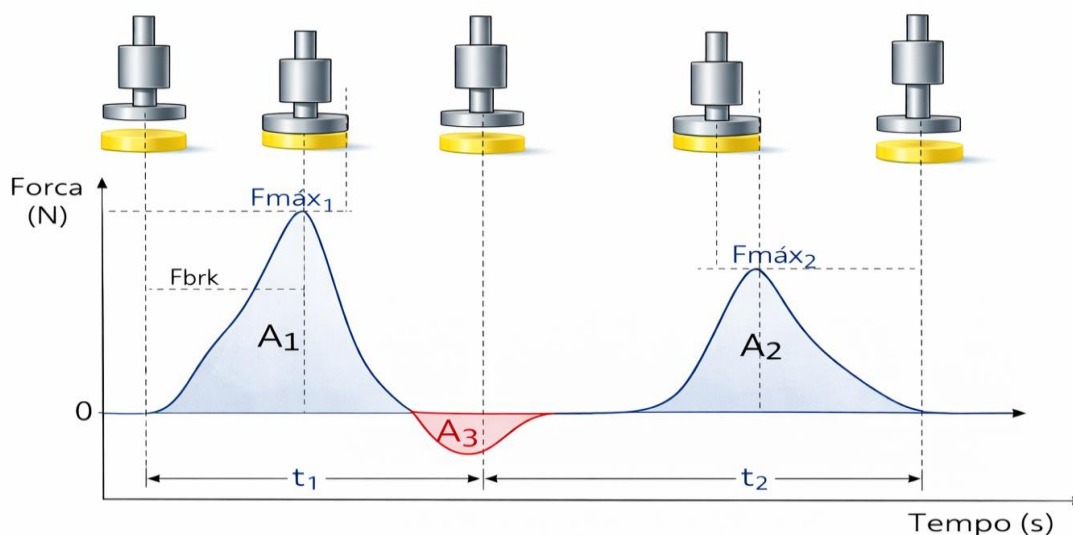
Com respeito à microestrutura, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) tem demonstrado que formulações com maior volume específico exibem paredes celulares contínuas, compostas por amido gelatinizado e proteínas parcialmente agregadas; produtos com baixa expansão mostram paredes frágeis, descontinuidades e colapso interno (RENZETTI ; ARENDT, 2009; WITCZAK et al., 2017).

Além disso, estudos de PUERTA et al. (2020), confirmam que o controle das condições de mistura, velocidade, instrumento de batida (pá, globo) afeta o volume de gás incorporado na massa e consequentemente o volume específico e a maciez do pão, com maior pressão promovendo uma estrutura mais fina e menos dura.

1.7.2. Perfil de Textura

A textura é um atributo determinante para aceitação sensorial e pode ser avaliada instrumentalmente por *Texture Profile Analysis* (TPA) por meio de duas compressões consecutivas que simulam o processo de mastigação, permitindo caracterizar o comportamento mecânico do miolo do pão por meio da curva força $\times$ tempo (Figura 2). A partir dessa análise, são obtidos parâmetros mecânicos primários e secundários que descrevem a resistência à deformação, a integridade estrutural e a capacidade de recuperação do produto (ABDEL-GAWAD et al., 2024).

Figura 2. Representação esquemática da Análise de Perfil de Textura (TPA) obtida por meio de ensaio de dupla compressão.



Fonte: A autora, 2026.

Durante o primeiro ciclo de compressão, a força aumenta até atingir o valor máximo ($F_{máx1}$), definido como dureza ($Hardness = F_{máx1}$). As áreas sob as curvas do primeiro (A_1) e do segundo (A_2) ciclos permitem calcular a coesividade ($Cohesiveness = A_2/A_1$), relacionada à integridade estrutural após a deformação. A elasticidade é determinada pela razão entre os tempos ou distâncias de compressão ($Springiness = t_2/t_1$), enquanto parâmetros derivados incluem a gomosidade ($Gumminess = Dureza \times Coesividade$) e a mastigabilidade ($Chewiness = Dureza \times Coesividade \times Elasticidade$). A adesividade corresponde à área negativa após a primeira compressão ($Adhesiveness = A_3$), e a resiliência é expressa pela razão entre a área de recuperação e a área total do primeiro ciclo ($Resilience = \text{Área recuperação}_1 / \text{Área total}_1$) (BOURNE, 2002).

Em pães, parâmetros como dureza, elasticidade (*springiness*), coesividade e mastigabilidade (*chewiness*) são os mais frequentemente medidos para caracterizar a textura do miolo. Esses parâmetros podem ser usados para comparar formulações, condições de processamento ou mudanças durante o armazenamento como envelhecimento/retrogradação.

A Tabela 8 apresenta o perfil de textura de pães elaborados com diferentes ingredientes e métodos de preparo, evidenciando a influência de cada formulação nas propriedades texturais do produto. A textura do pão de trigo está diretamente relacionada à formação da rede de glúten, responsável pela retenção de gases e pela organização da estrutura alveolar do miolo. O pão de trigo convencional apresenta textura macia e estrutura bem desenvolvida devido à formação dessa rede proteica contínua. Estudos de NORTON et al. (2025) demonstraram a influência do teor de fibra sobre o perfil de textura do pão de trigo. O pão controle apresentou dureza

aproximada de 36 N, elasticidade de 0,89 e coesividade em torno de 0,50, valores característicos de miolo macio, coeso e com boa capacidade de recuperação após compressão.

Em contrapartida, o pão elaborado com farinha de trigo naturalmente rica em arabinoxilano apresentou aumento da dureza (≈ 47 N) e da mastigabilidade (≈ 54 N), além de redução da elasticidade ($\approx 0,82$), indicando estrutura mais densa e maior resistência mecânica. Esses resultados evidenciam que o aumento do teor de fibra interfere na continuidade da rede de glúten, promovendo maior rigidez estrutural e servindo como base comparativa para sistemas panificados com redução ou ausência dessa proteína.

De forma semelhante, RATHEE et al. (2024) observaram que a maior incorporação de milho em formulações contendo trigo resultou em aumento da dureza (18,30 N no alto teor de milho) e redução da coesividade e resiliência, indicando que o elevado teor de fibra e partículas não formadoras de glúten compromete a uniformidade da matriz proteica. Assim, mesmo na presença de trigo, a diluição da rede de glúten promove alterações estruturais relevantes.

Em sistemas totalmente sem glúten, a ausência da rede proteica é compensada por amidos e hidrocolóides, como goma xantana e HPMC, que atuam na viscosidade da massa e na estabilização das bolhas de ar durante a fermentação (FRATELLI et al., 2021). No entanto, a estrutura formada é essencialmente amilácea e depende fortemente das interações entre polímeros. CHAKRABORTY et al. (2020) demonstraram que o pão de *little millet* apresentou dureza de 3,1 N, porém com menores valores de elasticidade e coesividade quando comparado ao sistema com glúten, evidenciando limitação estrutural mesmo com o uso de hidrocolóide.

A incorporação de fibras estruturais específicas, como o psyllium, também altera significativamente o perfil mecânico. Segundo TORRES-PÉREZ et al. (2024), pães sem glúten com adição de psyllium apresentaram elevada dureza ($\approx 64,7$ N) e mastigabilidade ($\approx 40,7$ N), indicando formação de matriz mais compacta e aumento da resistência à deformação. O psyllium atua como agente formador de gel, aumentando a retenção de água e a coesão estrutural, mas pode resultar em textura mais firme quando utilizado em maiores concentrações.

Tabela 8. Comparação dos parâmetros de textura (TPA) de diferentes formulações de pães com e sem glúten.

Tipo de pão	Formulação	H (N)	SP	COH	CHEW (N)	RES	Referência
Trigo	WWF 100%	36	0,89	0,50	47	0,21	(NORTON et al., 2025)
Trigo + fibra	Trigo rico em arabinoxilano	47	0,82	0,53	54	0,24	(NORTON et al., 2025)
Trigo + milho (alto)	WPMF + WWF + GP	18,30	–	0,27	3,64	0,09	(RATHEE et al., 2024)
GF <i>Little millet</i>	Farinha + xantana	3,1	0,48	0,36	–	0,32	(CHAKRABORTY et al., 2020)
GF + psyllium	Base GF + psyllium	64,7	–	0,63	40,7	–	(TORRES-PÉREZ et al., 2024)
GF + grão-de-bico	Arroz + amido + CP	6,25	0,91	0,75	42,91	0,95	(ABDEL-GAWAD et al., 2024)

H: dureza; SP: elasticidade; COH: coesividade; CHEW: mastigabilidade; RES: resiliência, obtidos por Análise de Perfil de Textura (*Texture Profile Analysis – TPA*). GF: sem glúten; WPMF: farinha integral de milho; WWF: farinha de trigo; GP: glúten em pó; (–) parâmetro não reportado no estudo correspondente.

Por outro lado, a incorporação de proteínas de leguminosas também influencia a textura. No estudo de ABDEL-GAWAD et al. (2024), o pão sem glúten contendo 30% de farinha de

grão-de-bico apresentou dureza intermediária (6,25 N), elevada coesividade (0,75) e alta mastigabilidade (42,91 N), sugerindo que a matriz proteica da leguminosa contribui para maior densidade estrutural. A presença de proteínas globulares e fibras da leguminosa favorece a compactação do miolo, aumentando a resistência mecânica do sistema.

De maneira geral, os dados da Tabela demonstram que a textura dos pães é fortemente dependente da natureza da matriz estrutural predominante: sistemas com glúten apresentam equilíbrio entre elasticidade e maciez; a adição de fibras aumenta a rigidez; e sistemas sem glúten dependem criticamente da interação entre amidos, hidrocolóides e proteínas vegetais para compensar a ausência da rede proteica contínua. Assim, a análise de perfil de textura (TPA) constitui ferramenta essencial para compreender como diferentes estratégias de formulação impactam a estrutura e a qualidade tecnológica de pães com e sem glúten.

1.8. CONCLUSÃO

O conjunto de evidências levantadas neste capítulo demonstra que o desenvolvimento de pães sem glúten é condicionado por limitações tecnológicas que não se restringem à ausência do glúten, incluindo o impacto do enriquecimento nutricional sobre o desempenho das massas. Nesse sentido, a incorporação de farinhas integrais e ingredientes ricos em fibras, embora desejável do ponto de vista nutricional, tende a comprometer o comportamento das formulações, exigindo estratégias capazes de mitigar esses efeitos.

Nesse contexto, a utilização de matrizes alternativas ao trigo, como o milheto, configura-se como uma abordagem promissora, tanto pela ausência de glúten quanto pelo seu potencial nutricional. No entanto, o aproveitamento dessas matérias-primas depende da adequação do sistema de moagem, cuja otimização influencia diretamente o grau de dano do amido e, consequentemente, o desempenho das massas e o volume dos pães.

Além disso, a dependência do trigo importado, associada a custos elevados e instabilidades geopolíticas, reforça a necessidade de diversificação de matérias-primas e do fortalecimento de cadeias produtivas locais. Dessa forma, os estudos analisados convergem ao indicar que o avanço na produção de pães sem glúten depende da integração entre formulação, escolha de matérias-primas e controle de processos, configurando-se como uma resposta às demandas nutricionais, tecnológicas e estruturais do sistema alimentar.

REFERÊNCIAS

ABDEL-GAWAD, A. S.; ELGHAZALI, M. N.; ELLIBY, A. K.; OSMAN, A. A.-K. Influence of legumes flour on physical and sensory attributes of gluten-free breads. **Aswan University Journal of Sciences and Technology**, v. 4, n. 2, p. 59-73, 2024.

ADOM, K. K.; LIU, R. H. Antioxidant activity of grains. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 50, n. 21, p. 6182-6187, 2002.

AGUIAR, E. V.; SANTOS, F. G.; CENTENO, A. C. L. S.; CAPRILES, V. D. Defining amaranth, buckwheat and quinoa flour levels in gluten-free bread: A simultaneous improvement on physical properties, acceptability and nutrient composition through mixture design. **Foods**, v. 11, n. 6, p. 848, 2022.

AGUIAR, E. V. et al. Nutritional facts regarding commercially available gluten-free bread worldwide: Recent advances and future challenges. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 63, n. 5, p. 693-705, 2023. ISSN 1040-8398.

ALENCAR, N. M. M. *et al.* What about gluten-free products? An insight on celiac consumers' opinions and expectations. **Journal of Sensory Studies**, v. 36, n. 4, p. e12664, 2021.

ALVAREZ-JUBETE, L.; WIJNGAARD, H.; ARENDT, E. K.; GALLAGHER, E. Polyphenol composition and in vitro antioxidant activity of amaranth, quinoa buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking. **Food chemistry**, v. 119, n. 2, p. 770-778, 2010.

ARENDT, E.; DAL BELLO, F. **Gluten-free cereal products and beverages**. Elsevier, 2011. BOUKID, F.; ZANNINI, E.; CARINI, E.; VITTADINI, E. Pulses for bread fortification: A necessity or a choice? **Trends in Food Science & Technology**, v. 88, p. 416-428, 2019.

BOURNE, M. **Food texture and viscosity: concept and measurement**. Elsevier, 2002. ISBN 0080491332.

CAIO, G. *et al.* Celiac disease: a comprehensive current review. **BMC medicine**, v. 17, n. 1, p. 142, 2019. ISSN 1741-7015.

CALIFANO, G.; VECCHIO, R.; CARACCILOLO, F. Overconfidence in nutritional knowledge is linked to unnecessary gluten-free consumption. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 19691, 2025. ISSN 2045-2322.

CEPEA, C. D. E. A. E. E. A. Trigo - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA-Esalq/USP. Piracicaba, 2026. Disponível em: <<https://www.cepea.org.br/br/indicador/trigo.aspx>>.

CEREALS, C. **Global Markets for Canadian Wheat: Key Insights Report 2024–25**. Cereals Canada. Winnipeg. 2025

CHAKRABORTY, S. K.; KOTWALIWALE, N.; NAVALE, S. A. Selection and incorporation of hydrocolloid for gluten-free leavened millet breads and optimization of the baking process thereof. **Lwt**, v. 119, p. 108878, 2020.

CHANDRASEKARA, A.; SHAHIDI, F. Bioactivities and antiradical properties of millet grains and hulls. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, n. 17, p. 9563-9571, 2011a.

CHANDRASEKARA, A.; SHAHIDI, F. Determination of antioxidant activity in free and hydrolyzed fractions of millet grains and characterization of their phenolic profiles by HPLC-DAD-ESI-MSn. **Journal of Functional Foods**, v. 3, n. 3, p. 144-158, 2011b.

CIPRIANI, D. C.; BARROS, A. C. A.; GABRIEL, C. G. Alimentos e preparações culinárias regionais e da sociobiodiversidade na alimentação escolar brasileira: uma revisão integrativa. **Segurança Alimentar e Nutricional**, v. 30, p. e023017-e023017, 2023. ISSN 2316-297X.

COMETTANT-RABANAL, R. *et al.* Extruded whole grain flours and sprout millet as functional ingredients for gluten-free bread. **LWT**, v. 150, p. 112042, 2021.

CONAB, C. N. D. A. **Conjuntura semanal do trigo: 13 a 17 de abril de 2026**. Conab. Brasília. 2026

DE AGUIAR, E. V.; CENTENO, A. C. L. S.; DOS SANTOS, F. G.; CAPRILES, V. D. Whole grain pearl millet-based gluten-free bread: A novel alternative with nutrition and sensory appeal. **Applied Food Research**, v. 4, n. 2, p. 100520, 2024.

DE ERIVE, M. O.; HE, F.; WANG, T.; CHEN, G. Development of β -glucan enriched wheat bread using soluble oat fiber. **Journal of Cereal Science**, v. 95, p. 103051, 2020.

DE LA HERA, E.; MARTINEZ, M.; GÓMEZ, M. Influence of flour particle size on quality of gluten-free rice bread. **LWT-Food Science and Technology**, v. 54, n. 1, p. 199-206, 2013.

DEVI, P. B. *et al.* Health benefits of finger millet (*Eleusine coracana* L.) polyphenols and dietary fiber: a review. **Journal of food science and technology**, v. 51, n. 6, p. 1021-1040, 2014.

DIAS-MARTINS, A. 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. ISSN 0963-9969.

DIEZ-SAMPEDRO, A.; OLENICK, M.; MALTSEVA, T.; FLOWERS, M. A gluten-free diet, not an appropriate choice without a medical diagnosis. **Journal of nutrition and metabolism**, v. 2019, n. 1, p. 2438934, 2019. ISSN 2090-0732.

DIOP, M.; THIAM, M.; KEBE, A.; GUEYE, I. Effects of hammer configurations on pearl millet grinding system with a hammer mill: theory and experiment. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 34, n. 1, p. 658-665, 2024.

DÓRIA, C. A. **O milho na alimentação brasileira**. Alameda Casa Editorial, 2021. ISBN 6559660052.

DOYLE, J. B.; SILVESTER, J.; LUDVIGSSON, J. F.; LEBWOHL, B. Advances in the pathophysiology, diagnosis, and management of celiac disease. **bmj**, v. 391, 2025. ISSN 1756-1833.

DZIKI, D.; KRAJEWSKA, A.; FINDURA, P. Particle size as an indicator of wheat flour quality: A review. **Processes**, v. 12, n. 11, p. 2480, 2024.

EL KHOURY, D.; BALFOUR-DUCHARME, S.; JOYE, I. J. A review on the gluten-free diet: Technological and nutritional challenges. **Nutrients**, v. 10, n. 10, p. 1410, 2018. ISSN 2072-6643.

FACT.MR. **Gluten-Free Products Market | Global Market Analysis Report 2025 - 2035**. Fact.MR. Rockville. 2025

FAO, F. A. O. T. U. N. FAOSTAT: Crops and livestock products. 2024. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/>>.

FERREIRA, P. *et al.* Milheto: gramínea de verão para a região norte do Rio Grande do Sul. 2024.

FLORES FERNÁNDEZ, J.; DURÁN LUGO, R.; LEAL MARTÍNEZ, M. G.; BÁEZ GONZÁLEZ, J. G. Cereales y legumbres: Alternativas a la carne roja desde la perspectiva del valor biológico y la salud. **Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos**, v. 7, p. 7-19, 2022.

FRATELLI, C. *et al.* Psyllium improves the quality and shelf life of gluten-free bread. **Foods**, v. 10, n. 5, p. 954, 2021.

FRY, L.; MADDEN, A.; FALLAIZE, R. An investigation into the nutritional composition and cost of gluten-free versus regular food products in the UK. **Journal of human nutrition and dietetics**, v. 31, n. 1, p. 108-120, 2018. ISSN 0952-3871.

GALLAGHER, E. **Gluten-free food science and technology**. Wiley Online Library, 2009.

GALLAGHER, E.; GORMLEY, T. R.; ARENDT, E. K. Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 15, n. 3-4, p. 143-152, 2004.

GALLO, V. *et al.* Properties and in vitro digestibility of a bread enriched with lentil flour at different leavening times. **Food Structure**, v. 33, p. 100284, 2022.

GLAUBER, J. W.; LABORDE DEBUCQUET, D.; SWINNEN, J. The Russia-Ukraine war's impact on global food markets: A historical perspective. 2023.

HAGER, A.-S.; ARENDT, E. K. Influence of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), xanthan gum and their combination on loaf specific volume, crumb hardness and crumb grain characteristics of gluten-free breads based on rice, maize, teff and buckwheat. **Food hydrocolloids**, v. 32, n. 1, p. 195-203, 2013.

HERCULANO, L. D. F. L. Potencialidades da farinha integral do milho (Pennisetum glaucum L.) e aplicação em pães sem glúten: efeito no comportamento nutricional e tecnológico. 2023.

HOSENEY, R. C. **Principles of cereal science and technology. A general reference on cereal foods**. 1986.

IKRAM, A. *et al.* Nutritional and end-use perspectives of sprouted grains: A comprehensive review. **Food science & nutrition**, v. 9, n. 8, p. 4617-4628, 2021. ISSN 2048-7177.

KAUR, S. *et al.* Pseudocereals for modern diets: Multifunctional grains with superior bioactive properties, nutraceutical potential, and diverse industrial applications. **Food Chemistry Advances**, v. 8, p. 101066, 2025/09/01/ 2025. ISSN 2772-753X. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772753X25001819> >.

KHAN, T.; AZAD, A. A.; ISLAM, R. U. Millets: A comprehensive review of nutritional, antinutritional, glycemic, bioactive, and processing aspects. **Journal of Food Composition and Analysis**, p. 107364, 2025.

KOCH, K. Hammermills and roller mills. 1996.

KOWALCZUK, A.; MOOR, F. A Meta-Synthesis Exploring Daily Experiences of Adults With Coeliac Disease in Adhering to a Gluten-Free Diet. **Journal of Human Nutrition and Dietetics**, v. 38, n. 2, p. e70043, 2025/04/01 2025. ISSN 0952-3871. Disponível em: < <https://doi.org/10.1111/jhn.70043> >. Acesso em: 2026/05/12.

LEE, A. R. et al. The effect of substituting alternative grains in the diet on the nutritional profile of the gluten-free diet. **Journal of Human Nutrition and Dietetics**, v. 22, n. 4, p. 359-363, 2009/08/01 2009. ISSN 0952-3871.

LEONARD, M. M.; SAPONE, A.; CATASSI, C.; FASANO, A. Celiac disease and nonceliac gluten sensitivity: a review. **Jama**, v. 318, n. 7, p. 647-656, 2017.

LOSOWSKY, M. S. A history of coeliac disease. **Digestive diseases**, v. 26, n. 2, p. 112-120, 2008. ISSN 0257-2753.

LYU, F.; THOMAS, M.; HENDRIKS, W.; VAN DER POEL, A. Size reduction in feed technology and methods for determining, expressing and predicting particle size: A review. **Animal Feed Science and Technology**, v. 261, p. 114347, 2020.

MAKTOUF, S. et al. Evaluation of dough rheological properties and bread texture of pearl millet-wheat flour mix. **Journal of food science and technology**, v. 53, n. 4, p. 2061-2066, 2016.

MARTÍNEZ-VILLALUENGA, C.; PEÑAS, E.; HERNÁNDEZ-LEDESMA, B. Pseudocereal grains: Nutritional value, health benefits and current applications for the development of gluten-free foods. **Food and chemical toxicology**, v. 137, p. 111178, 2020.

MEENU, M. et al. Impact of inherent chemical composition of wheat and various processing technologies on whole wheat flour and its final products. **Cereal Research Communications**, v. 53, n. 1, p. 409-424, 2025. ISSN 0133-3720.

MEZA, S. L. R. et al. A Brief Overview of the Nutritional Profile of Cereal Grains. **Cereal Grains**, p. 1-26, 2025.

MILLS, E. C. et al. Wheat proteins and bread quality. In: (Ed.). **Breadmaking**: Elsevier, 2020. p.109-135.

MONTEIRO, J. S. et al. A systematic review on gluten-free bread formulations using specific volume as a quality indicator. **Foods**, v. 10, n. 3, p. 614, 2021.

MYHRSTAD, M. C. et al. Nutritional quality and costs of gluten-free products: a case-control study of food products on the Norwegian market. **Food & nutrition research**, v. 65, p. 10.29219/fnr.v29265. 26121, 2021.

NORONHA, G. S. et al. Alimentação e nutrição no Brasil: perspectiva na segurança e soberania alimentar. 2023. ISSN 6587663095.

NORTON, V. et al. Exploring the relationship between physical properties and sensory characteristics of newly developed white breads with improved nutritional composition—initial insights. **LWT**, p. 118297, 2025.

OLIVEIRA, P. D.; TARDIN, F.; MACHADO, J. D. A. BRS 1501, BRS 1502 e BRS 1503: cultivares de milho para uso forrageiro, produção de grãos e de palha em plantio direto. 2022.

PAULIK, S. *et al.* Texture design of gluten-free bread by mixing under controlled headspace atmosphere. **European Food Research and Technology**, v. 247, n. 9, p. 2333-2343, 2021.

PICO, J.; REGUILON, M. P.; BERNAL, J.; GÓMEZ, M. Effect of rice, pea, egg white and whey proteins on crust quality of rice flour-corn starch based gluten-free breads. **Journal of Cereal Science**, v. 86, p. 92-101, 2019.

PONGRAC, P. *et al.* Spatially resolved distributions of the mineral elements in the grain of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). **Food Research International**, v. 54, n. 1, p. 125-131, 2013.

PRIETO-VÁZQUEZ DEL MERCADO, P.; MOJICA, L.; MORALES-HERNÁNDEZ, N. Protein ingredients in bread: Technological, textural and health implications. **Foods**, v. 11, n. 16, p. 2399, 2022.

PUERTA, P. *et al.* Oral processing and dynamics of texture perception in commercial gluten-free breads. **Food research international**, v. 134, p. 109233, 2020.

QIN, W. *et al.* Influence of damaged starch on the properties of rice flour and quality attributes of gluten-free rice bread. **Journal of Cereal Science**, v. 101, p. 103296, 2021.

