



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO REGIONAL
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA SUCROALCOOLEIRA



TATIANY GONÇALVES LISBOA

HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DO FARELO DE TRIGO POR AMILASES DE *Aspergillus*
sp. FSDE16: LIBERAÇÃO DE AÇÚCARES E COMPOSTOS BIOATIVOS

JOÃO PESSOA

2025

TATIANY GONÇALVES LISBOA

HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DO FARELO DE TRIGO POR AMILASES DE *Aspergillus* SP.
FSDE16: LIBERAÇÃO DE AÇÚCARES E COMPOSTOS BIOATIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Produção Sucroalcooleira.

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Laís Campos Teixeira de Carvalho Gonçalves

JOÃO PESSOA,

2025

TATIANY GONÇALVES LISBOA

HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DO FARELO DE TRIGO POR AMILASES DE
ASPERGILLUS SP. FSDE16: LIBERAÇÃO DE AÇÚCARES E COMPOSTOS
BIOATIVOS

Aprovado em: 25/09/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 LAIS CAMPOS TEIXEIRA DE CARVALHO GONCAL'
Data: 01/10/2025 15:00:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Laís Campos Teixeira de Carvalho Gonçalves

Orientadora – UFPB

Documento assinado digitalmente
 MARCIA HELENA PONTIERI
Data: 03/10/2025 10:41:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Márcia Helena Pontieri

Examinadora - UFPB

Documento assinado digitalmente
 HEBERT HENRIQUE SOUZA LIMA
Data: 03/10/2025 09:58:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Msc. Hebert Henrique Souza de Lima

Examinador - UFPB

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L769h Lisboa, Tatiany Goncalves.

Hidrólise enzimática do farelo de trigo por amilases de *Aspergillus* sp. FSDE16: liberação de açúcares e compostos bioativos / Tatiany Goncalves Lisboa. - João Pessoa, 2025.

36 f. : il.

Orientação: Laís Campos Teixeira de Carvalho Gonçalves.

TCC (Graduação) - UFPB/CTDR.

1. Amilases. 2. Hidrólise enzimática. 3. Farelo de trigo. 4. Compostos fenólicos. I. Campos Teixeira de Carvalho Gonçalves, Laís. II. Título.

UFPB/CTDR

CDU 663:633.11

*A todos que estiveram nessa caminhada
comigo, por serem meus maiores
incentivadores.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre me ajudou, me protegeu e me permitiu conhecer e aprender com todas as pessoas que serão citadas neste trabalho. Sem Sua presença, nada disso teria sido possível.

À minha família, expresso minha eterna gratidão. Especialmente aos meus pais, Lúcia Lisboa e Severino Gonçalves, por sempre estarem presentes, me apoiando e oferecendo as condições necessárias para que eu pudesse trilhar esse caminho de forma confortável e segura. Foram eles que me ensinaram, com o exemplo, o verdadeiro significado de dedicação e resiliência. À minha prima Raquel, que, com seus conselhos, trouxe leveza a momentos que pareciam sombrios, mostrando-me que muitas vezes os desafios não eram tão grandes quanto eu imaginava.

Aos meus amigos mais queridos, que já vivemos, estudamos e rimos juntos, deixo minha profunda gratidão. A Mikael Angelo, que esteve ao meu lado nos experimentos deste trabalho, chegando até a buscar água destilada em outros laboratórios para que tudo fosse conduzido de acordo com os POPs. À Heloísa Marinho, que sempre esteve presente, tornando essa jornada acadêmica mais leve e agradável. Além da amizade, ambos contribuíram imensamente com seus conhecimentos e habilidades, o que enriqueceu ainda mais essa caminhada.

À minha orientadora, professora Laís, que me mostrou que era possível viver a vida acadêmica que eu tanto sonhava desde criança ao desejar ingressar na Universidade Federal: um espaço de muito trabalho, mas também de conquistas recompensadoras. Graças a ela, muitas portas se abriram, e pude vivenciar experiências valiosas por meio da iniciação científica, da extensão e, primeiramente, da monitoria em Microbiologia. Com ela aprendi não apenas técnicas e teorias, mas também a graça e a leveza de se dedicar à ciência. Estendo meus agradecimentos às professoras Márcia Cezar e Márcia Pontieri, que me ensinaram muito além do conteúdo de suas disciplinas. A elas, guardo eterna gratidão e carinho.

Não poderia deixar de reconhecer o apoio fundamental dos técnicos Diego, Mikaela, Karol, Claudinha, Hebert e Ângela, que sempre estiveram dispostos a esclarecer minhas dúvidas e auxiliar nas mais diversas tarefas. Agradeço, especialmente, pela paciência em me receber quase todos os dias com novos desafios. Vocês também fazem parte desta conquista.

EPÍGRAFE

“A legend in the
making”.
(Beyoncé)

GONÇALVES-LISBOA, Tatiany. **Hidrólise Enzimática do Farelo de Trigo por Amilases de *Aspergillus* sp. FSDE16: Liberação de Açúcares e Compostos Bioativos**, 2025. Trabalho de conclusão de curso [Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira], Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

RESUMO

A agroindústria brasileira gera grandes volumes de resíduos que, quando mal aproveitados, representam passivos ambientais, mas que podem ser convertidos em produtos de valor agregado por meio de bioprocessos sustentáveis. Entre esses resíduos, o farelo de trigo destaca-se pelo elevado teor de carboidratos e compostos fenólicos ligados à parede celular. Nesse contexto, este trabalho utilizou amilases produzidas por *Aspergillus* sp. FSDE16 em fermentação sólida com casca de mandioca, por 168h em estufa bacteriológica a 37 °C. Após a obtenção das enzimas por filtração e centrifugação, elas foram encaminhadas para promover a hidrólise enzimática do farelo de trigo. Este processo foi conduzido por 96 h, em *shaker* a 50 °C e 150 rpm, sendo avaliados parâmetros como açúcares redutores, °Brix, massa residual e compostos fenólicos totais. Os resultados demonstraram aumento de 30,12% nos açúcares redutores, associado à redução do peso da biomassa de aproximadamente 34%. Também foi observado o aumento dos compostos bioativos em 185,62%. Os dados obtidos com esse estudo evidenciam a eficiência do coquetel enzimático na conversão de carboidratos estruturais em açúcares solúveis e na extração de bioativos, demonstrando o potencial do processo para a valorização de resíduos agroindustriais. Conclui-se que a aplicação das amilases de *Aspergillus* sp. FSDE16 constitui uma estratégia para ampliar a sustentabilidade e a competitividade de cadeias produtivas, fornecendo açúcares fermentescíveis e compostos de interesse funcional e nutracêutico.

Palavras-chave: Amilases; Hidrólise enzimática; Farelo de trigo; Compostos fenólicos.

GONÇALVES-LISBOA, Tatiany. **Enzymatic Hydrolysis of Wheat Bran by Amylases from *Aspergillus* sp. FSDE16: Release of Sugars and Bioactive Compounds**, 2025. Trabalho de conclusão de curso [Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira], Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

ABSTRACT

The Brazilian agroindustry generates large volumes of residues that, when poorly utilized, represent environmental liabilities but can be converted into value-added products through sustainable bioprocesses. Among these residues, wheat bran stands out due to its high content of carbohydrates and cell-wall-bound phenolic compounds. In this context, this study employed amylases produced by *Aspergillus* sp. FSDE16 in solid-state fermentation with cassava peel for 168 h in a bacteriological incubator at 37 °C. After enzyme extraction by filtration and centrifugation, the enzymes were used to perform the enzymatic hydrolysis of wheat bran. The hydrolysis was carried out for 96 h in a shaker at 50 °C and 150 rpm, evaluating parameters such as reducing sugars, °Brix, residual biomass, and total phenolic compounds. Results showed a 30.12% increase in reducing sugars, associated with a ~34% reduction in biomass weight. An increase of 185.62% in bioactive compounds was also observed. These data demonstrate the efficiency of the enzymatic cocktail in converting structural carbohydrates into soluble sugars and extracting bioactive compounds, highlighting the potential of this process for the valorization of agroindustrial residues. It is concluded that the application of *Aspergillus* sp. FSDE16 amylases constitutes a promising strategy to enhance the sustainability and competitiveness of production chains by providing fermentable sugars and compounds of functional and nutraceutical interest.

