

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**SUSTENTABILIDADE DE MATERIAIS RENOVÁVEIS:
COURO E MATERIAL DE MICÉLIO**
TESE DE DOUTORADO

Victória Vieira Kopp

Porto Alegre
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**SUSTENTABILIDADE DE MATERIAIS RENOVÁVEIS:
COURO E MATERIAL DE MICÉLIO**
TESE DE DOUTORADO

Victória Vieira Kopp

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Química.

Orientador: João Henrique Zimnoch dos Santos, Dr.
Co-Orientadora: Mariliz Gutterres Soares, Dra.

Porto Alegre

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Tese de Doutorado *Sustentabilidade de materiais renováveis: couro e material de micélio*, elaborada por Victória Vieira Kopp, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutora em Engenharia Química.

Comissão Examinadora:

Dra. Maria Aparecida de Jesus
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA)

Dra. Patrice Aquim
Universidade Feevale

Dr. Marcio Schwaab
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Mariliz e João, pela parceria, amizade e aprendizado em todos esses anos da pós-graduação. Por acreditarem em mim, mesmo à distância.

Aos membros da banca examinadora, pela dedicação do seu tempo e contribuição para este trabalho.

À Muush por me apresentar o mundo do micélio. Em especial ao Antonio e ao Diego pelo suporte na Avaliação do Ciclo de Vida.

Aos meus pais, Vera e João, pelo apoio e amor incondicionais, sempre presentes.

Aos amigos do LACOURO e do PPGEQ por toda parceria desde o mestrado e sempre presentes nessa jornada.

Aos meus amigos por todo apoio.

À CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado.

Resumo

A adoção de materiais renováveis é um passo crucial em direção a uma economia circular e sustentável, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e incentivando práticas mais responsáveis na indústria da moda. O couro, um material utilizado há milhares de anos, enfrenta desafios relacionados à sustentabilidade de seu processo de produção. O material de micélio, um material inovador, tem despertado crescente interesse, embora haja escassez de estudos sobre seu impacto ambiental. Este trabalho tem como objetivo investigar as potencialidades e limitações do processamento sustentável de dois materiais renováveis: o couro e o couro à base de micélio. O estudo foi dividido em três partes: (i) revisão da literatura sobre práticas mais sustentáveis no processamento do couro, a geração e o tratamento de resíduos sólidos, além da utilização de nanomateriais e celulose; (ii) avaliação do impacto ambiental do material de micélio por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); e (iii) discussão comparativa entre o couro e o material de micélio. O estudo sobre o processamento sustentável do couro envolveu o uso de nanomateriais e celulose, destacando a necessidade de inovações na biodegradabilidade, como o uso de agentes de curtimento alternativos, e no tratamento de resíduos, como técnicas de compostagem. Os resíduos de couro podem ser transformados em materiais biodegradáveis e compostos com celulose para diversas aplicações. A aplicação de nanomateriais também pode reduzir a quantidade de produtos químicos utilizados, tornando a água residual menos poluída. Quanto ao micélio, a ACV revelou uma pegada de carbono de 7,86 kg CO₂-eq/m², com a maior contribuição proveniente do consumo de eletricidade durante o processo. A discussão final sobre o couro e o biotecido de micélio destacou as principais características de cada material, seus processos de fabricação e os impactos ambientais associados.

Palavras-chave: couro; biotecido de micélio; sustentabilidade, ciclo de vida.

Abstract

The adoption of renewable materials is a crucial step towards a circular and sustainable economy, aligning with the sustainable development goals and encouraging more responsible practices in the fashion industry. Leather, a material used for thousands of years, faces challenges related to the sustainability of its production process. Mycelium, an innovative material, has been gaining increasing interest, although there is a lack of studies on its environmental impact. This work aims to investigate the potential and limitations of sustainable processing of two renewable materials: leather and mycelium-based leather. The study was divided into three parts: (i) a literature review on more sustainable practices in leather processing, the generation and treatment of solid waste, and the use of nanomaterials and cellulose; (ii) an environmental impact assessment of mycelium material through life cycle assessment (LCA); and (iii) a comparative discussion between leather and mycelium material. The study on sustainable leather processing involved the use of nanomaterials and cellulose, highlighting the need for innovations in biodegradability, such as alternative tanning agents, and waste treatment techniques like composting. Leather waste can be transformed into biodegradable materials and composites with cellulose for various applications. The application of nanomaterials can also reduce the amount of chemicals used, making wastewater less polluted. Regarding mycelium, the LCA revealed a carbon footprint of 7.86 kg CO₂-eq/m², with the highest contribution coming from electricity consumption during the process. The final discussion on leather and mycelium biotextiles highlighted the main characteristics of each material, their manufacturing processes, and the associated environmental impacts.

Keywords: leather; mycelium material; sustainability; life cycle.

Sumário

Resumo	5
Capítulo 1.....	
Introdução	11
1.1 Objetivos.....	14
1.2 Estrutura do trabalho.....	15
Capítulo 2.....	
Revisão Bibliográfica.....	16
2.1 Desenvolvimento Sustentável e Sustentabilidade	16
2.2 Bioeconomia	18
2.3 O Conceito e Avaliação do Ciclo de Vida	22
2.4 Couro.....	26
2.5 Material de Micélio.....	29
2.6 Problemática e Hipótese de Tese	37
2.7 Metodologia.....	38
Capítulo 3.....	
Capítulo de livro 1 - Biodegradation of tannery solid wastes	40
Capítulo 4.....	
Artigo 1 - Nanomaterials to help eco-friendly leather processing	41
Capítulo 5.....	
Capítulo de livro 2 - Application of Cellulose in Leather.....	42
Capítulo 6.....	
Artigo 2 - Life Cycle Ssessment of mycelium biotextile: case study.....	43
Capítulo 7.....	
Artigo 3 - Leather and Mycelium Biotextile in Discussion	44
Capítulo 8.....	

Conclusões	45
Referências.....	47

Lista de Figuras

Figura 1. Materiais históricos, atuais e de próxima geração.....	133
Figura 2. Tripé da Sustentabilidade	17
Figura 3. Bioeconomia circular.....	20
Figura 4. Esquema do processo de recolhimento, separação e processamento de biorresíduos para outro produto biológico.....	21
Figura 5. Entradas, saídas e exemplos de impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida de um produto	23
Figura 6. Ciclo de vida do produto	24
Figura 7. Representação das hifas, formando o micélio e o corpo de frutificação	30
Figura 8. Representação esquemática da fisiologia do micélio em diferentes escalas	32
Figura 9. Estrutura da quitina (a) e quitosana (b)	33
Figura 10. Estrutura do glucano em fungos	33
Figura 11. Fluxograma do processo mostrando o método de fabricação aplicado de compósitos e materiais à base de micélio	36

Lista de Esquemas

Esquema 1. Representação da apresentação da metodologia do trabalho	39
---	----

Lista de Tabelas

Tabela 1. Fases da metodologia da ACV.....	25
--	----

Capítulo 1

Introdução

A sustentabilidade tem se tornado um tema central nas discussões globais sobre desenvolvimento e conservação ambiental, impulsionando a busca por alternativas que minimizem os impactos negativos ao meio ambiente. No contexto da indústria da moda, os materiais renováveis são uma solução. Esses materiais devem se apresentar de acordo com as definições do Comitê Europeu de Normalização a norma EN ISO 14021:2016, em que o material renovável significa um material composto por biomassa e que pode ser continuamente reabastecido (SMIT & ZOON, 2024b). A adoção de materiais renováveis representa um passo significativo rumo a uma economia circular e sustentável, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e promovendo práticas mais responsáveis e conscientes na indústria da moda (VOLK et al., 2024; WIJAYARATHNA et al., 2022). O conceito de ciclo de vida é fundamental para a sustentabilidade, pois norteia a mensuração e o gerenciamento da sustentabilidade em todo o processo produtivo.

O **couro** é um material renovável. O couro começa com uma pele animal, que é um material natural e 100% de base biológica. Ao utilizar produtos no processo de fabricação do couro com alto teor de base biológica, o nível de renovabilidade do material permanece alto. A renovabilidade do couro pode chegar a 95%. Uma pele é renovável por si só e intrinsecamente biodegradável. Dependendo do processo de fabricação do couro, incluindo os produtos químicos e agente de curtimento corretos, os níveis de biodegradabilidade e compostabilidade podem ser melhorados ainda mais. A utilização dos produtos químicos certos no processo de fabricação do couro visa manter o nível de renovação o mais alto possível. Quando o couro em si tem um elevado conteúdo renovável, isso também significa que os resíduos do processo de fabricação do couro serão mais de base biológica e poderão ser melhor reutilizados, reciclados ou biodegradados. A base biológica, em combinação com uma boa biodegradabilidade, apoiará a circularidade total do couro se o couro também for corretamente processado após o uso (SMIT & ZOON, 2024a).

O couro é um material que tem sido usado há milhares de anos. Possui propriedades únicas que se mostraram difíceis de replicar em materiais sintéticos, mas também apresenta uma ampla gama de questões de sustentabilidade, juntamente com tecnologias em

desenvolvimento simultâneo para abordá-las. Os processos envolvidos na produção em larga escala do material criam impactos ambientais e sociais adversos quando não são cuidadosamente gerenciados e considerados. Embora as alternativas modernas ao couro possam ter pegadas ambientais comparativamente menores, projetar um produto sustentável pode não ser tão simples como substituir um material por outro e envolve julgamentos de valor complexos entre os atores da indústria e os consumidores. Essa dinâmica na indústria torna o couro e seus novos materiais alternativos um ponto de partida interessante para repensar suposições dentro da categoria mais ampla de produtos e materiais sustentáveis (QUA, 2019). O tamanho do mercado global de artigos de couro foi avaliado em USD 242,85 bilhões em 2022 e espera-se que se expanda a uma taxa de crescimento anual de 6,6% de 2023 a 2030. O mercado é principalmente impulsionado pelo aumento da renda disponível do consumidor, melhor padrão de vida, tendências de moda em constante mudança e pelo crescimento do turismo doméstico e internacional, de acordo com o Grand View Research (2024).

De acordo com a Material Innovation Initiative (2023), o couro pertence à categoria de materiais históricos, juntamente com têxteis baseados em algodão e seda (Figura 1). Esses materiais embora chamados de histórico, continuam a ser utilizados devido à sua qualidade.

O couro é utilizado em uma ampla gama de produtos manufaturados como calçados, bolsas, vestuário e estofamentos moveleiros e automotivos. Materiais alternativos também são utilizados para esses fins, como é visto a seguir.