RATHEE, S. *et al.* Modeling the Influence of Pearl Millet on High-Fiber Bread: An Investigation into Nutrition, Microstructure, Thermal Stability, Crystallinity, Rheology, and Glycemic Response. **Starch-Stärke**, v. 76, n. 11-12, p. 2300098, 2024.

RENZETTI, S.; ARENDT, E. Effect of protease treatment on the baking quality of brown rice bread: From textural and rheological properties to biochemistry and microstructure. **Journal of Cereal Science**, v. 50, n. 1, p. 22-28, 2009.

SALEH, A. S.; ZHANG, Q.; CHEN, J.; SHEN, Q. Millet grains: nutritional quality, processing, and potential health benefits. **Comprehensive reviews in food science and food safety**, v. 12, n. 3, p. 281-295, 2013.

SALEHI, F. Improvement of gluten-free bread and cake properties using natural hydrocolloids: A review. **Food Science & Nutrition**, v. 7, n. 11, p. 3391-3402, 2019/11/01 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/fsn3.1245> >.

SAMTIYA, M.; ALUKO, R. E.; DHEWA, T. Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview. **Food Production, Processing and Nutrition**, v. 2, n. 1, p. 6, 2020.

SCANLON, M.; ZGHAL, M. Bread properties and crumb structure. **Food research international**, v. 34, n. 10, p. 841-864, 2001.

SCIARINI, L. S.; RIBOTTA, P. D.; LEÓN, A. E.; PÉREZ, G. T. Incorporation of several additives into gluten free breads: Effect on dough properties and bread quality. **Journal of Food Engineering**, v. 111, n. 4, p. 590-597, 2012.

SHARMA, K. et al. The Russia-Ukraine conflict: Implications for global food security, trade, and economic stability. **Food and Agri Economics Review**, v. 4, n. 2, p. 39-45, 2024.

SHEWRY, P. R.; HALFORD, N. G. Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. **Journal of experimental botany**, v. 53, n. 370, p. 947-958, 2002.

SHEWRY, P. R.; HALFORD, N. G.; BELTON, P. S.; TATHAM, A. S. The structure and properties of gluten: an elastic protein from wheat grain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 357, n. 1418, p. 133-142, 2002.

SILVA, J. D. R. et al. Production of sourdough and gluten-free bread with brown rice and carioca and cowpea beans flours: biochemical, nutritional and structural characteristics. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 16, p. e303101623992-e303101623992, 2021.

SINGH, N. Pulses: an overview. **Journal of food science and technology**, v. 54, n. 4, p. 853-857, 2017.

ŠMÍDOVÁ, Z.; RYSOVÁ, J. Gluten-free bread and bakery products technology. **Foods**, v. 11, n. 3, p. 480, 2022.

SOFI, S.; NAZIR, A.; ASHRAF, U. Cereal bioactive compounds: A review. **International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology**, v. 12, n. 2, p. 107-113, 2019. ISSN 0974-1712.

TADESSE, W. et al. Role of sustainable wheat production to ensure food security in the CWANA region. **J Exp Biol Agric Sci**, v. 5, n. Spl-1-SAFSAW, p. S15-32, 2017.

TAYLOR, J. R.; EMMAMBUX, M. N. Gluten-free foods and beverages from millets. *In: (Ed.). Gluten-free cereal products and beverages: Elsevier*, 2008. p.119-V.

TESTER, R. F.; KARKALAS, J.; QI, X. Starch—composition, fine structure and architecture. **Journal of cereal science**, v. 39, n. 2, p. 151-165, 2004.

THOMAS, M.; HENDRIKS, W.; VAN DER POEL, A. Size distribution analysis of wheat, maize and soybeans and energy efficiency using different methods for coarse grinding. **Animal Feed Science and Technology**, v. 240, p. 11-21, 2018.

THOMAS, M.; VRIJ, M.; ZANDSTRA, T.; VAN DER POEL, A. Grinding performance of wheat, maize and soybeans in a multicracker system. **Animal feed science and technology**, v. 175, n. 3-4, p. 182-192, 2012.

TIAN, X. et al. Particle size distribution control during wheat milling: Nutritional quality and functional basis of flour products—A comprehensive review. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 12, p. 7556-7572, 2022.

TIWARI, B. K.; SINGH, N. **Pulse chemistry and technology**. Royal Society of Chemistry, 2012.

TORRES-PÉREZ, R. *et al.* Enhancing Gluten-Free Bread Production: Impact of Hydroxypropyl Methylcellulose, Psyllium Husk Fiber, and Xanthan Gum on Dough Characteristics and Bread Quality. **Foods**, v. 13, n. 11, p. 1691, 2024.

VARGAS SOLÓRZANO, J. W. Desenvolvimento de extrudados expandidos à base de cereais integrais. 2019.

VERA, E. P. *et al.* Comparison of the lipid profile and tocopherol content of four Peruvian quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars ('Amarilla de Marangani', 'Blanca de Juli',

INIA 415 'Roja Pasankalla', INIA 420 'Negra Collana') during germination. **Journal of Cereal Science**, v. 88, p. 132-137, 2019.

VOUČKO, B. *et al.* Fermentation Performance of Carob Flour, Proso Millet Flour and Bran for Gluten-Free Flat-Bread. **Foods**, v. 13, n. 21, p. 3458, 2024.

WIESER, H. Chemistry of gluten proteins. **Food microbiology**, v. 24, n. 2, p. 115-119, 2007. ISSN 0740-0020.

WIESER, H. *et al.* **Food Safety and Cross-Contamination of Gluten-Free Products: A Narrative Review.** Nutrients. 13: 2244 p. 2021.

WITCZAK, T.; JUSZCZAK, L.; ZIOBRO, R.; KORUS, J. Rheology of gluten-free dough and physical characteristics of bread with potato protein. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 3, p. e12491, 2017.

WRIGLEY, C. W. 1 - An introduction to the cereal grains: major providers for mankind's food needs. In: WRIGLEY, C. W. e BATEY, I. L. (Ed.). **Cereal Grains**: Woodhead Publishing, 2010. p.3-23. ISBN 978-1-84569-563-7.

ZERBINI, C.; DE CANIO, F.; MARTINELLI, E.; LUCERI, B. Are gluten-free products healthy for non-celiac consumers? How the perception of well-being moderates gluten-free addiction. **Food Quality and Preference**, v. 118, p. 105183, 2024. ISSN 0950-3293.

ZHANG, Y. *et al.* Effect of pulse type and substitution level on dough rheology and bread quality of whole wheat-based composite flours. **Processes**, v. 9, n. 9, p. 1687, 2021.

ZIEMICHÓD, A.; WÓJCIK, M.; RÓŻYŁO, R. Seeds of *Plantago psyllium* and *Plantago ovata*: Mineral composition, grinding, and use for gluten-free bread as substitutes for hydrocolloids. **Journal of food process engineering**, v. 42, n. 1, p. e12931, 2019.

CAPÍTULO II

MELHORIA DO PÃO SEM GLÚTEN À BASE DE AMIDO COM FARINHA DE MILHETO INTEGRAL: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E SENSORIAL

Article

Enhancing Gluten-Free Bread Quality with Whole-Grain Pearl Millet Flour: A Physicochemical and Sensory Approach

Bárbara Amorim Silva , Jhony Willian Vargas-Solórzano , Marília Penteado Stephan ,
Rosires Deliza , Inayara Beatriz Araújo Martins , Carlos Wanderlei Piler de Carvalho 
and José Luis Ramírez Ascheri 3,*

1 Postgraduate Program in Food Science and Technology, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rodovia Br 465, km 7, Seropédica CEP 23890-000, RJ, Brazil; barbara.amorim.silva@gmail.com

2 Postdoctoral Program Fundação Arthur Bernardes FUNARBE, Embrapa Agroindústria de Alimentos, Avenida das Américas 29501, Guaratiba, Rio de Janeiro CEP 23020-470, RJ, Brazil

3 Embrapa Agroindústria de Alimentos, Avenida das Américas 29501, Guaratiba, Rio de Janeiro CEP 23020-470, RJ, Brazil; marilia.stephan@embrapa.br (M.P.S.); rosires.deliza@embrapa.br (R.D.); carlos.piler@embrapa.br (C.W.P.d.C.)

4 Postdoctoral Program Nota 10-FAPERJ, Embrapa Agroindústria de Alimentos, Avenida das Américas 29501, Guaratiba, Rio de Janeiro CEP 23020-470, RJ, Brazil; inayarabeatriz@yahoo.com.br

* Correspondence: vargasjw@gmail.com (J.W.V.-S.); jose.ascheri@embrapa.br (J.L.R.A.); Tel.: +55-21-3622-9796 (J.L.R.A.)

Abstract

(1) Background: Starch-based breads can closely mimic wheat bread in texture and appearance; however, their nutritional value must be improved while maintaining their inherent bread-like characteristics. The objective of this study was to incorporate whole-grain pearl millet flour (PMF) into a starch-based bread formulation to enhance its dietary fiber and protein content. (2) Methods: The PMF was obtained using a combination of laboratory rollers and hammer mills, as well as appropriate sieves to obtain a particle size $\leq 250 \mu\text{m}$. The incorporation of PMF affected the properties of the base flour (BF), dough, and gluten-free bread (GFB). (3) Results: In the BF, setback viscosity was significantly reduced from 6379 to 1354 mPa·s. Similarly, in the freshly kneaded dough, both the elastic and viscous moduli decreased, from 168.3 to 17.8 kPa and from 36.3 to 4.3 kPa, respectively. During fermentation, dough-specific volume increased from 0.76 to 1.73 cm³/g. In the GFB, the moisture content decreased from 47.9 to 42.2%, bread specific volume varied from 2.13 to 2.68 cm³/g, and crumb hardness increased from 12.8 to 25.3 N. PMF incorporation segmented bread consumers into two preference-based clusters, characterized by lower (1) and higher (2) PMF levels. (4) Conclusions: Incorporating 30% PMF increased the fiber and protein contents of the starch-based bread by 4.9% and 2.2%, respectively, without compromising specific volume (2.56 g/cm³) or overall acceptance, which remained comparable to that of a commercial gluten-free bread (7.30 and 6.32 for clusters (1) and (2), respectively).

Keywords: cereal milling; dough rheology; baking product; physical property; crumb hardness; overall acceptability

2.1. Introduction

The use of different starch sources to replace gluten functionality is a strategy already established in the production of gluten-free breads. The most commonly used starches include those from corn, potato, rice, and cassava [1–3]. Given that starch-based breads are low in fiber and protein, several studies have incorporated whole flours from cereals or pulses to enhance their nutritional value; however, enrichment with whole flours affects the volume, texture, and

color of the bread, especially at high substitution proportions [4]. Whole-grain pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R.) is a small cereal with an average grain diameter of 3–4 mm, which has attracted increasing interest due to its nutritional potential. Its endosperm is rich in starch, with granules ranging from 3 to 14 μm and accounting for 63–79% of the grain weight, of which 19–33% corresponds to the amylose fraction. Proteins represent about 9–19% of the grain weight and are primarily located in the endosperm, where prolamins and glutelins predominate, and in the germ, which is enriched in albumins and globulins. In the endosperm, proteins are organized as a continuous matrix embedding starch granules and as discrete spherical protein bodies with diameters ranging from 0.6 to 1.5 μm . In addition, pearl millet is a valuable source of dietary fiber (approximately 7–12%), mainly composed of insoluble fractions such as cellulose and lignin concentrated in the pericarp, while soluble fiber components are distributed within the endosperm cell walls [5].

The incorporation of PMF into a starch-based gluten-free bread resulted in a more compact and moist crumb, with a characteristic cake-like appearance, differing from that typically observed in traditional wheat breads [6,7]. Among the factors associated with this phenomenon are the level of dough hydration, a high degree of starch granule damage in the flour, and the use of finely milled flours with particle sizes $< 100 \mu\text{m}$ [8]. The latter two factors are closely related to the milling system and have important implications for the breadmaking properties of the flour. Together with dough hydration level, they influence dough viscoelasticity during kneading, the expansion kinetics of CO₂ bubbles during fermentation, and consequently, bread specific volume [9,10]. Gluten-free formulations generally require higher water levels to achieve bread characteristics comparable to wheat breads. This occurs because, in the absence of gluten-forming proteins, dough consistency is primarily governed by starch-water interactions. The addition of hydrocolloids to stabilize these formulations further increases water absorption, as the hydroxyl groups of both hydrocolloids and starches form hydrogen bonds with water [11,12].

Despite the growing interest in pearl millet for gluten-free applications, many studies have not adequately addressed the role of milling conditions in flour preparation as a critical determinant of gluten-free bread quality. Milling-induced starch granule damage, resulting from particle size reduction, increases the exposure of amorphous regions, thereby enhancing water absorption and amylose leaching—key phenomena governing the rheological behavior of gluten-free doughs [13].

In this study, a combination of milling systems and sieving was employed to obtain PMF with particle sizes $\leq 250 \mu\text{m}$, while inducing slight starch granule damage [14]. Since bread moisture retention depends on the amount of water and formulation composition used in dough formation [15], as well as on baking conditions, a hydration level of 110% (flour basis) was used to obtain breads with a moisture content of approximately 40%. The formulation composition was primarily modified by incorporating PMF into a starch-based blend, thereby altering starch granule size distribution and protein and fiber contents. These modifications influenced dough rheological properties as well as breadcrumb structure, volume, texture, and sensory acceptability. Accordingly, the objective of this study was to develop gluten-free breads by replacing a starch-based flour with PMF at different levels (0, 10, 30, 50, and 100%). The physical properties of the raw flours, doughs, and breads were characterized, and consumer acceptance of the resulting breads was evaluated.

2.2. Materials and Methods

2.2.1. Materials

Pearl millet grains (*Pennisetum glaucum* (L.) R.), hybrid cultivar ADR9070, were kindly provided by Atto Sementes (Rondonópolis, Brazil). All ingredients used for the preparation of conventional gluten-free breads were purchased from local retail markets in Rio de Janeiro,

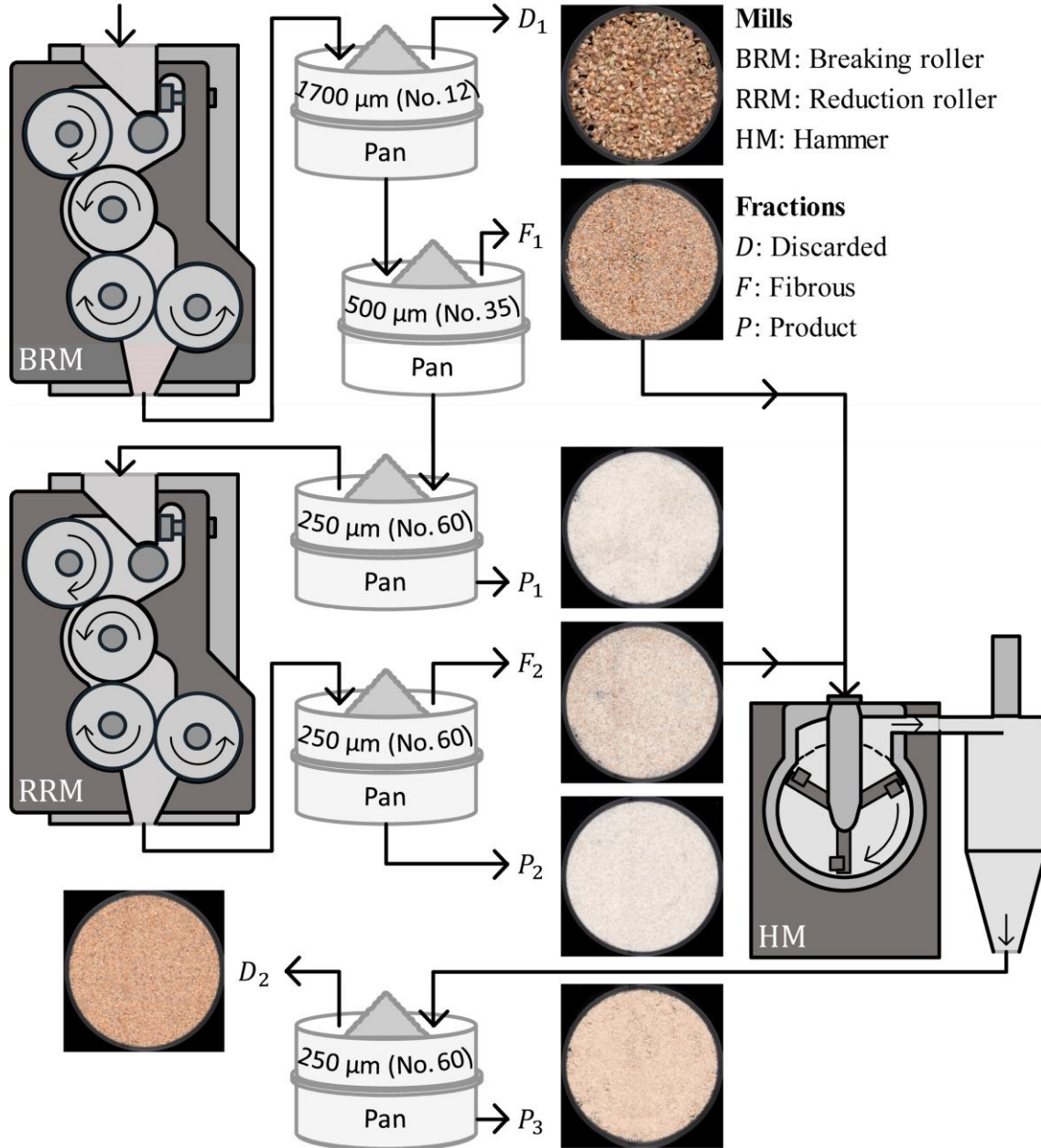
Brazil: polished rice flour (Tio João-Josapar, Pelotas, Brazil), cassava starch (Aminna Alimentos, Blumenau, Brazil), potato starch (Vitao Alimentos, Curitiba, Brazil), xanthan gum (WeNutri, Santo André, Brazil), dry yeast, table salt, refined sugar, and extra-virgin olive oil. Prior to use, all powdered ingredients were sifted through a 250 μm sieve (Newark, DE, USA) which is equivalent to the American Society for Testing and Materials (ASTM No. 60), complying with ASTM E11 specifications [16] to ensure particle size uniformity. Filtered tap water was used for dough preparation.

2.2.2. Preparation of Whole-Grain Pearl Millet Flour

Foreign materials resulting from grain harvesting were removed using a Clipper Office Tester 400/B (A.T. Ferrell Co., Bluffton, OH, USA). Screen plates with round openings of 2.78 mm and 2.07 mm were used to separate undersized grains, oversized or clumped grains, and residual straw and spikelet fragments.

The cleaned grains were size reduced to obtain particles $\leq 250 \mu\text{m}$ using a combination of laboratory-scale roller and hammer mills, followed by sieving, as illustrated in Figure 3. The characteristics of the milling equipment have been previously described by [17]. A sequential milling system was used, consisting of a Quadrumat® Junior laboratory mill (Brabender, Duisburg, Germany) operated without the sieving drum as the breaking roller mill (BRM), followed by the grinding/middlings reduction head of a Quadrumat® Senior laboratory mill (Brabender, Duisburg, Germany) operated without the sifter frame as the reduction roller mill (RRM), and completed by a 3100 laboratory hammer mill (Perten Instruments AB, Huddinge, Sweden) equipped with an 800 μm screen for comminution of insoluble fiber-rich particles. Both roller mills were equipped with four-roll “double-duty” heads operating in three successive roll passes, in which material was sequentially processed between roll pairs 1–2, 2–3, and 3–4 to achieve progressive kernel breakage (BRM) and stepwise middlings reduction (RRM). A combined roller–hammer milling strategy was adopted to achieve fine particle size reduction while controlling mechanical stress on starch granules. Roller milling was used as a first step to promote uniform endosperm fracture and controlled kernel opening, thereby limiting starch granule damage. This preconditioning step reduced both energy demand and impact intensity during subsequent milling, enabling finer size reduction while preserving the functional integrity of starch and protein components. Hammer milling was subsequently applied to efficiently reduce the size of insoluble fiber-rich particles derived from the grain peripheral layers, which require impact forces for effective comminution. This step improved particle size homogeneity and limited the presence of coarse fibrous fragments that could impair dough development and fermentation. Grains were fed into the BRM, with the feed opening set to the third position. The material exiting the BRM was successively sieved to obtain ground product 1 (P1). Particles retained on a 250 μm sieve were subsequently fed into the RRM at an approximate feed rate of 6 kg/h, and the resulting material was sieved to obtain ground product 2 (P2). Material retained on the 250 μm sieve after RRM processing (F2), together with the BRM fraction retained on the 500 μm sieve (ASTM No. 35; F1), was fed into the hammer mill (HM), which was configured with a sieve containing 800 μm openings. The material exiting the HM was sieved to obtain ground product 3 (P3). Particles retained on the 250 μm sieve after HM processing (D2), along with the BRM fraction retained on the 1700 μm sieve (ASTM No. 12; D1), were discarded. The discard fractions D1 and D2 accounted for $0.07 \pm 0.01\%$ and $4.91 \pm 0.09\%$ of the material, respectively. The milled product streams (P1, P2, and P3) were subsequently blended in a rotary mixer MR10L (Chopin Technologies, Paris, France) for 15 min. The resulting composite flour was labeled as whole-grain pearl millet flour (PMF). This milling process resulted in a flour yield of $93.34 \pm 0.10\%$.

Figure 3. Preparation of whole-grain pearl milled flour (PMF) for gluten-free bread making.



Fonte: Grinder designs were adapted from [17].

2.2.3. Preparation of Base Flour Blends

A blend of major ingredients (dry basis), consisting of polished rice flour (50%), potato starch (30%), and cassava starch (20%), was prepared using a planetary mixer KEC97A (KitchenAid, Greenville, SC, USA) equipped with a 4.8 L bowl and a flat beater as a mixing device. This blend was partially or fully substituted with PMF at levels of 0, 10, 30, 50, or 100% (dry basis). The major ingredients were mixed at speed 1 (40 rpm) for 5 min, and the resulting dry mixture was designated as the base flour (BF).

2.2.4. Pasting and Hydration Properties of Base Flours

The particle fraction between 106 and 212 µm of the BFs was used to prepare aqueous suspensions (w/w, dry basis). Pasting properties—namely pasting temperature (PT), peak viscosity (PV), trough viscosity (TV), gelation viscosity (GV), breakdown viscosity (BV), and setback viscosity (SV)—were measured in duplicate using 28 g of a 9.21% aqueous suspension

heated under constant stirring (160 rpm) in a Rapid Visco Analyzer RVA Series 4 (Newport Scientific Pty Ltd., Warriewood, Australia), according to [18]. Briefly, the suspension was equilibrated at 25 °C for 2 min, heated to 95 °C at a rate of 14 °C/min, maintained at this temperature for 3 min, and subsequently cooled to 25 °C at the same rate. Hydration properties, including the water solubility index (WSI) and water absorption index (WAI), were determined in quadruplicate using 11 g of a 9.09% aqueous suspension, following the method described by [19]. Briefly, the suspension was maintained at 25 °C for 30 min in an NT 232 Dubnoff water bath (Novatecnica, Piracicaba, Brazil) and then centrifuged at $9961 \times g$ for 15 min at 25 °C using a Universal 320R refrigerated centrifuge (Hettich, Tuttingen, Germany). The supernatant was collected, and its aqueous phase was oven-dried at 105 °C to obtain the dry residue (soluble solids), which was used to calculate the WSI in g soluble solids per 100 g of dry solids (g ss/100 g ds). Conversely, the aqueous phase retained in the precipitate (insoluble solids) was used to determine the WAI in a g of absorbed water per g of insoluble solids in the sample (g w/g is).

2.2.5. Preparation of Functional Additives and Yeast Activation

Xanthan gum (2% of BF) was manually dispersed in olive oil (3% of BF) to enhance oil droplet stability during dough kneading. Separately, dry yeast (1% of BF) and refined sugar (2% of BF) were manually dissolved in tempered water at 37 °C, using 25% of the total water to be added. This mixture was then incubated for 5 min in a fermentation-controlled chamber AC20T (Metalúrgica Venâncio Ltda, Venâncio Aires, Brazil) at 37 °C and 85% relative humidity.

2.2.6. Mixing Procedure and Dough Formation

Minor ingredients were added to the BF contained in the mixing bowl in the following sequence: functional additives, table salt (1.5% of BF), and activated yeast. After the addition of each ingredient, the dough was intermittently kneaded at speed 2 (50 rpm) for 3 min. The remaining water (75%) was then gradually incorporated under continuous kneading at speed 4 (95 rpm) for 3 min. Subsequently, the kneading speed was progressively increased from speed 6 (130 rpm) to speed 10 (195 rpm) until a smooth and homogeneous dough consistency was obtained. The total dough development time was approximately 20 min. This straight dough mixing procedure was adapted from standardized breadmaking guidelines [20] and designed in accordance with the general principles for breadmaking tests outlined in [21]. After mixing, 1 kg of dough was transferred into an aluminum mold (22 × 11 × 10 cm) and shaped by gentle tapping.

