

Desempenho mecânico de materiais à base de micélio cultivado de forma ancorada em comparação a couros sintéticos

Mechanical performance of anchorage-grown mycelium-based materials in comparison with synthetic leathers

Número da sessão temática da submissão – [3]

Júlia Silveira Pereira Guimarães, mestre, UEMG

juliaguimaraes997@gmail.com

Brenna Melo Marinho, mestre, UEMG

brennamelo2015@gmail.com

Paulo Sérgio Pedroso Costa Júnior, doutor, UFV

paulo.sergio.junior@ufv.br

José Guilherme Prado Martin, doutor, UFV

guilherme.martin@ufv.br

Caroline Salvan Pagnan, doutora, UEMG

caroline.pagnan@uemg.br

Resumo

A indústria do couro e de seus substitutos sintéticos gera elevados impactos socioambientais. Este estudo avalia o potencial do micélio fúngico como alternativa sustentável aos couros sintéticos, com foco em propriedades mecânicas. Foram analisados dois couros sintéticos comerciais, micélio puro e micélio cultivado de forma ancorada em tecido de algodão. Ensaio de tração (ASTM D5035) e análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizados. Os resultados indicam baixa resistência do micélio puro e melhor desempenho do micélio ancorado, com valores próximos aos couros sintéticos no sentido da trama. A MEV evidenciou a interpenetração das hifas na estrutura têxtil, contribuindo para a melhoria mecânica. Conclui-se que o micélio ancorado é uma alternativa promissora para materiais biofabricados aplicáveis ao design e à moda sustentável.

Palavras-chave: Micélio; Couro sintético; Biofabricação; Materiais sustentáveis; Ensaio mecânicos.

Abstract

The leather industry and its synthetic substitutes generate significant socio-environmental impacts. This study evaluates the potential of fungal mycelium as a sustainable alternative to synthetic leathers, with a focus on mechanical properties. Two commercial synthetic leathers, pure mycelium, and mycelium cultivated in an anchored configuration on cotton fabric were analyzed. Tensile tests were

conducted in accordance with ASTM D5035, and morphological analyses were performed using scanning electron microscopy (SEM). The results indicate low mechanical strength for pure mycelium, whereas anchored mycelium exhibited improved performance, with values approaching those of synthetic leathers in the warp direction. SEM analysis revealed the interpenetration of hyphae within the textile structure, contributing to enhanced mechanical properties. It is concluded that anchored mycelium represents a promising alternative for biofabricated materials applicable to sustainable design and fashion.

Keywords: Mycelium; Synthetic leather; Biofabrication; Sustainable materials; Mechanical testing.

1. Introdução

As discussões globais sobre as mudanças climáticas e a crescente finitude dos recursos naturais têm impulsionado uma transição significativa na indústria, substituindo modelos de economia linear por práticas de bioeconomia circular. Esse movimento é motivado pela urgência em preservar recursos para as gerações futuras e mitigar os impactos ambientais negativos, como o aquecimento global e a degradação dos ecossistemas. Nesse contexto, a busca por matérias-primas biogênicas (*bio-based*) e biodegradáveis surge como uma solução crucial para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar a pegada ecológica de materiais tradicionais de origem animal e sintética (KOPP, 2024). A exemplo disso, como objetivo desse artigo, tem-se a investigação de micélio fúngico como alternativa guiada de sustentabilidade, não só ao couro bovino mas também ao seu análogo produzido com poliuretano (PU).

No contexto da indústria da moda, há uma necessidade de revisão das pautas de produção e consumo. Isso porque os processos envolvidos na fabricação do couro geram impactos socioambientais adversos, principalmente quando não são considerados ou gerenciados (KOPP, 2024).

O couro é um material altamente valorizado que tem sido usado há milhares de anos. Isso está relacionado a suas propriedades estéticas e funcionais, difíceis de replicar em materiais sintéticos. Paralelamente, as alternativas sintéticas, muitas vezes comercializadas sob um discurso ecológico, também apresentam alto impacto ambiental derivado de sua origem majoritariamente petroquímica, baixa durabilidade e persistência na natureza (KOPP, 2024).