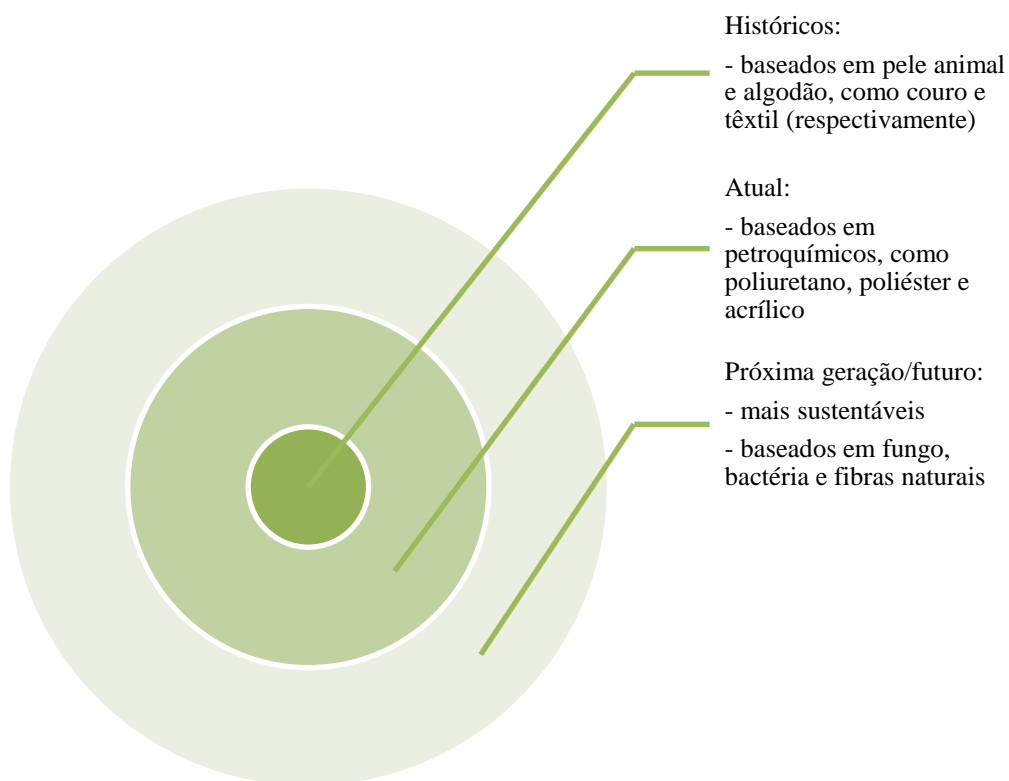
Materiais da geração atual são aqueles usados para substituir materiais de origem animal, ganhando no preço. Estes são materiais sintéticos proveniente de produtos petroquímicos como alternativas à base de petróleo (por exemplo, poliuretano (PU), cloreto de polivinila (PVC), fibra acrílica. O mercado global de materiais sintéticos que imitam couro foi avaliado em USD 22,13 bilhões em 2015, e estima-se que gere USD 28,03 bilhões em receita até 2025 (QUA, 2019).

Os materiais de próxima geração (*next-gen materials*) não são produtos obtidos a partir de animais e desejam replicar o alto desempenho dos materiais que eles são projetados para substituir. Esses materiais usam uma variedade de abordagens de biomimética para replicar a estética e desempenho de suas contrapartidas baseadas em animais. Esses materiais são derivados de plantas, micélio, células animais cultivadas, derivado de micróbio, material reciclado e combinação de materiais (MATERIAL INNOVATION INITIATIVE, 2023). O **micélio** é um exemplo dessa categoria, que é feito de fungo. Este material vegano utiliza biotecnologia e recursos renováveis em seu processo de fabricação (MEYER et al., 2020).

Apresenta características mecânicas e táteis semelhantes às dos produtos e aplicações industriais já existentes. O mercado de materiais da próxima geração será de USD 2,2 bilhões por ano em 2026 (MATERIAL INNOVATION INITIATIVE, 2023).

Contudo, materiais da próxima geração incluem também os atuais e os históricos, assim como os atuais incluem os materiais históricos.

Figura 1. Materiais históricos, atuais e de próxima geração



Fonte: O autor. Adaptado de Material Innovation Initiative (2023).

A motivação para este trabalho é analisar dois materiais renováveis através da sustentabilidade: o couro e o material de micélio. O **couro** a partir de estudos na literatura sobre como tornar o processamento mais sustentável. Este estudo consiste de uma análise abrangente sobre o uso de nanomateriais em todo processamento do couro, considerando que os estudos existentes apresentam a tecnologia de processamento de cada etapa. A segunda análise é o uso da celulose, um produto sustentável e renovável, em diferentes etapas do tratamento do couro e sua adição nos resíduos sólidos para gerar produtos de valor agregado. Além disso, aborda os resíduos sólidos gerados no processamento e como gerar produtos de

valor agregado a partir dos resíduos e como tornar o couro mais biodegradável. O estudo do **material de micélio** é motivado pelo trabalho desenvolvido à parte do doutorado na empresa Muush. Nesta tese, é apresentada uma avaliação da sustentabilidade do processamento do material por meio da Avaliação do Ciclo de Vida em colaboração com a UFRGS.

A inovação da tese reside na integração e discussão de materiais tradicionais e emergentes com foco em processos sustentáveis, na proposta de novas técnicas de processamento. A contribuição para o estado da arte é significativa ao preencher lacunas existentes na pesquisa e fornecer novas diretrizes e recomendações para a indústria, potencializando o desenvolvimento de práticas e produtos mais sustentáveis.

1.1 Objetivos

O objetivo da presente tese de doutorado é investigar as potencialidades e limitações do processamento mais sustentável dos materiais renováveis: couro e de material à base de micélio.

Os objetivos específicos são:

1. Estudar a biodegradabilidade do couro e especificar os resíduos sólidos gerados no processamento do couro e quais os destinos para uma bioeconomia circular → Cap. 3
2. Identificar quais etapas do processamento do couro podem ser mais sustentáveis com a aplicação de nanomateriais; → Cap. 4
3. Verificar como a celulose pode agregar no processamento do couro; → Cap. 5
4. Avaliar a sustentabilidade do processamento do material de micélio, através da Avaliação do Ciclo de Vida; → Cap. 6
5. Comparar couro e o material de micélio em termos de suas características e impactos ambientais. → Cap. 7

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 8 capítulos.

O Capítulo 1 introduz o trabalho com uma apresentação dos temas que foram estudados, os objetivos e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 consiste da revisão bibliográfica sobre desenvolvimento sustentável, sustentabilidade, economia circular e avaliação do ciclo de vida. Após, o capítulo trata sobre dois tipos de tecidos renováveis: couro e biotecido de micélio. O processamento de ambos os materiais é discutido.

No Capítulo 3 é apresentado o capítulo de livro *Biodegradation of tannery solid wastes* que foi submetido para publicação no livro *Handbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment*. O capítulo aborda os resíduos sólidos gerados no processamento do couro, como gerar produtos a partir dos resíduos e como tornar o couro mais biodegradável.

No Capítulo 4 é apresentado o artigo *Nanomaterials to help eco-friendly leather processing*, que está publicado no periódico *Environmental Science and Pollution Research*. O artigo aborda como o processamento do couro pode ser mais *eco-friendly* através do uso de nanomateriais em diferentes etapas.

No Capítulo 5 é apresentado o capítulo de livro *Application of Cellulose in Leather*, que está publicado no livro *Cellulose*. Este capítulo de livro trata sobre o uso da celulose em diferentes etapas do tratamento do couro e sua adição nos resíduos sólidos para gerar produtos de valor agregado.

No Capítulo 6 é apresentado o artigo *Life Cycle Assessment of mycelium biotextile: case study* submetido ao periódico *Journal of Cleaner Production*, sobre o estudo da Avaliação do Ciclo de Vida do material de micélio.

No Capítulo 7 é apresentado o artigo *Leather and Mycelium biotextile in Discussion* que será submetido ao periódico *Journal of Environmental Management*, que apresenta as principais características de cada material, seu processamento e seus impactos ambientais.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica que trata sobre o tema do desenvolvimento sustentável, sustentabilidade e bioeconomia circular. Além do pensamento do ciclo de vida e avaliação do ciclo de vida. Após, o capítulo trata de dois tipos de materiais renováveis: couro e biotecido de micélio. O processamento de ambos os materiais é discutido. Esses materiais são utilizados como tecidos em diversas indústrias.

2.1 Desenvolvimento Sustentável e Sustentabilidade

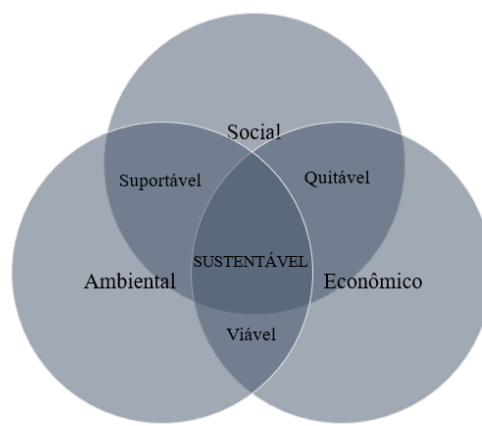
Nas últimas décadas houve um aumento no interesse da sustentabilidade ambiental, devido à preocupação em preservar os recursos naturais para o futuro (ANDERSSON et al., 2022) e às alterações climáticas que estão ocorrendo (WAGH et al., 2024).

O termo **desenvolvimento sustentável** foi apresentado no Relatório Brundtland pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas em 1987, com a definição: “Desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas necessidades e aspirações” (BRUNDTLAND GH, et al., 1987). As empresas sofrem uma pressão externa para reduzirem o seu impacto ambiental negativo e contribuírem para a criação de valor sustentável (ou seja, valor que beneficia o ambiente natural e as partes interessadas para além dos limites da empresa) (SCHALTEGGER; HÖRISCH; FREEMAN, 2019). Uma definição mais precisa sobre desenvolvimento sustentável de Herman Daly, economista do Banco Mundial: “Uma sociedade sustentável precisa atender a três condições: as suas taxas de utilização de recursos renováveis não devem exceder as suas taxas de regeneração; suas taxas de utilização de recursos não renováveis não devem exceder a taxa em que são desenvolvidos substitutos renováveis sustentáveis; e as suas taxas de emissão de poluição não devem exceder a capacidade de assimilação do ambiente.” (ELKINGTON, 1998).

Em 1997, John Elkington propôs o surgimento de um conjunto renovado de valores na sociedade, sendo que muitos desses valores seriam essenciais para a transição em direção à sustentabilidade. Essa tendência foi crucial à medida que as empresas passaram a visualizar

cada vez mais seu futuro de forma global, uma vez que a globalização engloba dimensões econômicas, sociais e ambientais, o que resultou no surgimento do **Tripé da Sustentabilidade** (*Triple Bottom Line*). O conceito de Tripé da Sustentabilidade do desenvolvimento sustentável é que a sociedade depende da economia, e esta, por sua vez, depende do ecossistema global, cuja saúde representa o resultado final. Contudo, esses três resultados não são estáveis; eles constituem um fluxo inconstante devido a fatores sociais, pressões, ciclos e conflitos políticos, econômicos e ambientais (Figura 2).