2.2.7. Dough Rheological Properties

Dough samples were prepared following the breadmaking procedure described above, with the exception of yeast addition to avoid structural changes associated with gas production during fermentation. The viscoelastic properties of the dough were evaluated by small-amplitude oscillatory shear measurements, focusing on the elastic (G') and viscous (G'') moduli. Measurements were performed in duplicate using a modular compact rheometer MCR 92 (Anton Paar GmbH, Graz, Austria) configured with parallel plate geometry (PP25) and an environmental measuring chamber to minimize moisture loss during testing. Dough samples were carefully loaded between the plates to minimize structural disruption; excess material was trimmed, and a fixed gap of 1 mm was applied. Oscillatory frequency sweep tests were conducted at 25 °C over a frequency range of 0.1–10 Hz using a constant shear strain of 0.015%, previously determined to fall within the linear viscoelastic region by strain sweep tests. This experimental approach is widely used to characterize the viscoelastic behavior and structural strength of gluten-free and starch-based dough systems [22,23]. The G' and G'' moduli were calculated from the raw rheological data using RheoCompass® software, version 1.24.510 (Anton Paar GmbH, Graz, Austria).

2.2.8. Fermentation and Baking Procedures

The molded dough was transferred to the fermentation-controlled chamber used for yeast activation. Fermentation was considered complete when the dough reached approximately twice its initial volume or approached the height of the mold [24,25]. Under these conditions, fermentation time decreased from 65 to 55 min as the level of BF substitution with PMF increased, indicating faster dough expansion at higher PMF contents. The fermented dough was then immediately baked in a turbo oven VM020141 (Metalúrgica Skymssen Ltda, Brusque, Brazil) preheated to 200 °C. Baking was carried out for 1 h, after which the loaf was cooled in a conditioned environment at 20 °C for 3 h and subsequently packaged in a polyethylene bag. After 16 h of storage, the bread was sliced transversely using a bread slicer FP-12S (G.Panis Ltda, Caxias do Sul, Brazil) to obtain 16 slices of approximately 10 mm thickness, with the lateral end slices discarded. Five experimental gluten-free breads were produced according to the PMF substitution level (GFB-0, GFB-10, GFB-30, GFB-50, and GFB-100). For comparison, wheat bread (WB) was prepared under the same processing conditions, in accordance with the general guidance provided by [21] for breadmaking tests, and only after the gluten-free breads to avoid cross-contact.

2.2.9. Determination of Dough and Bread Specific Volume

Three cylindrical containers of known mass (m_c) and volume (V_c) were used to monitor dough expansion during fermentation, assuming uniaxial (vertical) expansion, according to [9]. The dough was transferred into the cylinders using a pastry bag fitted with a confectioner's nozzle until the containers were completely filled. The dough was then manually compacted, leveled with a spatula to match the cylinder rim, and transferred to the fermentation chamber. The mass of each cylinder-dough system (m_{c+d}) was recorded at the beginning of fermentation and at 20 min intervals thereafter, following the removal of fermented dough exceeding the cylinder height. Dough specific volume (DSV) was calculated according to Equation (1), where t represents the time at which the mass was recorded.

$$DSV = \left(\frac{V_c}{m_{c+d} - m_c} \right)_t \quad (1)$$

For bread measurements, a separate cylindrical container of known mass (m_c) and volume (V_c) was used to freely accommodate a bread slice of known mass (m_b). The bread slice volume was determined in triplicate using the seed displacement method [26], in which pearl millet seeds were allowed to fall freely from a height of 25 cm to ensure uniform filling. The bread specific volume (BSV) was calculated using Equation (2):

$$BSV = \frac{V_c}{m_b} \left(\frac{m_1 - m_2 + m_b}{m_1 - m_c} \right) \quad (2)$$

where m_1 is the mass of the cylinder filled with seeds, and m_2 is the mass of the cylinder containing both the bread slice and the seeds.

2.2.10. Determination of Bread Moisture Content

Fresh bread slices taken from the central portion of each loaf were used to determine moisture content in triplicate. The mass of the bread slice (m_b) was recorded, after which the crust was carefully removed using a knife. The mass of the crust (m_{ct}) was then recorded, and the moisture contents of the crust (M_{ct}) and crumb (M_{cb}) were determined in accordance with AOAC Official Method 925.09 [27]. The overall bread moisture content (M_b) was subsequently calculated by applying a mass balance that considers the moisture content and mass fraction of crumb and crust regions, as described in Equation (3):

$$M_b = M_{cb} - \frac{m_{ct}}{m_b}(M_{cb} - M_{ct}) \quad (3)$$

2.2.11. Proximate Composition Analysis of Bread

Fresh breadcrumbs (200 g) were vacuum-dried in an SL-104/12 (SOLAB, São Paulo, Brazil) at 50 °C under 668 mmHg, with periodic removal of condensed water, until crumb moisture content decreased below 12%, as estimated from mass loss. The dried crumb was size reduced using a 3100 hammer Lab Mill (Perten Instruments AB, Huddinge, Sweden) configured with an 800 µm sieve. Proximate composition of the resulting crumb flour was determined in duplicate according to AOAC methods [27]: moisture (925.09), ash (923.03), total nitrogen (2001.11), lipids (945.38), and dietary fiber (985.29). Protein content was calculated as total nitrogen × 6.25, and available carbohydrates were determined by difference. Crumb flour moisture ranged from 4.62% to 11.70%. Proximate composition data, expressed on a dry basis, are reported in Supplementary Table S1 and were used to estimate base flour and dough formulations.

2.2.12. Crumb Structure and Microstructural Analysis

Bread slice images were obtained using a 1240U Perfection Office Scanner (Epson, Seiko, Suwa, Japan). The slices were positioned within a standardized scanning area of 12.5 × 11.5 cm, and image acquisition was performed using PhotoFiltre image-editing software, version 7 under fixed acquisition settings (exposure 3, gamma 1, highlight 200, shadows 24), following [28]. The bread's enlargement was incorporated into the scanned images as oven spring (OS), calculated as the % increase in the BSV since the end of fermentation. Crumb microstructure was examined by scanning electron microscopy (SEM). Dried crumb samples were prepared as cylindrical specimens (5 mm diameter × 3 mm height) and analyzed without sputter coating in a TM3000 benchtop SEM (Hitachi HighTechnologies Corporation, Tokyo, Japan), which operates in a low-vacuum mode. Samples were mounted on aluminum stubs using double-sided conductive adhesive tape. Following the manufacturer's recommendations, the sample height was adjusted to maintain a gap of approximately 1 mm between the specimen height gauge and the topmost sample surface. Images were acquired using TM3000 software (version 02-01), which automatically regulates emission current through brightness and contrast control. Observations were performed at an accelerating voltage of 5 kV. An air cell wall was selected as the observation point, and micrographs were recorded at a magnification level of ×500. Automatic adjustment modes were applied for focus, brightness, and contrast. Under these conditions, the detector working distance corresponded to D4.2–D4.5.

2.2.13. Crumb Texture Profile Analysis

Cylindrical crumb specimens were prepared using a stainless-steel ring (26.6 mm internal diameter). For each treatment, the mass and thickness of 15 specimens were recorded and then analyzed with a TA-XT2 Plus texturometer (Stable Micro Systems, Godalming, UK) configured with a 5 kg load cell. The P/36R cylindrical aluminum probe was used to deform the sample in two consecutive compression cycles to 50% of the original sample height at a test speed of 1 mm/s, following the procedure described by [29]. Force acquisition was initiated upon exceeding a trigger force of 0.049 N, with a 5 s interval between the first and second deformation cycles. Texture parameters—hardness (HA, N), cohesiveness (CO), springiness (SP), and chewiness (CH, N)—were calculated from the force-time curves using the Exponent software (version 4.0.13.0) over a total test duration of 30 s.

2.2.14. Crumb Color Measurement

Instrumental crumb color was measured in quadruplicate using a Color Quest XE colorimeter (Hunter Lab., Reston, VA, USA). Prior to measurements, the instrument was allowed to warm up and was standardized through the EasyMatch QC software, version 1.4 using manufacturer-supplied white and black reference tiles, thereby defining the upper and lower limits of the color scale under the same illuminant, observer angle, and measurement geometry applied to the samples. Central crumb sections (~50 mm in height) were placed over the instrument's 2.54 cm diameter measurement aperture. Measurements were performed in reflectance mode with the specular component excluded (RSEX) to minimize the influence of crumb surface heterogeneity. The sample was then exposed to illuminant D65 using the CIE 10° standard observer, and color coordinates were expressed in the CIELAB system as L* (lightness, 0 = black to 100 = white), a* (from green (−80 to 0) to red (0 to +100)); and b* (from blue (−100 to 0) to yellow (0 to +70)).

2.2.15. Consumer Acceptance Test

A total of 100 consumers (18–70 years old; female/male ratio 57/43) were randomly and spontaneously recruited at the Carlos Henrique Simonsen Shopping Center (Barra da Tijuca, Rio de Janeiro, Brazil) to participate in an overall acceptance test. The evaluation was conducted in a separate, covered, quiet, and well-lit booth, consistent with recommendations for central location tests and consumer hedonic evaluations in controlled areas [30]. This approach allows efficient recruitment of a large and heterogeneous consumer population under controlled serving conditions while maintaining realistic consumption contexts for acceptance measurement. Five experimental GFBs and one commercial sample (GFB-C) were evaluated using a nine-point hedonic scale (1 = dislike extremely; 9 = like extremely). Each participant received one-quarter of a bread slice, coded with three-digit random numbers. Samples were served monadically at room temperature, and the presentation order was balanced according to a Williams' Latin square design. Prior to tasting, participants were informed that, although the products were formulated as gluten-free, they were manufactured in facilities that handle wheat and therefore might contain traces of gluten. During tasting, participants were instructed to cleanse their palates with water between samples. After sensory evaluation, participants completed a questionnaire addressing sociodemographic characteristics and gluten-free bread consumption habits. Sociodemographic data are provided as Supplementary Table S2.

2.2.16. Experimental Design and Statistical Analysis

The partial or total incorporation of PMF into the BF was structured as a single-factor experimental design with five PMF substitution levels (0, 10, 30, 50, and 100%, dry basis). Analyses of variance (ANOVA) were applied to the mean values of all response variables obtained from two independent experimental replicates.

Overall acceptance data were analyzed via two-way ANOVA, considering bread type (BT) as a fixed factor and consumer as a random factor. Because the random effect was significant, hierarchical cluster analysis was performed using Euclidean distance and Ward's agglomerative method to identify consumer preference segments. To assess the influence of preference segmentation and prior gluten-free bread consumption on product acceptance, the factors of cluster and consumption habit were included in the ANOVA model.

When significant effects were detected ($p < 0.05$), mean comparisons were conducted using Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) test. Student's t -test was used to compare mean acceptance scores between consumer segmentation approaches. Additionally, internal preference mapping was performed by Principal Component Analysis (PCA) to visualize relationships between samples and consumer preferences. All statistical analyses were carried out using STATISTICA software, version 12 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA).

2.3. Results and Discussion

2.3.1. Pasting and Hydration Properties of Base Flour

The pasting onset of the BF occurred, on average, at approximately 5.4 min (Figure 4a). The addition of PMF had only a minor effect on PT, which ranged from 68.8 °C at 50% PMF to 71.8 °C at 30% PMF (Figure 4b and Table S3). In contrast, PV, TV, and GV viscosities were significantly altered, leading to marked changes in BV and SV viscosities (Figure 4a,b). The PV occurred 0.6–1.0 min earlier, whereas the TV was delayed by approximately 0.7 min. Because no gelation peaks were detected for PMF-containing suspensions within the 20 min RVA test, the final viscosity was considered equivalent to GV. Incorporation of 10% PMF caused pronounced reductions in PV, TV, and GV (65.5%, 71.5%, and 63.8%, respectively; $p < 0.05$). Similar decreases in pasting viscosities have been reported when finger millet flour was incorporated into wheat flour systems in the range of 0–30% [31]. Concomitantly, BV increased significantly from 144 to 489 mPa·s, whereas SV decreased from 3958 to 1102 mPa·s ($p < 0.05$). At PMF addition levels $\geq 30\%$ PMF, changes in BV and SV were less pronounced and no longer statistically significant ($p \geq 0.05$). The RVA profile of 100% PMF contrasted with [32], where an absence of a sharp PV and, consequently, a low BV was observed.

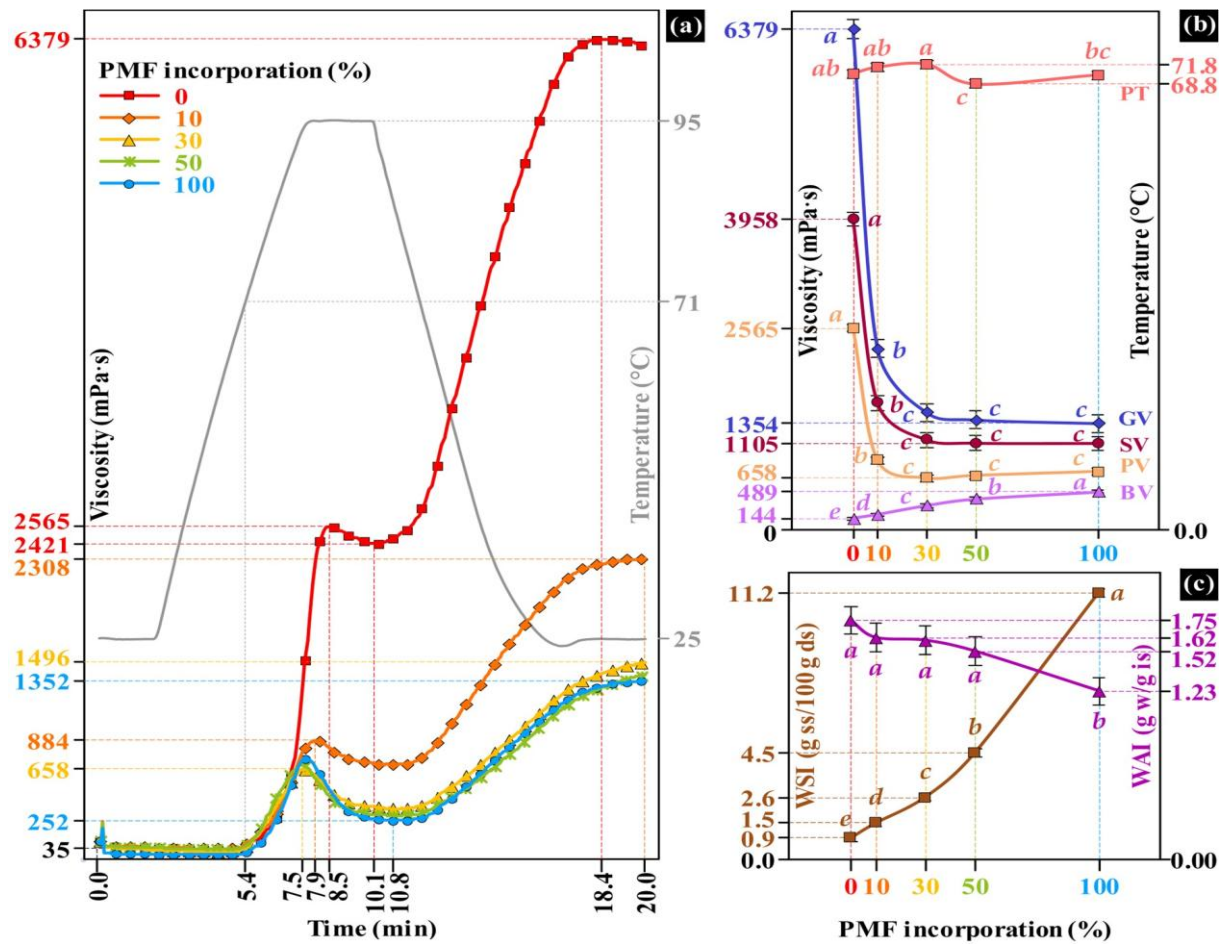
The reduction in paste viscosity may be attributed to physical and molecular constraints imposed by PMF incorporation. Fine pericarp fragments ($\leq 250 \mu\text{m}$), characterized by a needle-like morphology and enriched in insoluble fibers, likely hinder starch granule swelling during gelatinization and restrict reassociation of leached polymers during cooling [18]. In parallel, increased levels of lipids, proteins, and free phenolic compounds may promote non-covalent interactions and complex formation with solubilized amylose during hydration and thermal processing [33,34], thereby further suppressing SV, particularly at low PMF inclusion (10%). The relatively low holding temperature applied in the RVA protocol (25 °C) may also have contributed to the high SV value observed in the control formulation.

SV is closely related to starch retrogradation and bread staling behavior. Lower SV values are generally associated with reduced crumb firming during storage [35]. The stabilization of SV observed at PMF levels $\geq 30\%$ may result from the combined emulsifying and hydrocolloid-like effects of lipids, proteins, and soluble fiber, which can stabilize the starch gel matrix and offset the disruptive role of insoluble fiber, as previously observed in a standard wheat-based dough formulation containing emulsifiers and hydrocolloids [36]. WSI increased progressively with PMF incorporation (Figure 4c and Table S3), rising from 0.9 to 11.2 g soluble solids per 100 g of flour (dry basis). This behavior may be attributed to the leached soluble fraction of dietary fibers and proteins, as well as free phenolic compounds and low molecular weight carbohydrates contributed by pearl millet. The presence of free sugars is particularly relevant for fermentation performance. Elevated α -amylase activity in pearl millet may promote saccharide release [37], enhancing flour solubility and fermentable substrates. Moreover, soluble dietary fibers are known to chelate mineral elements and form charged polysaccharide mineral complexes [38]. At 100% PMF substitution, this mechanism likely increased the density of ionic sites within the system, thereby enhancing electrostatic interactions with charged amino acid residues of proteins embedded in the starch matrix. These interactions may facilitate protein solubilization, contributing to the overall increase in WSI.

WAI (g of absorbed water per g of insoluble solids in the flour) decreased from 1.75 to 1.23 g/g, the reduction being only significant at 100% PMF substitution ($p < 0.05$; Figure 4c and Table S3). The reduction in WAI as a function of formulation composition may be attributed to the combined effects of a low proportion of damaged starch ($<0.5\%$), reduced protein content, the presence of fine insoluble fiber particles, and lipid sources incorporated during the initial mixing stage, all of which limit water uptake and retention by the flour matrix [39,40]. As a whole-grain flour, PMF contains endogenous proteins, lipids, and a dietary fiber fraction dominated by insoluble components ($>86\%$, Table S1). Despite the higher protein concentration

as PMF content increased, the simultaneous increase in insoluble dietary fiber and lipid contents likely constrained the functional contribution of proteins to water absorption by reducing the accessibility of hydrophilic and charged amino acid residues. In addition, lipids may coat starch and protein surfaces, limiting capillary water uptake and restricting matrix swelling, which collectively contribute to reducing WAI.

Figure 4. Pasting and hydration responses of a starch-based flour blend as affected by whole-grain pearl millet flour (PMF) incorporation. (a) RVA viscosity profiles; (b) pasting properties: peak viscosity (PV), gelation viscosity (GV), breakdown viscosity (BV), and setback viscosity (SV); (c) hydration properties: water solubility index (WSI) and water absorption index (WAI).



Different lowercase letters within the same property differ significantly (Tukey's test, $p < 0.05$).

In addition, mechanical grinding can induce structural damage in finely milled insoluble fibers, altering particle morphology and surface characteristics that impact water adsorption. This may have occurred during the size reduction of the PMF fibrous fractions (F1 and F2, Figure 4). According to [10], hammer-milled flours from white proso millet exhibited a lower water-holding capacity than other milling systems, probably because more milling-induced structural damage to fibers occurred.

On the other hand, insoluble dietary fibers exhibit slower hydration kinetics than starch and soluble fibers because their rigid, highly crosslinked cell wall structure limits water absorption and swelling [4]. Consequently, under the hydration conditions used for WAI determination, water uptake is preferentially governed by starch granules.

At ambient temperature, water absorption is largely governed by starch granule size distribution and starch blend composition, which, according to the mean diameter (MD) and the number of

granules provided by each starchy ingredient, the total granular surface area will be defined. A greater granular surface area, as occurs in B-type starches, provides a higher ability to swell [41]. By using 100% PMF, the extremely small granules provided by rice starch (4.7 μm MD) and the larger granules provided by potato (42.3 μm MD) and cassava (23.2 μm MD) starches were replaced by slightly smaller granules from pearl millet starch (8.5 μm MD) [5,42]. Considering these MD values, the change in the BF composition from 0 to 100% PMF caused approximately a 30% decrease in the total granular surface area and consequently reduced the overall WAI.

2.3.2. Dough Viscoelastic Properties

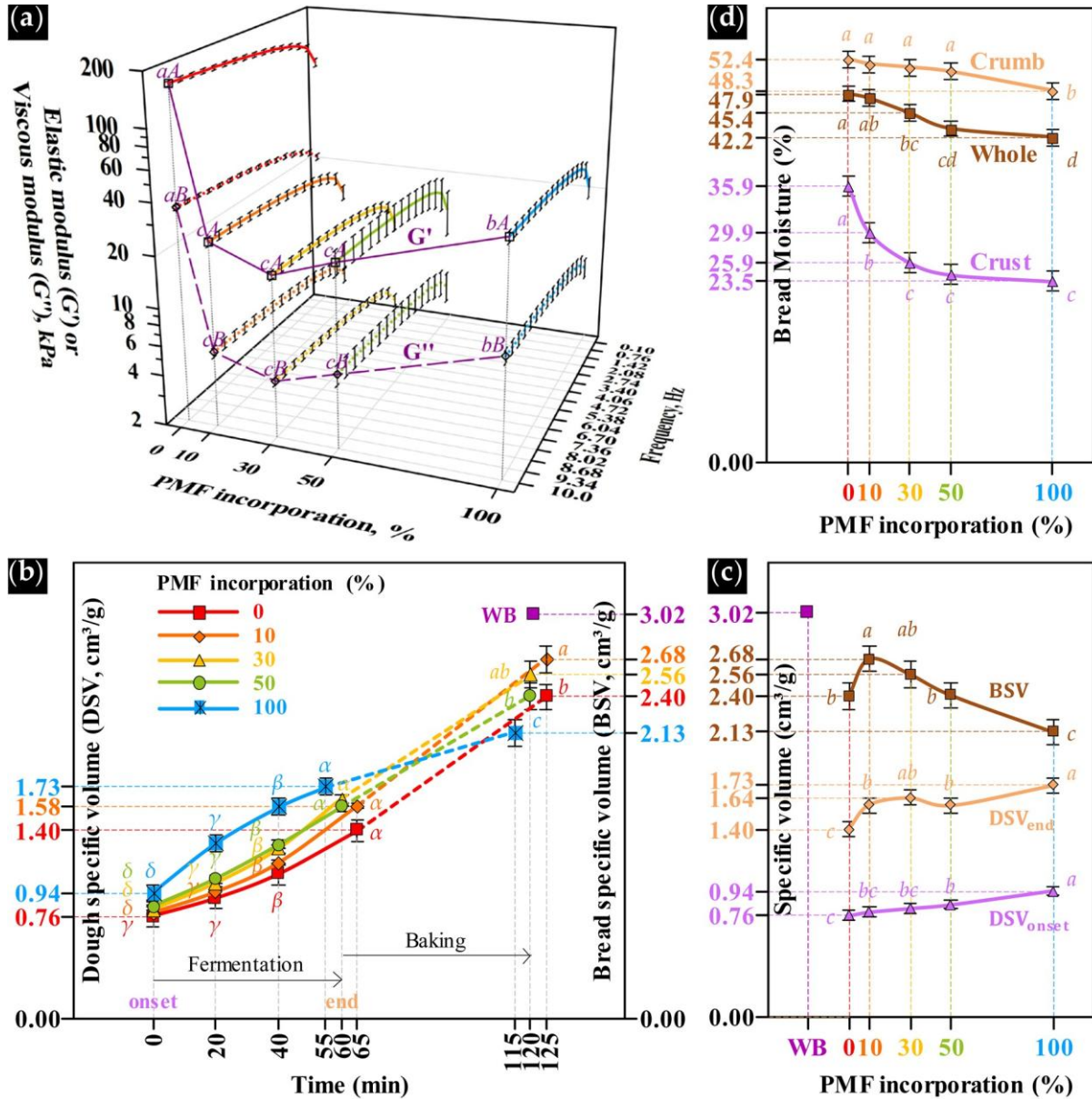
The effect of PMF incorporation on gluten-free dough consistency was assessed through oscillatory rheology by monitoring the G' and G'' moduli. Across the tested frequency range (0.1–10 Hz), both moduli exhibited a slight frequency dependence (Figure 5a and Table S4), with G' consistently exceeding G'' , indicating a predominantly elastic, weak gel-like structure irrespective of formulation [15,43]. The starch-based dough (0% PMF) exhibited the highest viscoelastic moduli ($G' = 168.3$ kPa; $G'' = 36.3$ kPa at 10 Hz). Partial substitution with PMF (10–50%) markedly reduced both G' and G'' to statistically similar levels ($p \geq 0.05$), with G' ranging from 17.8 to 24.5 kPa and G'' from 4.3 to 5.6 kPa at 10 Hz. In contrast, the dough formulated with 100% PMF displayed a significant increase in both moduli ($G' = 42.5$ kPa; $G'' = 10.0$ kPa; $p < 0.05$), suggesting partial recovery of structural rigidity. These rheological responses are strongly influenced by formulation water content and matrix composition. Ref. [44] reported substantially lower moduli ($G' < 5$ kPa; $G'' < 1$ kPa) for a 100% millet dough prepared at a higher hydration level (160%), highlighting the dominant role of water content in controlling gluten-free dough rheology.