A indústria de curtumes é reconhecida como uma das atividades de maior potencial poluidor, descarregando no ambiente efluentes líquidos, resíduos sólidos e gases tóxicos. Estima-se que apenas 20% a 25% da massa da pele animal seja transformada em couro acabado, enquanto o restante torna-se resíduo (RIBEIRO, 2006; DIXIT *et. al.*, 2015; TOSO, 2021; OLIVEIRA; MANGINI, 2022).

O couro é um subproduto da indústria da pecuária, em que, segundo a ONU (Organização das Nações Unidas), mais de 99% da produção mundial provém do processamento de peles de animais criados principalmente para a indústria de carne e laticínios (KOPP, 2024). Em decorrência disso, o setor argumenta que o couro é um produto sustentável por se tratar de uma prática de *upcycling* (reaproveitamento de resíduos) e economia circular, agregando valor a um material que, de outra forma, seria descartado pela indústria frigorífica (FERRARI; PACHECO, 2015; SILVA, 2021). Entretanto, uma análise crítica do processo deve ser multifatorial, considerando que o curtimento — responsável por transformar uma pele em iminente decomposição em um material estável e imputrescível — altera as propriedades químicas do colágeno e retarda consideravelmente a sua biodegradabilidade natural (KOPP, 2024; DIXIT *et. al.*, 2015).

Os principais desafios ambientais na transformação da pele animal em couro residem na grande quantidade de resíduos e subprodutos gerados ao longo de todo o ciclo produtivo. De acordo com o balanço de massa típico do setor, para cada tonelada de couro salgado processada, são consumidos cerca de 500 kg de produtos químicos, entre 15 e 25 m³ de água

e de 2.600 a 11.700 kWh de energia (Figura 1) (PACHECO, 2005; FERRARI; PACHECO, 2015; OLIVEIRA; MANGINI, 2022).



Figura 2: Fluxos básicos principais de um curtume. Fonte: adaptado de Ferrari; Pacheco (2015).

Como resultado, obtêm-se apenas 150 a 350 kg de couro acabado, o que evidencia um aproveitamento médio de apenas 25% da massa bruta inicial. Este baixo rendimento implica que a maior parte da matéria-prima e dos insumos é convertida em poluentes com alto impacto ecológico, resultando em aumento significativo da demanda química (DQO) e bioquímica (DBO) de oxigênio nos efluentes líquidos (Figura 1). Além disso, o processo descarta resíduos químicos perigosos e tóxicos, como cromo, sulfetos e cloretos, que possuem alto potencial de toxicidade e podem contaminar solos e águas superficiais se não forem adequadamente tratados (FERRARI; PACHECO, 2015; OLIVEIRA; MANGINI, 2022; CAPELOZZA; MAGNONI JÚNIOR, 2025).

O descarte inadequado desses resíduos representa um grave risco à saúde humana, especialmente devido à presença de cromo. Embora o cromo trivalente (Cr III) seja o mais utilizado, ele pode oxidar-se para a forma hexavalente (Cr VI), que é classificada como um agente carcinogênico reconhecido, associado principalmente ao câncer de pulmão em casos de exposição ocupacional prolongada. Além do potencial cancerígeno, o contato com o cromo não tratado pode causar ulcerações na pele, reações alérgicas imediatas, perfurações no trato respiratório e irritação gastrointestinal severa (RIBEIRO, 2006; DIXIT *et. al.*, 2015; FERRARI; PACHECO, 2015).

Ademais, a indústria gera um volume massivo de resíduos sólidos, que pode variar entre 600 kg e 1000 kg por tonelada de pele, incluindo aparas, raspas e lodos provenientes das estações de tratamento. Por fim, as operações fabris, especialmente no acabamento e na ribeira, são responsáveis por emissões atmosféricas de solventes orgânicos, amônia e gás

sulfídrico, que contribuem para a poluição do ar e a geração de odores desagradáveis (Figura 1) (PACHECO, 2005; FERRARI; PACHECO, 2015; OLIVEIRA; MANGINI, 2022; TOSO, 2021).

As substituições sintéticas, por outro lado, são desenvolvidas principalmente para substituir os produtos de origem animal com a vantagem de possuírem um preço mais acessível. Esses materiais, que incluem predominantemente o PU e o policloreto de vinila (PVC), são polímeros sintéticos derivados de combustíveis fósseis e petroquímicos. Embora sejam comercializados como alternativas "vegadas" e muitas vezes chamados de "ecológicos", sua produção e descarte representam um alto impacto ambiental (SCHNEIDER; PEREIRA; FERNANDES, 2022; KOPP, 2024).

