



PRODUÇÃO DE MICOMATERIAL BIODEGRADÁVEL POR BIOTRANSFORMAÇÃO DA CASCA DE AVEIA POR *PANUS STRIGELLUS*

LETICIA FERNANDES GONÇALVES; BEATRIZ MARJORIE MARIM; NILTON
SERGIO HERNANDES FILHO; MARCELO RODRIGUES DE MELO; ANDRÉ LUIZ
MARTINEZ DE OLIVEIRA

RESUMO

Foram desenvolvidos novos materiais a base de micélio, que constitui a principal estrutura dos fungos. Estes materiais foram obtidos a partir de subprodutos agrícolas locais (casca de aveia), utilizando o crescimento natural do micélio fúngico. Esse resíduo lignocelulósico é composto principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, e serve como base nutricional para o crescimento do micélio fúngico. O estudo concentrou-se na aplicação do fungo *Panus strigellus*, classificado no filo Basidiomycota e utilizado na alimentação de povos originários da Amazônia. O objetivo desta pesquisa foi caracterizar um micomaterial produzido com casca de aveia, em relação às suas propriedades de interação com a água, como a capacidade de intumescimento e solubilidade. Além disso, foi investigado o processo de biodegradação do material antes e após sua biotransformação pelo crescimento de *P. strigellus*, com a caracterização dos teores de celulose, lignina e hemicelulose. O cultivo do *Panus strigellus* foi conduzido em substrato preparado a partir da casca de aveia moída (2 mm), extrato de levedura (1% p/p) e água (100% p/v), em processo de biotransformação do material por fermentação em estado sólido. O processo de biotransformação alterou significativamente a morfologia da casca de aveia, resultando na obtenção de micomateriais. Os testes de capacidade de intumescimento revelaram que a amostra possui a capacidade de absorver 1,4g de água por grama de micomaterial (140%), com manutenção da integridade estrutural quando submersas em água por um período de até 7h horas. Além disso, observou-se uma diminuição na solubilidade em comparação com a casca de aveia in natura, o que pode ser atribuído ao revestimento das partículas de casca de aveia por quitina, o principal componente da parede celular de fungos, atuando como uma barreira contra a solubilização. Os testes de biodegradação demonstraram a perda de massa e de fibras insolúveis do micomaterial de aveia ao longo de 30 dias, representando uma redução de aproximadamente 26% em sua massa. Com base neste estudo, pode-se sugerir o uso de micomateriais como veículo de liberação controlada de nutrientes e compostos bioativos para cultivos agrícolas e florestais, como também um material com capacidade de aumentar a disponibilidade de água no solo.

Palavras-chave: Economia circular; Micélio fúngico; Subproduto; Resíduos lignocelulósicos; Fermentação sólida.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com grande produção de resíduos agroindustriais. Entre os principais resíduos gerados, destaca-se a casca de aveia. A casca de aveia é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, e é abundante no estado do Paraná, o segundo maior produtor de aveia no Brasil (G1, 2022). No entanto, um dos desafios enfrentados pela agroindústria é a destinação adequada dos resíduos gerados (BASTOS et al., 2022).

A versatilidade de aplicações dos resíduos lignocelulósicos está relacionada à sua composição química e estrutural, notadamente os teores de celulose, hemicelulose e lignina, que podem ser aproveitados por diversos setores industriais na produção de diversos materiais (KLEIN et al., 2019). Uma abordagem inovadora tem sido a utilização de resíduos agrícolas para a produção de materiais biodegradáveis, que agrega valor comercial aos resíduos por sua transformação.

Os fungos, devido às suas propriedades biológicas únicas, têm sido eficazmente utilizados na produção de uma ampla gama de produtos. O micélio, a estrutura vegetativa dos fungos filamentosos, atua como um adesivo natural, conectando-se aos fragmentos de substratos orgânicos e formando biocompósitos à base de micélio fúngico, conhecidos como micomateriais. Diversas espécies de fungos, em combinação com diversos substratos lignocelulósicos agrícolas e vegetais, tem sido empregada com sucesso na produção de micomateriais (MUIRURI et al., 2023).