The pronounced reduction in dough stiffness, evidenced by the sharp decrease in both moduli following only 10% PMF incorporation, may be attributed to the dispersion of insoluble fiber particles within the starch-based matrix. These fibers disrupt starch-starch interactions and weaken the continuity of the viscoelastic network. Given the limited compatibility between insoluble fiber particles and the starch phase, dough extensibility and tensile strength are reduced, reflecting a loss of elastic behavior [45]. The decrease in stiffness observed between 10 and 50% PMF substitution was statistically similar ($p \geq 0.05$). In contrast, the partial recovery of G' and G'' at 100% PMF substitution is likely related to the protein content increment, which may enhance matrix cohesion through protein-mediated interactions. This behavior is consistent with reported effects of protein type on the rheological properties of corn starch-protein doughs under optimal hydration conditions [15].

2.1.1. Physical Changes During Fermentation and Baking

DSV at the onset of fermentation ranged from 0.76 to 0.94 cm^3/g as a function of PMF incorporation, and this trend was observed throughout the fermentation interval (Figure 5b, left axis, Figure 5c, and Table S4). The protein content gradually introduced by PMF likely contributed to dough expansion under hydrated conditions, as protein-bound water increases matrix plasticity. Only doughs with 10–30% PMF doubled their initial volume by the end of fermentation (~101% increase), whereas control and $\geq 50\%$ PMF doughs reached only ~85% expansion, likely due to low protein content in the former and fiber-induced structural disruption in the latter. Fermentation time decreased from 65 to 55 min with increasing PMF, accompanied by a rise in final DSV from 1.40 to 1.73 cm^3/g . The shorter fermentation and higher DSV observed in PMF-containing doughs are consistent with the higher endogenous enzyme activity of pearl millet [37], which could have contributed to increased fermentable sugars for yeast metabolism and CO_2 production [46].

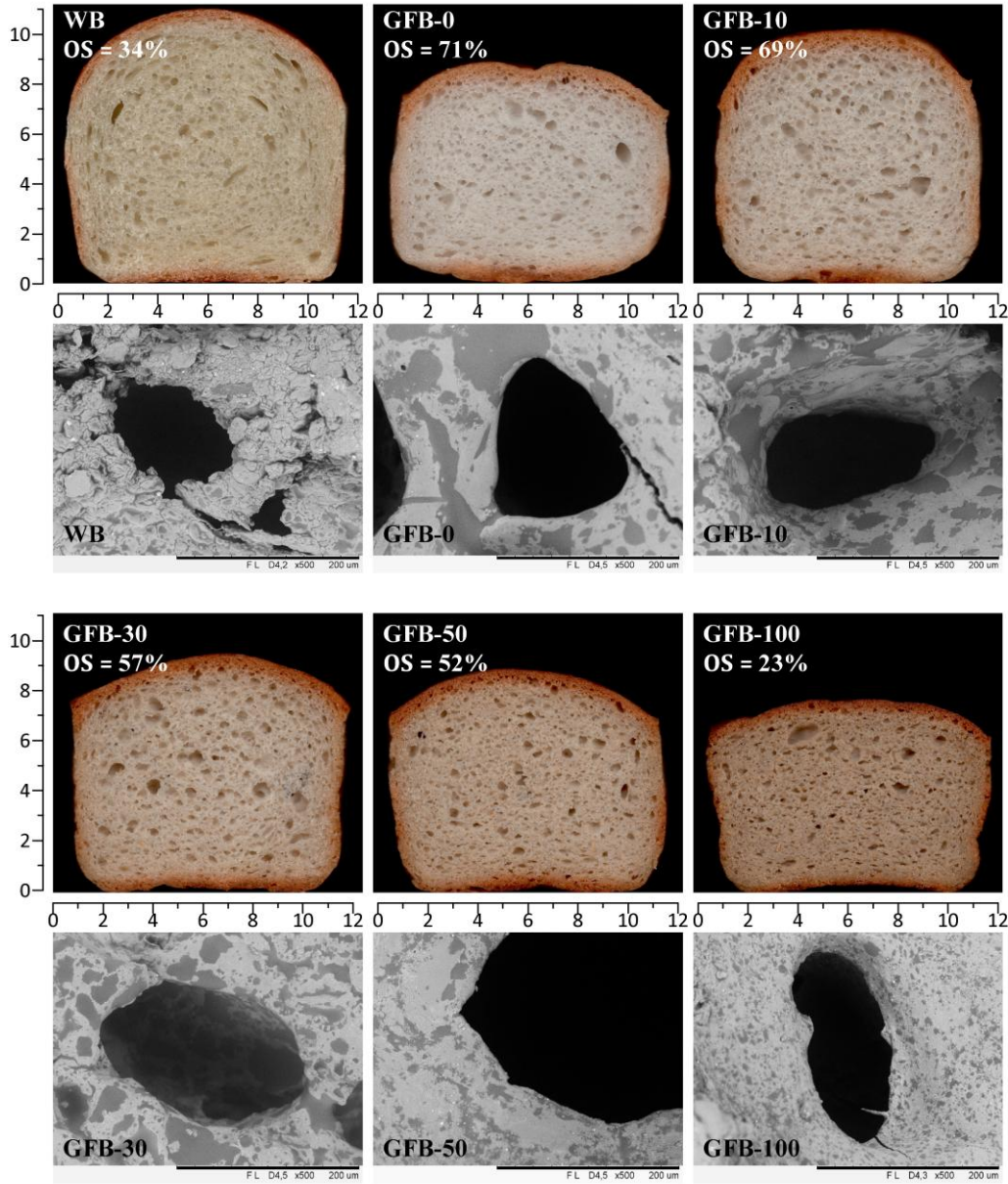
Figure 5. Physical changes before and during the fermentation of doughs and after the cooling of breads. Viscoelastic properties of doughs before fermentation; specific volume of doughs and breads: as a function of time and (c) as a function of PMF incorporation; (d) bread moisture distribution. PMF: whole-grain pearl millet flour, WB: wheat bread.



Different lowercase letters within the same curve, or different uppercase letters at the end of fermentation or baking, differ significantly (Tukey's test, $p < 0.05$).

During the early baking stage, yeast activity progressively declines above $\sim 43^\circ\text{C}$ and is fully inactivated near 55°C . As dough temperature approaches $\sim 60^\circ\text{C}$, starch gelatinization initiates and α -amylase activity is maximized between 60 and 70°C , promoting rapid sugar release and contributing to oven spring [47]. In formulations containing $\geq 30\%$ PMF, residual sugars likely intensified Maillard reactions during baking above 115°C , resulting in darker crumb and crust coloration (Figure 6: GFB-30, GFB-50, and GFB-100) and flavor development [47,48]. This browning effect was reflected by lower L^* values and positive a^* and b^* coordinates, as reported in Table S1 for these formulations.

Figure 6. Scanned images and crumb micrographs for wheat bread (WB) and gluten-free breads (GFB) as affected by whole-grain pearl millet flour incorporation (in %).



OS: oven spring. Area of scanned images: 12.4×11.2 cm. Area of micrographs: 339.7×254.8 μm .

After baking, BSV reflects the dough's ability to retain CO_2 within the stabilized crumb structure. PMF incorporation significantly affected BSV (Figure 5b, right axis, Figure 5c, and Table S4). GFB-10 and GFB-30 exhibited the highest BSV values (2.68 and 2.56 cm^3/g , respectively; $p < 0.05$), although still lower than WB (3.02 cm^3/g). GFB-0 and GFB-50 showed comparable volumes (~ 2.40 cm^3/g , $p \geq 0.05$), whereas GFB-100 resulted in the lowest BSV (2.13 cm^3/g).

The highest BSV observed for GFB-10 and GFB-30 is consistent with [49], who reported enhanced gas production—reflected by higher DSV after 40 min of fermentation—in rice flour-corn starch doughs containing 10% fine oat or bamboo fiber particles. This enhanced fermentative activity translated into a significantly higher BSV compared to the fiber-free control. In contrast, although formulations containing $\geq 50\%$ PMF exhibited higher fermentative activity, they displayed reduced gas retention, as evidenced by lower BSV. This behavior may be attributed to the accumulation of fine insoluble fiber particles, which disrupt interfacial

stability, weaken the viscoelastic matrix, and promote gas cell coalescence and collapse during baking [4]. In addition, bread volume is adversely affected in dough formulations containing lipid levels above 6% [40], as observed for GFB-100 (Table S1), where excess lipids are known to impair gas cell stabilization and limit bread expansion.

Bread moisture decreased with PMF incorporation, from 47.9% to 42.2%. Similar trends were observed for crumb and crust moisture, which declined from 52.4% to 48.3% and from 35.9% to 23.5%, respectively ($p < 0.05$, Figure 5d and Table S4). This behavior may be attributed to starch dilution—the main water-binding component in fermented doughs—as available carbohydrate content decreased from 85.26% to 61.64% (Table S1). Beyond starch quantity, intrinsic starch properties may influence baking performance and crumb structure, such as granule size distribution, crystalline organization, and the extent of amylose leaching during gelatinization. Amylose plays a central role in stabilizing crumb cell walls by reinforcing the starch gel network and enhancing gas retention [50]. During baking, starch gelatinization entraps water within this viscoelastic matrix, whose cell wall thickness varies from 20 to 200 μm [51]. However, reduced amylose leaching, lower crystallinity of ghost granules, the presence of finely milled insoluble pericarp fibers, and the limited structuring role of proteins collectively weaken the starch gel network and increase the permeability of crumb cell walls. Consequently, water vapor diffuses more readily through the crumb structure, resulting in higher moisture loss during baking of PMF-enriched formulations. Although PMF incorporation increased protein content, it did not effectively reinforce the crumb matrix. Thus, starch functionality remained the dominant factor governing baking performance. As a result, starch dilution prevailed, leading to reduced final bread moisture.

2.1.2. Structure and Microstructure of Breads

Figure 6 presents scanned slices of the experimental GFBs, with WB included as a reference. Clear differences in crumb height were observed, reflecting variations in oven spring among formulations (23–71%). Dome formation, commonly used as an indicator of the strength of the dough system because of its association with improved volume development and crumb structure [47], was most pronounced in GFB-10 and closely resembled that of WB. All PMF-containing breads exhibited some degree of dome formation; however, its intensity progressively decreased at higher substitution levels, being least evident in GFB-100, consistent with its lower BSV.

WB exhibited a yellowish crumb with a well-developed cellular structure, characterized by small, spherical air cells near the center and larger, elongated cells toward the periphery, together with a thinner and lighter crust compared with all GFBs. At the microstructural level, WB crumb displayed rough air cell walls composed of aggregated and deformed gelatinized starch granules, whose granular integrity was largely preserved by the continuous gluten network, resulting in irregular and well-defined cell borders. In contrast, GFBs showed a gradual darkening of crumb and crust with increasing PMF incorporation, as evidenced by the decrease in crumb L^* values from 68.90 to 56.96 (Table S1). The air cell distribution differed markedly from that of WB, lacking the characteristic spiral pattern due to the ease with which the wheat dough can form coiling layers during kneading. Larger air cells were observed in GFB-10 and GFB-30, whereas higher PMF levels ($\geq 50\%$) resulted in a more compact crumb structure dominated by smaller air cells. Additionally, crust thickness progressively decreased as PMF substitution increased. Microstructural observations further revealed that the crumb surface of GFB-0 contained elongated dark regions relative to lighter areas. With increasing PMF addition, these dark regions became progressively fragmented. The smooth appearance of both light and dark regions observed in the GFB crumbs represents a distinctive structural characteristic arising from the absence of a gluten-like network, wherein crumb organization is governed primarily by hydrocolloid–biopolymer interactions. This microstructural aspect

can, therefore, be attributed to the stabilizing effect of the added xanthan gum, which promotes uniform biopolymer distribution and cohesive matrix formation within the air cell walls [52]. Moreover, glucuronic acid residues in xanthan gum may ionize, creating negative charges to further facilitate interactions with mineral elements [53], contributing to the observed microstructural smoothness.

The dark regions may be interpreted as melted and aggregated ghost starch granules, whereas the lighter regions are likely composed of leached amylose forming macromolecular complexes with lipids, proteins, and dietary fiber. As PMF incorporation increased the concentration of these biopolymers, their collective emulsifying and interfacial stabilization capacity was enhanced. Consequently, the extent of starch granule melting and aggregation was reduced, resulting in smaller and more finely dispersed dark regions within the crumb matrix.

2.1.3. Texture Profile Analysis

The breadcrumb exhibited distinct mechanical behavior, as evidenced by the progressive increase in the area under the force-time curves with increasing PMF content in the GFBs. WB exhibited the smallest area under the curve, indicating a softer and more elastic crumb compared with all GFBs (Figure 7a). HA of the GFB samples ranged from 12.8 to 25.3 N, values that were substantially higher than that of WB (9.5 N). The softest crumbs were observed in GFB-0 and GFB-10, which were statistically similar ($p \geq 0.05$; Figure 7b), whereas breads containing higher levels of PMF exhibited significantly increased resistance to compression ($p < 0.05$). This increase in HA is consistent with the structural features observed in Figure 7 for GFBs containing $\geq 30\%$ PMF, which exhibited fewer air cells and thicker cell walls, resulting in a more compact crumb structure. Notably, the maximum hardness recorded for GFB-100 remained below the average human chewing force reported for whole wheat bread (~ 30 N), suggesting acceptable mastication properties in the experimental breads.

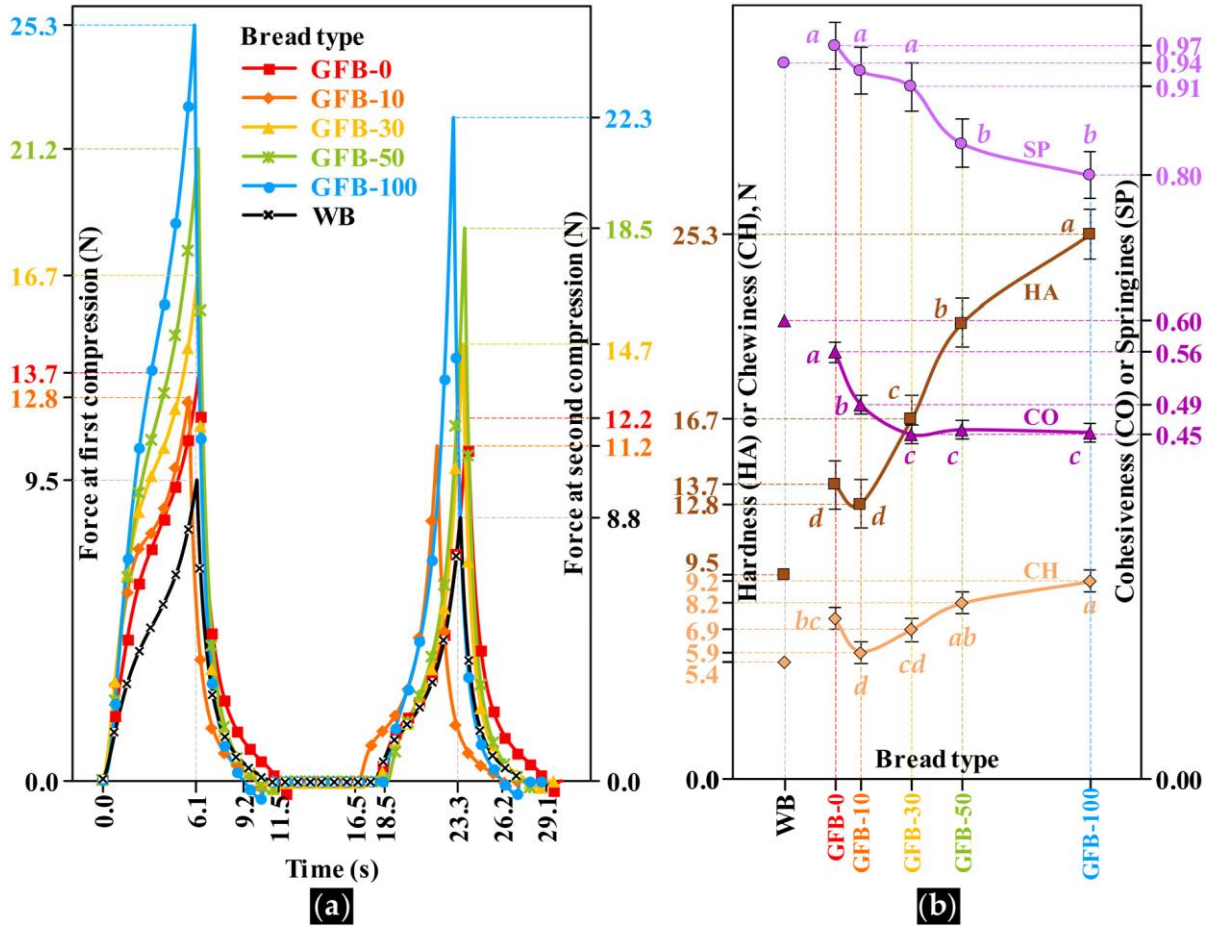
Analysis of the force-time curves further revealed differences in elastic recovery behavior. The first compression peak occurred at approximately 6.1 s for all samples, including WB, with the exception of GFB-10, which reached peak force slightly earlier. Greater variability was observed during the second compression cycle: while WB exhibited a second peak at 23.3 s, GFB-10 showed a noticeably delayed response.

These temporal shifts reflect differences in SP, which decreased from 0.97 to 0.80 as PMF content increased (Figure 7b). Notably, the SP values of GFBs containing $\leq 30\%$ PMF were statistically similar to each other ($p \geq 0.05$) and comparable to that of WB (0.94), whereas higher PMF incorporation led to a significant loss of elastic recovery.

2.1.1. Physical Changes During Fermentation and Baking

DSV at the onset of fermentation ranged from 0.76 to 0.94 cm³/g as a function of PMF incorporation, and this trend was observed throughout the fermentation interval (Figure 5b, left axis, Figure 5c, and Table S4). The protein content gradually introduced by PMF likely contributed to dough expansion under hydrated conditions, as protein-bound water increases matrix plasticity. Only doughs with 10–30% PMF doubled their initial volume by the end of fermentation ($\sim 101\%$ increase), whereas control and $\geq 50\%$ PMF doughs reached only $\sim 85\%$ expansion, likely due to low protein content in the former and fiber-induced structural disruption in the latter. Fermentation time decreased from 65 to 55 min with increasing PMF, accompanied by a rise in final DSV from 1.40 to 1.73 cm³/g. The shorter fermentation and higher DSV observed in PMF-containing doughs are consistent with the higher endogenous enzyme activity of pearl millet [37], which could have contributed to increased fermentable sugars for yeast metabolism and CO₂ production [46].

Figure 7. (a) Texture profiles of gluten-free bread (GFB) crumbs as affected by whole-grain pearl millet flour incorporation (PMF, %); (b) change in texture parameters: hardness (HA), chewiness (CH), cohesiveness (CO), and springiness (SP).



Values with different lowercase letters within a parameter differ from each other according to the Tukey test. Different lowercase letters within the same parameter differ significantly (Tukey's test, $p < 0.05$).

2.1.4. Consumer Acceptance Results

Based on gender and prior consumption of GFB (Table S2), the participants comprised 57 females (Yes, $n = 33$; No, $n = 24$) and 43 males (Yes, $n = 25$; No, $n = 18$). Most participants were 26–35 years old, had completed higher education, and reported a monthly income between US\$280 and US\$560. To further explore consumer heterogeneity, cluster analysis identified two distinct preference segments: cluster (1), $n = 53$, and cluster (2), $n = 47$. When stratified by prior GFB consumption, significant differences were observed in age and income distribution, with regular GFB consumers being more frequently represented in the 36–45 year age group and higher income brackets.

Table 9 summarizes the mean acceptance scores of the evaluated GFBs, both overall and segmented according to consumer preference clusters and prior consumption habits. Overall, GFB-C and GFB-30 achieved the highest acceptance scores, differing significantly ($p < 0.05$) from GFB-0, GFB-10, and GFB-100, which were the least preferred formulations. GFB-50 showed intermediate acceptability and did not differ statistically from the most accepted samples.

Tabela 9. Overall acceptance § of gluten-free breads and according to participants' segmentation by profile and consumption habits.

Bread Type (BT)	Participants													
	Overall <i>n</i> = 100		By Preference Segment						By Prior Consumption Habit					
			Cluster (1) <i>n</i> = 53			Cluster (2) <i>n</i> = 47			Yes <i>n</i> = 42			No <i>n</i> = 58		
GFB-0	5.8	± 2.10 <i>bc</i>	6.6	± 1.70 <i>abA</i>	4.8	± 2.10 <i>cdB</i>	5.5	± 1.80 <i>bcA</i>	5.9	± 2.30 <i>bA</i>				
GFB-10	5.7	± 2.60 <i>c</i>	7.3	± 1.50 <i>aA</i>	3.9	± 2.30 <i>dB</i>	5.7	± 2.70 <i>bcA</i>	5.6	± 2.50 <i>bA</i>				
GFB-30	6.8	± 2.00 <i>a</i>	7.3	± 1.60 <i>aA</i>	6.3	± 2.30 <i>abB</i>	6.9	± 2.00 <i>aA</i>	6.8	± 1.10 <i>aA</i>				
GFB-50	6.3	± 2.30 <i>ab</i>	6.2	± 2.20 <i>bA</i>	6.5	± 2.40 <i>abA</i>	6.5	± 2.40 <i>abA</i>	6.2	± 2.20 <i>abA</i>				
GFB-100	5.6	± 2.50 <i>c</i>	5.3	± 2.50 <i>cA</i>	5.8	± 2.50 <i>bcA</i>	4.8	± 2.60 <i>cB</i>	6.1	± 2.20 <i>abA</i>				
GFB-C	6.9	± 2.00 <i>a</i>	6.6	± 2.10 <i>abA</i>	7.2	± 1.80 <i>aA</i>	7.1	± 1.78 <i>aA</i>	6.8	± 2.20 <i>aA</i>				

§ Evaluated on a structured 9-point hedonic scale varying from (1) dislike extremely to (9) like extremely. GFB: gluten-free bread. C: commercial. Mean values ± standard deviations with the same lowercase [or uppercase] letters within the same column [or row in a preference segment or consumption habit] do not differ significantly ($p \geq 0.05$) according to Tukey's test [or Student's t-test].

Preference-based segmentation identified two consumer clusters with distinct liking patterns. Consumers in cluster (1) rated GFB-0, GFB-10, GFB-30, and GFB-C similarly ($p \geq 0.05$), indicating broad acceptance across low to intermediate PMF levels. In contrast, cluster (2) consumers showed comparable preference ($p \geq 0.05$) for GFB-50 and GFB-100. Despite these divergent preference profiles, no significant differences were observed between clusters with respect to sociodemographic characteristics (all $p \geq 0.05$, Table S2). When acceptance was analyzed according to prior consumption habits, only minor differences emerged between consumers who reported consuming GFB (Yes) and those who did not (No). In both groups, GFB-C and GFB-30 received the highest acceptance scores. However, Yes-consumers assigned significantly lower scores to GFB-100 than No-consumers, who exhibited greater acceptance of this formulation.

ANOVA results for overall acceptability indicated a significant effect of the BT factor ($p < 0.001$), confirming that PMF incorporation markedly influenced consumer preference among the GFBs. In addition, the cluster factor was also significant ($p < 0.001$), demonstrating that acceptability varied according to distinct consumer preference profiles. In contrast, the prior consumption habits factor did not significantly affect overall acceptability ($p \geq 0.05$), suggesting that liking was largely independent of whether participants routinely consumed gluten-free bread. Notably, significant interaction effects were observed between BT and CL ($p < 0.001$) and between BT and CH ($p = 0.0038$).

Internal preference mapping revealed clear differentiation among bread formulations based on consumer acceptance (Figure 8a). The first two dimensions explained 53.08% of the total variability (Dim1 = 30.58%; Dim2 = 22.50%). GFB-C, positioned in the upper right quadrant, was clearly separated from the experimental breads, particularly along Dim1, indicating a distinct acceptance pattern. This separation likely reflects differences in ingredient composition and/or industrial processing conditions.

Among experimental breads, GFB-0 and GFB-10 clustered closely, suggesting that low PMF incorporation preserves sensory characteristics comparable to the base formulation. In contrast, GFB-30 and GFB-50 were located near the center of the map, reflecting an intermediate acceptance profile between low and high PMF levels. GFB-100, positioned farther away in the lower right quadrant, exhibited the most distinct profile among the experimental breads, indicating that complete replacement of the BF substantially altered consumer acceptance.