Outro fator determinante é a baixa durabilidade e biodegradabilidade desses polímeros. Ao contrário do couro animal, que possui uma base biológica e intrinsecamente orgânica, os plásticos sintéticos podem levar décadas ou até séculos para se decompor na natureza. Estima-se que certas fibras sintéticas amplamente utilizadas na indústria da moda permaneçam no meio ambiente por cerca de 200 anos. O descarte inadequado desses artigos resulta em um acúmulo maciço em aterros sanitários, onde os polímeros persistem sem as opções naturais de "fim de vida" e reciclagem orgânica que os materiais biogênicos oferecem (TAKAYAMA; FONSECA, 2017; TEIXEIRA, 2019; KOPP, 2024).

Funcionalmente, embora as substituições sintéticas tentem mimetizar a aparência e a flexibilidade do couro, elas frequentemente apresentam menor conforto e baixa respirabilidade. Devido à sua fragilidade estrutural, esses materiais tendem a rachar, descascar e desbotar muito mais rapidamente, o que encurta sua vida útil e acelera perigosamente o ciclo de descarte e poluição (SCHNEIDER; PEREIRA; FERNANDES, 2022; KOPP, 2024).

Em decorrência disso, as alternativas biogênicas (*bio-based*) e biodegradáveis surgem como uma resposta estratégica à necessidade de substituir materiais de origem fóssil (petroquímicos como PU e PVC) e de mitigar os impactos ambientais dos curtumes. Esses materiais são definidos como sendo compostos por biomassa que pode ser continuamente reabastecida e que é biodegradável por advirem de processos biológicos naturais. As novas tecnologias materiais fundamentam-se em duas vertentes principais: a biofabricação, que utiliza o crescimento controlado de organismos vivos, e a valorização de resíduos agroindustriais (*upcycling*), transformando subprodutos que seriam descartados em materiais de alto valor agregado (SCHNEIDER; PEREIRA; FERNANDES, 2022; KOPP, 2024).

Nesse cenário, os materiais provenientes da valorização de resíduos orgânicos (*upcycling*) utilizam polpas e fibras de subprodutos agrícolas como base estrutural. Entre os exemplos mais notáveis, destacam-se o Piñatex, desenvolvido a partir das fibras das folhas de abacaxi que sobram após a colheita do fruto, e o WineLeather, produzido através do aproveitamento do bagaço resultante da indústria vinícola, incluindo cascas, sementes e caules. Inovações como o AppleSkin recuperam resíduos de celulose da maçã descartados pela indústria de sucos, enquanto o Desserto utiliza folhas de cacto moídas como matéria-prima para substituir componentes de origem fóssil, como o poliuretano (PU) ou o PVC (TAKAYAMA; FONSECA, 2017; TEIXEIRA, 2019; SCHNEIDER; PEREIRA; FERNANDES, 2022; KOPP, 2024).

A biofabricação representa um marco tecnológico ao empregar processos biotecnológicos

e de biomimética para reproduzir a estética e a funcionalidade de materiais tradicionais, eliminando a dependência da pecuária ou de recursos petroquímicos. O diferencial central desses materiais reside na capacidade regenerativa de organismos vivos, que atuam processando resíduos orgânicos como substrato nutricional enquanto sintetizam simultaneamente novas e complexas estruturas fibrosas (TAKAYAMA; FONSECA, 2017; KOPP, 2024).

Complementarmente, foca-se no desenvolvimento direto de organismos vivos para a criação de novos têxteis. Nessa categoria, ganham relevância os materiais originados da celulose tecida por culturas simbióticas de bactérias e leveduras conhecidas como SCOBY, destacando-se o BioCouture, além de bioprodutos derivados de algas e, fundamentalmente, aqueles provenientes da biomassa do crescimento de fungos (micélio), como o desenvolvido pela MycoWorks ou o material Mylo (TAKAYAMA; FONSECA, 2017; TEIXEIRA, 2019; SCHNEIDER; PEREIRA; FERNANDES, 2022; KOPP, 2024).