Um exemplo notável é o *Panus strigellus*, uma espécie de cogumelo comestível da Amazônia que pertence ao filo Basidiomycota. Esse fungo tem a capacidade de crescer micelialmente em temperaturas elevadas, favorecendo então o desenvolvimento do cultivo em regiões tropicais como a Amazônia, onde serve de alimento para os nativos Yanomami (VARGAS-ISLA e ISHIKAWA, 2008). Este fungo pode ser encontrado em substratos lignocelulósicos, obtidos por resíduos vegetais, em áreas abertas e semiabertas. Tais aspectos geram expectativas quanto à produção deste cogumelo em resíduos agroindustriais (ISHIKAWA et al., 2012). Neste sentido, o objetivo deste trabalho, foi tratar de resíduos agroindustriais transformados pelo metabolismo do microrganismo *Panus Strigellus*, visando sua aplicação futura no desenvolvimento de novos materiais biodegradáveis.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAL

Para este trabalho, utilizou-se casca de aveia (CA), fornecida pela empresa SL Alimentos (Mauá da Serra – PR). Os resíduos foram usados in natura para os processos fermentativos de biotransformação. Foi utilizada a cepa MP18-01 coletada na Universidade Estadual de Londrina com acesso registrado junto ao SISGEN sob número AF29CA9.

2.2 OBTENÇÃO DO INÓCULO

Um fragmento da cultura micelial do estoque de cada isolado foi transferido para placas de Petri contendo 20 mL de meio de cultura Batata Dextrose Ágar (BDA). Em seguida estes foram incubados durante sete dias em estufa a 25°C. Após o crescimento da colônia, fragmentos de 2x2 mm foram retirados da borda da colônia e utilizados como inóculo no experimento.

2.3 PROCESSO FERMENTATIVO DE BIOTRANSFORMAÇÃO

Para o processo fermentativo de biotransformação do resíduo, utilizou-se refratários de silicone. Foram pesados 20 gramas de CA, aos quais adicionou-se 1% de extrato de levedura e 20 mL de água destilada. O material foi autoclavado a 120°C por 15 minutos. Em ambiente esterilizado, adicionou-se uma esfera de cerca de 1 cm da cultura criopreservada do fungo a mistura de aveia, e posteriormente incubou-se em estufa a temperatura de 28 °C por 21 dias.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DO MICOMATERIAL DE AVEIA

2.4.1 Capacidade de Intumescimento

O micomaterial de Aveia foi cortado em 35 mm de diâmetro e seco a 30 °C durante 24 h. Amostras pesadas (1.0 g) com precisão (Wo) foram imersas em 30 mL de água destilada à

temperatura ambiente ($25 \pm 2^\circ\text{C}$), e retiradas a cada 5 minutos até 1 hora, seguido de tiragem a cada 60min, até 7 horas de intumescimento. Após a tiragem, a umidade da superfície foi removida e o peso dos micomateriais inchados (W_e) foi medido. O poder de intumescimento foi calculado com a Equação 2:

$$SP = (W_g - W_o) / W_o \text{ Eq. 2}$$

2.4.2 Solubilidade

Inicialmente, pesaram-se 2 gramas (W_i) de cada amostra e adicionou-se 30 mL de água destilada, seguido de agitação a 200 rpm por 1 hora. Posteriormente, as amostras foram centrifugadas, o sobrenadante foi descartado, e todas as amostras foram secas em estufa até atingirem peso constante. Então, pesaram-se novamente (W). A solubilidade foi calculada usando a Equação 3:

$$S = (W_i - W / W) * 100 \text{ Eq.3}$$

2.5 BIODEGRADAÇÃO

O delineamento experimental compreendeu a utilização de recipientes de plástico em volume de 300 mL, preenchidos com uma mistura de 200 g de solo a granel e areia esterilizada na proporção de 1:2 (peso/peso), respectivamente. Esses recipientes foram colocados em uma câmara de incubação biológica (BOD) mantida a uma temperatura de 25°C , e foram inseridas amostras do micomaterial de aveia (5 g).