Figure 8. Internal preference map. (a) Gluten-free breads (GFBs) as affected by whole-grain pearl millet flour incorporation (PMF, %). C: commercial; (b) consumers segmented by preference profile (cluster (1); cluster (2)) and by prior consumption (Yes; No).

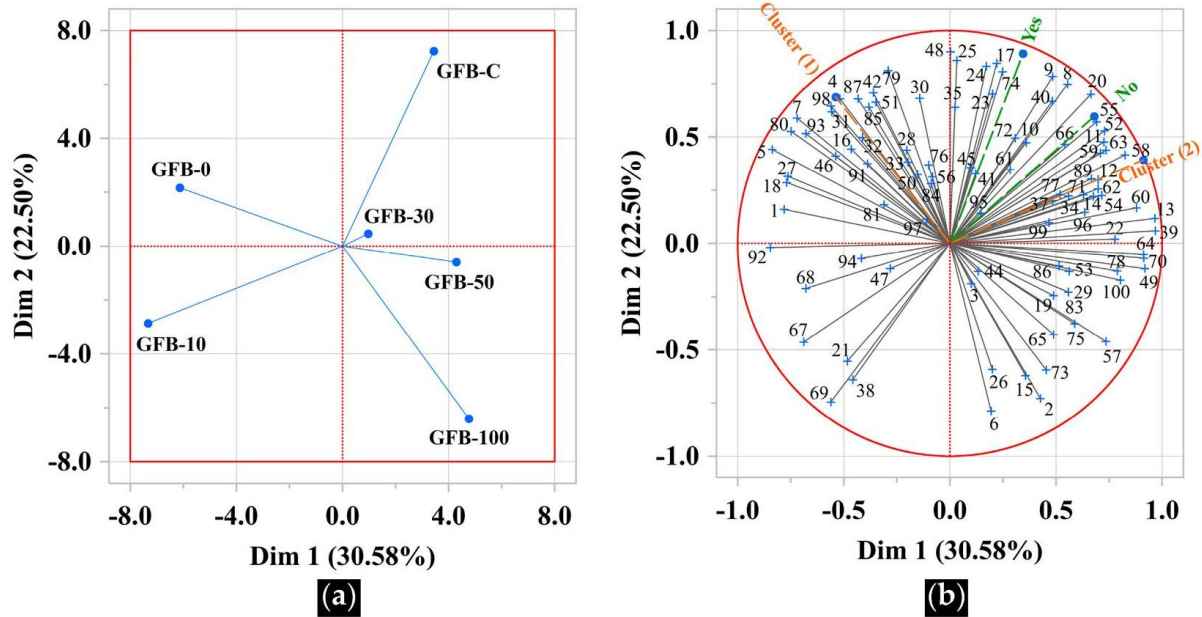


Figure 8b further illustrates the segmentation of consumers into two clearly differentiated preference clusters. Cluster (1) was distributed on the left side of the map, indicating a preference for formulations with low PMF incorporation, particularly GFB-0 and, to a lesser extent, GFB-10. The concentration of cluster (1) in the upper left quadrant reflects its close association with the base formulation, suggesting that minimal PMF addition preserves sensory attributes favored by this group. In contrast, cluster (2) was predominantly located on the right side of the map and was associated with formulations containing higher PMF levels, notably GFB-50 and GFB-100, as well as with GFB-C. Most consumers in this cluster were positioned in the upper right quadrant, where GFB-C and, to a lesser extent, GFB-30 were located, indicating broader acceptance of formulations with more pronounced compositional changes. Notably, this quadrant included consumers from both prior gluten-free bread consumption segments (Yes and No), suggesting that preference for these samples was not strongly conditioned by consumption habits. Only a small number of consumers were oriented toward the lower right quadrant, associated with GFB-100, indicating that complete substitution with PMF appealed to a limited subset of participants.

2.2. Conclusions

Starch-based breads, a major category of commercial gluten-free products, were improved by incorporating whole-grain pearl millet flour (PMF). The sequential milling and sieving strategy reduced insoluble fiber size while preserving starch granule integrity, limiting incompatibilities with starch-protein polymers during processing and enabling nutritional enrichment without loss of bread-like functionality. PMF incorporation systematically modified pasting behavior and dough viscoelasticity (G' , G''), which translated into changes in loaf volume, texture, color, and consumer perception. Microstructurally, increasing PMF shifted the system from starch continuity toward fiber-protein-dominated matrices, producing smoother cell walls, darker crumbs, and a transition from larger gas cells at low to intermediate levels to compact structures at high substitutions. Unexpectedly, moderate incorporation enhanced dough expansion and gas retention, whereas excessive PMF promoted premature rigidity, higher

firmness, and lower liking, while minimal substitution yielded modest nutritional improvement. Thus, starch acted as the primary scaffold, and fibers and proteins behaved as concentration-dependent interfacial regulators of bubble stability. Among formulations, 30% PMF achieved the best balance, improving protein and dietary fiber contents while maintaining acceptable specific volume, crumb texture, and overall acceptability comparable to commercial gluten-free bread. These results identify 30% PMF as a technologically viable route to nutritionally superior gluten-free bakery products.

References

1. Sudheesh, C.; Aaliya, B.; Sunooj, K.V. Role of Starch in Gluten-Free Breads. In *Gluten-Free Bread Technology*; Mir, S.A., Shah, M.A., Hamdani, A.M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; pp. 155–181.
2. Bourekoua, H.; Ferradji, S.; Ayad, R.; Chikhoune, A.; Belmouloud, R.; Djeghim, F.; Wójtowicz, A.; Rózyło, R. Enhancing gluten-free bread-making: Process optimization of starch blend in premix with rice and corn flour enriched with various natural flours. *Cereal Res. Commun.* **2025**, *53*, 2457–2476. [[CrossRef](#)]
3. Kim, M.; Yun, Y.; Jeong, Y. Effects of corn, potato, and tapioca starches on the quality of gluten-free rice bread. *Food Sci. Biotechnol.* **2015**, *24*, 913–919. [[CrossRef](#)]
4. Mišan, A.; Mandić, A.; Hadnadžev, T.D.; Filipčev, B. Healthy Grain Products. In *Innovative Processing Technologies for Healthy Grains*; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 2020; pp. 83–111.
5. Serna-Saldivar, S.O.; Espinosa-Ramírez, J. Chapter 7—Grain structure and grain chemical composition. In *Sorghum and Millets*, 3rd ed.; Taylor, J.R.N., Bean, S.R., Duodu, K.G., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2025; pp. 141–199.
6. Chakraborty, S.K.; Gupta, S.; Kotwaliwale, N. Quality characteristics of gluten free bread from barnyard millet–soy flour blends. *J. Food Sci. Technol.* **2016**, *53*, 4308–4315. [[CrossRef](#)]
7. de Aguiar, E.V.; Centeno, A.C.L.S.; Garcia dos Santos, F.; Capriles, V.D. Whole grain pearl millet-based gluten-free bread: A novel alternative with nutrition and sensory appeal. *Appl. Food Res.* **2024**, *4*, 100520. [[CrossRef](#)]
8. Gómez, M.; Martínez, M.M. Changing flour functionality through physical treatments for the production of gluten-free baking goods. *J. Cereal Sci.* **2016**, *67*, 68–74. [[CrossRef](#)]
9. Tsatsaragkou, K.; Mandala, I.; Stoforos, N.G. Fermentation Kinetics of Gluten-Free Breads: The Effect of Carob Fraction and Water Content. *Foods* **2023**, *12*, 1809. [[CrossRef](#)]
10. Doddabematti Prakash, S.; Nkurikiye, E.; Rajpurohit, B.; Li, Y.; Siliveru, K. Significance of different milling methods on white proso millet flour physicochemical, rheological, and baking properties. *J. Texture Stud.* **2023**, *54*, 92–104. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
11. González, L.C.; Contigiani, E.V.; Tolaba, M.P. Development of gluten-free and gum-free rice bread: Influence of ingredients, hydration and processing time on bread quality. *Discov. Food* **2024**, *4*, 61. [[CrossRef](#)]
12. Belorio, M.; Gómez, M. Effect of Hydration on Gluten-Free Breads Made with Hydroxypropyl Methylcellulose in Comparison with Psyllium and Xanthan Gum. *Foods* **2020**, *9*, 1548. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Wang, Q.; Li, L.; Zheng, X. A review of milling damaged starch: Generation, measurement, functionality and its effect on starch-based food systems. *Food Chem.* **2020**, *315*, 126267. [[CrossRef](#)]
14. Brüttsch, L.; Huggler, I.; Kuster, S.; Windhab, E.J. Industrial Roller Milling Process Characterisation for Targeted Bread Quality Optimization. *Food Bioprocess Technol.* **2017**, *10*, 710–719. [[CrossRef](#)]

15. Sahagún, M.; Gómez, M. Assessing Influence of Protein Source on Characteristics of Gluten-Free Breads Optimising their Hydration Level. *Food Bioprocess Technol.* **2018**, *11*, 1686–1694. [[CrossRef](#)]
16. *ASTM E11*; Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2024.
17. Vargas-Solórzano, J.W. Development of Whole-Grain Cereals Expanded Extrudates. Ph.D. Thesis, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Brazil, 2019.
18. Vargas-Solórzano, J.W.; Ascheri, J.L.R.; Carvalho, C.W.P.; Takeiti, C.Y.; Galdeano, M.C. Impact of the Pretreatment of Grains on the Interparticle Porosity of Feed Material and the Torque Supplied During the Extrusion of Brown Rice. *Food Bioprocess Technol.* **2020**, *13*, 88–100. [[CrossRef](#)]
19. Vargas-Solórzano, J.W.; Carvalho, C.W.P.; Takeiti, C.Y.; Ascheri, J.L.R.; Queiroz, V.A.V. Physicochemical properties of expanded extrudates from colored sorghum genotypes. *Food Res. Int.* **2014**, *55*, 37–44. [[CrossRef](#)]
20. *Method 10-10.03*; Optimized Straight-Dough Bread-Making Method. AACC: St. Paul, MN, USA, 1999; p. 8. [[CrossRef](#)]
21. *ISO 6820:1985*; Wheat Flour and Rye Flour—General Guidance on the Drafting of Bread-Making Tests. ISO: Geneva, Switzerland, 1985; p. 8. Available online: <https://www.iso.org/standard/13329.html> (accessed on 6 February 2026).
22. 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. *J. Food Eng.* **2007**, *79*, 1033–1047. [[CrossRef](#)]
23. Zhang, D. Effect of Proofing on the Rheology and Moisture Distribution of Corn Starch-Hydroxypropylmethylcellulose Gluten-Free Dough. *Foods* **2023**, *12*, 695. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. McCarthy, D.F.; Gallagher, E.; Gormley, T.R.; Schober, T.J.; Arendt, E.K. Application of Response Surface Methodology in the Development of Gluten-Free Bread. *Cereal Chem.* **2005**, *82*, 609–615. [[CrossRef](#)]
25. Cauvain, S.P. Chapter 5—Proving, Baking and Cooling. In *Technology of Breadmaking*, 3rd ed.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2015; pp. 147–181.
26. *Method 10-05.01*; Guidelines for Measurement of Volume by Rapeseed Displacement. AACC: St. Paul, MN, USA, 1999; p. 4. [[CrossRef](#)]
27. AOAC. *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 18th ed.; Horwitz, W., Latimer, G.W.J., Eds.; AOAC International: Gaithersburg, MD, USA, 2005.
28. Romero Rodríguez, J.A.; Ascheri, J.L.R.; da Silva Lopes, A.J.; Vargas-Solórzano, J.W.; Pacheco, S.; de Jesus, M.S.C. Physical Characterization of Maize Grits Expanded Snacks and Changes in the Carotenoid Profile. *Plant Foods Hum. Nutr.* **2021**, *76*, 68–75. [[CrossRef](#)]
29. Ronie, M.E.; Mamat, H.; Abdul Aziz, A.H.; Zainol, M.K. Proximate Compositions, Texture, and Sensory Profiles of Gluten-Free Bario Rice Bread Supplemented with Potato Starch. *Foods* **2023**, *12*, 1172. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
30. Sensory Analysis—Methodology—General Guidance for Conducting Hedonic Tests with Consumers in a Controlled Area. ISO: Geneva, Switzerland, 2014. Available online: <https://www.iso.org/standard/50125.html> (accessed on 9 February 2026).
31. Panghal, A.; Khatkar, B.S.; Yadav, D.N.; Chhikara, N. Effect of finger millet on nutritional, rheological, and pasting profile of whole wheat flat bread (chapatti). *Cereal Chem.* **2019**, *96*, 86–94. [[CrossRef](#)]
32. Kharat, S.; Medina-Meza, I.G.; Kowalski, R.J.; Hosamani, A.; Ramachandra, C.T.; Hiregoudar, S.; Ganjyal, G.M. Extrusion processing characteristics of whole grain flours

- of select major millets (foxtail, finger, and pearl). *Food Bioprod. Process.* **2019**, *114*, 60–71. [[CrossRef](#)]
33. Scott, G.; Awika, J.M. Effect of protein–starch interactions on starch retrogradation and implications for food product quality. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2023**, *22*, 2081–2111. [[CrossRef](#)]
 34. Zhu, F. Interactions between starch and phenolic compound. *Trends Food Sci. Technol.* **2015**, *43*, 129–143. [[CrossRef](#)]
 35. Gull, A.; Prasad, K.; Kumar, P. Evaluation of functional, antinutritional, pasting and microstructural properties of Millet flours. *J. Food Meas. Charact.* **2016**, *10*, 96–102. [[CrossRef](#)]
 36. Collar, C. Significance of viscosity profile of pasted and gelled formulated wheat doughs on bread staling. *Eur. Food Res. Technol.* **2003**, *216*, 505–513. [[CrossRef](#)]
 37. Badi, S.M.; Hoseney, R.C.; Finney, P.L. Pearl millet. II. Partial characterization of starch and use of millet flour in breadmaking. *Cereal Chem.* **1976**, *53*, 718–724. Available online: https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1976/Documents/Chem53_718.pdf (accessed on 19 August 2025).
 38. Persson, H.; Nyman, M.; Liljeberg, H.; Önning, G.; Frølich, W. Binding of mineral elements by dietary fibre components in cereals—In vitro (III). *Food Chem.* **1991**, *40*, 169–183. [[CrossRef](#)]
 39. Horstmann, S.W.; Lynch, K.M.; Arendt, E.K. Starch Characteristics Linked to Gluten-Free Products. *Foods* **2017**, *6*, 29. [[CrossRef](#)]
 40. Jagarlamudi, L. Chapter 6—Formulations and Processing of Breads. In *Bakery and Confectionery Products: Processing, Quality Assessment, Packaging and Storage Techniques*; Jagarlamudi, L., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2022; pp. 107–130.
 41. Waziirroh, E.; Bender, D.; Saric, A.; Jaeger, H.; Schoenlechner, R. Ohmic Baking of Gluten-Free Bread: Role of Starch and Flour on Batter Properties. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 6567. [[CrossRef](#)]
 42. Srichuwong, S.; Sunarti, T.C.; Mishima, T.; Isono, N.; Hisamatsu, M. Starches from different botanical sources I: Contribution of amylopectin fine structure to thermal properties and enzyme digestibility. *Carbohydr. Polym.* **2005**, *60*, 529–538. [[CrossRef](#)]
 43. Tamilselvan, T.; Sharma, S.; Thomas, P.E.; Goyal, K.; Prabhasankar, P. Role of hydrocolloids in improving the rheology, quality characteristics, and microstructure of gluten-free proso millet bread. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2022**, *57*, 7156–7166. [[CrossRef](#)]
 44. Torbica, A.; Belovic', M.; Tomic', J. Novel breads of non-wheat flours. *Food Chem.* **2019**, *282*, 134–140. [[CrossRef](#)]
 45. Li, Y.; Lv, J.; Wang, L.; Zhu, Y.; Shen, R. Effects of Millet Bran Dietary Fiber and Millet Flour on Dough Development, Steamed Bread Quality, and Digestion In Vitro. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 912. [[CrossRef](#)]
 46. Struyf, N.; Laurent, J.; Lefevre, B.; Verspreet, J.; Verstrepen, K.J.; Courtin, C.M. Establishing the relative importance of damaged starch and fructan as sources of fermentable sugars in wheat flour and whole meal bread dough fermentations. *Food Chem.* **2017**, *218*, 89–98. [[CrossRef](#)]
 47. Cauvain, S.P. Chapter 1—Introduction and overview to breadmaking. In *Breadmaking*, 3rd ed.; Cauvain, S.P., Ed.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2020; pp. 1–30.
 48. Çelik, E.E.; Gökmen, V. Formation of Maillard reaction products in bread crust-like model system made of different whole cereal flours. *Eur. Food Res. Technol.* **2020**, *246*, 1207–1218. [[CrossRef](#)]
 49. Martínez, M.M.; Díaz, Á.; Gómez, M. Effect of different microstructural features of soluble and insoluble fibres on gluten-free dough rheology and bread-making. *J. Food Eng.* **2014**, *142*, 49–56. [[CrossRef](#)]

50. Eliasson, A.C. Chapter 5—Wheat starch structure and bread quality. In *Breadmaking*, 3rd ed.; Cauvain, S.P., Ed.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2020; pp. 137–167.
51. Lagrain, B.; Wilderjans, E.; Glorieux, C.; Delcour, J.A. Importance of Gluten and Starch for Structural and Textural Properties of Crumb from Fresh and Stored Bread. *Food Biophys.* **2012**, *7*, 173–181. [[CrossRef](#)]
52. Manzoor, M.; Shams, R.; Rizvi, Q.-u.-E.H.; Dar, A.H.; Singh, A. Chapter 5—Structural Aspects of Gluten Free Breads. In *Gluten-Free Bread Technology*; Mir, S.A., Shah, M.A., Hamdani, A.M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; pp. 71–87.
53. Gioia, L.C.; Ganancio, J.R.; Steel, C.J. Chapter 6—Food Additives and Processing Aids used in Breadmaking. In *Food Additives*; Karunaratne, D.N., Pamunuwa, G., Eds.; IntechOpen: London, UK, 2017; pp. 147–166.
54. Chakraborty, S.K.; Kotwaliwale, N.; Navale, S.A. Selection and incorporation of hydrocolloid for gluten-free leavened millet breads and optimization of the baking process thereof. *LWT* **2020**, *119*, 108878. [[CrossRef](#)]

CAPÍTULO III

EXPECTATIVA, ACEITAÇÃO SENSORIAL E FATORES DETERMINANTES DA PREFERÊNCIA POR PÃES SEM GLÚTEN FEITOS COM FARINHA DE MILHETO: APLICAÇÃO DA ANÁLISE CATA E DA ANÁLISE DE PENALIDADE

EXPECTATIVA, ACEITAÇÃO SENSORIAL E FATORES DETERMINANTES DA PREFERÊNCIA POR PÃES SEM GLÚTEN FEITOS COM FARINHA DE MILHETO: APLICAÇÃO DA ANÁLISE CATA E DA ANÁLISE DE PENALIDADE

Bárbara Amorim Silva^a, Rosires Deliza^b, Inayara Beatriz Araujo Martins^c, Marcela de Alcantara^c, Jhony Willian Vargas-Solórzano^d, Marília P. Stephan^b, Silmara R. Bianchi^b, Carlos Wanderlei Piler de Carvalho^b, José Luis Ramírez Ascheri^{b, *}

^a Postgraduate Program in Food Science and Technology. Federal Rural University of Rio de Janeiro. Rodovia Br 465, km 7, CEP 23890-000, Seropédica, RJ – Brazil.

^b Embrapa Food Technology, Avenida das Américas 29501, Guaratiba, CEP 23020-470, Rio de Janeiro, RJ – Brazil.

^c Postdoctoral program Nota 10-FAPERJ/Embrapa Food Technology, Avenida das Américas 29501, Guaratiba, CEP 23020-470, Rio de Janeiro, RJ – Brazil.

^d Postdoctoral program Fundação Arthur Bernardes FUNARBE/Embrapa Food Technology, Avenida das Américas 29501, Guaratiba, CEP 23020-470, Rio de Janeiro, RJ – Brazil.

Resumo

O desenvolvimento de pães sem glúten com qualidade sensorial satisfatória e melhor valor nutricional permanece como um desafio tecnológico importante. Nesse contexto, a farinha integral de milheto-pérola (*Pennisetum glaucum*) apresenta potencial promissor como ingrediente alternativo, embora sua incorporação possa modificar a expectativa e a aceitação do consumidor. Este estudo teve como objetivo avaliar a aceitação sensorial e comparar a expectativa de aceitação com a aceitação real de pães sem glúten elaborados com substituição parcial e total de uma base amilácea (pão de referência 1) por farinha integral de milheto-pérola, nas proporções de 10, 30, 50 e 100%, além de um pão comercial como referência 2. Adicionalmente, os atributos sensoriais dos produtos foram caracterizados por meio do método Check-All-That-Apply (CATA) e análise de penalidade, a fim de identificar os atributos que dirigem a aceitação ou rejeição dos pães. A expectativa visual foi maior para a formulação com 10% de milheto, sem diferença em relação ao pão base e ao pão comercial. Após a degustação, o pão comercial e a formulação com 30% de milheto apresentaram os maiores escores de aceitação, enquanto a formulação com 100% apresentou o menor desempenho. O aumento da substituição por milheto promoveu mudança progressiva no perfil sensorial, com associação a atributos como cor escura, aparência integral, notas de cereal e amargor. Em contraste, maciez, umidade, aroma característico de pão e gosto doce atuaram como direcionadores positivos da aceitação. Os resultados indicam que níveis intermediários de substituição, especialmente entre 30 e 50%, representam o melhor equilíbrio entre incorporação de milheto e aceitação sensorial em pães sem glúten.

Palavras-chave: Pão sem glúten; Farinha de milheto-pérola; Aceitação sensorial; Check-All-That-Apply (CATA); Análise de penalidade.

Abstract:

The development of gluten-free breads with satisfactory sensory quality and improved nutritional value remains a significant technological challenge. In this context, whole pearl millet (*Pennisetum glaucum*) flour has shown promising potential as an alternative ingredient, although its incorporation may influence consumer expectations and acceptance. This study aimed to evaluate sensory acceptance and compare expected acceptance with actual acceptance of gluten-free breads produced with partial and total replacement of a starch-based formulation (reference bread 1) by whole pearl millet flour at levels of 10, 30, 50, and 100%, in addition to a commercial bread used as reference 2. Furthermore, the sensory attributes of the products were characterized using the Check-All-That-Apply (CATA) method and penalty analysis to identify the attributes driving consumer acceptance or rejection. Visual expectation was higher for the formulation containing 10% millet, with no significant difference compared with the base bread and the commercial bread. After tasting, the commercial bread and the formulation containing 30% millet showed the highest acceptance scores, whereas the formulation with 100% millet presented the lowest performance. Increasing millet substitution promoted a progressive shift in the sensory profile, associated with attributes such as darker color, whole-grain appearance, cereal notes, and bitterness. In contrast, softness, moisture, characteristic bread aroma, and sweet taste acted as positive drivers of acceptance. These results indicate that intermediate substitution levels, particularly between 30 and 50%, provide the best balance between millet incorporation and sensory acceptance in gluten-free bread

Keywords: Gluten-free bread; Pearl millet flour; Sensory acceptance; Check-All-That-Apply (CATA); Penalty analysis.

3.1. INTRODUÇÃO

O pão constitui um dos alimentos mais consumidos e culturalmente arraigados na dieta humana, desempenhando papel central na alimentação cotidiana de diversas populações ao redor do mundo. Sua ampla aceitação está associada à conveniência, ao perfil sensorial agradável e ao seu papel histórico como alimento básico, o que mantém elevados os níveis de consumo e o posiciona como uma importante fonte de energia e macronutrientes, especialmente carboidratos (SHEWRY ; HEY, 2015).

Apesar de sua relevância alimentar, os pães convencionais, majoritariamente elaborados com trigo, têm enfrentado crescente demanda por alternativas destinadas a indivíduos com restrições alimentares, como aqueles diagnosticados com doença celíaca ou sensibilidade ao glúten não celíaca. Esse cenário tem impulsionado o desenvolvimento de pães sem glúten, os quais ainda apresentam desafios significativos relacionados à estrutura, à qualidade sensorial e ao valor nutricional, fatores decisivos para a aceitação e intenção de consumo pelos consumidores (FRATELLI et al., 2018).

Nesse contexto, o milheto pérola (*Pennisetum glaucum* (L.) R.), cereal cultivado e consumido em diversas regiões do mundo, surge como uma alternativa promissora para a formulação de pães sem glúten. Seu potencial está associado ao perfil nutricional diferenciado, caracterizado por maiores teores de fibras dietéticas, amido resistente, proteínas e minerais, além da presença de compostos bioativos relacionados a efeitos fisiológicos benéficos, como a modulação da resposta glicêmica e a contribuição para a saúde intestinal. Tais atributos são particularmente relevantes para indivíduos que seguem dietas sem glúten por períodos prolongados, considerando que produtos dessa categoria frequentemente apresentam baixo teor de fibras e elevado índice glicêmico (DE AGUIAR et al., 2024).