O micélio tem-se destacado como um material de próxima geração por ser uma alternativa sustentável e vegana que transforma resíduos agrícolas de baixo custo, como cascas de milho e arroz, em produtos de alto valor agregado. Sua fabricação é extremamente eficiente, exigindo um consumo mínimo de energia, água e terra, além de apresentar uma pegada de carbono significativamente menor do que a do couro animal ou dos materiais sintéticos. Por ser 100% biodegradável e possuir características táteis e de resistência semelhantes às dos materiais tradicionais, ele se consolida como uma solução ideal para a bioeconomia circular, eliminando a dependência de produtos químicos perigosos e recursos derivados do petróleo (KOPP, 2024).

Essas inovações demonstram que o redesenho dos materiais, focado na LCA (Avaliação do Ciclo de Vida) e na regeneração biológica, permite que o planeta suporte a produção industrial indefinidamente, superando as limitações dos modelos lineares de consumo (TEIXEIRA, 2019; SCHNEIDER; PEREIRA; FERNANDES, 2022; KOPP, 2024).

1.1 Aplicações de materiais miceliais no universo da moda

Os materiais miceliais vêm se mostrando como materiais interessantes dentro do universo do design, não só em termos funcionais, mas principalmente no desenvolvimento de novas possibilidades estéticas e simbólicas. Estes estão sendo aplicados no universo do design como uma alternativa de "próxima geração" para substituir materiais de origem animal e sintética. No setor de moda e vestuário, esses materiais são utilizados para a fabricação de bolsas, calçados e roupas, apresentando características mecânicas e táteis similares ao couro tradicional. Um exemplo notável é o material Mylo, utilizado pela designer Stella McCartney para confeccionar bolsas de luxo sustentáveis (Figura 2). Empresas de biotecnologia continuam a aprimorar essas aplicações, produzindo materiais que são simultaneamente fortes, flexíveis e altamente respiráveis para atender às demandas do design contemporâneo (TEIXEIRA, 2019; KOPP, 2024).

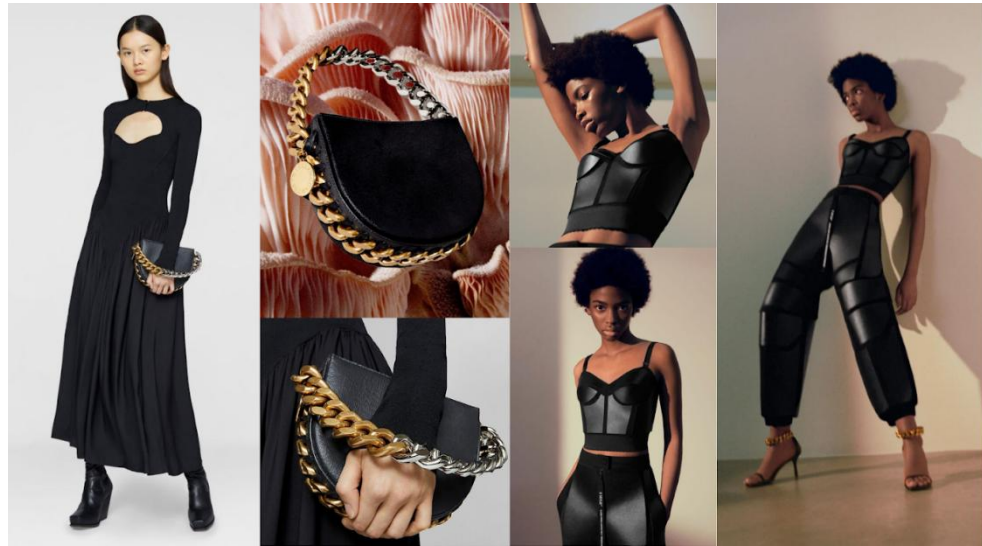


Figura 2: Produtos desenvolvidos pela estilista Stella McCartney com Mylo. Fonte: stellamccartnet.com. Acesso em: 14/01/26.

1.2 Crescimento Ancorado

Como já descrito anteriormente, o presente estudo teve como objetivo investigar o potencial do cultivo de micélio como alternativa análoga ao couro sintético e ao couro de origem animal. Para isso, a pesquisa avaliou o crescimento do micélio em duas condições distintas: (I) micélio cultivado de forma ancorada em tecido e (II) micélio cultivado sem suporte têxtil, denominado micélio puro.