A perda de peso dos materiais das amostras biotransformadas foi determinada subtraindo-se o peso inicial das amostras do peso obtido após diferentes períodos de enterro (15 e 30 dias) para determinar o grau de degradação. A perda de peso foi expressa em porcentagem ($W_{loss}\%$) e foi calculada usando a Equação 4:

$$W_{loss}\% = ((W_0 - W_i)) / W_0 \times 100 \text{ Eq. 4}$$

2.5.1 Determinação de Celulose e Hemicelulose

As frações de celulose e hemicelulose foram determinadas através das quantificações de fibras em detergente ácido (FDA) e fibras em detergente neutro (FDN). As quantificações foram realizadas no micomaterial de aveia, na amostra biodegradada por 15 dias (A/B.15) e na amostra biodegradada por 30 dias (A/B.30)

2.5.2 Determinação de Lignina

Os teores de lignina foram determinados de acordo com as normas TAPPI (1999), utilizando o procedimento T222 om-88. As quantificações também foram realizadas no micomaterial de aveia, na amostra biodegradada por 15 dias (A/B.15) e na amostra biodegradada por 30 dias (A/B.30)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MICOMATERIAL DE AVEIA

Na Figura 1, é possível observar a efetiva colonização do substrato ao longo do período de incubação. O micélio, responsável pela formação da matriz fúngica branca, encontra-se homogeneamente distribuído por todo o material, deduzindo assim que o fungo *Panus strigellus* foi capaz de colonizar o substrato.

Figura 1: Colonização de *P.Strigellus* em resíduo de casca de aveia.



Fonte: autoria própria.

3.2 CINÉTICA DE INTUMESCIMENTO

O intumescimento é um processo no qual um material aumento de volume de forma significativa devido à absorção de líquidos, principalmente água (Marim, 2022). Uma análise inicial foi conduzida nos micomateriais de aveia para determinar o período de tempo durante os quais poderiam ser submersos em água destilada sem comprometer sua integridade estrutural. foi observado que todas as amostras conseguiram manter sua integridade estrutural quando submersas em água por um período de 7h horas, sendo estabelecido esse limite como critério para a realização dos testes de cinética de intumescimento. A figura 2 apresenta uma comparação entre o MMA seco e o MMA submerso em água em 7h. Podemos observar que durante a imersão em água o material se expandiu.

Figura 2: Intumescimento dos micomateriais de aveia: (1) MMA seco, e (2) MMA submerso em água destilada por 7h.

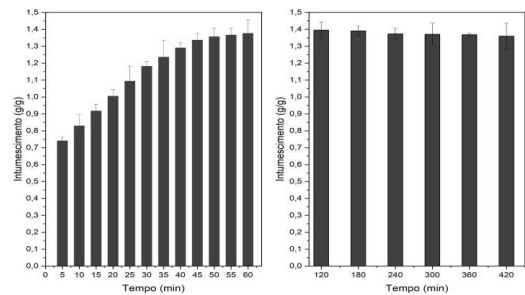


Fonte: autoria própria.

A figura 3 ilustra os resultados do intumescimento em água, evidenciando uma fase inicial de acentuado aumento volumétrico do micomaterial de aveia, seguida de uma estabilização do grau de intumescimento após 1 hora. Esses fenômenos são regidos por interações de natureza química e física que promovem a migração do líquido intrínseco para o interior de uma matriz polimérica, promovendo o inchaço dos materiais. No estágio inicial do experimento, observa-se uma rápida absorção de água, devido à presença de amplo espaço intermolecular entre as cadeias do micélio, o que facilita a infiltração do solvente, conforme o tempo avança, a taxa de absorção de água diminui, estabelecendo um equilíbrio no sistema.

O micomaterial de aveia apresenta o maior grau de intumescimento em 1 hora. O estudo conduzido por Zimele et al. (2020), o micélio derivado do basidiomiceto lignocelulósico *Trametes Versicolor*, foi cultivado em substratos contendo lascas de madeira nobre e palha de cânhamo. Os resultados revelam que as amostras obtidas a partir da palha de cânhamo apresentaram um grau de intumescimento significativamente maior, atingindo valores de 550%, em comparação com as amostras de madeira, que exibiram um intumescimento de 400%. As amostras derivadas da palha de cânhamo demonstraram um intumescimento quatro a cinco vezes superior. Isso pode ser atribuído, em parte, ao possível desenvolvimento de uma camada micelial hidrofóbica externa durante o crescimento do *P. Strigellus*.