Keywords: Amylases; Enzymatic hydrolysis; Wheat bran; Phenolic compounds.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fermentação sólida de cereais com a produção de enzimas microbianas que promovem a hidrólise de fibra da biomassa e a liberação de compostos fenólicos	17
Figura 2 - Casca de mandioca cortada e encaminhada para secagem em estufa (a) e casca de mandioca, após moagem e peneiramento (b).....	19
Figura 3 - Fungo <i>Aspergillus</i> sp. FSDE16 em placa de Petri contendo meio PDA	19
Figura 4 - Casca de mandioca (a), fermentação sólida da casca de mandioca pelo fungo (b) e obtenção do sobrenadante contendo as amilases (c).....	20
Figura 5 - Curva padrão de glicose para análise dos açúcares redutores (ARs).....	22
Figura 6 - Atividade de alfa-amilases após fermentação sólida da casca de mandioca por <i>Aspergillus</i> sp. FSDE16.....	24
Figura 7 - Etapas do processo de hidrólise enzimática do farelo de trigo.....	25
Figura 8 - Hidrólise enzimática do farelo de trigo e análise dos açúcares redutores (AR) e °Brix dos tempos 0h a 96h de reação.....	25
Figura 9 - Comparação entre a massa do farelo de trigo e os ARs nos tempos 0 e após 96h de hidrólise enzimática.....	26
Figura 10 - Análise (a) e quantificação dos compostos fenólicos presentes nas amostras antes e após a hidrólise enzimática (b).....	27

LISTA DE TABELAS

Figura 1 - Composição química média do farelo de trigo.....	15
Figura 2 - Massa do farelo de trigo antes e após a hidrólise enzimática	26

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo geral.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3.1 Amilases.....	14
3.3 Farelo de trigo.....	16
3.4 Fermentação sólida de biomassa por fungos.....	17
3.5 Hidrólise enzimática de biomassa.....	17
3.6 Compostos Fenólicos.....	18
4. METODOLOGIA.....	20
4.1 Fermentação sólida da casca de mandioca por <i>Aspergillus</i> sp. FSDE16.....	20
4.2 Atividade de alfa-amilases.....	22
4.3 Hidrólise enzimática do farelo de trigo.....	22
4.4 Análise da massa do farelo de trigo após a hidrólise.....	23
4.5 Avaliação de compostos fenólicos nas amostras.....	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
6. CONCLUSÃO.....	30
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

1. INTRODUÇÃO

A agroindústria brasileira produz toneladas de resíduos por ano. Conforme o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos do SINIR (Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos), as indústrias declararam, em 2019, a emissão de aproximadamente 2.194.883 toneladas de resíduos tóxicos e não tóxicos. Grande parte desse resíduo – predominantemente matéria orgânica – acaba sendo “desvalorizado” pela clássica gestão linear do tipo "pegar-usar-descartar". E este acúmulo, somado ao descarte inadequado dos resíduos, pode gerar problemas ambientais, como contaminação de solos e corpos hídricos, proliferação de vetores de doenças e emissão de gases de efeito estufa, como metano (Campos *et al.*, 2020).

Quando tratados sob nova perspectiva, tais resíduos podem se transformar em produtos de valor agregado e manter uma economia circular através de medidas como o reaproveitamento desses resíduos na geração de energia e suplementação nutricional em dietas animais (Carvalho *et al.*, 2006). O farelo de trigo e a casca de mandioca são exemplos clássicos de materiais mal explorados na forma de ração animal, adubos e fertilizantes. Isso não apenas mitiga o descarte, mas cria possibilidades econômicas e ambientais valiosas.

Um dos resíduos agroindustriais de maior relevância é o farelo de trigo, subproduto do processamento do grão de trigo para produção de farinha para panificação, massas, biscoitos e cerveja. Em sua composição, os carboidratos totais correspondem a cerca de 64,3 %, o que torna este resíduo um substrato acessível e promissor para processos biotecnológicos (TBCA, 2025; Sharanappa *et al.*, 2016). A utilização do farelo de trigo como matéria-prima pode agregar valor a este bioproduto de ampla disponibilidade, ao mesmo tempo em que contribui para a mitigação de passivos ambientais (Nascimento, 2022).

Nesse contexto, a biotecnologia tem se consolidado como uma estratégia promissora, especialmente pelo emprego de enzimas, que atuam como ferramentas versáteis e ambientalmente adequadas na transformação de resíduos orgânicos em produtos de alto valor agregado (Martins *et al.*, 2019).

As enzimas são catalisadores biológicos de natureza proteica que aceleram reações químicas específicas, sem serem consumidas no processo, apresentando alta especificidade e eficiência. Essas propriedades as tornam fundamentais em diferentes setores industriais, incluindo a produção de alimentos, detergentes, bebidas alcoólicas e biocombustíveis (Nelson; Cox, 2017; Ajala *et al.*, 2020; Bernardes; Oliveira, 2018). Em comparação com

processos químicos convencionais, as enzimas oferecem vantagens como menor gasto energético, redução do uso de reagentes tóxicos, não geração de subprodutos tóxicos e menor impacto ambiental (Abedi *et al.*, 2024; Paul *et al.*, 2021).

Entre as enzimas mais relevantes na indústria, destacam-se as amilases microbianas, amplamente aplicadas nas indústrias alimentícia, farmacêutica, têxtil e de papel (Putri; Nakagawa, 2020; Santos *et al.*, 2021). Essas enzimas hidrolisam as ligações glicosídicas do amido, liberando glicose, maltose e oligossacarídeos. O amido, por sua vez, constitui a principal forma de armazenamento energético em vegetais, sendo composto por amilose e amilopectina, e tem sido amplamente explorado em aplicações industriais (Iuga; Mironeasa, 2020; Seung, 2020).

O gênero *Aspergillus*, composto por fungos filamentosos largamente distribuídos no ambiente, exerce papel essencial na manutenção do equilíbrio ecológico, atuando na decomposição da matéria orgânica. Essa função é possível graças à secreção de complexos enzimáticos capazes de degradar polímeros como celulose, hemicelulose, pectinas, amido, bem como compostos como ceras, óleos e proteínas (Souza; Harrison, 2020; Gugnani, 2003; Raveendran *et al.*, 2018; Abdel-Azeem *et al.*, 2019). Além disso, tais microrganismos apresentam vantagens como elevada secreção enzimática, estabilidade em ampla faixa de pH e termotolerância, características que reforçam sua importância industrial (Meyer, 2020; Mondal *et al.*, 2022; Troiano, Dumont, 2020).

Nesse cenário, a produção de amilases por fermentação em estado sólido (FES) e a sua utilização na hidrólise da casca de mandioca para liberação de açúcares e compostos fenólicos apresenta-se como uma alternativa eficaz para a economia circular. Assim, além do aproveitamento de resíduos agrícolas, possibilita a obtenção de enzimas com características desejáveis para diferentes aplicações industriais, como alta especificidade, estabilidade e eficiência catalítica (Pandey *et al.*, 2000; Mondal *et al.*, 2022).

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a produção de amilases por *Aspergillus* sp. FSDE16 e aplicar essas enzimas na hidrólise enzimática do farelo de trigo, visando a liberação de açúcares e compostos fenólicos com potencial de aplicação em diferentes processos industriais.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Promover a hidrólise do farelo de trigo com amilases produzidas por *Aspergillus* sp. FSDE16 em fermentação sólida com casca de mandioca e avaliar o potencial das amilases na liberação de açúcares e compostos fenólicos.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a fermentação sólida de casca de mandioca pelo fungo *Aspergillus* sp. FSDE16;
- Avaliar a atividade de alfa-amilases;
- Promover a hidrólise enzimática do farelo de trigo;
- Analisar as variações de pH, teor de açúcares redutores, massa do farelo de trigo e °Brix, antes e após a hidrólise enzimática.
- Avaliar a produção de compostos fenólicos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Amilases

A utilização de enzimas, catalisadores biológicos de natureza proteica, consolidou-se como uma estratégia essencial para a otimização de diversos processos industriais, em especial pela sua capacidade de acelerar reações químicas com elevada especificidade e eficiência, sob condições brandas de pH e temperatura. Esse desempenho representa uma vantagem significativa em relação aos catalisadores químicos tradicionais, que frequentemente requerem condições elevadas de pH e temperatura e podem gerar subprodutos indesejados (Caspeta *et al.*, 2018).