Figura 2. Tripé da Sustentabilidade



Fonte: O autor (2024)

Sustentabilidade é o princípio de garantir que nossas ações hoje não limitem o leque de opções econômicas, sociais e ambientais abertas a gerações futuras. Além disso, trata-se de uma nova forma de valor que a sociedade exigirá e que as empresas de sucesso fornecerão através de mercados transformados. Porém, a essência da revolução da sustentabilidade é um dos maiores desafios que temos pela frente. Paul Hawken argumentou que o problema que enfrentamos não é tanto um problema de gerenciamento como um problema de design. “Para aproximar-nos de uma sociedade em situação sustentável”, conclui ele, “precisamos descrever um sistema de comércio e produção em que cada ato é inerentemente sustentável e restaurador”. Isto é o desafio implícito na transição para a sustentabilidade. Mesmo as melhores empresas só serão sustentáveis quando as instituições e os mercados que os rodeiam foram redesenhados para apoiar e promover a sustentabilidade. Portanto, o principal objetivo é encontrar o equilíbrio no tripé da sustentabilidade. A Harvard Business Review publicou

em 1997: “Além da ecologização existe um enorme desafio – e uma enorme oportunidade. O desafio é desenvolver uma economia global sustentável: uma economia que o planeta seja capaz de suportar indefinidamente”. Isto representa um desafio profundo. Da mesma forma, a oportunidade é imensa (ELKINGTON, 1998).

Na busca incessante de soluções sustentáveis para os desafios globais da escassez de recursos, da degradação ambiental e das alterações climáticas, o conceito de **bioeconomia** emergiu, unindo inovação, conservação e crescimento econômico (WAGH et al., 2024). Bioeconomia refere-se ao uso de conhecimento biológico para fins comerciais e industriais (BIRNER, 2018). A inclusão de produtos de base biológica é estimulada pela transição da economia linear para a circular (HUARACHI et al., 2023).

2.2 Bioeconomia Circular

Quando são utilizados resíduos de origem biológica para conversão em bioprodutos de valor agregado de maneira sustentável, o termo **bioeconomia circular** é utilizado (SALVADOR et al., 2021). A bioeconomia circular é um método promissor de desenvolvimento sustentável para gerar produtos de valor agregado, como água limpa, nutrientes, biocombustíveis, biometano, biotêxteis a partir de recursos biológicos renováveis (ou seja, águas residuais, bioresíduos) e conservar o valor dos recursos a longo prazo através de uma conversão eficaz através da biotecnologia. Isto pode alcançar a geração zero de resíduos, reduzir as emissões de gases de efeito estufa, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e economizar custos ambientais e econômicos (DENG et al., 2022).

No Brasil foi aprovado em 2024 o requerimento de urgência para o projeto que cria a Política Nacional de Economia Circular (PL 1.874/2022). Essa política estabelece objetivos, princípios e instrumentos da política nacional de economia circular, que prioriza a conservação do valor dos recursos extraídos e produzidos, mantendo-os em circulação por meio de cadeias produtivas integradas. O modelo prega o reaproveitamento de resíduos, o reparo, o reuso e a remanufatura (AGÊNCIA DO SENADO, 2024). A mudança de uma economia linear para uma economia circular promove a integração de produtos baseados em biomassa na chamada bioeconomia circular (HUARACHI et al., 2023).

A transição para uma economia circular de base biológica deve ocorrer para promover a produção de forma mais sustentável de alimentos, rações, produtos químicos, combustíveis, têxteis, materiais para construção, automotivo e móveis (MEYER et al., 2020). São vantagens ambientais e econômicas, pois além da recuperação de resíduos e subprodutos derivados de biomassa¹ que irão evitar a poluição, também promove sua valorização potencial (SALVADOR et al., 2021).

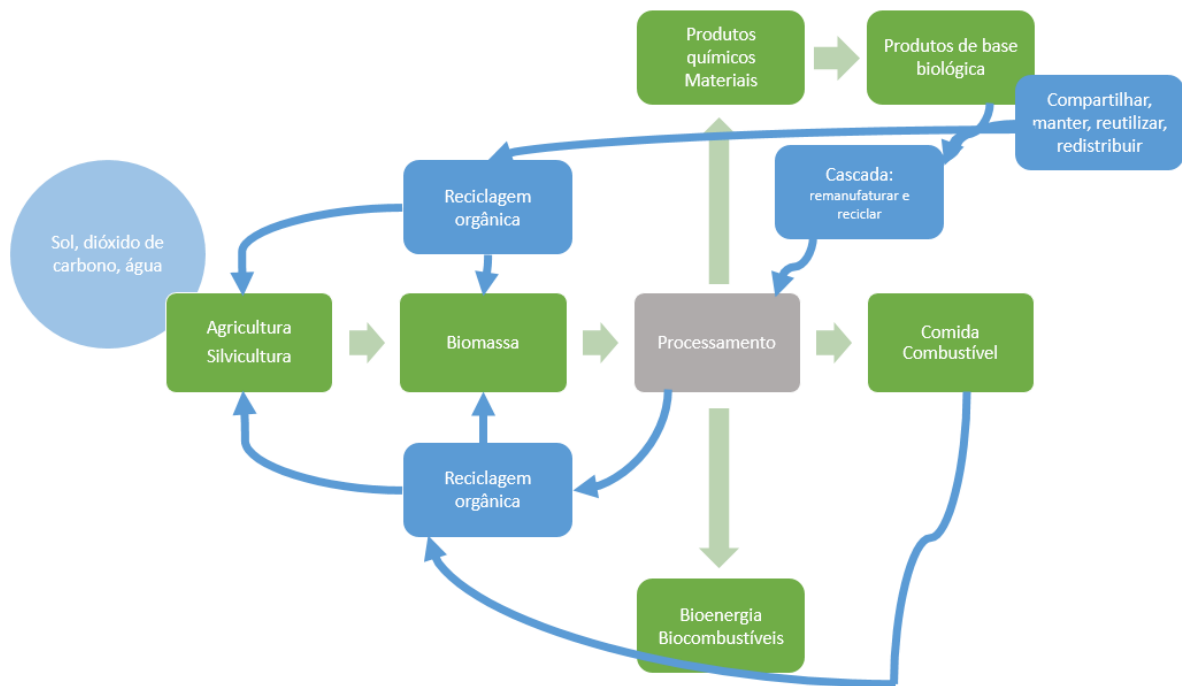
A bioeconomia circular pode contribuir para um desenvolvimento mais sustentável, colaborando para alguns dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) definidos pelas Nações Unidas (ONU) (ONU, 2020), incluindo energia limpa e acessível (ODS 7), indústria, inovação e infraestruturas (ODS 9), cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11), consumo e produção responsáveis (ODS 12) e ação climática (ODS 13) (SALVADOR et al., 2021).

Não se pode negligenciar que a implementação da bioeconomia circular implica em alguns desafios: a aquisição e o transporte de biomassa, e a difícil conversão devido à qualidade entre diferentes tipos de biomassa. Uma das desvantagens da economia circular é seu domínio atual pela indústria de metais e minerais, devido à facilidade em manter seu valor durante o uso em cascata (o que significa as etapas de remanufatura e reciclagem). Para aumentar o potencial de utilização de biomassa, sua transformação deve ocorrer em produtos químicos e materiais e deixar a energia em último lugar. O uso em cascata é visualizado na

Figura 3. O fluxo de biomassa (verde) começa no lado esquerdo com radiação solar, CO₂ e água utilizada na agricultura, silvicultura (e também marinha/pesca), e depois continua através de biomassa, processamento para alimentos/ração, bioenergia/biocombustíveis, produtos químicos/materiais e, finalmente, produtos de base biológica. Os subprodutos e os biorresíduos podem ser novamente utilizados na reciclagem orgânica e em cascata (azul): Estas partes constituem a ‘bioeconomia circular’ (CARUS; DAMMER, 2018).

¹ Entende-se por biomassa a substância orgânica renovável de origem animal ou vegetal (CTIQ, 2015).

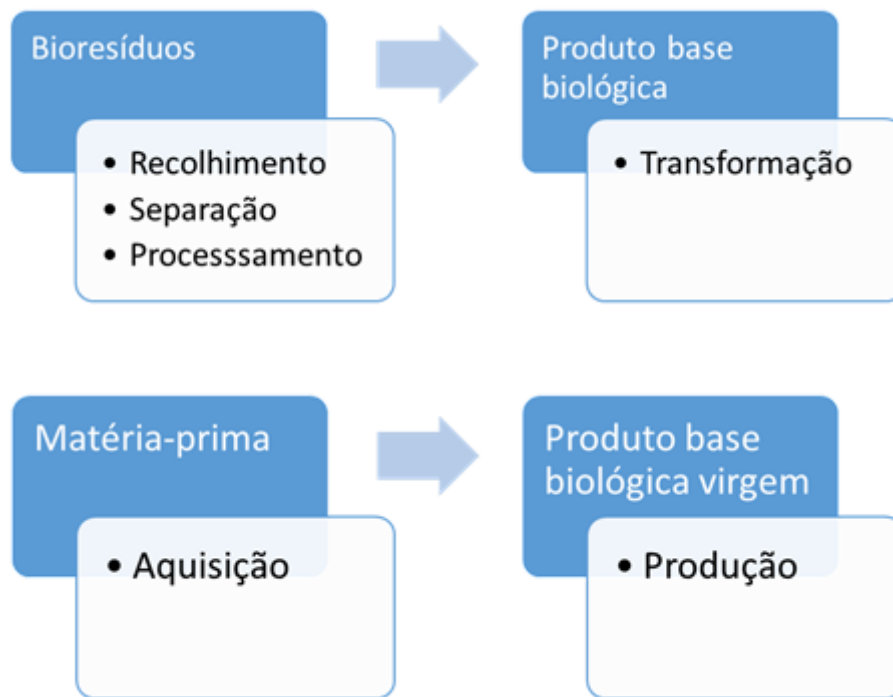
Figura 3. Bioeconomia circular



Fonte: Autor, 2024. Adaptado de Carus e Dammer (2018)

Embora a utilização em cascata geralmente aumente a utilização eficiente dos recursos, a ligação direta para a redução de emissões de gases do efeito estufa é mais complexa. As emissões só diminuem se as emissões causadas pelo recolhimento, separação e processamento do fluxo de biorresíduos para outro produto de base biológica forem inferiores às emissões causadas pela aquisição e produção de outro produto de base biológica virgem, como é exemplificado na Figura 4 (CARUS; DAMMER, 2018).