O cultivo ancorado em substrato têxtil já foi empregado em estudos anteriores para diferentes finalidades, como a obtenção de blocos arquitetônicos (KANIYAMPARAMBIL *et al.*, 2026). No entanto, neste trabalho, essa abordagem é analisada em comparação com a técnica de dublagem, que consiste na fixação de dois materiais — têxteis ou não têxteis — com o objetivo de combinar e potencializar suas características mecânicas. O crescimento ancorado consiste no desenvolvimento do micélio sobre um substrato têxtil, de modo que as hifas penetrem e atravessem a espessura da trama, promovendo a ancoragem mecânica do tecido por meio da interpenetração do micélio na estrutura fibrosa do material (Figura 3).

Dessa forma, busca-se investigar se a incorporação do tecido de algodão ao micélio é capaz de agregar e potencializar suas propriedades mecânicas, aumentando, assim, sua viabilidade para aplicações em produtos de moda, entre outros usos.

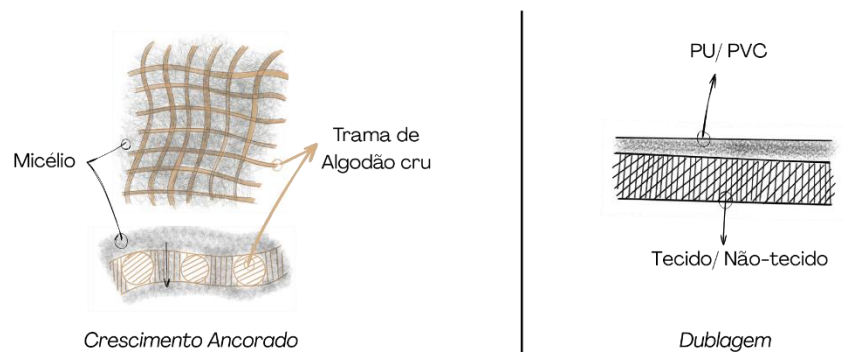


Figura 3: Esquema visual do crescimento ancorado de micélio e da técnica de dublagem. Fonte: elaborado pelos autores (2026).

2. Procedimentos Metodológicos

2.1 Materiais

Para comparar com o Micélio puro e o Micélio ancorado, foram testados dois tipos comercialmente disponíveis de couro sintético — sendo um de composição de 70% PVC + poli(tereftalato de etileno) (PET) + 5% PU e outro 100% PU — denominados, para fins de diferenciação, respectivamente, de Couro Sintético I (CS-I) e Couro Sintético de PU (CSPU). Tais materiais sintéticos foram obtidos através de doação de retalhos na cidade de Belo Horizonte.

Já os materiais miceliais foram coletados e cultivados em parceria com pesquisadores da UFV (Universidade Federal de Viçosa). Com base nisso, foi selecionada uma espécie promissora para o estudo de comparação mecânica com os materiais sintéticos. A fim de esclarecimento, pelo fato da pesquisa estar em andamento, ainda não foi possível sequenciar o DNA de todas as espécies de fungos coletados, assim como o usado neste artigo.

O micélio testado foi cultivado em meio com caldo de batata dextrose (BD) separado em grupos diferentes, com um grupo crescido sobre tecido de algodão puro e outro sem tecido na placa de Petri. Para identificação, as amostras foram denominadas – diferenciando a presença, ou não, do algodão cru –, respectivamente, de Micélio Puro e Micélio + Algodão. O tempo de crescimento variou entre as amostras sem tecido e com tecido. As amostras sem o emprego do tecido para ancoragem do micélio demoraram aproximadamente dois meses para formar um biofilme mais homogêneo. Já as amostras com tecido necessitaram de 30 dias em crescimento. Em ambos os testes, os fungos foram cultivados em temperatura de cerca de 26 °C em uma incubadora BOD (Demanda Bioquímica de Oxigênio). Por fim, a secagem dos fungos crescidos teve duração de 24 horas a uma temperatura entre 40 e 45 °C em estufa.

2.2 Ensaio mecânico

Para a realização dos ensaios de tração, foi utilizado equipamento de ensaios universais para testes mecânicos da marca EMIC modelo DL-3000 em temperatura ambiente, com velocidade de 20 mm/minuto, com célula de carga de 500 N e com distância entre garras de

10 mm. Os ensaios foram realizados com base na norma ASTM D5035-11 (2019) – a qual estabelece critérios para o teste de tração em materiais têxteis –, utilizando cinco réplicas por amostra. Os corpos de prova foram produzidos com medidas adaptadas conforme Antinori *et al.* (2021), com 20×35 mm, em razão da limitação da área de crescimento das amostras na placa de Petri.