Entre essas enzimas, destacam-se as amilases, também conhecidas por glicosídeo-hidrolases. Elas catalisam a hidrólise das moléculas de amido em açúcares, como maltose e dextrinas, bem como em polímeros menores formados por unidades de glicose (Joshi *et al.*, 2021).

Existem três tipos de amilases: α -amilase, β -amilase e γ -amilase. As α -amilases atuam em locais aleatórios ao longo da cadeia de amido e promovem a quebra de carboidratos de cadeia longa. As β -amilases atuam a partir da extremidade não redutora e catalisam a hidrólise da segunda ligação glicosídica α -1,4, liberando duas unidades de glicose por vez. As γ -amilases atuam a partir da extremidade não redutora e clivam as últimas ligações

glicosídicas α -1,4, gerando glicose com ligação glicosídica α (1-6) (Joshi *et al.*, 2021).

O amido, principal carboidrato de reserva vegetal, constituído por amilose e amilopectina, apresenta alta disponibilidade e baixo custo, tornando-se matéria-prima estratégica para processos industriais (Seung, 2020; Troiano e Dumont, 2020). Nesse cenário, as α -amilases têm conquistado espaço crescente, com o mercado global avaliado em aproximadamente US\$274,1 milhões em 2019 e previsão de alcançar US\$ 382,4 milhões até 2025 (Mondal *et al.*, 2022).

O crescente interesse pela utilização de enzimas está alinhado aos princípios da química verde, que buscam o desenvolvimento de processos mais sustentáveis, com redução no consumo de energia, menor geração de resíduos tóxicos e diminuição da dependência de catalisadores químicos (Woodley, 2014; Contech Brasil, 2023). Além disso, estudos recentes têm explorado modificações estruturais das α -amilases, utilizando tanto tecnologias convencionais quanto emergentes, com foco na estabilidade térmica, na manutenção da estrutura secundária e na eficiência da amilose, ampliando ainda mais seu potencial industrial (Abedi, Kaveh, Hashemi, 2024).

Assim, o uso de α -amilases e glucoamilases como biocatalisadores do amido se destaca não apenas pela eficiência reacional, mas também pelo impacto positivo na promoção da bioeconomia, na diversificação de aplicações e no fortalecimento da sustentabilidade industrial (Mesbah, 2022; Abedi, Kaveh, Hashemi, 2024).

3.2 Casca de mandioca

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma raiz de grande importância para a alimentação brasileira. A sua casca, subproduto do processamento, é frequentemente descartada, mas tem se mostrado um substrato promissor para fermentação em estado sólido (FES) por microrganismos, devido ao seu alto teor de fibras e potencial como fonte de compostos bioativos. O processamento da casca envolve o descascamento, lavagem e remoção da camada externa das raízes, seguido de secagem e moagem para uso como substrato na FES (Egbune *et al.*, 2023). Diversos microrganismos foram aplicados para aumentar o teor de proteína e reduzir os níveis de cianeto nas cascas de mandioca. Iyayi e Losel (2001) e Bayitse *et al.* (2015) observaram que *Trichoderma pseudokoningii* e *Saccharomyces cerevisiae* aumentaram a proteína bruta em 12,5% e 16,74%, respectivamente, após FES desta biomassa. Após fermentação sólida da casca de mandioca, um estudo realizado por Oboh (2002) demonstrou que o teor de proteína aumentou de 8,2% na amostra

fresca para 11,1% na amostra fermentada e aumentou ainda mais para 21,5% na amostra fermentada com cultura mista, enquanto que o teor de fibra bruta diminuiu de 11,7% na amostra fresca para 6,5% na amostra fermentada.

3.3 Farelo de trigo

Outro resíduo agroindustrial de grande relevância é o farelo de trigo, subproduto do processamento do grão de trigo. Ele possui muitos nutrientes em sua composição, como carboidratos, proteínas, amido, entre outros. Também é composto de celulose, hemicelulose e lignina, sendo caracterizado como uma biomassa lignocelulósica (Mao *et al.*, 2019).

O trigo (*Triticum aestivum*) pertence à família Poaceae e é a matéria-prima original da farinha que está presente em pães, bolos, biscoitos, entre outros. Tal versatilidade, torna o farelo de trigo um dos subprodutos mais abundantes da moagem de cereais (Figueiredo, 2024), correspondendo a aproximadamente 30% da massa total do grão (Ye *et al.*, 2021).

De acordo com a Tabela 1, o farelo de trigo apresenta boa quantidade de nutrientes, composto majoritariamente por carboidratos (56,8–75%), amido (11,8–24,7%), celulose (9–25%), hemicelulose (28,9–32%) e lignina (2,5–10%). Devido a essas características, o resíduo do trigo oferece muitas oportunidades, no entanto, ainda possui baixo valor agregado, sendo utilizado, principalmente, na alimentação animal (Yan *et al.*, 2015).

Tabela 1 – Composição química média do farelo de trigo

Componentes	Quantidade (%)	Referências
Carboidratos totais	56,8 – 75,0	Dobrevet al., 2007; Onipe et al., 2015
Celulose	9 - 25	Babu et al., 2018; Formela et al., 2016
Hemicelulose	28,9 - 32	Formela et al., 2016; Rodriguez-Zúnga, 2010
Lignina	2,5 – 10	Araújo et al., 2008; Wesendonck, 2012
Proteína	9,6 – 18,6	Onipe et al., 2015; Yan et al., 2015
Amido	11,8 – 24,7	Dobrev et al., 2007; Yan et al., 2015
Cinzas	3,4 – 8,1	Apprich et al., 2014; Babu et al., 2018

Fonte: SIMÕES, 2021.

Devido à sua alta composição de carboidratos e à sua característica lignocelulósica, o tratamento desse resíduo por meio de processos biotecnológicos pode gerar novos produtos através da sacarificação e extração de compostos fenólicos desse resíduo. A utilização desse resíduo como matéria-prima pode agregar valor a um subproduto de ampla disponibilidade, ao mesmo tempo em que contribui para a mitigação de passivos ambientais (Nascimento, 2022).

3.4 Fermentação sólida de biomassa por fungos

No contexto da economia circular, a fermentação em estado sólido (FES) pode representar uma abordagem inteligente para obter produtos valiosos a partir de resíduos e subprodutos. A FES permite o crescimento de diversos microrganismos em superfícies sólidas, com pouca ou nenhuma água livre, sendo um método prático e valioso, aplicado nas indústrias alimentícia, farmacêutica, energética e química (Mattedi *et al.*, 2023).

A fermentação em estado sólido (FES) da mandioca envolve o uso de diversos microrganismos para a produção de produtos de valor agregado, sendo os fungos os microrganismos mais utilizados na mandioca devido à sua capacidade de crescer e produzir enzimas e metabólitos em condições de baixa umidade. Diversos fungos têm sido relatados como eficazes na FES da mandioca, incluindo *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp., *Rhizopus* spp. e *Trichoderma* spp. (Vuong *et al.*, 2021).

As enzimas estão entre os principais produtos obtidos por meio da fermentação em estado sólido (FES). A utilização da FES para produção enzimática oferece diversas vantagens em relação à fermentação submersa (SmF), como menor custo, maior facilidade no processamento downstream e maior estabilidade das enzimas. A fermentação submersa, por sua vez, é um processo realizado em meio líquido, no qual os microrganismos crescem suspensos ou em forma de pellets, geralmente sob condições rigorosamente controladas de aeração, agitação e pH, sendo amplamente empregada em processos industriais de larga escala devido à sua reprodutibilidade e facilidade de monitoramento. Por meio da FES da mandioca, é possível produzir diferentes tipos de enzimas, incluindo amilases, celulasas, xilanases, proteases e lipases, que encontram aplicação em indústrias alimentícia, de rações e farmacêutica (Liu; Kokare, 2023).

3.5 Hidrólise enzimática de biomassa

O farelo de trigo apresenta, além do amido, a presença de celulose, hemicelulose e lignina. A amilase é comumente utilizada para melhorar a hidrólise do amido, promovendo a liberação dos monossacarídeos. Além dela, outras enzimas podem atuar na hidrólise de outros constituintes da biomassa, como a celulase que cliva a celulose, e as xilanasas e lacases que hidrolisam, respectivamente, a hemicelulose e a lignina (Huang *et al.*, 2022).