Entretanto, a utilização do milheto em produtos de panificação ainda é limitada do ponto de vista do consumidor, especialmente na forma de pães sem glúten. Essa restrição está relacionada à baixa familiaridade com o cereal, ao consumo tradicionalmente restrito e às suas características sensoriais próprias, como sabor característico e coloração mais escura, que podem influenciar negativamente a aceitação, sobretudo entre consumidores habituados a pães elaborados com farinhas refinadas. A ausência do hábito de consumo contribui, ainda, para resistência inicial à experimentação do produto (SALEH et al., 2013; DIAS-MARTINS et al., 2018).

Quando adequadamente processado e formulado, o cereal pode contribuir para melhorias na textura e na estrutura do miolo, reduzindo características indesejáveis frequentemente associadas a pães sem glúten, como secura excessiva e esfarelamento. No entanto, o sucesso dessa aplicação depende do aprofundamento no entendimento das interações entre os componentes do milheto e os demais ingredientes da formulação, bem como da influência das condições de processamento sobre as propriedades finais do produto (HERCULANO, 2023; ANBERBIR et al., 2024).

Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar a aceitação sensorial de pães sem glúten formulados com substituição parcial e total de uma base amilácea por farinha de milheto-pérola nas proporções de 10, 30, 50 e 100%. Além disso, os atributos sensoriais foram caracterizados por meio do método Check-All-That-Apply (CATA) e da análise de penalidade, visando identificar os atributos responsáveis pela aceitação ou rejeição dos produtos.

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1. Amostras

Foram avaliadas seis amostras de pães sem glúten, incluindo um pão comercial sem glúten, um pão controle formulado à base de amidos, e quatro pães experimentais elaborados com substituição parcial e total da base amilácea por farinha de milheto-pérola nas proporções de 10, 30, 50 e 100%.

A formulação dos pães experimentais foi baseada em formulação previamente descrita por SILVA et al. (2026), com as proporções apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10. Formulação dos pães sem glúten com diferentes níveis de substituição por farinha de milho (g).

Ingredientes	Nível de substituição de farinha integral de milho-pérola				
	0%	10%	30%	50%	100%
Variáveis					
Farinha de arroz	324,75	292,27	227,32	162,37	0,00
Fécula de batata	215,41	193,87	150,79	107,71	0,00
Fécula de mandioca	137,60	123,84	96,32	68,80	0,00
Farinha de milho	0,00	68,80	206,40	344,00	687,99
Constantes					
Fermento biológico	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Azeite de oliva	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Goma xantana	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Sal	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Açúcar refinado	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Água	660,00	660,00	660,00	660,00	660,00

3.2.2. Seleção dos atributos sensoriais

O levantamento dos descritores sensoriais foi conduzido com um grupo de nove participantes, com idade superior a 30 anos, selecionados com base na experiência prévia no consumo de pães sem glúten. A partir da avaliação das amostras, foram inicialmente levantados 31 descritores sensoriais, categorizados em 8 aparências (de pão integral, quebradiço, pegajoso, cor amarelo claro, cor clara, cor escura, formato regular, miolo com furos uniformes), 3 gostos (amargo, doce, salgado), 8 sabores/residual (de arroz, de bolo de milho, de cereal, sem sabor de pão, residual amargo; residual de arroz; residual de cereal; residual de farinha), 6 texturas (duro, arenoso, macio, quebradiço, pegajoso, úmido) e 6 aromas (adocicado, de bolo de milho, de fermento, característico de pão de forma, de cereal, de pão integral). Posteriormente, esses descritores foram revisados, refinados e organizados para a elaboração do questionário Check-All-That-Apply (CATA).

3.2.3. Consumidor

Participaram do estudo 100 consumidores com idades entre 18 e 70 anos, sendo 57% do sexo feminino, interessados em participar do estudo, foram recrutados no Shopping Carlos Henrique Simonsen, localizado na Barra da Tijuca, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Os dados foram coletados utilizando o software Compusense (Compusense Inc., Guelph, Canadá), sob iluminação natural tipo luz do dia e temperatura ambiente (25 °C).

3.2.4. Avaliação sensorial com consumidores

A avaliação sensorial foi conduzida em duas etapas. Na primeira, os consumidores observaram visualmente uma fatia de pão e registraram sua expectativa de aceitação com base apenas na aparência da amostra. Nessa etapa, também responderam ao questionário CATA contendo exclusivamente os atributos visuais. Na segunda etapa, os participantes degustaram aproximadamente um quarto da fatia da amostra (~13 g), contendo miolo e crosta, e avaliaram

a aceitação global após o consumo. Em seguida, responderam ao questionário CATA referente aos atributos de aroma, sabor, gosto residual e textura. Água mineral foi fornecida entre as amostras para limpeza do palato.

A aceitação global, tanto na etapa de expectativa quanto após a degustação, foi determinada por meio de escala hedônica estruturada de nove pontos, variando de 1 (“desgostei extremamente”) a 9 (“gostei extremamente”). As amostras foram apresentadas de forma monádica, em ordem balanceada segundo delineamento em quadrado latino de Williams, à temperatura ambiente.

3.2.5. Análise estatística

Os dados de aceitação global foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA), considerando as amostras como fonte de variação e os consumidores como efeito aleatório. Quando identificadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Os dados provenientes da questão Check-All-That-Apply (CATA) foram tratados como variáveis binárias, atribuindo-se o valor 1 para os atributos selecionados e 0 para os não selecionados. A frequência de uso de cada atributo sensorial foi determinada pela contagem do número de consumidores que selecionaram cada termo para descrever as amostras. O teste Q de Cochran foi utilizado para identificar diferenças significativas entre as amostras quanto à frequência de seleção dos atributos sensoriais. A análise de correspondência foi realizada utilizando a distância euclidiana e o método de Ward para identificar grupos homogêneos entre as amostras e os descritores sensoriais avaliados.

A análise de penalidade foi aplicada para avaliar o impacto dos atributos sensoriais, identificados pelo CATA, sobre a aceitação global dos pães sem glúten. Para essa análise, foram comparadas as médias de aceitação entre os grupos de consumidores que selecionaram determinado atributo e aqueles que não o selecionaram. Diferenças negativas na média hedônica indicaram atributos penalizadores da aceitação (“*to-be-avoided*”), enquanto diferenças positivas indicaram atributos associados ao aumento da aceitação (“*drivers of liking*”). A análise foi conduzida de acordo com a abordagem proposta por Meyners, Castura e Carr (2013).

3.3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.3.1. Comparação da Expectativa de Aceitação

Os resultados da expectativa de aceitação indicaram que a formulação com 10% de farinha de milho apresentou maior pontuação, alcançando valores de 7,56 (Tabela 11), não diferindo estatisticamente do pão base e do pão comercial ($p > 0.05$). As formulações com 30% e 50% apresentaram aceitação intermediária e a formulação com 100% de milho obteve a menor aceitação (5,72) (ALENCAR et al., 2021).

As médias da expectativa de aceitação dos pães com adição de milho oscilaram entre 5,72 e 7,56, indicando avaliação positiva dos produtos antes da degustação. Os pães base, comercial e com 10% de milho apresentaram os maiores valores de expectativa ($p < 0.05$) entre as amostras, entretanto eles não tiveram diferença significativa entre si ($p > 0.05$). Isto evidencia que os produtos com aparência mais próximas ao pão tradicional de trigo, tendem a gerar maior intenção em experimentar produtos sem glúten nos consumidores (ALENCAR et al., 2021).

Entretanto, a adição de 10% de milho não afetou a expectativa em comparação com o pão base e comercial sem glúten. Enquanto, a partir de 30% de adição causou redução significativa da expectativa à medida que o teor de milho aumentou progressivamente, sendo a formulação com 100% de milho a que apresentou a menor média ($p < 0.05$). Esse resultado sugere que características visuais e conceituais associadas a produtos com maior teor de

milheto, como coloração mais escura e aparência integral, podem influenciar negativamente a expectativa inicial do consumidor (CHEUNG et al., 2025).

Tabela 11. Médias de expectativa e aceitação das amostras de pães sem glúten elaboradas com diferentes níveis de farinha de milheto.

Amostra	Expectativa ¹	Aceitação ¹
Pão base (0% de milheto)	7,39(±1,77) ^{aA}	5,75 (±2,1) ^{bcB}
10% de milheto	7,56(±1,58) ^{aA}	5,66 (±2,6) ^{cB}
30% de milheto	6,79(±1,78) ^{bA}	6,84 (±2,0) ^{aA}
50% de milheto	6,47(±1,95) ^{bA}	6,33(±2,3) ^{abA}
100% de milheto	5,72(±2,41) ^{cA}	5,55 (±2,5) ^{cA}
Comercial	7,02(±1,71) ^{abA}	6,9(±2,0) ^{aA}

¹ Avaliado em uma escala hedônica estruturada de 9 pontos, variando de 1: Desgostei extremamente a 9: Gostei extremamente. Valores médios com as mesmas letras minúsculas dentro da mesma coluna não diferem significativamente ($p > 0,05$) de acordo com o teste de Tukey. Valores médios com as mesmas letras maiúsculas dentro da mesma linha não diferem significativamente ($p > 0,05$) de acordo com o teste t de Student.

Em relação à aceitação, todas as amostras apresentaram médias superiores ao ponto neutro da escala, indicando aceitação sensorial geral dos produtos. As formulações com 30%, 50% e 100% de milheto, bem como o pão comercial, apresentaram médias significativamente maiores do que o pão base e a formulação com 10% de milheto ($p \leq 0.05$). Esses resultados demonstram que a adição de milheto, mesmo em níveis elevados, não comprometeu a aceitação sensorial, sugerindo que a experiência de consumo foi determinante para a avaliação positiva dos produtos (DELIZA ; MACFIE, 1996; MOSS ; MCSWEENEY, 2022).

3.3.2. Check-All-That-Apply (CATA)

O teste de Cochran's Q aplicado aos dados CATA revelou diferenças significativas ($p < 0,05$) na frequência de seleção da maioria dos descritores sensoriais entre as amostras de pão sem glúten (Tabela 12), indicando que os consumidores perceberam diferenças sensoriais entre as formulações avaliadas. Apenas alguns atributos não apresentaram diferença significativa, sugerindo percepção semelhante desses descritores entre os produtos.

A Análise de Correspondência (CA) aplicada aos dados do método *Check-All-That-Apply* (CATA) permitiu visualizar claramente a associação entre as amostras de pão e os descritores sensoriais avaliados. As duas primeiras dimensões explicaram conjuntamente 90,48% da variabilidade total, sendo a Dimensão 1 responsável por 71,54% e a Dimensão 2 por 18,94%, indicando adequada representação dos dados no plano bidimensional.

A Dimensão 1 foi o principal eixo discriminatório, separando as amostras de acordo com o teor de milheto. No lado negativo do eixo, agruparam-se o pão base e a formulação com 10% de milheto, associados a descritores como cor clara, sabor de arroz, sabor residual de arroz, aroma de fermento e aroma característico de pão de forma. Esses atributos indicam um perfil sensorial mais próximo ao pão tradicional, com menor influência de cereais integrais, o que explica a maior expectativa observada para essas amostras antes da degustação.

Em contraste, as formulações com 50% e 100% de milheto foram posicionadas no lado positivo da Dimensão 1, associadas a descritores como cor escura, aparência de pão integral, aroma de pão integral, aroma e sabor de bolo de milho, aroma de cereal e sabor residual de cereal, além de gosto amargo e gosto residual amargo (SALEH et al., 2013). Esses resultados

evidenciam que o aumento do teor de milho promoveu uma mudança significativa no perfil sensorial, deslocando-o para características típicas de produtos integrais e à base de cereais, o que pode justificar a menor expectativa inicial atribuída a essas formulações.

Tabela 12. Resultados do teste Q de Cochran para diferentes amostras e atributos de pão.

Atributo	PB	Pão com substituição de mileto-pérola				PC	Sign. Cochran
		10%	30%	50%	100%		
Aparência de pão integral	7	13	26	63	72	30	***
Aparência quebradiça	6	8	13	3	7	8	ns
Aparência de pegajoso	12	9	11	11	9	8	ns
Cor amarelo claro	15	13	21	13	2	48	***
Cor clara	91	87	57	16	1	30	***
Cor escura	0	0	11	50	82	17	***
Formato regular	54	60	55	42	44	45	***
Miolo com furos uniformes	32	37	34	33	26	39	ns
Aroma adocicado	15	12	13	18	22	32	***
Aroma de bolo de milho	3	10	16	24	32	6	***
Aroma de fermento	25	23	15	14	4	16	***
Aroma característico de pão de forma	42	42	42	21	9	31	***
Aroma de cereal	22	24	24	21	31	18	ns
Aroma de pão integral	14	15	27	36	36	32	***
Duro	31	16	8	15	11	23	***
Arenoso	38	54	27	35	42	20	***
Macio	38	30	54	54	36	57	***
Quebradiço	18	40	16	13	20	1	***
Pegajoso	8	6	6	6	4	10	ns
Úmido	19	24	34	34	31	31	ns
Gosto amargo	6	4	0	10	31	2	***
Gosto doce	11	9	15	21	17	26	***
Gosto salgado	18	23	29	19	15	26	ns
Sabor de arroz	37	31	20	7	2	14	***
Sabor de bolo de milho	8	9	18	29	28	10	***
Sabor de cereal	26	28	25	33	30	25	ns
Sem sabor de pão	24	25	19	15	13	15	ns
Gosto residual amargo	4	3	5	12	37	7	***
Sabor residual de arroz	40	35	23	9	7	11	***
Sabor residual de cereal	18	30	45	42	36	34	***
Sabor residual de farinha	31	35	18	20	17	29	***

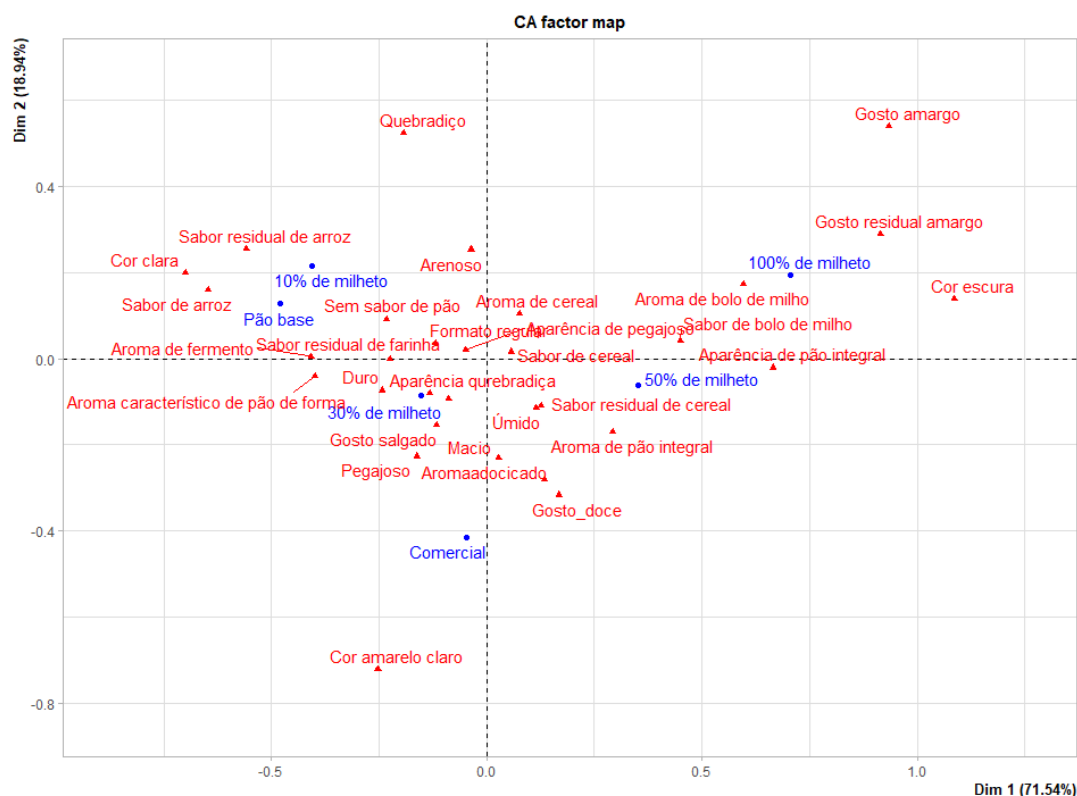
***: $p < 0.01$; ns: $p > 0.05$, PB: Pão base, PC: Pão comercial

A Dimensão 2 esteve relacionada principalmente a atributos de textura e gosto básico. A região inferior do gráfico concentrou descritores como úmido, macio, pegajoso, aroma adocicado e gosto doce, aos quais o pão comercial se mostrou mais próximo. Essa associação é coerente com os maiores escores de aceitação observados para essa amostra, refletindo a preferência dos consumidores por produtos mais macios e úmidos características frequentemente associadas à maior aceitação de pães sem glúten pelos consumidores

(VARELA ; ARES, 2012). Por outro lado, descritores como arenoso e quebradiço localizaram-se na região superior da Dimensão 2, associados principalmente às formulações com menores teores de milho. De forma semelhante, MOSS ; MCSWEENEY (2022) observaram que atributos como duro, denso e arenoso estiveram associados a menor aceitação de pães sem glúten, indicando que características de textura mais firmes ou granuladas tendem a impactar negativamente a percepção sensorial do produto.

A formulação com 30% de milho apresentou posicionamento intermediário no mapa fatorial, associando-se tanto a atributos tradicionais quanto a características relacionadas ao milho. Esse comportamento sugere uma transição sensorial equilibrada, o que se refletiu em sua elevada aceitação, superior à expectativa inicial. De modo semelhante, a formulação com 50% de milho apresentou associação com atributos de cereal e pão integral, porém sem forte proximidade com descritores negativos de textura ou gosto, o que contribuiu para sua boa aceitação sensorial. Estudos indicam que a incorporação de milho em farinhas sem glúten melhora o valor nutricional e pode ser otimizada com o uso de hidrocoloides para melhorar as propriedades físicas e sensoriais do pão, como volume, maciez e textura (OMRAN ; MAHGOUB, 2022; DE AGUIAR et al., 2024; SINGH et al., 2025). A substituição parcial da farinha tradicional por milho também tem mostrado aumentar o teor de fibras e proteínas, além de manter ou melhorar a aceitação do consumidor em pães sem glúten (WOOMER et al., 2020; OMRAN ; MAHGOUB, 2022). A combinação adequada de ingredientes e processos, como o uso de goma xantana ou guar, pode ajudar a equilibrar as características sensoriais do produto final, evitando notas amargas ou texturas indesejadas associadas ao milho puro (TOMIĆ et al., 2020). Portanto, formulações com 30% a 50% de milho em pães sem glúten apresentam um bom equilíbrio entre atributos sensoriais tradicionais e específicos do milho, resultando em alta aceitação pelo consumidor

Figura 9. Mapa fatorial da Análise de correspondência obtido a partir dos dados do teste CATA, mostrando a associação entre as amostras de pães e os descritores sensoriais.



A integração dos resultados do CATA com os dados de expectativa e aceitação evidencia que, embora o aumento do teor de milho esteja associado a atributos como cor mais escura e notas amargas, a presença simultânea de características positivas, como umidade, maciez e aromas adocicados e de cereal, contribuiu para a desconfirmação positiva observada nas formulações com maiores proporções de milho. Assim, a degustação foi capaz de superar a percepção inicial baseada apenas na aparência e no conceito do produto.

De forma geral, os resultados demonstram que o milho promove alterações sensoriais consistentes e perceptíveis no produto final, mas que tais alterações não resultam em rejeição, desde que acompanhadas de atributos positivos de textura e aroma. Esses achados reforçam o potencial do milho como ingrediente para a elaboração de pães com perfil sensorial diferenciado e boa aceitação pelo consumidor, mesmo em níveis elevados de substituição (TORBICA et al., 2019; ADEPEHIN et al., 2023).

Em conjunto, esses resultados, aliados à análise CATA, indicam que o milho é um ingrediente promissor para a formulação de pães, uma vez que, apesar de reduzir a expectativa inicial, contribui para atributos sensoriais que favorecem a aceitação após a degustação. Assim, a utilização de milho em proporções intermediárias e elevadas mostra-se viável do ponto de vista sensorial (DE AGUIAR et al., 2024).

3.3.3. Análise de penalidade baseada no CATA

A análise de penalidade baseada nos dados CATA permitiu identificar os atributos sensoriais que impactaram significativamente a aceitação dos pães, tanto quando ausentes quanto quando presentes. De modo geral, os resultados indicaram que atributos relacionados à textura e ao sabor foram os principais direcionadores da aceitação do produto o que também tem sido observado em estudos com pães elaborados com cereais alternativos, nos quais textura, sabor e características do miolo são fatores determinantes para a preferência do consumidor (COMPAORE-SEREME et al., 2023).

Os atributos macio e úmido apresentaram as maiores penalidades quando ausentes, evidenciando que a falta dessas características resultou em reduções expressivas na aceitação média. De forma semelhante, a ausência de gosto doce e aroma adocicado também esteve associada a perdas significativas de aceitação, caracterizando esses atributos como essenciais para a percepção positiva do produto. Esses resultados indicam que maciez, umidade e o gosto doce são atributos críticos para a aceitação de pães, independentemente da formulação. A identificação desses atributos como direcionadores positivos da aceitação é consistente com estudos de análise de penalidade baseados em dados CATA, nos quais determinados descritores sensoriais podem aumentar significativamente as médias de aceitação quando presentes (MEYNERS et al., 2013).

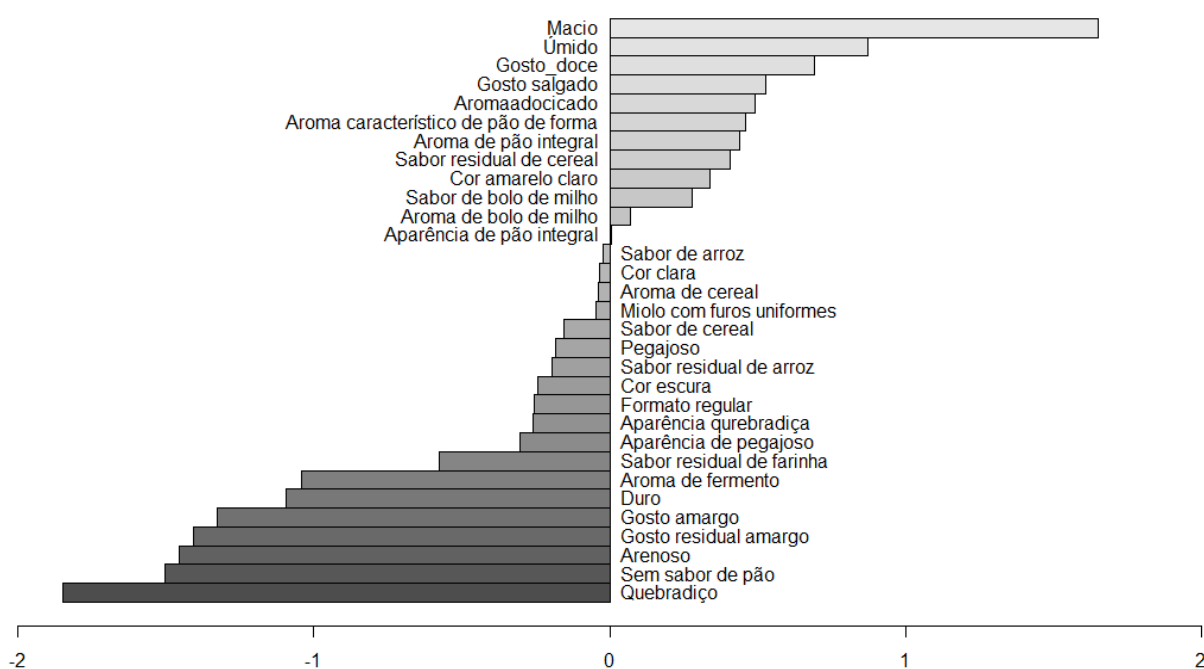
Em contraste, a presença de atributos como quebradiço, arenoso, duro, gosto amargo e gosto residual amargo resultou em penalidades negativas relevantes, indicando que esses atributos foram percebidos como indesejáveis pelos consumidores. Entre eles, quebradiço e arenoso destacaram-se como os atributos mais penalizantes, sugerindo que alterações estruturais na matriz do pão exerceram forte influência negativa sobre a aceitação global (DE AGUIAR et al., 2024).

A integração da análise de penalidade com o mapa fatorial da Análise de Correspondência reforçou essas observações. As formulações com maiores níveis de substituição por milho (50% e 100%) estiveram associadas aos atributos penalizantes, como gosto amargo, gosto residual amargo, cor escura e textura arenosa, explicando sua menor aceitação relativa. Esses resultados sugerem que o aumento do teor de milho compromete a estrutura e o perfil sensorial do produto, possivelmente em função da redução da rede de glúten e do aumento do conteúdo de fibras e compostos fenólicos, que podem intensificar sensações de amargor e aspereza (MOSS ; MCSWEENEY, 2022).