Figura 3: Cinética de intumescimento dos micomateriais de aveia.



Fonte: autoria própria.

3.3 SOLUBILIDADE

A solubilidade é uma propriedade intrínseca de materiais que se refere à sua capacidade de dissolução em um líquido. Podemos observar na Tabela 1 que a casca de aveia in natura apresentou uma solubilidade significativamente maior em comparação à MMA. Em um estudo anterior conduzido por Apples et al (2019), foram desenvolvidos compósitos de micélio de *Pleurotus* cultivados em palha de canola, os quais exibiram baixa solubilidade e absorção de água. Essa característica provavelmente está relacionada à presença da pele fúngica repelente à água nos materiais, que atua como uma barreira contra a penetração de líquidos.

Tabela 1: Solubilidade em água da casca de aveia (CA) e do micomaterial de aveia (MMA)

Amostra	Solubilidade (%)
CA	22,36±1,2a
MMA	13,76±1,7b

Fonte: autoria própria.

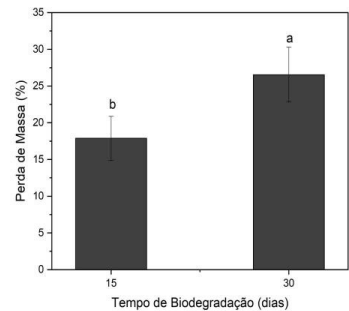
^aLetras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey (p 0,05).

3.4 BIODEGRADAÇÃO

Na Figura 1, é apresentada a análise da perda de massa do micomaterial de aveia. Durante um período de 30 dias, observou-se uma redução de aproximadamente 26% em sua massa, o que representa uma perda considerável.

O estudo realizado por Zimele et al. (2020), que investigou os micélios do fungo *Trametes versicolor* cultivados em lascas de madeiras nobre e palha de canhamo, demonstrou que, em um período de 12 semanas (84 dias), as amostras foram completamente degradadas em um ambiente de compostagem. Esses resultados corroboram a necessidade de continuar o experimento, e é plausível que, em aproximadamente 80 dias, a amostra biotransformada (T0) seja completamente degradada.

Figura 4. Biodegradação em ambiente de compostagem durante 30 dias do micomaterial de aveia.



Fonte: autoria própria.

3.4 QUANTIFICAÇÃO DE CELULOSE, HEMICELULOSE E LIGNINA

A quantificação de celulose, hemicelulose e lignina das amostras in natura (CA), das amostras submetidas à biotransformação por *P. strigellus* no (MMA), nas amostras que passaram pelo processo de biodegradação por 15 (A/B.15) e 30 dias(A/B.30), estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Quantificação de celulose, hemicelulose e lignina em casca de aveia, micomaterial de aveia e amostras submetidas a diferentes condições de biodegradação.

Amostras	Hemicelulose (%)	Lignina(%)	Celulose(%)	Fibra
CA	34,06±6,4 ^a	22,50±3,4 ^a	27,57±5,6	
MMA	25,15±9,1 ^b	16,59± ^b		
A/B.15	17,68±8,3			
A/B.3				

Fonte: autoria própria.

A CA apresentou resultados semelhantes aos descritos na literatura. Marim et al. (2023) relatam que a casca de aveia apresentou uma composição com 26% de celulose, 30% de hemicelulose e 21% de lignina, valores próximos aos obtidos em nosso estudo. Em comparação com a casca de aveia in natura, o micomaterial de aveia apresentou diferença significativa nos teores de celulose, hemicelulose e lignina resultando consequentemente em uma redução do teor de fibras insolúveis. As enzimas produzidas por fungos podem degradar a lignina, além de produzir radicais que podem ajudar a melhorar a ligação adesiva entre o substrato e o micélio (Sun et al., 2019). Não houve diferença significativa entre o produto biotransformado (MMA) e as amostras coletadas em diferentes momentos ao longo do processo de biodegradação.