Uma das vantagens da hidrólise enzimática é sua seletividade. Enzimas celulolíticas, por exemplo, degradam apenas as ligações da celulose, deixando os outros componentes intactos e minimizando a formação de subprodutos. Isso é importante para a fermentação subsequente,

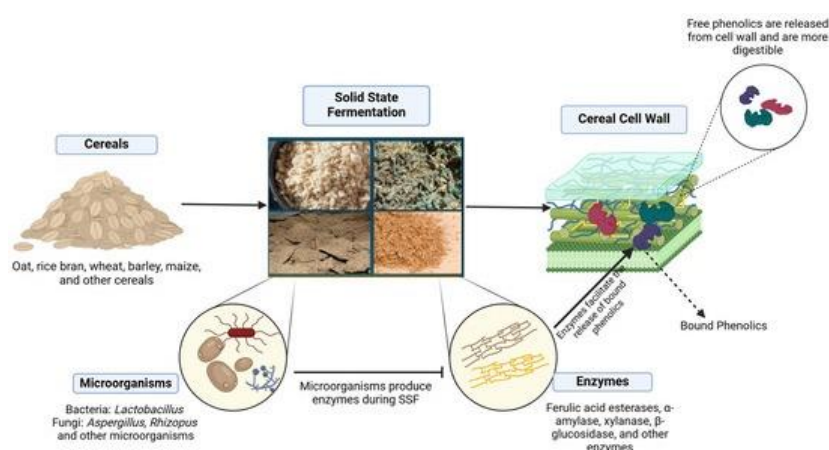
uma vez que subprodutos como furfural e hidroximetilfurfural (HMF), gerados a partir da hidrólise química, podem atuar como inibidores da fermentação (Petersen *et al.*, 2009).

Os avanços na hidrólise enzimática incluem o desenvolvimento de enzimas termostáveis e coquetéis enzimáticos adaptados a tipos específicos de biomassa, melhorando significativamente a eficiência da hidrólise. Além disso, a reciclagem de enzimas após a hidrólise mostrou reduzir custos, tornando o método mais sustentável para aplicações industriais. A integração com técnicas inovadoras de manuseio da matéria-prima, como o pré-tratamento assistido por ultrassom, potencializa ainda mais a atividade enzimática e o rendimento de açúcares (Wozniak *et al.*, 2025).

3.6 Compostos Fenólicos

Os compostos fenólicos são compostos bioativos amplamente reconhecidos por suas propriedades antioxidantes, antimicrobianas e anti-inflamatórias, o que os torna de grande interesse para as indústrias farmacêutica, alimentícia e cosmética (Da Silva *et al.*, 2023). O farelo de trigo é considerado uma fonte relevante desses compostos, principalmente de ácido ferúlico, ácidos hidroxicinâmicos e flavonóides. A maior parte, contudo, encontra-se ligada à parede celular, o que limita sua biodisponibilidade. Para aumentar sua liberação, diversas estratégias biotecnológicas têm sido exploradas, como pré-tratamentos físicos, químicos e enzimáticos (Li *et al.*, 2023; Khanna, *et al.*, 2024).

Figura 1 - Fermentação sólida de cereais com a produção de enzimas microbianas que promovem a hidrólise de fibra da biomassa e a liberação de compostos fenólicos.



Fonte: Wijaya *et al.*, 2025

Nesse sentido, estudos recentes demonstram que a FES do farelo de trigo pode aumentar

significativamente a liberação de fenólicos e a atividade antioxidante (Khanna *et al.*, 2024) (Figura 1). Pesquisas com farinhas integrais de diferentes genótipos brasileiros mostraram que o tamanho de partícula influencia diretamente a acessibilidade e a disponibilidade dos compostos fenólicos totais, sendo a moagem fina mais eficiente para aumentar esse teor (Bressiani *et al.*, 2023).

Figueiredo (2024) demonstrou que a FES do farelo de trigo com *Rhizopus oligosporus* não apenas manteve a atividade antioxidante natural do resíduo, mas também possibilitou a produção de compostos bioativos de interesse para alimentos funcionais. Lammers (2018), ao investigar diferentes processamentos químicos e térmicos do farelo, evidenciou que condições alcalinas e térmicas promovem a solubilização da fração polissacarídica e liberam compostos fenólicos inicialmente presos à parede celular.

Esses resultados reforçam que o aproveitamento do farelo de trigo como fonte de compostos bioativos depende da escolha adequada do método de tratamento ou bioprocessamento, com impacto direto sobre o perfil químico obtido e o potencial antioxidante final.

4. METODOLOGIA

4.1 Fermentação sólida da casca de mandioca por *Aspergillus* sp. FSDE16

As cascas de mandioca foram obtidas de feiras livres no município de João Pessoa-PB. Em seguida, foram lavadas, cortadas e secadas em estufa, em média de 24 a 72h, até secagem completa. Em seguida, foi realizada a moagem e peneiramento, respectivamente, para obtenção do resíduo em granulometrias de mesh 16, mesh 20, mesh 30, mesh 40 e mesh 50, sendo utilizada a fração da mistura do mesh 20 e 30 para fermentação sólida, devido a melhor aderência do fungo, segundo experimentos anteriores.

Figura 2 - Casca de mandioca cortada e encaminhada para secagem em estufa (a) e casca de mandioca, após moagem e peneiramento (b).



Fonte: autoria própria (2025).

O fungo *Aspergillus* sp. FSDE16 (Figura 3), que faz parte da coleção de microrganismos do Laboratório de Biotecnologia e Bioprocessos (LABIP – CTDR, UFPB), foi plaqueado em meio PDA (*Potato Dextrose Agar*) e mantido em estufa a 37°C por 7 dias.

Figura 3 - Fungo *Aspergillus* sp. FSDE16 em placa de Petri contendo meio PDA



Fonte: autoria própria,
2025.

Em seguida, foram pesados 100 g de casca de mandioca para cada um dos quatro erlenmeyers de 1L. A biomassa foi umedecida com água destilada para apresentar 50% de umidade, conforme a equação (1) abaixo:

$$m_a = m_r * \frac{u_d - u_r}{1 - u_d} \quad (1)$$

Onde:

m_a = massa de água;

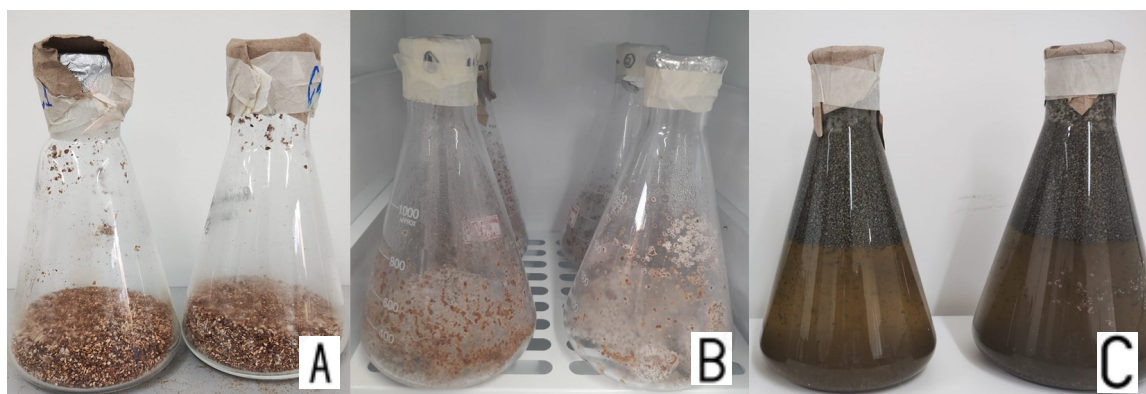
m_r = massa do resíduo;

u_d = umidade desejada;

u_r = umidade do resíduo.

Os meios foram esterilizados em autoclave durante 15 minutos a 121°C (Figura 4 a). Em seguida, foi realizada a inoculação dos esporos na concentração de 10^7 esporos/g, conforme Carvalho-Gonçalves 2017 (Figura 4 b).

Figura 4 - Casca de mandioca (a), fermentação sólida da casca de mandioca pelo fungo (b) e obtenção do sobrenadante contendo as amilases (c).