Por outro lado, as formulações com menores teores de milho (10% e 30%), bem como o pão comercial, estiveram mais próximas de atributos desejáveis, como macio, úmido, aroma adocicado e aroma característico de pão de forma, os quais apresentaram baixa penalidade ou efeito positivo sobre a aceitação. Esses resultados indicam que níveis moderados de substituição permitem manter características sensoriais próximas às de produtos comerciais, minimizando a ocorrência de atributos penalizantes. OMRAN ; MAHGOUB (2022), ao investigarem pães sem glúten formulados com farinha de arroz e milho, observaram que a substituição parcial da farinha de arroz por milho em níveis de até aproximadamente 10% não compromete as propriedades sensoriais do produto, sugerindo que níveis moderados desse cereal permitem manter características aceitáveis de textura e aroma.

Do ponto de vista do desenvolvimento do produto, a análise de penalidade mostrou-se uma ferramenta importante para evidenciar que a aceitação do consumidor não depende apenas da presença de atributos positivos, mas principalmente da redução ou ausência de atributos negativos críticos, especialmente aqueles relacionados à textura e ao amargor. Nesse contexto, os resultados indicam que formulações intermediárias representam um equilíbrio sensorial adequado entre a melhoria do valor nutricional e a manutenção da aceitação do consumidor, mostrando-se mais promissoras para aplicação industrial.

Figura 10. Análise de penalidade dos atributos sensoriais obtidos a partir dos dados do teste Check-All-That-Apply (CATA) para as amostras de pães sem glúten com diferentes níveis de milho. Valores positivos indicam aumento da aceitação quando o atributo é percebido, enquanto valores negativos indicam redução da aceitação média associada à presença do atributo.



* Valores positivos indicam aumento da aceitação quando o atributo é percebido, enquanto valores negativos indicam redução da aceitação média associada à presença do atributo.

3.3.4. Penalidade dos atributos de aparência

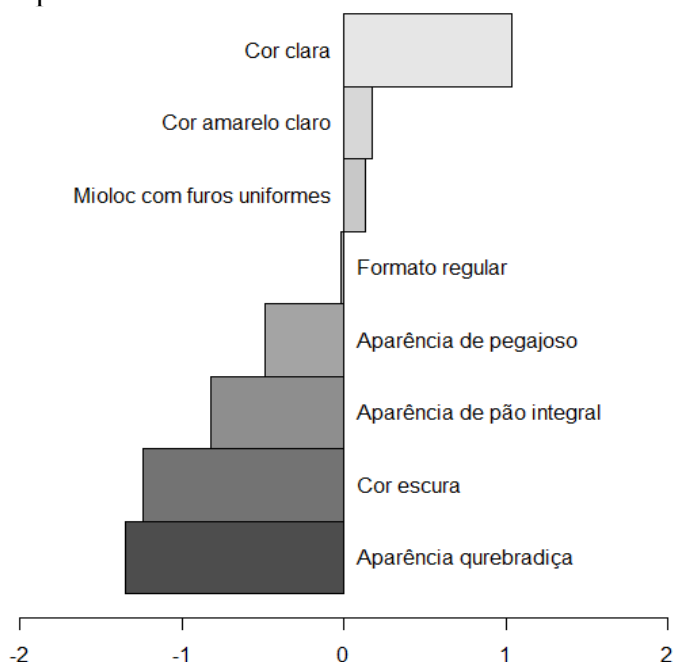
A análise de penalidade permitiu identificar os atributos visuais que mais impactaram a aceitação global dos pães avaliados. Observou-se que a presença de atributos como aparência quebradiça, cor escura, aparência de pão integral e aparência de pegajoso resultou em penalizações significativas na aceitação, evidenciando que esses aspectos visuais são

percebidos negativamente pelos consumidores. Esses resultados indicam que, embora tais características sejam frequentemente associadas a produtos integrais ou com maior teor de cereais, elas podem atuar como barreiras sensoriais à aceitação.

Em contrapartida, a cor clara apresentou efeito positivo na aceitação, demonstrando ser um atributo visual desejável e associado a maior agrado do consumidor. Esse achado está em consonância com os resultados de expectativa, nos quais amostras visualmente mais claras apresentaram maiores escores antes da degustação, reforçando a importância da aparência na formação da percepção inicial do produto (CASTRO et al., 2017; MOLLAKHALILI-MEYBODI et al., 2023).

Atributos como formato regular, miolo com furos uniformes e cor amarelo claro apresentaram penalização próxima de zero, indicando que não exerceram influência significativa sobre a aceitação global. Esses resultados sugerem que tais características são consideradas básicas ou esperadas pelos consumidores, não sendo determinantes para o aumento ou redução da aceitação. Resultados semelhantes foram observados por (GARCÍA-GÓMEZ et al., 2022) na avaliação sensorial de pães do tipo galego, na qual alguns atributos visuais e estruturais foram percebidos pelos consumidores como características inerentes ao produto, apresentando influência limitada sobre a aceitação hedônica. De forma semelhante, DE AGUIAR et al. (2020), ao compararem técnicas descritivas rápidas para caracterização sensorial de pães de sorgo, observaram que determinados descritores sensoriais atuaram principalmente como atributos descritivos do produto, sem desempenhar papel determinante como direcionadores positivos ou negativos da aceitação. Esses resultados reforçam que, em produtos de panificação, algumas características estruturais ou visuais funcionam mais como atributos de referência do produto, enquanto atributos relacionados à textura, aroma e sabor tendem a exercer maior influência na preferência do consumidor. (DE AGUIAR et al., 2020; GARCÍA-GÓMEZ et al., 2022).

Figura 11. Impacto dos atributos de aparência na aceitação dos pães sem glúten, avaliado por análise de penalidade baseada nos dados do teste Check-All-That-ApPLY (CATA).



* Valores positivos indicam aumento da aceitação quando o atributo é percebido, enquanto valores negativos indicam redução da aceitação média associada à presença do atributo.

A integração dos resultados da análise de penalidade com os dados de CATA e aceitação sensorial demonstra que o aumento do teor de milho, embora contribua para atributos como cor escura e aparência integral, deve ser cuidadosamente balanceado para minimizar características visuais penalizadoras, como a aparência quebradiça. Assim, estratégias tecnológicas voltadas para a melhoria da estrutura do miolo e controle da coloração podem ser fundamentais para aumentar a aceitação de pães formulados com maior proporção de milho. (DUBEY et al., 2025).

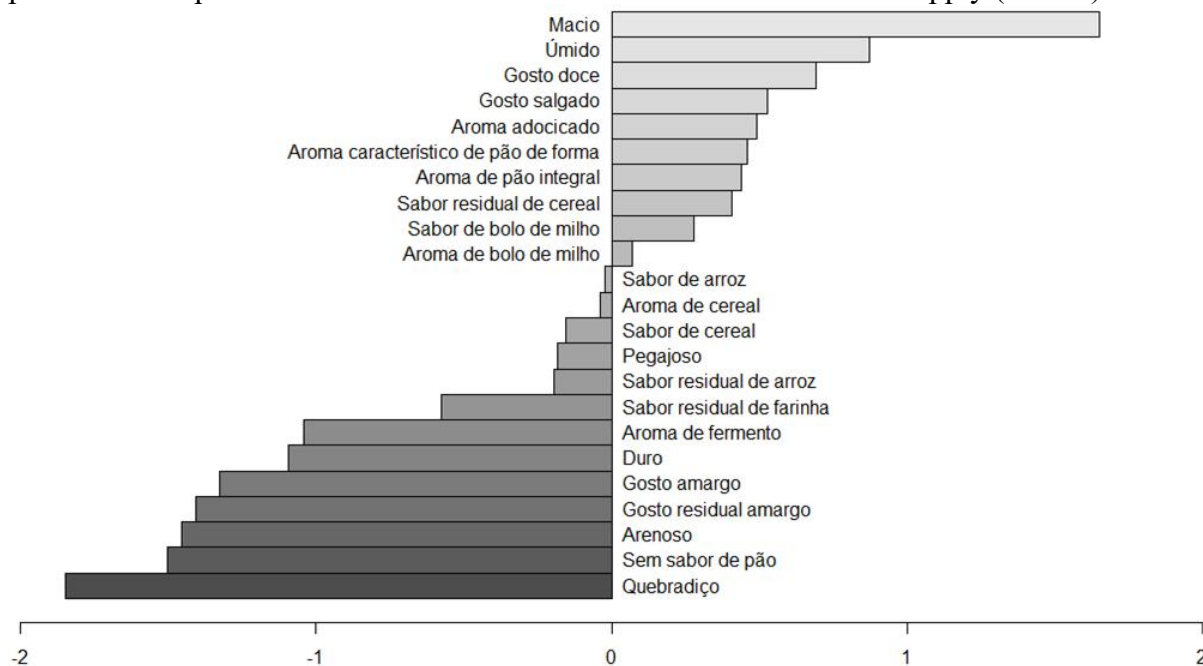
De modo geral, os resultados evidenciam que atributos visuais desempenham papel central na aceitação do produto, influenciando tanto a expectativa quanto a avaliação final após a degustação. Dessa forma, a análise de penalidade mostrou-se uma ferramenta eficiente para direcionar ajustes na formulação e no processamento, visando otimizar a aceitação sensorial de pães enriquecidos com milho.

3.3.5. Penalidade dos atributos de aroma e sabor

A análise de penalidade dos atributos de aroma e sabor evidenciou os principais direcionadores sensoriais da aceitação dos pães avaliados. Observou-se que atributos relacionados à textura favorável, como macio e úmido, juntamente com gosto doce e aroma adocicado, apresentaram os maiores efeitos positivos sobre a aceitação global. Esses resultados indicam que a percepção de maciez e umidade, aliada a notas sensoriais suaves, desempenha papel central na preferência do consumidor (SINGH et al., 2025).

Além disso, aromas característicos de produtos panificados, como aroma de pão de forma e aroma de pão integral, contribuíram positivamente para a aceitação, sugerindo que a familiaridade sensorial exerce influência importante na avaliação do produto. A presença de notas associadas ao milho, como aroma e sabor de bolo de milho e sabor residual de cereal, também apresentou contribuição positiva, indicando que tais características foram bem aceitas quando não associadas a atributos sensoriais negativos (SINGH et al., 2012).

Figura 12. Impacto dos atributos de aroma e sabor na aceitação dos pães sem glúten, avaliado por análise de penalidade baseada nos dados do teste Check-All-That-Apply (CATA).



* Valores positivos indicam aumento da aceitação quando o atributo é percebido, enquanto valores negativos indicam redução da aceitação média associada à presença do atributo.

Em contrapartida, atributos como gosto amargo, gosto residual amargo, arenoso, duro e quebradiço apresentaram elevada penalização, evidenciando que sensações desagradáveis de sabor e textura comprometem significativamente a aceitação. Da mesma forma, a percepção de aroma de fermento e sabor residual de farinha foi associada à redução da aceitação, possivelmente por indicar processos fermentativos excessivos ou formulações desequilibradas (CONG et al., 2021; GUINÉ, 2022).

A ausência de sabor característico de pão também se destacou como um fator de penalização, reforçando a importância da manutenção de notas sensoriais típicas dos produtos panificados, mesmo em formulações alternativas. Esses resultados estão em consonância com a análise CATA e com os dados de aceitação hedônica, nos quais amostras associadas a atributos positivos de textura, aroma e sabor apresentaram maior aceitação e desconfirmação positiva (SANNA et al., 2026).

De forma geral, a análise de penalidade demonstrou que a aceitação sensorial dos pães formulados com milho depende do equilíbrio entre a incorporação de notas características do cereal e a minimização de atributos negativos de sabor e textura. Assim, ajustes tecnológicos que favoreçam a maciez, a umidade e aromas agradáveis podem potencializar a aceitação do produto final.

3.4. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que a incorporação de milho na formulação de pães promove alterações sensoriais perceptíveis, influenciando a expectativa, a aceitação e a percepção de atributos visuais, de aroma, sabor e textura. O aumento do teor de milho esteve associado a mudanças progressivas no perfil sensorial, com intensificação de características típicas de produtos integrais, como coloração mais escura e notas de cereal e milho, conforme evidenciado pela análise CATA e pela Análise de Correspondência.

Apesar da redução da expectativa inicial observada nas formulações com maiores proporções de milho, a aceitação sensorial após a degustação foi satisfatória, especialmente para as formulações com 30%, 50% e 100% de milho, caracterizando um efeito de desconfirmação positiva. Esses resultados indicam que a experiência sensorial foi capaz de superar a impressão inicial baseada predominantemente em aspectos visuais e conceituais do produto.

A análise de penalidade revelou que atributos como maciez, umidade, gosto doce e aromas característicos de pão e de cereal atuaram como importantes direcionadores positivos da aceitação, enquanto características como aparência quebradiça, cor excessivamente escura, gosto amargo e textura arenosa exerceram impacto negativo na avaliação global. Esses achados ressaltam a importância do equilíbrio entre a incorporação do milho e o controle de atributos sensoriais potencialmente penalizadores.

De forma geral, os resultados indicam que o milho é um ingrediente promissor para a elaboração de pães com perfil sensorial diferenciado e boa aceitação pelo consumidor, mesmo em níveis elevados de substituição, desde que estratégias tecnológicas adequadas sejam adotadas para preservar atributos positivos de textura e aroma. Assim, o uso do milho apresenta potencial para o desenvolvimento de produtos panificados inovadores, atendendo à demanda por alimentos com maior diversidade de cereais e valor agregado, sem comprometer a aceitação sensorial.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-GAWAD, A. S. et al. Influence of legumes flour on physical and sensory attributes of gluten-free breads. **Aswan University Journal of Sciences and Technology**, v. 4, n. 2, p. 59-73, 2024. ISSN 2735-3087.
- ADEPEHIN, J. O. et al. Physicochemical and sensory attributes of gluten-free sourdough breads produced from underutilised African cereal flours and flour blends. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 58, n. 1, p. 493-501, 2023. ISSN 0950-5423.
- AGUIAR, E. V. et al. Defining amaranth, buckwheat and quinoa flour levels in gluten-free bread: A simultaneous improvement on physical properties, acceptability and nutrient composition through mixture design. **Foods**, v. 11, n. 6, p. 848, 2022. ISSN 2304-8158.
- AGUIAR, E. V. et al. Nutritional facts regarding commercially available gluten-free bread worldwide: Recent advances and future challenges. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 63, n. 5, p. 693-705, 2023. ISSN 1040-8398.
- AKIN, P. A. et al. The impact of different hydrocolloids on gluten-free bazlama bread quality. **Food Hydrocolloids**, v. 156, p. 110236, 2024. ISSN 0268-005X.
- AL-TOMA, A. et al. European Society for the Study of Coeliac Disease 2025 Updated Guidelines on the Diagnosis and Management of Coeliac Disease in Adults. Part 1: Diagnostic Approach. **United European Gastroenterology Journal**, v. 13, n. 10, p. 1855-1886, 2025/12/01 2025. ISSN 2050-6406. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/ueg2.70119> >. Acesso em: 2026/05/12.
- ALENCAR, N. M. M. et al. What about gluten-free products? An insight on celiac consumers' opinions and expectations. **Journal of Sensory Studies**, v. 36, n. 4, p. e12664, 2021. ISSN 0887-8250.
- ANBERBIR, S. M. et al. Evaluation of nutritional composition, functional and pasting properties of pearl millet, teff, and buckwheat grain composite flour. **Applied Food Research**, v. 4, n. 1, p. 100390, 2024. ISSN 2772-5022.
- ARENDT, E.; DAL BELLO, F. **Gluten-free cereal products and beverages**. Elsevier, 2011. ISBN 0080557767.
- BOUKID, F. et al. Pulses for bread fortification: A necessity or a choice? **Trends in Food Science & Technology**, v. 88, p. 416-428, 2019. ISSN 0924-2244.
- BOURNE, M. **Food texture and viscosity: concept and measurement**. Elsevier, 2002. ISBN 0080491332.
- CASTRO, W. et al. Application of image analysis to optimization of the bread-making process based on the acceptability of the crust color. **Journal of Cereal Science**, v. 74, p. 194-199, 2017. ISSN 0733-5210.

CHAKRABORTY, S. K.; KOTWALIWALE, N.; NAVALE, S. A. Selection and incorporation of hydrocolloid for gluten-free leavened millet breads and optimization of the baking process thereof. **Lwt**, v. 119, p. 108878, 2020. ISSN 0023-6438.

CHEUNG, M. M. et al. Sensory properties and acceptability of fermented pearl millet, a climate-resistant and nutritious grain, among consumers in the United States—a pilot study. **Foods**, v. 14, n. 5, p. 871, 2025. ISSN 2304-8158.

COMPAORE-SEREME, D. et al. Production and sensory evaluation of composite breads based on wheat and whole millet or sorghum in the presence of *Weissella confusa* A16 exopolysaccharides. **Heliyon**, v. 9, n. 3, 2023. ISSN 2405-8440.

CONG, W. et al. Identification of non-volatile compounds that negatively impact whole wheat bread flavor liking. **Food chemistry**, v. 364, p. 130362, 2021. ISSN 0308-8146.

DE AGUIAR, E. V. et al. Whole grain pearl millet-based gluten-free bread: A novel alternative with nutrition and sensory appeal. **Applied Food Research**, v. 4, n. 2, p. 100520, 2024. ISSN 2772-5022.

DE AGUIAR, L. A. et al. Comparison of two rapid descriptive sensory techniques for profiling and screening of drivers of liking of sorghum breads. **Food Research International**, v. 131, p. 108999, 2020. ISSN 0963-9969.

DE ERIVE, M. O. et al. Development of β -glucan enriched wheat bread using soluble oat fiber. **Journal of Cereal Science**, v. 95, p. 103051, 2020. ISSN 0733-5210.

DELIZA, R.; MACFIE, H. J. The generation of sensory expectation by external cues and its effect on sensory perception and hedonic ratings: A review. **Journal of sensory studies**, v. 11, n. 2, p. 103-128, 1996. ISSN 0887-8250.

DIAS-MARTINS, A. 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. ISSN 0963-9969.

DIOP, M. et al. Effects of hammer configurations on pearl millet grinding system with a hammer mill: theory and experiment. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 34, n. 1, p. 658-665, 2024.

DUBEY, A.; GUPTA, V.; TRIPATHY, P. Exploring compositional and technological strategies to enhance the quality of millet-based bread: an overview of current and prospective outlooks. **Food Reviews International**, v. 41, n. 6, p. 1771-1815, 2025. ISSN 8755-9129.

DZIKI, D.; KRAJEWSKA, A.; FINDURA, P. Particle size as an indicator of wheat flour quality: A review. **Processes**, v. 12, n. 11, p. 2480, 2024. ISSN 2227-9717.

FRATELLI, C. et al. Modelling the effects of psyllium and water in gluten-free bread: An approach to improve the bread quality and glycemic response. **Journal of functional foods**, v. 42, p. 339-345, 2018. ISSN 1756-4646.

FRATELLI, C. et al. Psyllium improves the quality and shelf life of gluten-free bread. **Foods**, v. 10, n. 5, p. 954, 2021. ISSN 2304-8158.

GALLAGHER, E. **Gluten-free food science and technology**. Wiley Online Library, 2009. ISBN 1444316214.

GALLAGHER, E.; GORMLEY, T. R.; ARENDT, E. K. Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 15, n. 3-4, p. 143-152, 2004. ISSN 0924-2244.

GALLO, V. et al. Properties and in vitro digestibility of a bread enriched with lentil flour at different leavening times. **Food Structure**, v. 33, p. 100284, 2022. ISSN 2213-3291.

GARCÍA-GÓMEZ, B. et al. Sensory descriptive analysis and hedonic consumer test for Galician type breads. **Food Control**, v. 134, p. 108765, 2022. ISSN 0956-7135.

GUINÉ, R. P. Textural properties of bakery products: A review of instrumental and sensory evaluation studies. **Applied Sciences**, v. 12, n. 17, p. 8628, 2022. ISSN 2076-3417.

HAGER, A.-S.; ARENDT, E. K. Influence of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), xanthan gum and their combination on loaf specific volume, crumb hardness and crumb grain characteristics of gluten-free breads based on rice, maize, teff and buckwheat. **Food hydrocolloids**, v. 32, n. 1, p. 195-203, 2013. ISSN 0268-005X.

HERCULANO, L. D. F. L. Potencialidades da farinha integral do milheto (*Pennisetum glaucum* L.) e aplicação em pães sem glúten: efeito no comportamento nutricional e tecnológico. 2023.

HOSENEY, R. C. **Principles of cereal science and technology. A general reference on cereal foods**. 1986. ISBN 0913250430.

KOBYLAŃSKI, J. R.; PÉREZ, O. E.; PILOSOFF, A. M. R. Thermal transitions of gluten-free doughs as affected by water, egg white and hydroxypropylmethylcellulose. **Thermochimica Acta**, v. 411, n. 1, p. 81-89, 2004/02/19/ 2004. ISSN 0040-6031. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040603103004179>>.

MAKTOUF, S. et al. Evaluation of dough rheological properties and bread texture of pearl millet-wheat flour mix. **Journal of food science and technology**, v. 53, n. 4, p. 2061-2066, 2016. ISSN 0022-1155.

MARTÍNEZ-VILLALUENGA, C.; PEÑAS, E.; HERNÁNDEZ-LEDESMA, B. Pseudocereal grains: Nutritional value, health benefits and current applications for the development of gluten-free foods. **Food and chemical toxicology**, v. 137, p. 111178, 2020. ISSN 0278-6915.

MEYNEERS, M.; CASTURA, J. C.; CARR, B. T. Existing and new approaches for the analysis of CATA data. **Food Quality and Preference**, v. 30, n. 2, p. 309-319, 2013. ISSN 0950-3293.

MOLLAKHALILI-MEYBODI, N. et al. Sensory attributes of wheat bread: A review of influential factors. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 17, n. 3, p. 2172-2181, 2023. ISSN 2193-4126.

MONTEIRO, J. S. et al. A systematic review on gluten-free bread formulations using specific volume as a quality indicator. **Foods**, v. 10, n. 3, p. 614, 2021. ISSN 2304-8158.

MOSS, R.; MCSWEENEY, M. B. Effect of quinoa, chia and millet addition on consumer acceptability of gluten-free bread. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 2, p. 1248-1258, 2022. ISSN 0950-5423.

NORTON, V. et al. Exploring the relationship between physical properties and sensory characteristics of newly developed white breads with improved nutritional composition—initial insights. **LWT**, p. 118297, 2025. ISSN 0023-6438.

OMRAN, A. A.; MAHGOUB, S. A. Quality evaluation of gluten-free flat bread prepared by using rice and millet flour. **British food journal**, v. 124, n. 12, p. 4406-4419, 2022. ISSN 0007-070X.

PAULIK, S. et al. Texture design of gluten-free bread by mixing under controlled headspace atmosphere. **European Food Research and Technology**, v. 247, n. 9, p. 2333-2343, 2021. ISSN 1438-2377.

PICO, J. et al. Effect of rice, pea, egg white and whey proteins on crust quality of rice flour-corn starch based gluten-free breads. **Journal of Cereal Science**, v. 86, p. 92-101, 2019. ISSN 0733-5210.

PUERTA, P. et al. Oral processing and dynamics of texture perception in commercial gluten-free breads. **Food research international**, v. 134, p. 109233, 2020. ISSN 0963-9969.

QIN, W. et al. Influence of damaged starch on the properties of rice flour and quality attributes of gluten-free rice bread. **Journal of Cereal Science**, v. 101, p. 103296, 2021. ISSN 0733-5210.

RATHEE, S. et al. Modeling the Influence of Pearl Millet on High-Fiber Bread: An Investigation into Nutrition, Microstructure, Thermal Stability, Crystallinity, Rheology, and Glycemic Response. **Starch-Stärke**, v. 76, n. 11-12, p. 2300098, 2024. ISSN 0038-9056.

RENZETTI, S.; ARENDT, E. Effect of protease treatment on the baking quality of brown rice bread: From textural and rheological properties to biochemistry and microstructure. **Journal of Cereal Science**, v. 50, n. 1, p. 22-28, 2009. ISSN 0733-5210.

SALEH, A. S. et al. Millet grains: nutritional quality, processing, and potential health benefits. **Comprehensive reviews in food science and food safety**, v. 12, n. 3, p. 281-295, 2013. ISSN 1541-4337.

SANNA, M. et al. From Composition to Acceptance: Linking Nutritional, Structural and Sensory Attributes in Clean-Label Breads. **Foods**, v. 15, n. 5, p. 831, 2026. ISSN 2304-8158.

SCANLON, M.; ZGHAL, M. Bread properties and crumb structure. **Food research international**, v. 34, n. 10, p. 841-864, 2001. ISSN 0963-9969.

SCIARINI, L. S. et al. Incorporation of several additives into gluten free breads: Effect on dough properties and bread quality. **Journal of Food Engineering**, v. 111, n. 4, p. 590-597, 2012. ISSN 0260-8774.

SHEWRY, P. R.; HEY, S. J. The contribution of wheat to human diet and health. **Food and energy security**, v. 4, n. 3, p. 178-202, 2015. ISSN 2048-3694.