Figura 4. Esquema do processo de recolhimento, separação e processamento de biorresíduos para outro produto biológico



Fonte: O autor, baseado em Carus e Dammer (2018)

No entanto, uma produção e conversão mais eficiente de biomassa têm suas limitações. Além da eficiência de ganhos, a quantidade de recursos de biomassa ainda não explorados torna-se, portanto, um fator-chave para o crescimento da bioeconomia (MEYER, 2017). Antes da biomassa se tornar um produto de base biológica, os incentivos conduzem biomassa diretamente para utilização energética (CARUS; DAMMER, 2018). Para implementação da bioeconomia é crucial o desenvolvimento e a aplicação de avaliações de sustentabilidade e esquemas de certificação (MEYER, 2017).

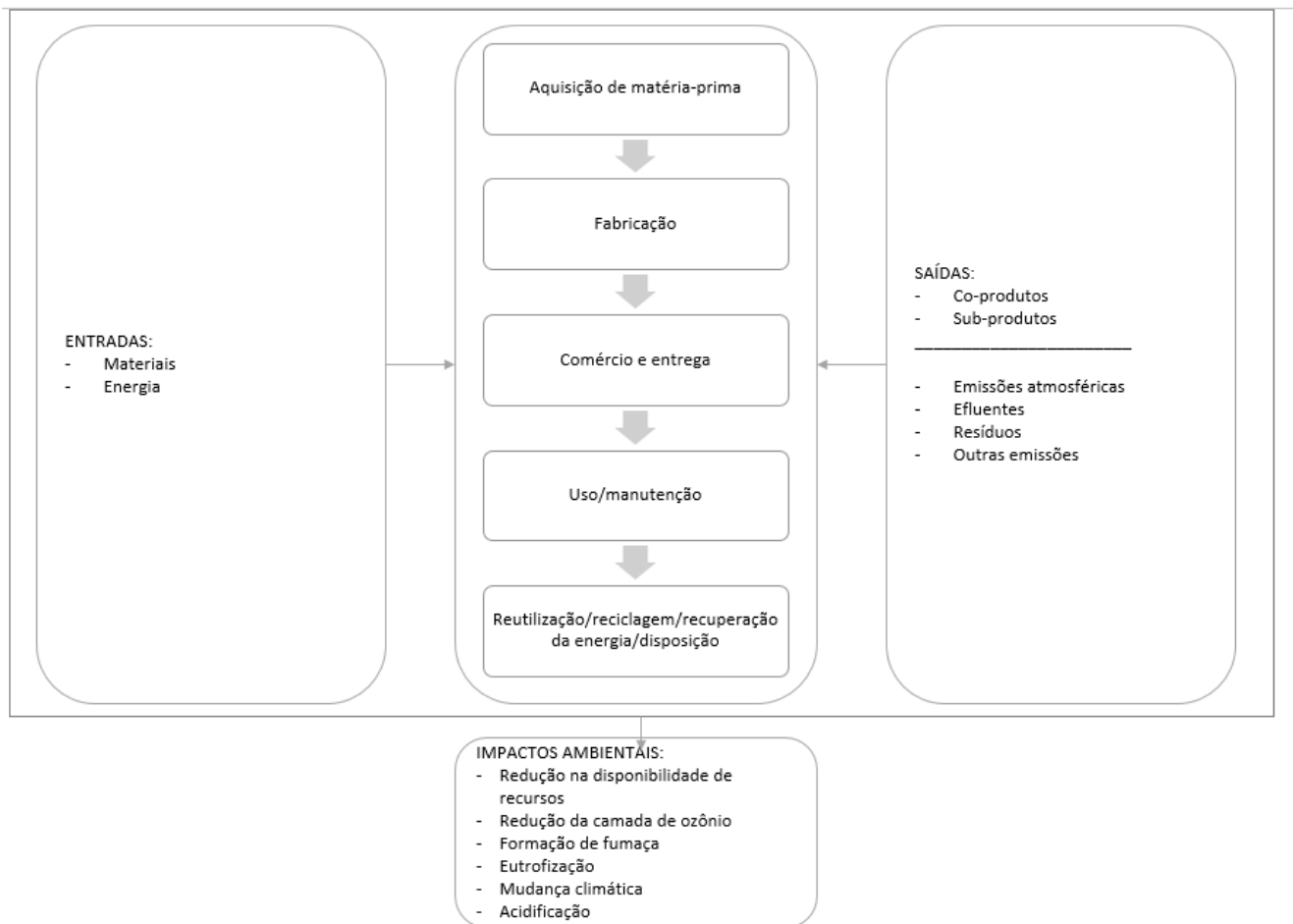
Existem limitações para a bioeconomia circular. Ao longo da cascata, os produtos podem acumular substâncias tóxicas, que podem servir como barreiras para posterior reciclagem ou mesmo incineração. A incineração de resíduos é economicamente mais atraente em vez de reciclá-los. Além disso, para otimizar o uso em cascata dos resíduos é necessária a ecoeficiência do processo. Para transformar o resíduo em um produto de base biológica há dependência da energia adicional para o processamento. A utilização de energias

renováveis, incluindo a bioenergia, tornará justificáveis mais fases em cascata do ponto de vista dos gases do efeito estufa. Para uma avaliação abrangente da sustentabilidade de uma cascata, é crucial uma avaliação completa do ciclo de vida (CARUS; DAMMER, 2018).

2.3 O Conceito e a Avaliação do Ciclo de Vida

Para avaliação de sistemas circulares, na literatura são utilizadas metodologias baseadas no pensamento do ciclo de vida (DANTAS, 2023). Todos os produtos, de uma forma ou de outra, têm efeitos no meio ambiente. Esses efeitos podem manifestar-se em todas as etapas do seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até a disposição final (DALUZ, 2017). A ISO/TR 14062 (ABNT, 2004; LTDA, [s.d.]) estabelece como objetivo a integração de aspectos ambientais no projeto e desenvolvimento do produto para minimizar seus impactos ambientais. Portanto, compreender o ciclo de vida do produto, incluindo suas entradas e saídas, bem como seus impactos ambientais, é fundamental para a redução desses impactos. A Figura 5 demonstra um esquema genérico do ciclo de vida do produto (ABNT, 2004).

Figura 5. Entradas, saídas e exemplos de impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida de um produto

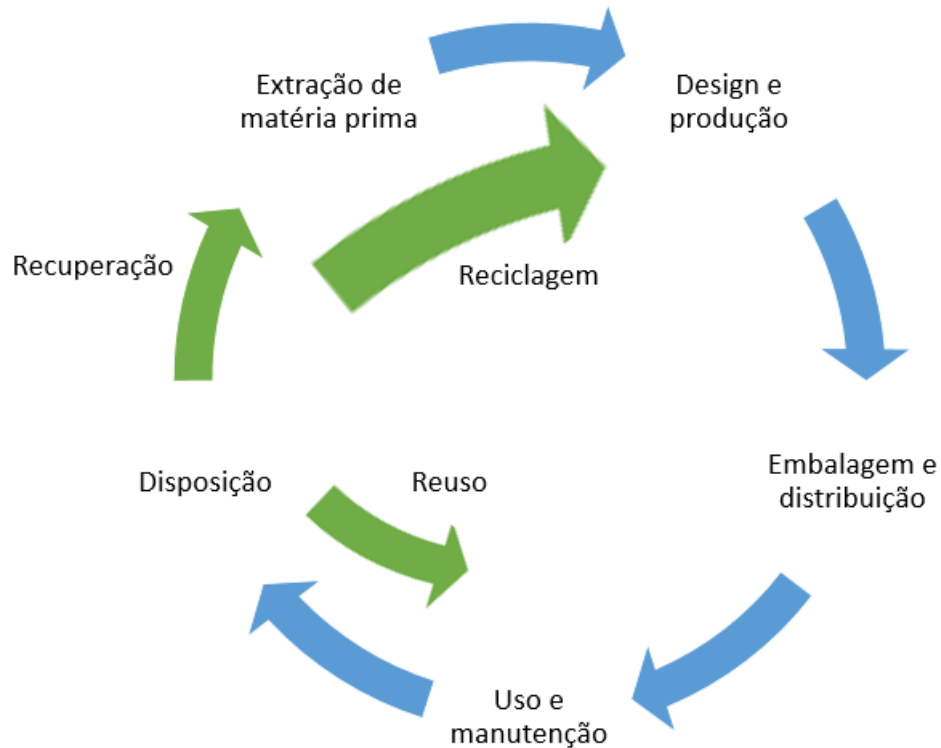


Fonte: O Autor, 2024. Adaptação de ABNT (2004)

O pensamento do ciclo de vida refere-se a uma abordagem que considera os impactos ambientais, sociais e econômicos de um produto ao longo de todo o seu ciclo de vida (desde a extração de matéria-prima até o processamento de materiais, fabricação, distribuição, uso, reparo e manutenção, e disposição ou reciclagem) e cadeia de valor (Figura 6), desde o berço até o túmulo (UNEP, 2012). É uma metodologia teórica que capacita uma organização a detectar processos de alto impacto, como questões relacionadas a materiais e pontos críticos, ao longo de sua cadeia de valor (UNEP, 2019). Assim, busca identificar oportunidades de aprimoramento e redução de impactos em todas as fases de produção, desde a extração e conversão até a distribuição, utilização e destino final (JACOB-LOPES; COSTA DEPRÁ; QUEIROZ ZEPKA, 2021). Os principais objetivos do pensamento do ciclo de vida são a

redução do consumo de recursos de um produto e das emissões para o meio ambiente, bem como a melhoria de seu desempenho social e socioeconômico ao longo de seu ciclo de vida (UNEP, 2012).

Figura 6. Ciclo de vida do produto



Fonte: O Autor, adaptado de UNEP (2012)

São utilizadas diversas ferramentas, como Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental (ACV), Custeio do Ciclo de Vida (LCC), Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) e Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) (HUARACHI et al., 2023). A revisão sistemática da literatura realizada por Huarachi et al. (2023) revelou que a ACV é a ferramenta mais utilizada do Pensamento do Ciclo de Vida para a bioeconomia circular.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica de avaliação de potencial de impacto ambiental e de saúde humana associados a um produto, processo ou serviço em todo o ciclo de vida (ABNT, 2014). É a ferramenta mais abrangente para avaliar o perfil ambiental

completo de um produto (SALVADOR et al., 2014). A ACV avalia os aspectos e impactos ambientais de todas as etapas que envolvem o ciclo de vida de um produto, começando com a coleta da matéria-prima na natureza e terminando quando todos os materiais são devolvidos ao meio ambiente, possibilitando assim uma visão global do sistema do produto (BARCELOS et al., 2013). O estudo pode ser realizado do berço ao túmulo (*cradle to grave*), sendo o berço o local de nascimento do produto com a extração de recursos naturais e túmulo sendo o destino final dos resíduos que não serão reusados ou reciclados. Alguns ciclos de vida se concentram no berço ao portão (*cradle to gate*), onde a palavra portão se refere ao portão da fábrica (MATTHEW; T. HENDRICKSON; MATTHEWS, 2014).