Fonte: Autoria própria.

Nos tempos de 96 h e 168 h foi adicionada água destilada na proporção de 1:10 (g/mL) em cada um dos erlenmeyers (Figura 4). Após mistura com espátula para homogeneizar o meio, ele foi mantido por 1h na bancada, em temperatura ambiente. Em seguida, a amostra foi filtrada em pano de algodão, seguida por filtração em papel de filtro. O sobrenadante obtido foi mantido a -20 °C até a realização da análise de atividade de alfa-amilases.

4.2 Atividade de alfa-amilases

A análise da atividade alfa-amilases foi realizada de acordo com Aleixo Júnior (2018) com adaptações. Em microtubos, adicionou-se 0,25 uL de amido solúvel 1% (m/v) e 0,25 uL de tampão citrato de sódio pH 4.8. Em seguida, adicionou-se 0,25 uL de do sobrenadante, a mistura foi homogeneizada e a reação ocorreu por 10 minutos a 50°C. As análises foram feitas em triplicata. Para o branco da amostra, em um microtubo foram adicionados 0,25 uL de tampão citrato, 0,25 uL do sobrenadante do extrato enzimático e 0,5uL de solução de DNS. O branco do espectrofotômetro foi preparado adicionando 0,5 uL de tampão citrato e 0,5 uL de solução de DNS em um tubo de ensaio. Todas as análises foram feitas em triplicata. A concentração de açúcares redutores foi determinada pelo método do DNS. Fez-se a leitura a 540 nm usando solução de glicose como padrão (MILLER, 1959). O valor da atividade enzimática foi calculado através da Equação 2:

$$Amilase \left(U/g \right) = \frac{(A-B) \times f \times d \times V \times R}{0,18 \times t \times V_e} \quad (2)$$

Onde:

A = absorbância da amostra;

B = absorbância do branco da amostra;

f = fator de conversão da curva de calibração (mg/mL);

d = diluição da amostra;

V = volume total do meio de reação (mL);

0,18 = fator de conversão de miligramas para μmol de glicose;

t = tempo de reação (min);

Ve = volume da enzima no meio de reação (mL);

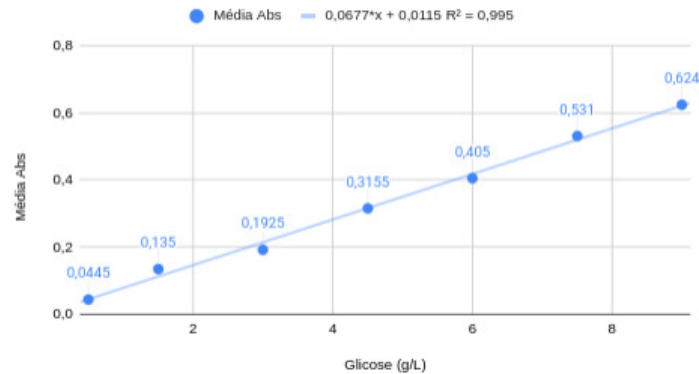
R = razão volume de solvente por grama de meio cultivado (mL/g).

4.3 Hidrólise enzimática do farelo de trigo

Para realização da hidrólise enzimática foram pesados 7,5g de farelo de trigo, obtido de feira livre. As amostras foram adicionadas em Erlenmeyers de 125 mL, em duplicata. Em seguida, adicionou-se o coquetel enzimático contendo a amilase produzida na concentração de 1,5 U/mL e o tampão citrato (50 mM , pH 4,8) até completar 50 mL de volume final de reação. A hidrólise ocorreu em *shaker*, por 96 h, a 50 °C e 150 rpm e foi realizada em duplicata. Os açúcares redutores (AR) foram analisados de acordo com a metodologia proposta por Miller (1959) e baseados na curva padrão (Figura 5). O pH foi medido em

pHmetro de bancada (PHS-3E, Satra). O °Brix foi analisado em refratômetro (Nova).

Figura 5 - Curva padrão de glicose para análise dos açúcares redutores (ARs)



Fonte: autoria própria, 2025.

4.4 Análise da massa do farelo de trigo após a hidrólise

Para avaliar a eficiência das amilases na quebra da biomassa, ao final da hidrólise enzimática (96h), as amostras foram submetidas à centrifugação a 7.000 rpm por 10 minutos. O sobrenadante (extrato enzimático) foi reservado para análises posteriores. A biomassa foi então colocada em papéis de filtro, que foram anteriormente pesados sem a amostra. O papel de filtro com farelo de trigo foi encaminhado à estufa para secagem a 50 °C por 24h. Em seguida, foi realizada a pesagem e avaliação da massa obtida.

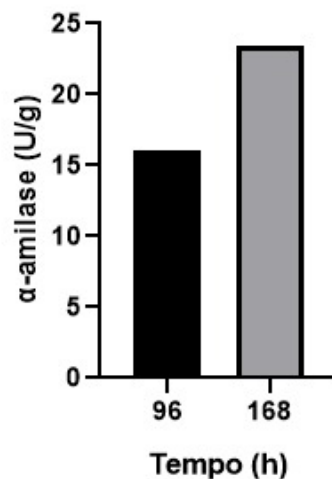
4.5 Avaliação de compostos fenólicos nas amostras

Os compostos fenólicos totais foram analisados pelo método colorimétrico de Folin-Ciocalteu (SOUSA *et al.*, 2007, p. 352). Em tubos de ensaio foram adicionados 300 µL das amostras na diluição 1:6 (50 uL da amostra com 250 uL de água destilada). Foram acrescentados 2,5 mL do reagente Folin-Ciocalteu 10% e a amostra foi homogeneizada em agitador de tubos. Após 2 minutos em temperatura ambiente, foram adicionados 2 mL de carbonato de cálcio 7,5%, com o qual a amostra foi homogeneizada em agitador de tubos. Em seguida, as amostras foram aquecidas em banho-termostático a 50 °C durante 15 minutos. Após esfriamento das amostras em bancada, foi realizada a leitura da absorbância no espectrofotômetro a 760 nm. O branco da amostra correspondeu a 300 uL de água, seguido da adição do reagente Folin-Ciocalteu e carbonato de cálcio, nas mesmas proporções apresentadas acima.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a realização da fermentação sólida da casca de mandioca, podemos observar, de acordo com a Figura 6, que a atividade de alfa-amilase foi de 16,0 U/g em 96h para 23,4 U/g em 168h.

Figura 6 - Atividade de alfa-amilases após fermentação sólida da casca de mandioca por *Aspergillus* sp. FSDE16



Fonte: Autoria própria, 2025.

O aumento da atividade de α -amilase é semelhante ao descrito por Cruz *et al.* (2011), que, utilizando *Aspergillus niger* em casca de mandioca com 45, 55, 65 e 75 % de umidade por 120h a 35 °C, e obtiveram atividades entre 12,5 e 18,7 U/g de substrato, reforçando que o resíduo é um meio eficiente para produção enzimática.

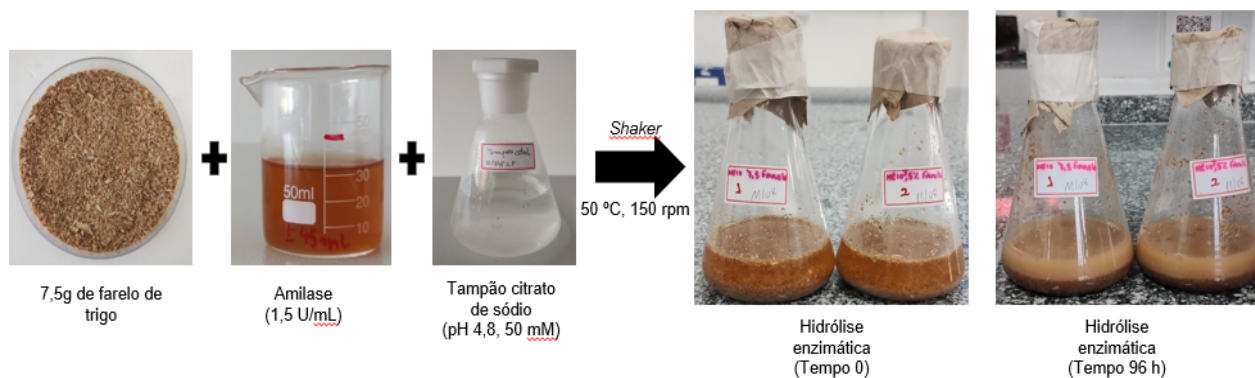
De forma compatível, Pereira *et al.* (2018) relataram produção de α -amilase por fermentação em estado sólido de resíduos de mandioca, alcançando valores próximos de 20 U/g em 144 h, e destacaram a importância do tempo de fermentação e do teor de umidade como variáveis críticas no processo.