SILVA, B. A. et al. **Enhancing Gluten-Free Bread Quality with Whole-Grain Pearl Millet Flour: A Physicochemical and Sensory Approach**. *Foods*. 15: 926 p. 2026.

SINGH, K.; MISHRA, A.; MISHRA, H. Fuzzy analysis of sensory attributes of bread prepared from millet-based composite flours. **LWT-Food Science and Technology**, v. 48, n. 2, p. 276-282, 2012. ISSN 0023-6438.

SINGH, M. et al. Rheological, Baking, and Microstructural Properties of Proso Millet-Hydrocolloid-Based Gluten-Free Bread. **Journal of Food Science**, v. 90, n. 9, p. e70531, 2025. ISSN 0022-1147.

ŠMÍDOVÁ, Z.; RYSOVÁ, J. Gluten-free bread and bakery products technology. **Foods**, v. 11, n. 3, p. 480, 2022. ISSN 2304-8158.

TESTER, R. F.; KARKALAS, J.; QI, X. Starch—composition, fine structure and architecture. **Journal of cereal science**, v. 39, n. 2, p. 151-165, 2004. ISSN 0733-5210.

TOMIĆ, J.; TORBICA, A.; BELOVIĆ, M. Effect of non-gluten proteins and transglutaminase on dough rheological properties and quality of bread based on millet (*Panicum miliaceum*) flour. **Lwt**, v. 118, p. 108852, 2020. ISSN 0023-6438.

TORBICA, A.; BELOVIĆ, M.; TOMIĆ, J. Novel breads of non-wheat flours. **Food Chemistry**, v. 282, p. 134-140, 2019. ISSN 0308-8146.

TORRES-PÉREZ, R. et al. Enhancing Gluten-Free Bread Production: Impact of Hydroxypropyl Methylcellulose, Psyllium Husk Fiber, and Xanthan Gum on Dough Characteristics and Bread Quality. **Foods**, v. 13, n. 11, p. 1691, 2024. ISSN 2304-8158.

VARELA, P.; ARES, G. Sensory profiling, the blurred line between sensory and consumer science. A review of novel methods for product characterization. **Food Research International**, v. 48, n. 2, p. 893-908, 2012. ISSN 0963-9969.

VARGAS SOLÓRZANO, J. W. Desenvolvimento de extrudados expandidos à base de cereais integrais. 2019.

VERA, E. P. et al. Comparison of the lipid profile and tocopherol content of four Peruvian quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars ('Amarilla de Maranganí', 'Blanca de Juli', INIA 415 'Roja Pasankalla', INIA 420 'Negra Collana') during germination. **Journal of Cereal Science**, v. 88, p. 132-137, 2019. ISSN 0733-5210.

WAZIIROH, E. et al. **Ohmic Baking of Gluten-Free Bread: Role of Starch and Flour on Batter Properties**. *Applied Sciences*. 11: 6567 p. 2021.

WITCZAK, T. et al. Rheology of gluten-free dough and physical characteristics of bread with potato protein. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 3, p. e12491, 2017. ISSN 0145-8876.

WOOMER, J. et al. Physical properties and organoleptic evaluation of gluten-free bread from proso millet. **British Food Journal**, v. 122, n. 2, p. 547-560, 2020. ISSN 0007-070X.

WU, T. et al. Effects of chemical composition and baking on in vitro digestibility of proteins in breads made from selected gluten-containing and gluten-free flours. **Food Chemistry**, v. 233, p. 514-524, 2017/10/15/ 2017. ISSN 0308-8146. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814617307392>>.

ZIEMICHÓD, A.; WÓJCIK, M.; RÓŻYŁO, R. Seeds of *Plantago psyllium* and *Plantago ovata*: Mineral composition, grinding, and use for gluten-free bread as substitutes for hydrocolloids. **Journal of food process engineering**, v. 42, n. 1, p. e12931, 2019. ISSN 0145-8876.

CONCLUSÃO GERAL

O mercado de produtos sem glúten tem apresentado crescimento expressivo, impulsionado tanto pelo aumento no diagnóstico de doenças relacionadas ao glúten quanto pelo consumo por indivíduos não diagnosticados, frequentemente motivados pela percepção de benefícios à saúde. Apesar dessa expansão, o setor ainda apresenta limitações importantes, uma vez que muitos produtos disponíveis são formulados predominantemente com amidos refinados, resultando em baixo valor nutricional.

Paralelamente, o cenário global de produção de trigo, marcado por instabilidades geopolíticas, dependência de importações e volatilidade de preços, reforça a necessidade de diversificação de matérias-primas na panificação. Nesse contexto, a substituição parcial ou total do trigo por cereais alternativos configura-se não apenas como uma estratégia tecnológica, mas também econômica e sustentável, ampliando as possibilidades de desenvolvimento de produtos mais nutritivos, acessíveis e alinhados às demandas contemporâneas do mercado e da segurança alimentar.

Diante desse cenário, este estudo teve como propósito o desenvolvimento de pães sem glúten formulados com diferentes níveis de substituição por farinha integral de milheto-pérula (*Pennisetum glaucum*). O objetivo central foi desdobrado na investigação dos efeitos dessa incorporação sobre a estrutura dos pães, o perfil sensorial e a aceitação do consumidor.

De modo geral, os objetivos propostos foram alcançados, evidenciando a adequação da abordagem metodológica empregada e a consistência dos resultados obtidos em relação à fundamentação teórica apresentada na literatura.

A hipótese deste estudo foi de que a substituição parcial da farinha base de amidos por farinha integral de milheto-pérula resultaria em pães sem glúten com melhor valor nutricional, mantendo qualidade tecnológica adequada e aceitação sensorial satisfatória.

Os resultados demonstraram que o milheto se configura como uma matéria-prima alternativa viável para a produção de pães sem glúten, contribuindo para a melhoria do valor nutricional, apresentando propriedades reológicas adequadas e mantendo boa aceitação sensorial. Evidenciou-se que um dos principais entraves da panificação sem glúten está relacionado à ausência da rede viscoelástica do glúten, à dependência de uma matriz predominantemente amilácea e à necessidade de sistemas estruturantes alternativos. Além disso, verificou-se que o enriquecimento nutricional, especialmente pela incorporação de fibras, representa um desafio tecnológico adicional, configurando um ponto crítico na formulação desses produtos.

Nesse contexto, observou-se que o método de preparo da farinha integral de milheto, aliado ao ajuste da moagem, influenciou diretamente suas propriedades tecnológicas, permitindo o controle do grau de dano do amido e a redução do tamanho das partículas da fração fibrosa. Esses fatores contribuíram para a redução de incompatibilidades durante o processamento e favoreceram a estruturação da massa. O comportamento das formulações mostrou-se dependente do nível de substituição, refletindo as interações entre amido, fibras e proteínas.

As análises físicas demonstraram que o aumento da proporção de farinha integral de milheto modificou o comportamento reológico das massas, indicando uma massa de natureza semissólida, o que promoveu maior firmeza, intensificação da coloração e aumento do volume específico até o nível de 30% de substituição, seguido de redução em níveis mais elevados.

A análise química demonstrou que a inclusão de farinha integral de milheto promoveu aumento nos teores de proteína e fibra. A formulação com 30% de substituição foi classificada como de “alto teor de fibra”, enquanto a formulação com 100% apresentou “aumento em fibra”, conforme os critérios estabelecidos pela legislação vigente.

Do ponto de vista sensorial, observou-se um comportamento distinto entre expectativa e aceitação. Níveis de substituição mais baixos geraram alta expectativa sem se refletir em aceitação equivalente, enquanto níveis elevados reduziram a expectativa inicial, mas mantiveram aceitação satisfatória. A formulação com 30% apresentou expectativa inicial mais baixa, porém, após a degustação, obteve maior aceitação, evidenciando uma mudança positiva na percepção do consumidor.

As análises sensoriais, incluindo CATA e análise de penalidade, indicaram que atributos relacionados à maciez, umidade, gosto doce e aromas característicos de pão e de cereal atuam como principais direcionadores da aceitação, enquanto características associadas a níveis mais elevados de substituição, como cor excessivamente escura, gosto amargo e textura arenosa, podem exercer impacto negativo quando não adequadamente controladas. Observou-se ainda que, apesar de alterações visuais iniciais, a aceitação após o consumo foi satisfatória, sugerindo que a experiência sensorial pode superar expectativas iniciais. Nesse sentido, a formulação com 30% de milho apresentou o melhor equilíbrio sensorial e maior aceitação pelos consumidores.

É importante salientar que o conhecimento gerado nesta tese ultrapassa o âmbito acadêmico, ao apresentar potencial de aplicação no desenvolvimento de produtos sem glúten mais nutritivos e acessíveis. Nesse contexto, a ciência desempenha papel fundamental ao responder às demandas da sociedade, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida, promoção da segurança alimentar e incentivo à utilização de matérias-primas alternativas, como o milho.

A hipótese proposta foi confirmada, especialmente no nível de 30% de substituição, que proporcionou o melhor equilíbrio entre qualidade nutricional, tecnológica e sensorial. Diante da relevância da temática, sugere-se que estudos futuros explorem estratégias para melhorar a textura e o volume de pães com maiores proporções de milho, bem como a padronização do tamanho das partículas da farinha. Recomenda-se, ainda, avaliar o impacto de diferentes variedades ou cultivares de milho nas propriedades tecnológicas, nutricionais e funcionais dos pães sem glúten.

Dessa forma, esta tese contribui para o avanço do conhecimento na área de panificação sem glúten, ampliando as perspectivas de utilização do milho e fortalecendo o desenvolvimento de produtos mais nutritivos, sustentáveis e alinhados às demandas atuais da sociedade.

APENDICES

Apêndice 1. Declaração de uso de inteligência artificial

Declaração de Uso de Inteligência Artificial

Declaro que ferramentas de Inteligência Artificial Generativa foram utilizadas neste trabalho nas seguintes condições:

GPT-v.5pro (OpenAI) foi utilizada para revisão linguística e para adequação da terminologia técnica em inglês ao longo deste trabalho, sem participação na análise ou interpretação dos dados.

Todo o conteúdo gerado com o apoio dessa ferramenta foi submetido à revisão crítica pela autora, que assume integral responsabilidade pela originalidade, veracidade e integridade do texto final, em conformidade com a Política de Integridade na Atividade Científica do CNPq (Portaria nº 2.664/2026).

Apêndice 2. Termo de consentimento livre e esclarecido aplicado à pesquisa de desenvolvimento de pão sem glúten com farinha de milho.

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

Convido o(a) Sr(a) para participar da pesquisa sobre desenvolvimento de pão sem glúten com farinha de milho, sob a responsabilidade da aluna de doutorado Bárbara Amorim Silva.

Sua participação é voluntária e se dará por meio de respostas ao questionário. Os dados serão analisados e os resultados publicados; no entanto, sua identidade será mantida em sigilo. Pedimos que participe, pois precisamos de um número mínimo de colaboradores para que os dados possam ser analisados estatisticamente.

Ressaltamos que não existe resposta certa ou errada. O importante é a sua opinião sobre o produto.

Para qualquer informação, o(a) Sr.(a) poderá entrar em contato por meio do e-mail: barbara.amorim.silva@gmail.com

Concordo com os termos citados:

☐ Sim

☐ Não

Apêndice 3. Formato de avaliação CATA aplicado à pesquisa de desenvolvimento de pão sem glúten com farinha de milho.

Você está recebendo uma amostra de PÃO SEM GLÚTEN que pode ou não conter FARINHA DE MILHETO. Por favor, *observe* a amostra e marque o quanto você acha que vai gostar na escala abaixo.

Amostra:

Acho que vou desgostar extremamente					Acho que não vou gostar, nem desgostar						Acho que vou gostar extremamente

Agora, marque todas as palavras que você considera adequada para descrever essa amostra:

☐	Cor amarelo claro
☐	Aparência de pão integral
☐	Aparência quebradiça
☐	Cor clara
☐	Aparência solada
☐	Cor escura
☐	Miolo com furos uniformes
☐	Formato regular

ANEXOS

Anexo 1. Proximate composition and instrumental color of experimental breads and wheat bread.

Component ¹	Experimental gluten-free breads (GFBs) with varying PMF ² substitution levels (%)						Wheat bread
	GFB-0	GFB-10	GFB-30	GFB-50	GFB-100		WB
Proximate composition (% dry basis) ³							
ASH	1.76 ± 0.01 <i>e</i>	1.86 ± 0.02 <i>d</i>	2.06 ± 0.03 <i>c</i>	2.29 ± 0.03 <i>b</i>	2.81 ± 0.00 <i>a</i>		1.75 ± 0.09
PRO	3.47 ± 0.00 <i>e</i>	4.14 ± 0.08 <i>d</i>	5.65 ± 0.16 <i>c</i>	7.25 ± 0.20 <i>b</i>	11.02 ± 0.00 <i>a</i>		12.18 ± 0.08
LIP	1.86 ± 0.14 <i>d</i>	2.78 ± 0.28 <i>cd</i>	3.96 ± 0.55 <i>bc</i>	4.73 ± 0.26 <i>b</i>	6.29 ± 0.37 <i>a</i>		2.49 ± 0.06
DF	7.65 ± 0.66 <i>e</i>	9.83 ± 0.33 <i>d</i>	12.54 ± 0.16 <i>c</i>	14.36 ± 0.01 <i>b</i>	18.24 ± 0.11 <i>a</i>		5.62 ± 0.42
<i>SDF</i>	1.61 ± 0.32 <i>b</i>	1.80 ± 0.02 <i>ab</i>	2.05 ± 0.17 <i>ab</i>	2.17 ± 0.26 <i>ab</i>	2.53 ± 0.12 <i>a</i>		1.70 ± 0.08
<i>IDF</i>	6.04 ± 0.34 <i>e</i>	8.03 ± 0.35 <i>d</i>	10.50 ± 0.00 <i>c</i>	12.19 ± 0.27 <i>b</i>	15.71 ± 0.01 <i>a</i>		3.92 ± 0.33
CHOa	85.26 ± 0.79 <i>a</i>	81.39 ± 0.01 <i>b</i>	75.78 ± 0.52 <i>c</i>	71.37 ± 0.50 <i>d</i>	61.64 ± 0.27 <i>e</i>		77.96 ± 0.36
Instrumental color ³							
L*	68.90 ± 0.12 <i>a</i>	64.80 ± 0.04 <i>b</i>	64.53 ± 0.01 <i>c</i>	62.74 ± 0.01 <i>d</i>	56.96 ± 0.05 <i>e</i>		75.70 ± 0.03
a*	-0.58 ± 0.04 <i>e</i>	-0.44 ± 0.01 <i>d</i>	0.02 ± 0.01 <i>c</i>	0.46 ± 0.03 <i>b</i>	1.21 ± 0.04 <i>a</i>		0.50 ± 0.03
b*	4.93 ± 0.31 <i>d</i>	7.35 ± 0.02 <i>c</i>	10.47 ± 0.01 <i>b</i>	11.95 ± 0.05 <i>a</i>	11.44 ± 0.10 <i>a</i>		17.35 ± 0.03

¹ ASH: ashes, PRO: protein, LIP: lipids, DF: dietary fiber, SDF: soluble dietary fiber, IDF: insoluble dietary fiber, CHOa: available carbohydrates, L*: lightness, a*: red-green coordinate, b*: yellow-blue coordinate. ² PMF: whole-grain pearl millet flour. ³ Means (n = 4 for proximate composition; n = 4 for instrumental color) ± standard deviations within a row followed by the same lowercase letter are not significantly different (p ≥ 0.05) according to Tukey's test.

Anexo 2. Sociodemographic characteristics of the study participants, according to consumer preference clusters and prior gluten-free bread (GFB) consumption.

Characteristics	Participants						
	Overall n = 100	By preference profile		p-value	By prior consumption habit		p-value
		Cluster (1) n = 53	Cluster (2) n = 47		Yes n = 42	No n = 58	
Genre							
Female	57	28	29	0.37 ns	33	24	0.98 ns
Male	43	25	18		25	18	
Age							
18-25	28	16	12	0.53 ns	13	15	0.01 **
26-35	34	15	19		15(-)*	19(+)*	
36-45	21	11	10		17(+)*	4(-)*	
> 46	17	11	6		13	4	
Scholarly							
Elementary School	2	1	1		1	1	0.14 ns
High School	20	12	8		15	5	
Higher Education	49	24	25		23	26	
Postgraduate Studies	29	16	13		19	10	
Income (R\$)							
< 1.518,00	22	11	11	0.40 ns	11	11	0.02 *
> 1.518,00 to 3.036,00	26	16	10		12	14	
> 3.036,00 to 7.590,00	17	10	7		10	7	
> 7.590,00 to 15.180,00	10	7	3		8	2	
> 15.180,00	17	6	11		15(+)**	2(-)**	
I prefer not to answer	8	3	5		2(-)*	6(+)*	

(+) or (-) indicates an observed value that is greater or less than the expected theoretical value. *** p < 0.001, ** p < 0.01, and * p < 0.05; chi-square effect per cell.

Anexo 3. Pasting and hydration responses of a starch-based flour blend as affected by whole-grain pearl millet flour (PMF) incorporation, used in Figure 4.

Property ¹	Gluten-free flours with varying PMF ² substitution levels (%)										Mean value
	0		10		30		50		100		
Pasting properties ³											
IV	43.5 ± 4.9	<i>a</i>	58.0 ± 8.49	<i>a</i>	42.5 ± 12.0	<i>a</i>	34.5 ± 7.8	<i>a</i>	-2.0 ± 0.0	<i>b</i>	35 ± 22.5
<i>t</i> -PT	5.40 ± 0.00	<i>ab</i>	5.43 ± 0.05	<i>a</i>	5.50 ± 0.05	<i>a</i>	5.27 ± 0.00	<i>b</i>	5.43 ± 0.05	<i>a</i>	5.4 ± 0.09
PT	70.38 ± 0.32	<i>ab</i>	71.35 ± 0.42	<i>ab</i>	71.83 ± 0.53	<i>a</i>	68.80 ± 0.21	<i>c</i>	70.18 ± 0.25	<i>bc</i>	71 ± 1.17
PV	2565 ± 29.7	<i>a</i>	884 ± 30.4	<i>b</i>	658 ± 5.7	<i>c</i>	690 ± 29.7	<i>c</i>	741 ± 14.1	<i>c</i>	-
TV	2421 ± 14.1	<i>a</i>	690 ± 27.6	<i>b</i>	348 ± 2.8	<i>c</i>	295 ± 14.8	<i>cd</i>	252 ± 4.2	<i>d</i>	-
GV	6379 ± 110	<i>a</i>	2308 ± 59.4	<i>b</i>	1496 ± 5.7	<i>c</i>	1399 ± 56.6	<i>c</i>	1354 ± 36.1	<i>c</i>	-
BV	144 ± 15.6	<i>e</i>	194 ± 2.8	<i>d</i>	310 ± 8.5	<i>c</i>	396 ± 14.8	<i>b</i>	489 ± 9.9	<i>a</i>	-
SV	3958 ± 95.5	<i>a</i>	1619 ± 31.8	<i>b</i>	1148 ± 8.5	<i>c</i>	1105 ± 41.7	<i>c</i>	1102 ± 31.8	<i>c</i>	-
Hydration properties ³											
WSI	0.90 ± 0.09	<i>e</i>	1.52 ± 0.10	<i>d</i>	2.60 ± 0.04	<i>c</i>	4.45 ± 0.10	<i>b</i>	11.15 ± 0.11	<i>a</i>	-
WAI	1.75 ± 0.05	<i>a</i>	1.62 ± 0.05	<i>a</i>	1.60 ± 0.06	<i>a</i>	1.52 ± 0.04	<i>a</i>	1.23 ± 0.08	<i>b</i>	-

¹ IV: initial viscosity (mPa·s), *t*-PT: pasting onset (min), PT: pasting temperature (°C), PV: peak viscosity (mPa·s), TV: trough viscosity (mPa·s), GV: gelation viscosity (mPa·s), BV: breakdown viscosity (mPa·s), SV: setback viscosity (mPa·s), WSI: water solubility index (g soluble solids per 100 g of flour on a dry basis), WAI: water absorption index (g absorbed water per g of insoluble solids in the flour). ² PMF: whole-grain pearl millet flour. ³ Means (n = 4 for pasting properties; n = 8 for hydration properties) ± standard deviations within a row followed by the same lowercase letter are not significantly different (p ≥ 0.05) according to Tukey's test.

Anexo 4. Rheological properties, dough and bread specific volume, and moisture distribution responses of a starch-based dough as affected by whole-grain pearl millet flour (PMF) incorporation.

Property ¹	Experimental gluten-free products with varying PMF ² substitution levels (%)										Wheat bread
	0		10		30		50		100		WB
Viscoelastic properties of doughs before fermentation (kPa) ³											
G' at 0.1 Hz	92.0 ± 3.7	<i>aA</i>	12.8 ± 0.71	<i>cA</i>	9.6 ± 0.7	<i>cA</i>	8.6 ± 0.3	<i>cA</i>	11.8 ± 1.5	<i>bA</i>	-
G'' at 0.1 Hz	21.51 ± 0.47	<i>aB</i>	3.35 ± 0.25	<i>cB</i>	2.64 ± 0.04	<i>cB</i>	2.45 ± 0.10	<i>cB</i>	3.51 ± 0.46	<i>bB</i>	-
G' at 10 Hz	168.3 ± 3.3	<i>aA</i>	20.0 ± 1.44	<i>cA</i>	17.8 ± 0.8	<i>cA</i>	23.6 ± 3.0	<i>cA</i>	42.5 ± 2.2	<i>bA</i>	-
G'' at 10 Hz	36.32 ± 0.69	<i>aB</i>	4.80 ± 0.18	<i>cB</i>	4.35 ± 0.15	<i>cB</i>	5.53 ± 0.57	<i>cB</i>	10.00 ± 0.59	<i>bB</i>	-
Specific volume of doughs and breads (cm ³ /g) ³											
DSV _{onset}	0.76 ± 0.03	<i>cγ</i>	0.78 ± 0.01	<i>bcδ</i>	0.81 ± 0.01	<i>bcδ</i>	0.84 ± 0.00	<i>bδ</i>	0.94 ± 0.02	<i>aδ</i>	1.03 ± 0.03
DSV _{20 min}	0.89 ± 0.05	<i>dγ</i>	0.94 ± 0.01	<i>cdγ</i>	1.01 ± 0.00	<i>bcγ</i>	1.04 ± 0.00	<i>bγ</i>	1.31 ± 0.01	<i>aγ</i>	1.41 ± 0.01
DSV _{40 min}	1.08 ± 0.05	<i>dβ</i>	1.16 ± 0.02	<i>cdβ</i>	1.26 ± 0.01	<i>bcβ</i>	1.30 ± 0.01	<i>bβ</i>	1.58 ± 0.04	<i>aβ</i>	1.93 ± 0.03
DSV _{end}	1.40 ± 0.04	<i>ca</i>	1.58 ± 0.02	<i>ba</i>	1.64 ± 0.02	<i>aba</i>	1.58 ± 0.03	<i>ba</i>	1.73 ± 0.04	<i>aa</i>	2.25 ± 0.01
FT (min)	65		65		60		60		55		60
BSV	2.40 ± 0.06	<i>b</i>	2.68 ± 0.05	<i>a</i>	2.56 ± 0.07	<i>ab</i>	2.41 ± 0.03	<i>b</i>	2.13 ± 0.04	<i>c</i>	3.02 ± 0.03
OS (%)	71.4		69.1		56.6		52.4		23.1		33.8
Moisture distribution of breads (%) ³											
Whole bread	47.89 ± 0.38	<i>a</i>	47.31 ± 0.54	<i>ab</i>	45.37 ± 0.83	<i>bc</i>	43.35 ± 0.16	<i>cd</i>	42.24 ± 0.71	<i>d</i>	-
Crumb	52.43 ± 0.04	<i>a</i>	51.80 ± 0.19	<i>a</i>	51.33 ± 0.80	<i>a</i>	50.75 ± 0.70	<i>a</i>	48.25 ± 0.75	<i>b</i>	-
Crust	35.88 ± 0.01	<i>a</i>	29.88 ± 0.76	<i>b</i>	25.92 ± 0.04	<i>c</i>	24.34 ± 0.41	<i>c</i>	23.48 ± 1.37	<i>c</i>	-

¹ G': elastic modulus, G'': viscous modulus, DSV: dough specific volume. Subscripts: onset (before starting fermentation), 20 (after 20 min), 40 (after 40 min), end (after fermentation is complete), FT: fermentation time at the end, BSV: bread specific volume. OS: oven spring ($OS = 100\% \times (BSV - DSV_{end}) / DSV_{end}$). ² PMF: whole-grain pearl millet flour. ³ Means (n = 4 for viscoelastic properties; n = 6 for specific volumes and moisture contents) ± standard deviations within a row followed by the same lowercase letter, or within a column followed by the same uppercase letter for viscoelastic properties or by the same Greek letter for DSV, are not significantly different ($p \geq 0.05$) according to Tukey's test.