A metodologia para ACV segue as normas ISO 14040 e 14044. A ISO 14040 (ABNT, 2009), especifica os princípios e estrutura e a ISO 141044 os requisitos e orientações (ABNT, 2014). A metodologia inclui quatro fases (Tabela 1).

Tabela 1. Fases da metodologia da ACV

Fase	Escopo	Descrição
1	Definição de objetivo e escopo	Definição do propósito, como o estudo será conduzido, decisão sobre a unidade funcional e limites do sistema
2	Análise de inventário	Levantamento dos dados, coleta e análise
3	Avaliação dos impactos	Os dados gerados são associados a categorias de impacto
4	Interpretação de resultados	Resultados são interpretados de acordo com os objetivos

Os resultados obtidos na ACV permitem comparações entre produtos, além de apresentar um levantamento completo dos insumos utilizados e produzidos durante o ciclo de vida. A ACV possui uma série de benefícios, como a identificação de oportunidades de

melhorias na performance ambiental de produtos, auxílio a tomadores de decisão dos setores produtivos, seleção de indicadores ambientais relevantes ao contexto local e divulgação de ações sustentáveis (INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2020).

Como visto anteriormente, a bioeconomia, em contraste com a economia baseada no petróleo, depende da gestão e produção de recursos biológicos (COLLET, 2018). A utilização de produtos renováveis, a valorização de resíduos e a transformação em produtos de valor agregado são temas centrais da sustentabilidade ambiental e da bioeconomia circular.

O **couro** é um material com uma longa história de uso que remonta a milhares de anos, demonstrando sua durabilidade e versatilidade ao longo do tempo. Sua origem como um subproduto da indústria frigorífica torna-o intrinsecamente renovável, já que é derivado de uma fonte natural e renovável: a pele animal. Além disso, o processo de tratamento tem sido aprimorado ao longo dos anos para tornar-se mais eficiente e para minimizar o impacto ambiental, como será visto na Seção 2.4.

Além do couro, há um crescente surgimento de novos biomateriais têxteis que estão revolucionando a indústria da moda. Estes biomateriais são produzidos a partir de fontes renováveis e sustentáveis, como plantas, algas e fungos. Um dos exemplos é **material de micélio** a partir de resíduos, que será discutido na Seção 2.5.

2.4 Couro

Sendo quase tão antigo quanto a civilização humana mais antiga, o **couro** é um dos materiais mais duráveis e maleáveis (AMOBONYE et al., 2023). É o segundo material orgânico mais utilizado no mundo, ficando atrás apenas do algodão. Tem um valor de mercado estimado em quase US\$ 360 bilhões até 2025 e é um material muito utilizado em roupas, calçados, móveis e acessórios devido à sua durabilidade aliada às suas propriedades estéticas (JONES et al., 2021). Sua matéria-prima é a pele animal, um dos subprodutos da indústria frigorífica. A Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO) concluiu que as peles são um subproduto quando um animal é criado principalmente para carne e laticínios. Afirma ainda que "mais de 99% da produção mundial

de couro provém do processamento de peles e couros brutos derivados de animais que foram criados principalmente para produção de leite e/ou carne” (QUA, 2019).

Para produção do couro, é necessário realizar seu tratamento, que envolve uma série de etapas que podem ser classificados principalmente em três grupos: (1) etapas antes do curtimento, (2) curtimento e (3) pós-curtimento (KHAMBHATY, 2020). Os **métodos tradicionais de produção de couro** podem resultar na liberação de vários poluentes, como nitrogênio, metais, sais e enxofre, no efluente. Durante as etapas de pós-curtimento, a principal fonte de poluição inorgânica no efluente provém dos agentes de recurtimento, incluindo tanto taninos naturais quanto sintéticos (HANSEN et al., 2020). Assim, esta indústria enfrenta desafios duplos: reduzir a poluição ambiental enquanto garante a qualidade dos produtos de couro (YORGANCIOGLU; BAYRAMOGLU; RENNER, 2019). Para enfrentar esses desafios e aprimorar o desempenho do couro, são necessárias técnicas de produção inovadoras. Essas técnicas devem priorizar o meio ambiente, facilidade de aplicação e eficácia.

Um **processo mais sustentável de couro** é aquele que minimiza o impacto ambiental e social ao longo de todas as etapas da produção, desde a obtenção da matéria-prima até a fabricação do produto final. Para o processamento de couro isso pode incluir:

- a) Tratamento sustentável: utilizar métodos de tratamento que reduzam o uso de produtos químicos prejudiciais e o consumo de água, além de minimizar a geração de resíduos e emissões poluentes, como métodos de preservação de peles sem sal (SIVAKUMAR; MOHAN; MURALIDHARAN, 2019), enzimas para remoção de pelos (DE CASTRO BIZERRA et al., 2024), técnicas alternativas de curtimento (CHINA et al., 2020) e biocorantes naturais de fungos filamentosos (FUCK; BRANDELLI; GUTTERRES, 2018).
- b) Inovação e melhoria contínua: buscar constantemente novas tecnologias e práticas que possam melhorar a sustentabilidade do processo de produção de couro, bem como monitorar e avaliar regularmente o desempenho ambiental e social da operação.
- c) Gestão de resíduos: adotar medidas para reduzir, reutilizar e reciclar os resíduos gerados durante o processo de produção, incluindo o tratamento adequado de subprodutos como os resíduos sólidos e efluente.

Em relação à gestão de resíduos, durante o processamento são gerados **resíduos sólidos**. Quando se pensa em um sistema de fabricação circular, esses resíduos podem ser utilizados para gerar novos produtos ou energia. Trabalhos recentes do grupo de pesquisa do **Laboratório de Estudos em Couro e Meio Ambiente (LACOURO)** utilizaram resíduos sólidos para geração de biogás através da co-digestão anaeróbica dos resíduos com palha de trigo crua e pré-tratada (SIMIONI et al., 2022) e associação de bactérias (AGUSTINI; DA COSTA; GUTTERRES, 2020). A partir da oleína, subproduto produzido a partir dos resíduos sólidos, foram preparados polióis e espumas de poliuretano (SILVA et al., 2022). Resíduos sólidos também foram utilizados como adsorventes para remoção de corantes catiônicos e aniônicos (PINHEIRO; PEREZ-LOPEZ; GUTTERRES, 2022). O pelo também pode ser aproveitado através da extração de queratina (DE SOUZA et al., 2022). Carvão ativado foi produzido a partir de resíduos e aplicado no tratamento de efluentes de curtume (MELLA et al., 2019).

Os resíduos sólidos são comumente descartados em aterros. Porém para facilitar seu descarte, é possível produzir um couro mais biodegradável, como é discutido no Capítulo 3. Além disso, são abordados os métodos para reutilização dos resíduos sólidos ou obtenção de energia por meio da biodegradação. Também é possível adicionar **celulose** aos resíduos para gerar produtos de valor agregado que são utilizados desde a agricultura até embalagens (Capítulo 5). Assim minimiza-se o desperdício e protege-se o meio ambiente (MOKTADIR et al., 2020).

Cada vez mais atenção tem sido dada aos nanomateriais na melhoria da fabricação tradicional de couro (PAN et al., 2020), pois podem levar a melhorias sustentáveis e economicamente viáveis na qualidade do couro acabado, com o uso de nanopartículas e nanocápsulas como substituição de produtos químicos perigosos, como será visto no Capítulo 4.

A celulose, um produto sustentável e renovável, pode ser utilizada em três etapas diferentes do processamento do couro. No curtimento, a celulose auxilia na penetração dos metais na matriz do couro, contribuindo para a estabilidade das fibras e melhorando o desempenho do curtimento. No recurtimento, o uso de celulose melhora as propriedades físicas e estéticas do couro. Enquanto isso, no acabamento, a celulose é misturada com outros produtos químicos para obter um couro melhor, sem comprometer as propriedades estéticas. O processamento de couro gera resíduos sólidos durante a operação de ajuste da espessura do couro ou redução dela. A celulose pode ser adicionada a esses resíduos para obter produtos de

valor agregado, que são usados em diferentes áreas, como agricultura e embalagens (Capítulo 5).

Apesar do couro ser um material de base biológica e renovável, cada vez mais se discute a emissão de gases do efeito estufa devido à criação do gado e o bem-estar animal e há um número crescente de pessoas que não querem comer carne ou se utilizar de produtos de origem animal (MEYER et al., 2021). Essa dinâmica na indústria torna o couro e seus novos materiais alternativos um ponto de partida interessante para pensar em nossas suposições dentro da categoria mais ampla de produtos e materiais sustentáveis (QUA, 2019). Considerando a crescente procura pelo couro como material de luxo, materiais alternativos e sustentáveis semelhantes ao couro são altamente procurados (WIJAYARATHNA et al., 2022).

Diversas alternativas ao couro foram desenvolvidas. Os tecidos sintéticos, chamados de “couro” sintético, geralmente são feitos de poliuretano (PU) e policloreto de vinila (PVC), derivados de combustíveis fósseis. O tecido não é biodegradável e tem as mesmas opções limitadas de fim de vida da maioria dos plásticos. Além disso, a produção de material de PVC utiliza produtos químicos perigosos (JONES et al., 2021). Aliado a isso, os ingredientes crus dos tecidos de poliuretano são principalmente derivados do petróleo; o processamento desse recurso tem sido observado por seu enorme consumo de energia, assim como seus efeitos negativos sobre a mudança climática e o meio ambiente em geral (AMOBONYE et al., 2023). O surgimento desses materiais mais acessíveis está liderando uma mudança em direção a alternativas sustentáveis, desafiando a predominância de couros e sintéticos (WHABI; YU; XU, 2024).

2.5 Material de Micélio

Uma alternativa à utilização de materiais de origem animal ou sintéticos é o **material à base de micélio**, a parte vegetativa do fungo. É um material vegano que utiliza biotecnologia e materiais renováveis no seu desenvolvimento (MEYER et al., 2020). Apresenta características mecânicas e táteis similares às dos produtos e aplicações industriais já existentes. Essa nova abordagem oferece uma alternativa aos polímeros derivados do petróleo (RAMAN et al., 2022).