2.3 MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)

Para as imagens de MEV, utilizou-se um microscópio eletrônico modelo de bancada Hitachi 4000 Plus, com feixe de elétrons operando a 5 kV, e capturadas usando o detector de elétrons retroespalhados (BSD). As amostras, após o ensaio de tração, foram fixadas em um porta-amostra com auxílio de uma fita condutora de carbono em três posições diferentes. Para melhor observar o comportamento do micélio crescido sob o tecido, assim como a área de seu rompimento, foram feitas imagens da lateral, da lateral do rasgo, da superfície e da superfície do rasgo das amostras.

3. Resultados

3.1 Ensaio mecânico

Em sequência, são apresentados os valores de tensão máxima e de deformação, referentes à média de três corpos de prova de cada amostra, e seus desvios-padrão (Tabela 1). A tensão (T) foi determinada a partir da razão entre a força aplicada (F) e a espessura do corpo de prova (A), conforme a Equação (1).

$$T \text{ (MPa)} = \frac{N \text{ (Força)}}{A \text{ (área)}} \quad (1)$$

Tabela 1: Resultado dos ensaios de tração

Amostra	Tensão Máx. (MPa)	Deformação (%)
Couro Sintético I (sentido urdume)	11,93 ± 3,4	4,25 ± 0,41
Couro Sintético I (sentido trama)	6,09 ± 5,17	57,94 ± 19,16
Couro Sintético PU	8,17 ± 0,81	15,13 ± 1,70
Micélio Puro	1,37 ± 0,68	0,1 ± 0,03
Micélio + Algodão	6,50 ± 1,85	3,25 ± 0,35

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

3.2 MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)

A análise morfológica foi realizada apenas nos corpos de prova miceliais de modo que seja possível observar se obteve, ou não, o processo de ancoragem durante o crescimento como ilustrado na Figura 4.

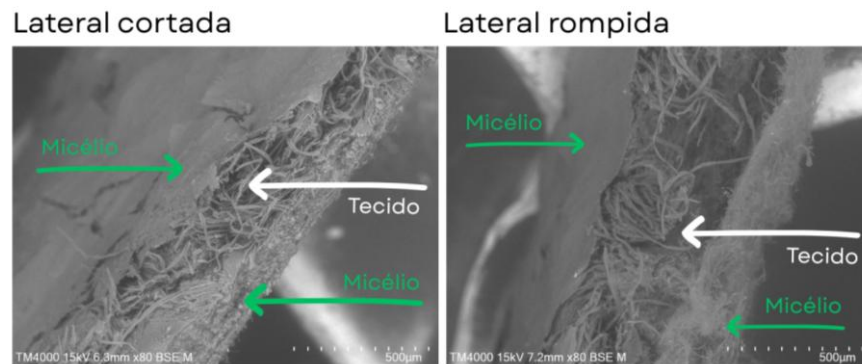


Figura 4: Imagem lateral MEV do Micélio + Algodão antes do teste de tração e após o teste. Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Além disso, observaram-se diferenças morfológicas entre os corpos de prova do Micélio Puro e do Micélio + Algodão (Figuras 5 e 6).

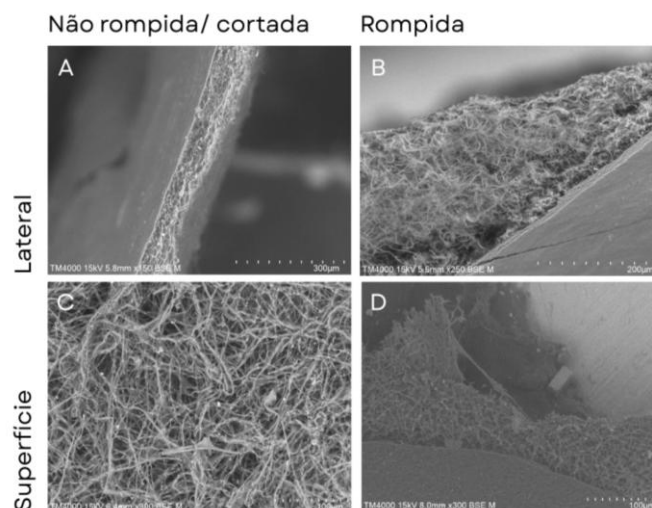


Figura 5: Imagem MEV lateral e superior do Micélio Puro antes do teste de tração e após o teste. Fonte: elaborado pelos autores (2025).