Esses resultados demonstram que o valor máximo obtido neste trabalho, 23,4 g/L em 168 h, apresenta-se acima do que apresentado em outros estudos, reforçando a viabilidade do *Aspergillus* sp. FSDE16 e da casca de mandioca como sistema eficiente para produção de α -amilase a baixo custo.

A Figura 7 demonstra como foi realizado o processo de hidrólise do farelo de trigo. Ao final da reação, observamos que os ARs liberados aumentaram de 25,9 AR(g/L) para 33,7 AR(g/L) (Figura 8). O aumento do AR correspondeu a 30,12%, em relação ao valor inicial.

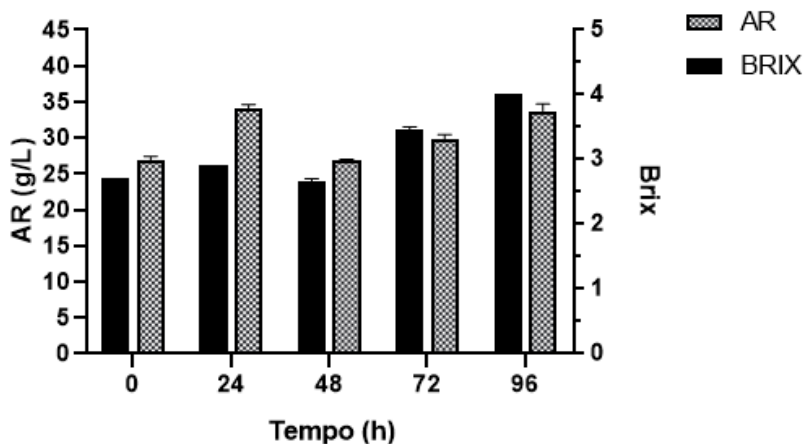
Em relação ao °Brix, observamos um aumento de 2,7 (tempo 0) para 4,0 (96h) (Figura 8). O aumento do °Brix correspondeu a 48%. Em relação ao pH, observamos que o valor inicial era de 4.66 (tempo 0) e reduziu para 3.98 (96h).

Figura 7 - Etapas do processo de hidrólise enzimática do farelo de trigo.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 8 - Hidrólise enzimática do farelo de trigo e análise dos açúcares redutores (AR) e °Brix dos tempos 0h a 96h de reação.



Fonte: Autoria própria, 2025.

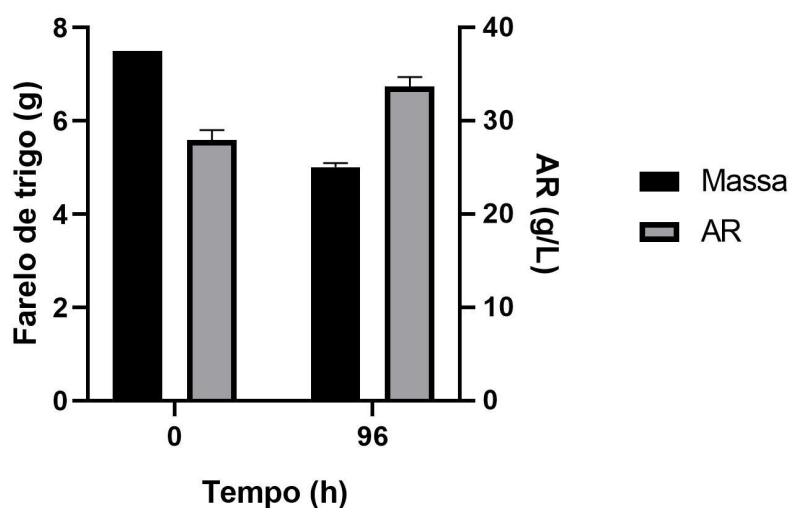
Para avaliar a ação das enzimas na quebra do farelo de trigo, foi avaliada a massa do farelo antes e após a hidrólise (Tabela 2). Podemos perceber que a massa reduziu de 7,5g para 4,92g. Isso corresponde a aproximadamente 34,4 %. E , como apresentado na Figura 9, é feita a comparação entre a redução da massa com o aumento de açúcares redutores na amostra antes e após a hidrólise.

Tabela 2 - Massa do farelo de trigo antes e após a hidrólise enzimática

Amostra	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	Redução (%)
FARELO 1	7,5	4,92	34,4
FARELO 2	7,5	5,01	33,2

Fonte: autoria própria, 2025.

Figura 9 - Comparação entre a massa do farelo de trigo e os ARs nos tempos 0 e após 96h de hidrólise enzimática.



Fonte: Autoria própria, 2025.

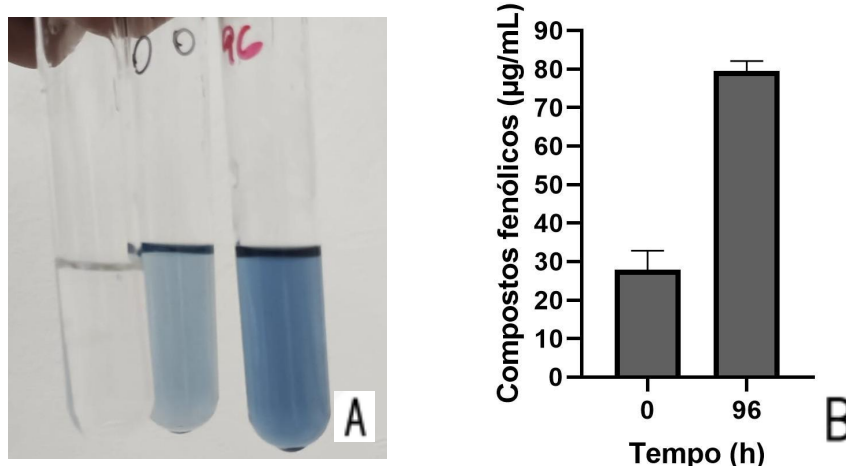
Esse comportamento observado confirma que a diminuição da biomassa sólida está associada à solubilização dos carboidratos estruturais, liberados principalmente na forma de açúcares redutores, como relatado em estudos de hidrólise de diferentes resíduos lignocelulósicos (Zhang *et al.*, 2016; Zhu *et al.*, 2025).

Esse resultado está de acordo com a literatura, que aponta que a quebra enzimática da celulose e hemicelulose promove não apenas a liberação de açúcares, mas também a alteração estrutural da matriz lignocelulósica, levando à redução do resíduo sólido recuperado (Chen *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2016). Assim, os dados obtidos reforçam a eficiência do coquetel enzimático em converter carboidratos poliméricos do farelo de trigo em açúcares solúveis, reduzindo a biomassa residual e demonstrando o potencial desse subproduto agroindustrial como fonte de açúcares fermentescíveis.

Em relação à análise de compostos fenólicos, a Figura 10a apresenta o método colorimétrico utilizado para quantificação dos compostos, onde a primeira imagem transparente evidencia o branco da amostra e as tonalidades de azul claro e azul escuro evidenciam, respectivamente, os tempos 0 e 96 h da hidrólise enzimática.

A Figura 10b demonstra a concentração de fenólicos totais de 27,82 $\mu\text{g/mL}$ no tempo 0 e de 79,46 $\mu\text{g/mL}$ após 96 h de hidrólise. O aumento desses compostos, de 185,62%, bioativos pode ser atribuído à ação das enzimas hidrolíticas, que degradam componentes da parede celular, como polissacarídeos e lignina, promovendo a liberação de fenólicos anteriormente ligados a essas estruturas (Shahidi, Nacz, 2004; Carvalho *et al.*, 2020).

Figura 10 - Análise (a) e quantificação dos compostos fenólicos presentes nas amostras antes e após a hidrólise enzimática (b).



Fonte: Autoria própria, 2025.