Alternativas sustentáveis podem ser produzidas a partir de fungos, particularmente a partir do seu componente vegetativo conhecido como micélio. Para se tornar um material

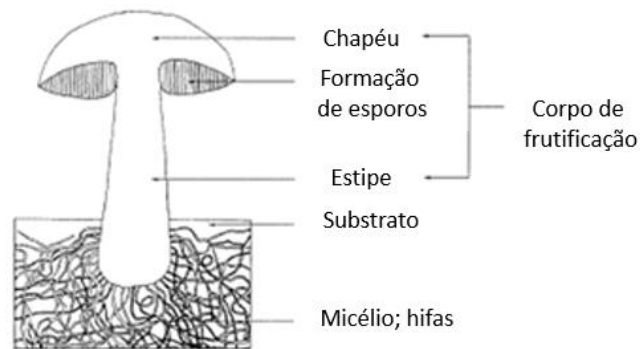
utilizável, o micélio passa por tratamentos químicos e térmicos, aumentando sua durabilidade e resistência ao estresse ambiental. Os têxteis de micélio apresentam coloração marrom-esbranquiçada, textura coriácea e demonstram resistência à perfuração, possuindo diversos atributos físicos e mecânicos (RAMAN et al., 2022).

As espécies de fungos utilizadas, juntamente com as condições ambientais e a nutrição química, representam o parâmetro de desempenho de crescimento mais influente (KAVANAGH, 2017). Além disso, as propriedades físico-mecânicas do micélio são afetadas por fatores como tipo de substrato, condições de incubação e processo de produção. Os substratos geralmente incluem resíduos agrícolas de baixo custo, tais como agrícolas e industriais. Por meio da fermentação no estado sólido, são degradados os substratos dos resíduos agroindustriais, predominantemente compostos por celulose, hemicelulose e lignina, conhecidos coletivamente como materiais lignocelulósicos (RAMAN et al., 2022). Juntamente com a capacidade dos fungos de reciclar resíduos em micélios construtivos, a fabricação destes materiais miceliais funcionais é econômica e renovável, exigindo um consumo mínimo de energia (WHABI; YU; XU, 2024).

2.5.1 Fungo

Os fungos são organismos eucariontes, com células contendo membrana plasmática. As unidades vegetativas básicas dos fungos são as hifas, constituídas por um conjunto de células cilíndricas que formam uma rede de filamentos tubulares. O conjunto de hifas do fungo é o micélio, utilizado para o material à base de fungo, pois é flexível. O micélio está encarregado da absorção de água e nutrientes, sustentação do crescimento, penetração e colonização de substratos. As mudanças fisiológicas estão associadas à absorção, armazenamento e redistribuição de nutrientes (ORTIZ-MONSALVE, 2019). Quando o micélio se diferencia, ele se torna um corpo de frutificação (cogumelo). A representação do micélio e do corpo de frutificação é visto na Figura 7.

Figura 7. Representação das hifas, formando o micélio e o corpo de frutificação



Fonte: O autor (2024), adaptado de Kalac (2001)

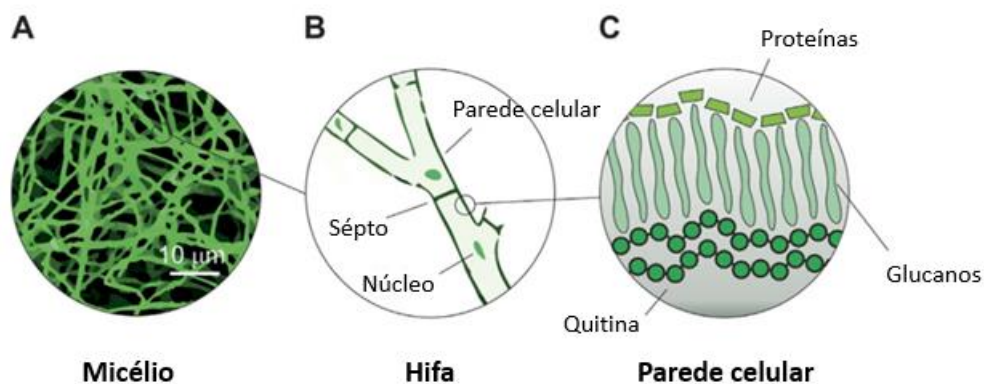
Estes microrganismos variam de organismos unicelulares simples, como leveduras, a espécies multicelulares complexas como filamentosos e basidiomicetos² (FUCK; BRANDELLI; GUTTERRES, 2018). Os **fungos filamentosos** demonstram um padrão de crescimento natural que produz uma rede quase infinita de células tubulares microscopicamente interconectadas, formando gradualmente o micélio, que constitui a extensa rede macroscópica de biomassa dos fungos (AMOBONYE et al., 2023). Os **fungos do filo basidiomiceto** são ótimos candidatos para o cultivo de materiais de micélio, pois são decompositores de resíduos orgânicos (ELSACKER et al., 2020). Eles digerem a lignocelulose dos resíduos, desenvolvendo micélios densos (RAMAN et al., 2022).

As paredes celulares fúngicas são compostas principalmente por quitina, glucano, polissacarídeos e lipídios, e contém vários grupos funcionais como aminas, carboxilas, tiois e fosfatos (FUCK; BRANDELLI; GUTTERRES, 2018; ORTIZ-MONSALVE, 2019), como é mostrado na Figura 8. As estruturas flexíveis são compostas de quitina, glucanos e glicoproteínas (RAMAN et al., 2022). Esses componentes conferem-lhes propriedades mecânicas e estruturais substanciais, que são muito procuradas na ciência dos materiais sustentáveis. Tipicamente, a parede celular das hifas consiste em uma matriz interna densamente reticulada com quitina e glucana, seguida por uma camada externa abundante em proteínas. A hipótese é que as cadeias de microfibrilas de quitina estão ligadas umas às outras através de ligações de hidrogênio intramoleculares, levando à adoção de conformações

² Uma das duas grandes divisões que constituem o subreino Dikarya dentro do reino Fungi

cristalinas. As quitinas são subseqüentemente ligadas a β -1,3-glucanos ramificados, formando um complexo mais forte que pode ainda se ligar covalentemente a outros polissacarídeos, dependendo da espécie fúngica. Em numerosos fungos, as proteínas glicosiladas dentro dos filamentos são ancoradas ao β -1,6-glucano através de uma âncora de glicosilfosfatidilinositol. Estas proteínas abrangem proteínas estruturais, proteínas envolvidas na adesão celular e enzimas responsáveis pela remodelação da parede celular. No entanto, os filamentos individuais exibem rotação e deformação em resposta à carga de campo distante, dependendo das suas propriedades elásticas, orientação e conectividade dentro da rede. Isto culmina numa resposta global multifacetada da rede (AMOBONYE et al., 2023).

Figura 8. Representação esquemática da fisiologia do micélio em diferentes escalas

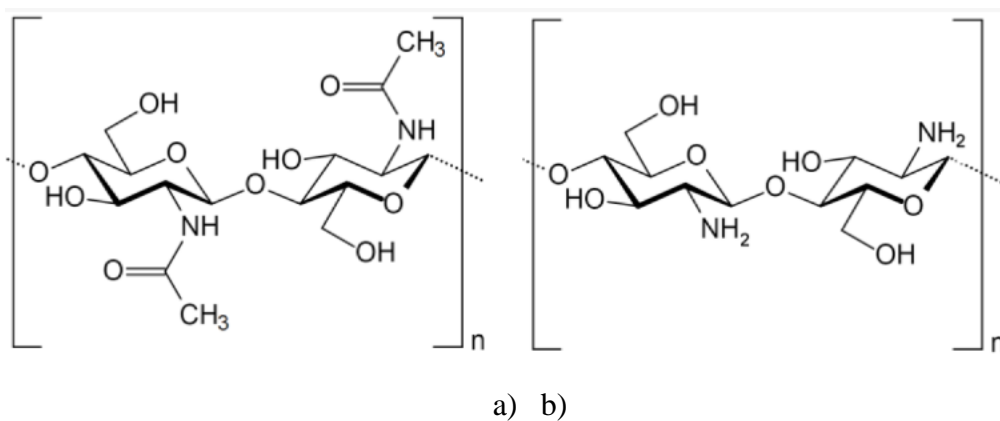


Fonte: O autor (2024), adaptado de Haneef et al. (2017)

A estrutura fibrilar polimérica da parede celular dos fungos é de grande importância para o desenvolvimento do material à base de micélio, pois dependendo dos componentes, essa estrutura será mais rígida. Os polímeros quitina e glucano são encontrados em basidiomicetos, como *Trametes versicolor* (JONES et al., 2019) e *Ganoderma lucidum* (LIU et al., 2022). A quitina é um polissacarídeo estrutural que representa a resistência física do material à base de micélio (RAMAN et al., 2022). É uma macromolécula linear composta de N-acetilglicosamina acetilada (Figura 9), que também é o principal componente do exoesqueleto da maioria dos insetos e outros artrópodes. É forte devido à ligação de hidrogênio ao longo das cadeias o que lhes confere rigidez (JONES et al., 2019). Nos cogumelos, está na forma de α -quitina (NAWAWI et al., 2020). A estrutura da quitina

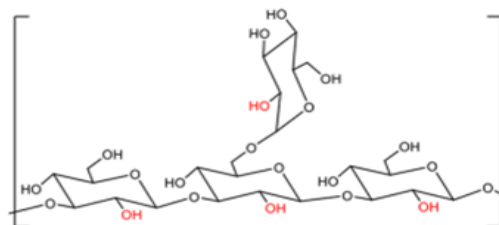
fúngica também está associada a β -glucano ou quitosana ramificada mais maleável, fornecendo uma arquitetura nativa de nanocompósito que é forte e resistente (JONES et al., 2019). Na parede celular de fungos, o glucano está associado à quitina por ligações covalentes, consistindo em ligações β -1-3 e pequeno número de ramificações limitadas por ligações β -1-6 (Figura 10) (LIU et al., 2022).

Figura 9. Estrutura da quitina (a) e quitosana (b)



Fonte:Younes e Rinaudo (2015)

Figura 10. Estrutura do glucano em fungos



Fonte: Nawawi et al. (2020)

Embora as pesquisas sobre as propriedades mecânicas e as relações estrutura-propriedade são limitadas, foi observado que o ajuste das propriedades mecânicas em materiais à base de micélio pode ser atribuído ao conteúdo variável de quitina, glucanos, e

proteínas dentro de suas paredes de hifas (AMOBONYE et al., 2023). Existe um interesse promissor, tanto nos círculos acadêmicos como na indústria, no domínio da *fungineering*³ e no avanço de materiais superiores, construindo o caminho para a transição para uma bioeconomia circular (WHABI; YU; XU, 2024), devido ao seu potencial de sustentabilidade, baixo combustibilidade, rentabilidade na produção, rápida taxa de crescimento, bem como a sua pegada de carbono comparativamente baixa (AMOBONYE et al., 2023)

No **LACOURO**, trabalhos foram desenvolvidos utilizando fungos. (ORTIZ-MONSALVE et al., 2020) realizaram o tratamento do efluente de tingimento de couros utilizando fungos. (SPIER; GUTTERRES, 2019) avaliaram o potencial de isolados nativos de cepas de fungos de biodegradar taninos vegetais utilizados na indústria de curtumes. (FUCK; BRANDELLI; GUTTERRES, 2018) extraíram corantes naturais de fungos filamentosos e utilizaram o corante para o tingimento do couro.