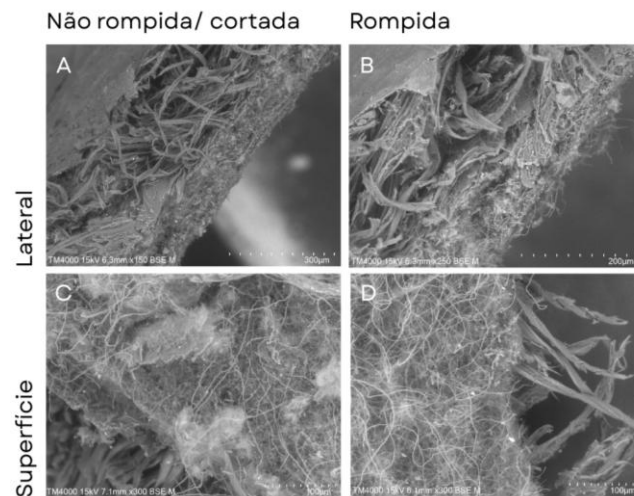


Figura 6: Imagem MEV lateral e superior do Micélio + Algodão antes do teste de tração e após o teste.
Fonte: elaborado pelos autores (2025).

4. Análises dos Resultados e Discussões

4.1 Ensaio Mecânico

A resistência à tração do Micélio Puro atingiu 1,37 MPa, o menor valor obtido. No entanto, estudos que também utilizaram micélio puro não tratado relataram resultados semelhantes, como 1,40 MPa (RAMAN *et al.* 2022). Em contraste, o CS-I e o CSPU apresentaram desempenho superior. A resistência à tração desses materiais depende principalmente das propriedades do tecido base (MEYER *et al.* 2021), bem como da direção do entrelaçamento, sendo o urdume a direção mais resistente. Embora preliminar, o ensaio mostrou-se promissor, uma vez que o Micélio + Algodão atingiu resistência à tração comparável à da amostra de CS-I na direção da trama. Assim, pode-se concluir que, possivelmente, uma vez controlada a degradação do tecido de algodão durante o cultivo do micélio, o MC poderá, no futuro, apresentar desempenho mecânico semelhante ao dos couros sintéticos à base de polímeros.

4.2 MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)

A análise morfológica foi realizada apenas nos corpos de prova miceliais de modo que fosse possível observar se obteve, ou não, o processo de ancoragem durante o crescimento, como ilustrado na Figura 4.

Nas Figuras 5 e 6, é possível notar a diferença de espessura dos corpos de prova entre o Micélio sem tecido (Figura 5-A e B) e o corpo de prova mais espesso pela presença do tecido de algodão na parte central (Figura 6-A e B). De acordo com os resultados do teste de tração, sugere-se que a espessura do tecido e a soma das suas propriedades mecânicas melhoraram o desempenho e a resistência à tração em comparação ao corpo de prova apenas como micélio. Observando as Figuras 6 C e 6 D, melhores resultados podem não ter sido alcançados pela não ancoragem e adesão da parte mais superior do micélio, pois notam-se partes mais esbranquiçadas que sugerem hifas soltas. Segundo X, a abertura da trama – a

gramatura do tecido – influencia essa passagem das hifas do micélio e seu melhor travamento mecânico.

5. Considerações Finais

Os resultados deste estudo indicam que o micélio fúngico apresenta potencial como material alternativo aos couros sintéticos de origem petroquímica, especialmente quando cultivado de forma ancorada em substrato têxtil. Embora o micélio puro tenha apresentado desempenho mecânico inferior, a incorporação do tecido de algodão promoveu um aumento significativo na resistência à tração, alcançando valores comparáveis aos do couro sintético na direção da trama. As análises por microscopia eletrônica de varredura corroboraram esses resultados ao evidenciar a interpenetração das hifas na estrutura fibrosa do tecido, sugerindo que o crescimento ancorado contribui para o reforço mecânico do material compósito.