4 CONCLUSÃO

A biotransformação da casca de aveia com o micélio do fungo *Panus Strigellus* foi bem-sucedida. Os testes de intumescimento revelaram que a amostra T0 possui a capacidade de absorver 1,4g de água por grama de micomaterial de aveia. Além disso, observou-se uma diminuição na solubilidade em comparação com a aveia in natura, o que pode ser atribuído à presença da pele fúngica repelente à água nos materiais, atuando como uma barreira contra a solubilização. Os testes de biodegradação evidenciaram a perda de massa e de fibras insolúveis do micomaterial de aveia, indicando sua natureza biodegradável devido à composição exclusivamente orgânica. Com base nesses resultados, torna-se necessário realizar estudos adicionais. O teste de biodegradação deve ser estendido para determinar o período necessário para a completa degradação do micomaterial de aveia. Além disso, testes em solos devem ser conduzidos para avaliar a viabilidade do uso desse material na melhoria da qualidade de sistemas agroflorestais.

REFERÊNCIAS

APPELS, F. V. W.; CAMERE, S.; MONTALTI, M.; KARANA, E.; JANSEN, K.M.B.; DIJKSTERHUIS, J.; KRIJGSHELD P.; WÖSTEN, H.A.B. **Fabrication factors influencing**

mechanical, moisture- and water- related properties of mycelium-based composites. *Materials and Design*, v. 161, p 64-71, 2019.

BASTOS, B. G.; LOPES, J. C. J.; GONÇALVES, A. C. N.; NEIVA, K. N. **Bioeconomia, economia circular e agroindústria 4.0: proposições para as transições tecnológicas emergentes.** *Olóquio*, v. 19, p. 312-338, 2022.

ISHIKAWA, N.K.; VARGAS-ISLA, R.; CHAVES, R.S.; CABRAL, T.S. 2012. **Macrofungos da Amazônia: importância e potencialidades.** *Ciência & Ambiente*. 44: 129-139.

KLEIN, C. B.; CHAGAS, F. M.; WATANABE, B. D. M.; BONOMI, A.; FILHO, M. R. **Low carbon biofuels and the New Brazilian National Biofuel Policy (RenovaBio): A case study for sugarcane mills and integrated sugarcane microalgae biorefineries.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 115, nov. 2019.

MARIM, B. M. **Hidrogéis biopoliméricos superabsorventes e retentores de umidade.** Tese (Doutorado) – Biotecnologia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2022.

MARIM, B. M.; MANTOVAN, J.; PEREIRA, J. F.; DEBIAGI, F.; MALI, S. **Sustainable process based on reactive extrusion to modify cellulose from oat hull with sodium trimetaphosphate and tartaric acid.** *Polymer Bulletin*. v. 13, p.128-144, 2023

MUIRURI, J. K.; YEO, J. C. C.; ZHU, Q.; YE, E.; LOH, X. J.; LI, Z. **Sustainable Mycelium-Bound Biocomposites: Design Strategies, Materials Properties, and Emerging Applications.** *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 11, p. 6801–6821, 2023.

OLIVEIRA, J. P.; BRUNI, G. P.; LIMA, K. O.; EL-HALAL, S. L. M.; ROSA, G. S.; DIAS, A. R.; ZAVAREZE, E. R. **Cellulose fibers extracted from rice and oat husks and their application in hydrogel.** *Food Chemistry*, v. 221, p. 153–160, 2017.

ROCHA, R. L.; PANDOLFI, M. A. C. **Geração de resíduos no setor sucroalcooleiro.** *Revista Interface Tecnológica*, v. 16, n. 1, p. 384-392, 2019.

SUN, W.; Tajvidi, M.; Hunt, C. G.; McIntyre G.; Gardner, D. J. **Fully Bio-Based Hybrid Composites Made of Wood, Fungal Mycelium and Cellulose Nanofibrils.** *Scientific reports*, v. 9, p. 3766, 2019

TAPPI TEST METHOD T222 om-88. **Acid-insoluble lignin in wood and pulp. In: Tappi test methods**, 1999. Atlanta: Tappi Press. Disponível em: <https://www.tappi.org/content/SARG/T222.pdf>. Acesso em: 24 julho.2024.

VARGAS-ISLA, R.; ISHIKAWA, N.K. 2008. **Optimal conditions of in vitro mycelial growth of *Lentinus strigosus*, an edible mushroom isolated in the Brazilian Amazon.** *Mycoscience*. 49: 215 - 219