2.5.2 Cultivo de fungo

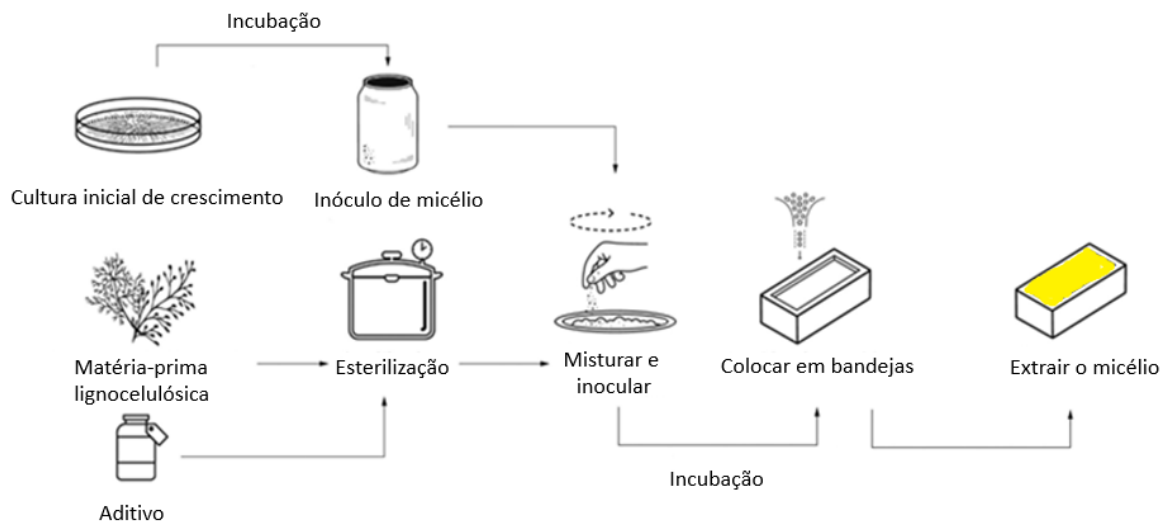
O metabolismo dos fungos é baseado em exoenzimas que produzem secreção no meio para digestão do substrato, degradando moléculas complexas em moléculas pequenas assimiláveis às organelas do fungo. O tipo de substrato, a variedade utilizada no cultivo, a técnica de cultivo, agitação, aeração, tempo de cultivo, composição do meio, temperatura e pH são fatores determinantes seu crescimento (VIANA, 2018). Os fungos precisam de uma fonte de carbono para crescer. Além do tipo de fonte de carbono, sua concentração também é um parâmetro importante. Baixas concentrações de carbono podem ser insuficientes para a ativação do sistema enzimático ligninolítico e altas concentrações de carbono podem inibir as enzimas e diminuir a biodegradação. Esses parâmetros dependem do fungo usado no tratamento (ORTIZ-MONSALVE, 2019). Uma alta concentração de carbono pode aumentar a ramificação das hifas e diminuir a taxa de extensão das hifas, aumentando assim a taxa de absorção de oxigênio (TIŠMA et al., 2021). Fontes de nitrogênio, orgânico e inorgânico, são essenciais para o crescimento dos fungos. O nitrogênio também é bastante importante na atividade de biodegradação das enzimas ligninolíticas. Em várias espécies de fungos, no entanto, altas concentrações de nitrogênio podem inibir a atividade das enzimas ligninolíticas (ORTIZ-MONSALVE, 2019).

³ Fungineering = fungi + engineering. Traduzido literalmente como engenharia dos fungos

Os **compostos lignocelulósicos** são a fonte de carbono mais comum e abundante do planeta e a maior parte desses compostos estão presentes nas plantas e na madeira (ORTIZ-MONSALVE, 2019). Os resíduos agroindustriais são formados principalmente por biomassa lignocelulósica, que representa uma importante fonte de matéria orgânica renovável e consistem principalmente de celulose, hemicelulose e lignina (RAMAN et al., 2022). Grandes quantidades de resíduos podem causar vários problemas ambientais, e considerando que o Brasil está entre os países com maior produção agrícola no mundo, há a necessidade de se estudar alternativas de uso (VIANA, 2018). A produção de fungos pode ser realizada através do seu cultivo com fermentação em estado sólido ou meio líquido (FUCK; BRANDELLI; GUTTERRES, 2018). Existem várias vantagens da **fermentação em estado sólido**, como por exemplo elevadas taxas de produtividade, estabilidade prolongada dos produtos e baixos custos de produção (HÖLKER; LENZ, 2005). Para produção do material de micélio, é possível realizar o *upcycling* de substratos de resíduos agrícolas de baixo custo (RAMAN et al., 2022). São resíduos que permanecem nos campos como subproduto das atividades pós-colheita (ROMERO-PERDOMO; GONZÁLEZ-CURBELO, 2023), como casca de milho e casca de arroz.

O protocolo geral para fermentação em estado sólido é ilustrado na Figura 11. Primeiramente ocorre o crescimento do fungo na placa de Petri e é transferido para a semente (inóculo de micélio). O fungo é misturado no substrato lignocelulósico e incubado até crescer no molde. Quando o micélio fica denso, a parte superior é removida e realizado seu pós-processamento. O substrato restante do cultivo em estado sólido pode ser aplicado na agricultura como adubo ou na alimentação animal. Como tem baixa densidade, uma alternativa é a aplicação na construção civil ou como embalagem de compósito de micélio (DANNINGER et al., 2022).

Figura 11. Fluxograma do processo mostrando o método de fabricação aplicado de compósitos e materiais à base de micélio



Fonte: O autor (2024), adaptado de Elsacker et al. (2020)

Materiais derivados de micélio são tipicamente limitados a propriedades mecânicas semelhantes a espumas e materiais naturais. A força do próprio micélio é limitada pela presença de elementos não estruturais, como citoplasma, proteínas e lipídios presentes na biomassa fúngica (JONES et al., 2019). Porém, o desempenho mecânico dos materiais à base de fungo pode ser melhorado na etapa de pós-processamento, através do tratamento do micélio com produtos químicos.

2.5.3 Pós-processamento para obtenção de material de micélio

Como visto anteriormente, é possível melhorar suas propriedades físico-químicas e mecânicas, como a natureza higroscópica, estabilidade térmica, resistência à tração e taxa de alongamento através do pós-processamento. Métodos de desacetilação, reticulação (*crosslinking*), plastificação e prensagem a quente e revestimento podem alterar as propriedades e a arquitetura do micélio (RAMAN et al., 2022), a seguir comentados:

(i) Desacetilação: Antes da reticulação, a quitina é primeiro desacetilada por imersão do material em hidróxido de sódio, ácido acético ou álcool. Esta etapa cria um grupo NH_3

carregado positivamente na quitosana que é capaz de formar ligações com grupos aldeídos em agentes de reticulação (HUDEPOL, 2023);

(ii) Reticulação (*Crosslinking*): A reticulação permite o controle de vários parâmetros importantes, incluindo resistência à tração, resistência ao rasgo, resistência à abrasão, além de várias propriedades químicas, como a fixação do corante. A reticulação também pode ajudar a determinar o quão putrescível ou estabilizado um determinado material pode ser. Ligações químicas distintamente diferentes estão disponíveis para reticulação de quitina, quando comparadas ao colágeno. Os couros são compostos de colágeno, que é um material orgânico e fibroso. O micélio, por outro lado, é composto de quitina. A quitina é um material de fibra orgânica molecularmente distinto com uma composição distinta de grupos hidroxila versus amina disponível para reticulação química (CHASE et al., 2019).

Os agentes de reticulação potenciais são ácido tânico, fenol, genipina e taninos vegetais. O ácido tânico é um polifenol que existe naturalmente em muitos tecidos de plantas aéreas. A molécula é capaz de realizar reticulação com vários tipos de interações, incluindo ligações de hidrogênio, ligações iônicas, interações π - π e interações π -cátion (CHEN et al., 2022). O micélio reticulado com ácido tânico, no entanto, não é facilmente biodegradado. A pesquisa mostra que, devido à atividade antimicrobiana de ambos os materiais, apenas algumas espécies microbianas são adequadas para a digestão dos materiais (HUDEPOL, 2023). Extratos vegetais, como taninos vegetais, realizam uma ligação dos grupos hidroxila entre os polissacarídeos e/ou quitina presentes no micélio (CHASE et al., 2019).

(iii) Plastificação. Agentes plastificantes reduzem a fragilidade de filmes de bioderivados de polissacarídeos. Os plastificantes são compostos não voláteis que são incorporados em um material para aumentar a flexibilidade. O glicerol está entre os mais comumente usados como plastificantes e é um subproduto da produção de biodiesel. Este pequeno poliálcool tem uma natureza higroscópica e aumenta a flexibilidade do biofilme aumentando o espaço entre seus polímeros (APPELS et al., 2020).

(iv) Prensagem à quente: Essa etapa pode aumentar substancialmente a resistência à tração. A prensagem a quente do micélio ocorre na faixa de 60 a 120 °C em uma prensa à quente e após é resfriado à temperatura ambiente (RAMAN et al., 2022).

(v) Revestimento (*Coating*): Por último é realizado o revestimento do material com uma camada à base de plantas ou à base de petróleo (WILLIAMS et al., 2022). O revestimento reduz a absorção de água e suaviza a superfície (RAMAN et al., 2022).

A discussão sobre o material de micélio e o couro foi realizado no Capítulo 8 como um artigo de revisão da literatura.

2.6 Problemática e Hipótese de Tese

Dado o exposto, surgiram alguns questionamentos:

1. O couro é um material biodegradável e sustentável? Os resíduos sólidos gerados podem estar inseridos dentro de uma gestão de bioeconomia circular?
2. O processamento do couro pode ser mais sustentável utilizando nanomateriais e celulose?
3. O material de micélio é uma alternativa viável de material renovável produzido a partir de resíduos?
4. Quais as diferenças e semelhanças entre o couro e o material de micélio?

A hipótese da tese é que a produção de materiais históricos ou alternativos para produtos manufaturados a partir de fontes renováveis, alinhada com inovações e processamento sustentável é viável.