Apesar do caráter preliminar da pesquisa, os achados apontam para a viabilidade do desenvolvimento de biocompósitos miceliais com propriedades ajustáveis baseado na seleção e no controle dos parâmetros têxteis e biológicos. Como limitações, destacam-se a necessidade de maior controle da degradação do tecido durante o cultivo e a ampliação dos ensaios mecânicos e morfológicos. Ainda assim, o estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre biofabricação de materiais e reforça o micélio como uma alternativa promissora e alinhada aos princípios da sustentabilidade e da bioeconomia circular.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro para o desenvolvimento da pesquisa pela Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), pelo seu Programa de Pós-Graduação em Design (PPGD/UEMG), pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) (Processos APQ-03275-22, APQ-04407-24, BIP-00197-24).

Referências

CAPELOZZA, Nilton José; MAGNONI JÚNIOR, Lourenço. A pecuária, o couro e os impactos ao meio ambiente. **Ciência Geográfica**, Bauru, v. 29, n. 1, p. 306-319, jan./dez. 2025.

DIXIT, Sumita; YADAV, Ashish; DWIVEDI, Premendra D.; DAS, Mukul. Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 87, p. 39-49, out. 2015.

FERRARI, Walter Alves; PACHECO, José Wagner Faria. **Guia Técnico Ambiental de Curtumes**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 2015.

KOPP, Victória Vieira. **Sustentabilidade de materiais renováveis**: couro e material de micélio. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade

Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

KANIYAMPARAMBIL, S. H.; ZIYAN, Z. Z.; ALBLOOSHI, N.; DALI, M.-H. A.; LIZUNDIA, E.; METTU, S.; MABROOK, G.; SALIM, M. H.; TARDY, B. L. Biofabrication of mycelium-fabric biocomposites from textile residues. **Cleaner Materials**, v. 19, p. 100366, 2026.

MEYER, M.; DIETRICH, S.; SCHULZ, H.; MONDSCHNEIN, A. *Comparison of the technical performance of leather, artificial leather, and trendy alternatives*. **Coatings**, v. 11, n. 2, p. 226, 2021.

OLIVEIRA, Renato Machado de; MANGINI, Lígia Fernanda Kaefer. **A química de transformação do couro e quais seus impactos ambientais**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) – Centro Universitário Internacional UNINTER, Curitiba, 2022.

PACHECO, José Wagner Faria. **Curtumes**. São Paulo: CETESB, 2005. (Série P + L).

RAMAN, J.; KIM, D.-S.; KIM, H.-S.; OH, D.-S.; SHIN, H.-J. *Mycofabrication of mycelium-based leather from brown-rot fungi*. **Journal of Fungi**, v. 8, n. 3, p. 317, 2022.

RIBEIRO, Elizete Maria Possamai. **Produção e análise físico-química do adubo de descarte de couro bovino com ênfase no impacto ambiental e energético**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SCHNEIDER, Thaissa; PEREIRA, Laura Pedri; FERNANDES, Karolyne Mylena Behling. O couro e suas alternativas: uma análise do seu uso no mercado da moda. **e-TECH: Tecnologias para Competitividade Industrial**, Florianópolis, v. 15, n. 1, p. 1-22, 2022. (Nota: O volume 15 de 2022 corresponde ao n. 1 no catálogo oficial).

SILVA, Vânia F. M. Overview of the Leather Industry and Pollution Impact. **U.Porto Journal of Engineering**, Porto, v. 7, n. 4, p. 1-15, nov. 2021.

TAKAYAMA, Letícia; FONSECA, Amanda Miyuki; PRATES, Nathália Hiendicke Moreira. Impactos ambientais na cadeia produtiva do couro bovino: novos materiais de substituição do couro. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE DESIGN PARA A SUSTENTABILIDADE (ENSUS), 5., 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: UFSC, 2017.

TEIXEIRA, Thainá dos Santos. **Impactos ambientais das indústrias de curtumes e inovações sustentáveis para substituição do couro**. 2019. Monografia (Tecnologia em Produção Têxtil) – Faculdade de Tecnologia de Americana, Americana, 2019.

TOSO, Giordano Saloni. **Gestão ambiental na indústria do curtume: uma pesquisa bibliométrica**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Administração) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Jaboticabal, 2021.