Conforme apresentado por Kin *et al* (2006), a FES auxilia na conversão de fenólicos ligados em fenólicos livres, melhorando sua liberação e biodisponibilidade. Para Ren *et al* (2023), a fermentação em estado sólido aumentou significativamente o teor de flavonóides no farelo de trigo, de 0,72 mg/g para 3,10 mg/g em 72 horas. Esse aumento ocorreu devido à liberação de compostos bioativos, potencializada pela maior área superficial do farelo e pela ação de enzimas hidrolíticas produzidas pelos fungos, que degradaram fenólicos ligados a componentes da parede celular.

De acordo com Wijaya *et al* (2025), a fermentação em estado sólido destaca-se em

relação à fermentação em estado líquido pelo baixo custo, eficiência e sustentabilidade, além de aumentar a liberação de compostos fenólicos. Nos cereais, a maior parte desses compostos está ligada à parede celular (celulose, hemicelulose, lignina e pectina), chegando a 88% no arroz integral, 85% no milho e 75% no trigo. Durante a FES, enzimas microbianas quebram as ligações éter e éster, liberando fenólicos solúveis e elevando seu teor bioativo.

Em estudos prévios, valores semelhantes ao presente estudo foram relatados. Li *et al.* (2018), por exemplo, observaram aumento de fenólicos totais em farelo de trigo de 30,2 µg/mL para 85,7 µg/mL após 72 h de hidrólise enzimática com celulase e xilanase. De forma próxima, Mateos-Aparicio *et al.* (2010) verificaram que a hidrólise do farelo elevou a concentração de ácido ferúlico livre de 47 mg/100 g para 142 mg/100 g, evidenciando o papel da ação enzimática na liberação de compostos ligados. Carvalho *et al.* (2020) também reportaram incremento de 2,3 vezes na liberação de fenólicos totais em resíduos lignocelulósicos após hidrólise com coquetéis ricos em hemicelulases. Esses resultados corroboram os dados obtidos neste trabalho, demonstrando que o tempo de incubação e a composição enzimática são determinantes na eficiência do processo.

Assim, os resultados encontrados reforçam a relevância da hidrólise enzimática como estratégia para potencializar a extração de compostos bioativos de subprodutos agroindustriais, ampliando suas aplicações nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética (Brohem *et al.*, 2021).

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou que a produção de amilases por *Aspergillus* sp. FSDE16 em fermentação em estado sólido utilizando casca de mandioca e sua aplicação na hidrólise do farelo de trigo é uma estratégia eficaz para o aproveitamento de resíduos agroindustriais. Os resultados obtidos evidenciaram aumento de 30,12% nos teores de açúcares redutores (AR) e 185,62% na liberação de compostos fenólicos, confirmando o potencial do processo enzimático para geração de produtos de valor agregado a partir de biomassa de baixo custo e ampla disponibilidade.

Além disso, observou-se um aumento expressivo na concentração de compostos fenólicos, de 25 µg/mL para 78 µg/mL após 96 horas de hidrólise, indicando que a ação das enzimas hidrolíticas promove a liberação de fenólicos ligados à parede celular. Esses resultados estão de acordo com a literatura, demonstrando que o tempo de incubação e a composição enzimática são determinantes para a eficiência do processo.

Os dados obtidos reforçam que a utilização de amilases de *Aspergillus* sp. FSDE16 constitui uma estratégia promissora para a valorização de subprodutos lignocelulósicos, ampliando sua aplicação em processos industriais voltados à produção de açúcares e compostos bioativos com potencial funcional e nutracêutico.

Para estudos futuros, destaca-se a necessidade de identificar as enzimas presentes no coquetel enzimático, bem como os açúcares específicos liberados após a hidrólise, utilizando técnicas cromatográficas. Além disso, sugere-se o aprimoramento das condições de produção enzimática visando maior rendimento e estabilidade, de forma a ampliar a aplicabilidade industrial do processo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDI, Elahe; *et al.* **Structure-based modification of α -amylase by conventional and emerging technologies: Comparative study on the secondary structure, activity, thermal stability and amylolysis efficiency.** *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 250, p. 126–136, 2024.
- ALMEIDA, M. F. *et al.* **Lignina como fonte de compostos de valor agregado: avanços e desafios.** *Biomass and Bioenergy*, v. 148, p. 106006, 2021.
- BAYITSE, R., HOU, X., LARYEA, G. *et al.* **Protein enrichment of cassava residue using *Trichoderma pseudokoningii* (ATCC 26801).** *AMB Expr* 5, 80 (2015). <https://doi.org/10.1186/s13568-015-0166-8>
- BROHEM, C. A. *et al.* **Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass for phenolic compounds release: advances and challenges.** *Bioresource Technology*, v. 337, p. 125–432, 2021.
- CAMPOS, A. A.; FERREIRA, J. S.; OLIVEIRA, M. R. **Descarte inadequado e suas consequências ambientais.** *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 15, n. 2, p. 45-59, 2020.
- CARVALHO, A. F. A. *et al.* **Valorization of agro-industrial residues by enzymatic technology: phenolic compounds release and applications.** *Industrial Crops and Products*, v. 158, p. 113–120, 2020.
- CARVALHO, G. J.; PEREIRA, E. L.; SOARES, A. R. **Bagaço de cana como suplemento nutricional em dietas animais.** *Revista Ciência Animal Brasileira*, v. 7, n. 3, p. 267-275, 2006.
- CASPETA, Luis *et al.* **Enzyme and microbial technology for industrial applications.** *Enzyme and Microbial Technology*, v. 115, p. 1–13, 2018.
- CONTECH BRASIL. **Aplicações industriais de enzimas: inovação e sustentabilidade.** *Contech Brasil*, 2023. Disponível em: <https://www.contech.com.br/>.
- CRUZ, E. A. da; *et al.* **Produção de Alfa-Amilase por *Aspergillus niger* em resíduo do descascamento de mandioca, com diferentes teores de umidade.** *Journal of Health Sciences*, v.13, n.4, p.245-249, 2011.

DA SILVA, F. R. *et al.* **Phenolic compounds: biological properties and industrial applications.** *Food Research International*, v. 170, p. 112999, 2023.

DA SILVA, L. M. *et al.* **Compostos fenólicos do bagaço de malte: extração, caracterização e aplicações potenciais.** *Alimentos e Nutrição em Saúde*, v. 15, n. 3, p. 112-125, 2023.

EGBUNE, E.O., EZEDOM, T., ORORORO, O.C. *et al.* **Solid-state fermentation of cassava (Manihot esculenta Crantz): a review.** *World J Microbiol Biotechnol* 39, 259 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03706-0> .

FIGUEIREDO, Célia Cristina Malaguti. **Aplicação de técnica biotecnológica de fermentação em estado sólido para aproveitamento de resíduos da indústria de farinha de trigo e desenvolvimento de novo produto alimentício funcional.** Disponível em: <<https://hdl.handle.net/11449/254941>>. Acesso em: 17 set. 2025.

IUGA, Mirabela; MIRONEASA, Silvia. **Influence of amylases on starch degradation and industrial applications.** *Foods*, v. 9, n. 12, p. 1–15, 2020.

IYAYI EA, LOSEL DM. **Protein enrichment of cassava by- products through solid state fermentation by fungi.** *J Food Technol Africa*. 2001;6(4):116–8.

KHANNA, S. *et al.* **Valorization of wheat bran by three fungi solid-state fermentation: physicochemical properties, antioxidant activity and flavor characteristics.** *Foods*, v. 13, n. 12, p. 1722, 2024.

LI, G. *et al.* **Penicillium fermentation combined with enzyme treatment to enhance the release of phenolic acids from wheat bran.** *Food Science and Technology (Campinas)*, v. 43, 2023.

LI, T. *et al.* **Enzymatic hydrolysis enhances release of ferulic acid and other phenolics from wheat bran.** *Food Chemistry*, v. 259, p. 24–31, 2018.

MARTINS, D. A.; ALMEIDA, C. P.; SANTOS, H. F. **Enzimas como estratégia biotecnológica sustentável.** *Biotechnology Advances*, v. 37, n. 5, p. 107-115, 2019.

MATEOS-APARICIO, I. *et al.* **Wheat bran as a source of bioactive compounds: extraction and characterization.** *Food Research International*, v. 43, n. 7, p. 1813–1818,

2010.

MATTEDI, A. *et al.* **Solid-State Fermentation: Applications and Future Perspectives for Biostimulant and Biopesticides Production.** *Microorganisms*, v. 11, n. 6, p. 1408, 1 jun. 2023.

MESBAH, Azadeh. **Industrial relevance of α -amylases: biotechnological applications and challenges.** *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 194, p. 3793–3812, 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário Nacional de Resíduos Sólidos e MTR: Dados de 2023 sobre resíduos declarados — SINIR (Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos).** Disponível em: SINIR. Acesso em: 2025.

MONDAL, Anup *et al.* **Recent advances in microbial amylases: Production, characterization and industrial applications.** *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 205, p. 196–214, 2022.

NASCIMENTO, R. A. **Reutilização de resíduos agroindustriais: mitigação ambiental e valor agregado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

OBOH G, AKINDAHUNSI AA and OSHODI AA. **Nutrient and antinutrient contents of aspergillus niger-fermented cassava products (flour and gari).** *J. Food Comp. Anal.* 15: 617-622, 2002

PAUL, Alok Kumar *et al.* **Amylases: characteristics, sources, production and applications – A review.** *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 169, p. 141–157, 2021.

PEREIRA, A. S.; *et al.* **Study of alpha-amylase obtained by solid state fermentation of cassava residue in aqueous two-phase systems.** *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.35, n.03, p.1141-1152, jul./set. 2018.

REN, H.; WANG, T.; LIU, R. **Correlation Analyses of Amylase and Protease Activities and Physicochemical Properties of Wheat Bran During Solid-State Fermentation.** *Foods* 2024, 13, 3998. <https://doi.org/10.3390/foods13243998>

RODRIGUES, E. M. G.; *et al.* **Estudo comparativo da produção de amilases utilizando substratos como amido de mandioca e bagaço de cana-de-açúcar.** *Bioenergia em Revista*,

VI Seminário Brasileiro, 2023.

SANTANA, Renata Sampaio Mafra de. **Produção de enzimas amilolíticas através da fermentação em estado sólido**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, 2012.

SANTOS, Natasha Kevellyn dos; PASQUINI, Daniel; BAFFI, Milla Alves. **Fatores que influenciam a hidrólise enzimática de resíduos agrícolas para produção de etanol: uma revisão.** *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 8, n. 11, 2021. DOI: 10.18540/jcecvl8iss11pp15137-01e.

SEUNG, David. **Starch metabolism: methods and protocols**. *Springer Protocols*, 2020.

SHARANAPPA, T. *et al.* **“Evaluation of genotypic wheat bran varieties for physico-chemical and bioactive properties.”** *Food Chemistry*, v. 206, p. 37-46, 2016.

SILVA, M. J.; SOUZA, T. F. **Desafios ambientais globais e busca por soluções sustentáveis**. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 9, n. 3, p. 12-28, 2020.

SIMÕES, Amanda Leticia De Carvalho Cardoso. **Produção de amilases por cultivo em estado sólido e hidrólise enzimática de resíduos de mandioca**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/21944>>. Acesso em: 17 set. 2025.

SOUSA, Cleyton Marcos de M. *et al.* **Fenóis totais e atividade antioxidante de cinco plantas medicinais**. *Química Nova*, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 351-355, 2007. Disponível em: [SciELO: Fenóis totais e atividade antioxidante de cinco plantas medicinais](#). Acesso em: 2025.

TABELA BRASILEIRA DE COMPOSIÇÃO DE ALIMENTOS (TBCA). **Trigo, farelo. Composição centesimal. Dados de composição de alimentos, Brasil**. Disponível em: <https://www.tbca.net.br>. Acesso em: 2025.

TESFAYE, E. L. *et al.* **The role of amylase in bioethanol production: advances in amylase-producing strains using CRISPR/Cas9 Technology**. *Fuel Communications*, v. 23, p. 100142, 26 maio 2025.

TROIANO, Daniela; DUMONT, Marie-Jeanne. **Advances in fungal enzyme production for industrial biotechnology**. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 104, p. 4757–4771,

2020.

VUONG, M.-D, *et al.* **Protein Enrichment of Cassava-Based Dried Distiller's Grain by Solid State Fermentation Using *Trichoderma Harzianum* and *Yarrowia Lipolytica* for Feed Ingredients.** *Waste and Biomass Valorization*, 20 out. 2020.

WIJAYA, Ganesha Yanuar Arief, *et al.* **Solid-State Fermented Cereals: Increased Phenolics and Their Role in Attenuating Liver Diseases.** *Nutrients*, v. 17, n. 5, p. 900, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu17050900>

WOODLEY, John M. **New frontiers in biocatalysis for sustainable chemistry.** *Current Opinion in Chemical Biology*, v. 19, p. 20–28, 2014.

YAN, X.; YE, R.; CHEN, Y. **Blasting extrusion processing: The increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran.** *Food Chemistry*, v. 180, p. 106 – 115, 2015.

YE G, *et al.* **Comparison of six modification methods on the chemical composition, functional properties, and antioxidant capacity of wheat bran.** *LWT - Food Sci Technol*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111996>

ZHU, N.; JIN, H.; KONG, X. *et al.* **Improving the fermentable sugar yields of wheat straw by high-temperature pre-hydrolysis with thermophilic enzymes of *Malbranchea cinnamomea*.** *Microbial Cell Factories*, v. 19, p. 149, 2020. DOI: 10.1186/s12934-020-01408-y.

GAMBARATO, Bruno Chaboli *et al.* **Hidrólise ácida de jornal para a produção de açúcares fermentescíveis e energia.** *Cadernos UniFOA*, Volta Redonda, n. 27, p. 25-32, abr. 2015.

LYU, Q. *et al.* **Effects of Lignocellulosic Biomass-Derived Hydrolysate Inhibitors on Cell Growth and Lipid Production During Microbial Fermentation of Oleaginous Microorganisms—A Review.** *Fermentation*, v. 11, n. 3, p. 121–121, 4 mar. 2025.

MAO QQ, *et al.* **Bioactive Compounds and Bioactivities of Ginger (*Zingiber officinale* Roscoe).** *Foods*. 2019 May 30;8(6):185. doi: 10.3390/foods8060185. PMID: 31151279; PMCID: PMC6616534.

MUÑOZ, A. H. Serafin, *et al.* **Characterization and integrated process of pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn straw.** *Waste and Biomass Valorization*, v. 10, p. 1857-1871, 2019. DOI: 10.1007/s12649-018-0218-9.

HUANG, C.; Li, R., *et al.* **Improve Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass by Modifying Lignin Structure via Sulfite Pretreatment and Using Lignin Blockers.** *Fermentation* 2022, 8, 558. <https://doi.org/10.3390/fermentation8100558>

PETERSEN, M. Ø.; LARSEN, J.; THOMSEN, M. H. **Optimization of hydrothermal pretreatment of wheat straw for production of bioethanol at low water consumption without addition of chemicals.** *Biomass and Bioenergy*, v. 33, n. 5, p. 834–840, maio 2009.

WOŹNIAK, A. *et al.* **Review of Lignocellulosic Biomass Pretreatment Using Physical, Thermal and Chemical Methods for Higher Yields in Bioethanol Production.** *Sustainability*, v. 17, n. 1, p. 287, 2 jan. 2025.

SHI, R., ZHANG, Z., ZHANG, J. *et al.* **A comparative study on enhanced enzymatic hydrolysis of diverse herbaceous and woody wastes by promising dilute acid and alkaline pretreatments.** *Bioresour. Bioprocess.* 12, 36 (2025). <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00873-w>

CHEN, M. *et al.* **Kinetic studies on the product inhibition of enzymatic lignocellulose hydrolysis.** *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 166, n. 5, p. 1168–1177, 2012.

XU, N. *et al.* **Recalcitrant carbohydrates after enzymatic hydrolysis of pretreated lignocellulosic biomass.** *Biotechnology for Biofuels*, v. 9, p. 187, 2016.

ZHANG, X. *et al.* **Study of enzymatic hydrolysis of mild pretreated lignocellulosic biomasses.** *BioResources*, v. 11, n. 2, p. 4836–4849, 2016.

SHAHIDI, F., & NACZK, M. (2003). **Phenolics in Food and Nutraceuticals** (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203508732>