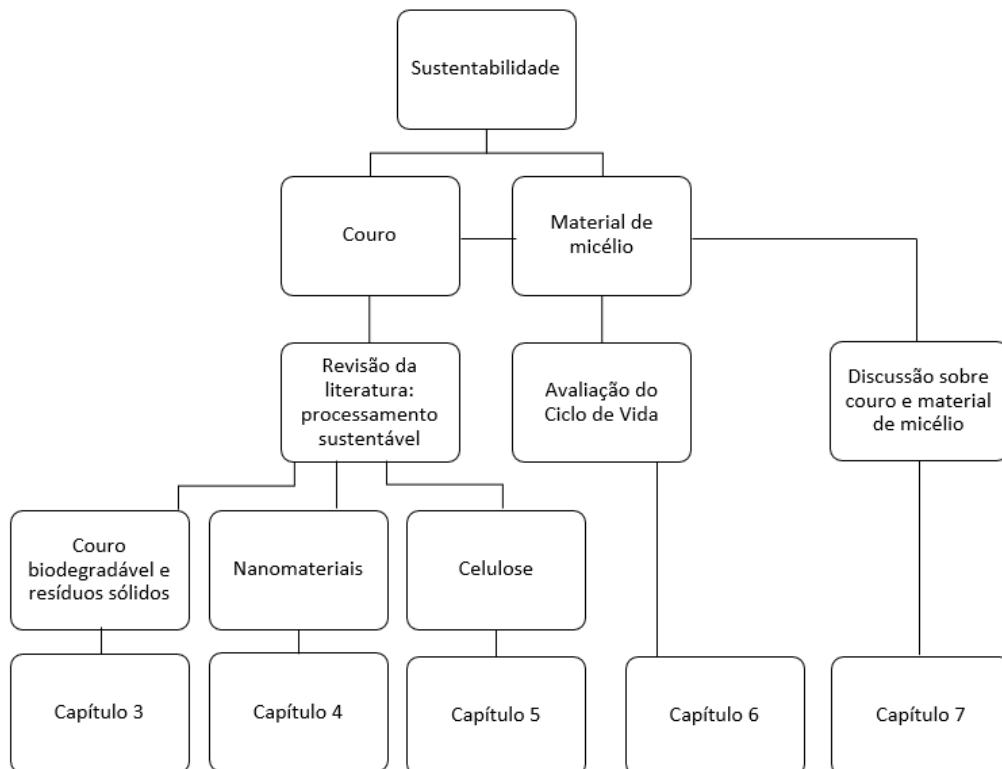
2.7 Metodologia

A presente tese consistiu no estudo de dois materiais renováveis: couro e material de micélio. Para o couro, a metodologia consistiu na revisão da literatura para o processamento mais sustentável. Iniciou-se o estudo com a produção de um couro mais biodegradável e o aproveitamento dos resíduos sólidos do processo (Capítulo 3), seguido da utilização de nanomateriais em diferentes etapas (Capítulo 4) e por fim a utilização de celulose no processamento e nos resíduos sólidos (Capítulo 5). Para o material de micélio, realizou-se a

Avaliação do Ciclo de Vida para identificar o potencial impacto ambiental (Capítulo 6). Por fim, uma discussão sobre o couro e o material de micélio (Capítulo 7).

O Esquema 1 apresenta as etapas do desenvolvimento do trabalho e os respectivos artigos gerados. Os resultados desta tese estão apresentados no formato de integração por artigos. Mais detalhes serão fornecidos na sequência dos capítulos.

Esquema 1. Representação da apresentação da metodologia do trabalho



Capítulo 3

Capítulo de livro 1 - Biodegradation of tannery solid wastes

Autores: Victória Vieira Kopp, Mariliz Gutterres, João Henrique Zimnoch dos Santos

Abstract:

Leather is a unique material that shows excellent vapor permeability, strength, thermal stability, and hydrothermal stability. However, leather manufacturing produces a substantial amount of solid waste that severely impacts the environment. The production of a more biodegradable leather is way to make leather amenable to easy disposal. Since metal-free tanning has limited applications compared to those for chrome tanned leather, alternative tanning agents are used, such as dialdehyde polysaccharides, amino acids and titanium salts. Likewise, biodegradable products are used during leather production for a cleaner process. In addition, it is important to reduce the waste generated by the leather industry. Solid wastes are commonly disposed of in landfill sites. However, solid wastes from tanneries can be turned into valuable biodegradable products after different treatments. From untanned and tanned wastes, biodegradable films were developed for use in packaging applications. Also, biodegradation treatment technologies can generate value-added products, as biogas and fertilizer.

Keywords: Leather, solid waste, tannery waste, biodegradable wastes.

Capítulo 4

Artigo 1 - Nanomaterials to help eco-friendly leather processing

Autores: Victória Vieira Kopp, Caroline Borges Agustini, Mariliz Gutterres, João Henrique Zimnoch dos Santos

DOI: 10.1007/s11356-021-16216-z

Abstract:

The leather industry converts the hide, a byproduct of slaughterhouses, into leather, a value-added product. This old industry generates wastes, causing environmental pollution. However, nanomaterials can help to decrease this problem. These tiny particles (1–100 nm) can replace chemicals in various steps of leather processing. This paper aims at giving an overview of the fundamentals of classical leather process and how nanomaterials can be applied in each step to obtain a more sustainable manufacturing. After a comprehensive literature review of journal articles, six steps were identified for potential for application of nanomaterials: unhairing, tanning, retanning, dyeing, fatliquoring, and finishing. With nano-oxides, polymers, and metals, it is feasible to reduce the amount of chemical products and also improve the properties of leather. Thus, it is possible to reach a more eco-friendly and effective process with the use of nanomaterials to turn hide/skins into finished leather.

Keywords Leather industry; Nanomaterials; Eco-friendly; Sustainability; Clean technology.

Capítulo 5

Capítulo de livro 2 - Application of Cellulose in Leather

Autores: Victória Vieira Kopp, Vânia Queiroz, Mariliz Gutterres, João Henrique Zimnoch dos Santos

DOI: 10.1201/9781003358084-19

Abstract:

Leather has a significant impact on the world's economy. Leather manufacturing involves a chemical process applied to a biological matrix that uses a huge quantity of chemicals and generates large amounts of residue. Cellulose, a sustainable and renewable product, can be used during leather production in three different steps, which are tanning, retanning, and finishing. In tanning, cellulose helps with the penetration of metals into the hide matrix contributing to the fiber's stability and improving the tanning performance. In retanning, the use of cellulose improves the physical and aesthetic properties of leather. Meanwhile, in finishing, cellulose is mixed with other chemicals to obtain better leather, without compromising the aesthetic properties. The leather processing generates solid waste during the operation of adjusting the thickness of the leather or lowering it. Cellulose can be added to these wastes to obtain value-added products. They are used in different areas, such as agriculture and packaging.

Capítulo 6

Artigo 2 - Life Cycle Assessment of mycelium biotextile: case study

Autores: Victória Vieira Kopp, Diego Alexis Ramos, Antonio Carlos de Francisco, João Henrique Zimnoch dos Santos e Mariliz Gutterres

Abstract

This study performs a life cycle assessment (LCA) of mycelium biotextiles, focusing on a case study to evaluate their environmental impacts compared to conventional materials such as synthetic textiles and leather. The assessment follows the Brazilian Technical Standards Association (ABNT) NBR ISO 14040 and 14044 standards, utilizing primary data collected from pilot-scale production operations. Two scenarios were analyzed: one representing standard pilot-scale operations and another incorporating improvements to reduce environmental impacts. The analysis identifies five key production stages: substrate preparation, seed preparation, mycelium inoculation, sheet extraction, and sheet treatment, while also highlighting opportunities for environmental improvements at each stage. The results show that mycelium biotextiles have a carbon footprint of 7.86 kg CO₂-eq/m² for the improved scenario, significantly lower than the 57.15 kg CO₂-eq/m² reported for mycelium leather-like material in an Indonesian case study. The findings suggest that mycelium biotextiles not only provide a sustainable alternative to conventional materials but also contribute to a circular bioeconomy by utilizing agricultural waste, reducing dependence on petrochemical resources, and offering biodegradable solutions. This study emphasizes the need for further comparative LCA research and encourages stakeholders in the textile industry to adopt mycelium-based materials to enhance sustainability and foster innovation.

Keywords: Mycelium; Mycelium biotextile; Sustainable materials; Carbon footprint; Life cycle assessment.

Capítulo 7

Artigo 3 - Leather and Mycelium Biotextile in Discussion

Autores: Victória Vieira Kopp, Mariliz Gutterres e João Henrique Zimnoch dos Santos

Abstract:

The adoption of renewable materials represents a significant step towards a circular and sustainable economy, aligning with the Sustainable Development Goals and promoting more responsible and conscious practices in the fashion industry. Leather, used for thousands of years, faces challenges related to the sustainability of its production process. Mycelium-based leather, a new-generation material, is generating interest. This study aims to investigate the potential and limitations of these materials, regarding the main characteristics of each material, their processing methods, and their environmental impacts. Leather is valued for its strength, elasticity, and durability, offering comfort, luxury, and long-lasting performance. Mycelium biotextile, while promising for sustainable applications, is still being studied for its long-term durability and performance in high-stress environments. Although leather outperforms mycelium in mechanical properties, mycelium offers advantages in chemical use, water consumption, and land requirements, positioning it as a viable alternative for eco-friendly materials with potential for improvement through further research.

Keywords: leather; mycelium biotextile; renewable materials.

Capítulo 8

Conclusões

Esta tese de doutorado investigou as potencialidades e limitações de dois materiais renováveis: o couro, um material histórico, e o material de micélio, um material da próxima geração. Apesar das diferentes gerações, são materiais com o mesmo intuito de uso em produtos manufaturados como calçados, bolsas, vestuário e estofamentos moveleiros e automotivos. Embora o couro seja um material derivado da pele animal, que é um material natural e de base biológica, o processo de curtimento altera suas propriedades químicas, dificultando a biodegradação. No entanto, o uso de agentes de curtimento alternativos e biodegradáveis, como aminoácidos e substâncias naturais, pode melhorar a biodegradabilidade do couro, contribuindo para um ciclo de vida mais sustentável.

Os resíduos sólidos derivados do processamento podem ser tratados biologicamente, por meio de compostagem ou digestão anaeróbica, resultando em produtos como fertilizantes e biogás, além de reduzir o volume de resíduos. Uma alternativa para esses resíduos, após a remoção do cromo, é como fonte de materiais biodegradáveis para aplicações em filmes de gelatina, bioplásticos e fertilizantes ecológicos. No processamento do couro, o uso de nanomateriais oferece uma solução inovadora para tornar a o processamento mais sustentável. A aplicação desses materiais em etapas como depilação, curtimento, recurtimento, tingimento, engraxe e acabamento pode reduzir o uso de produtos químicos, melhorar as propriedades do couro e diminuir os impactos ambientais, contribuindo para um processo mais ecológico e eficiente. Uma alternativa é a celulose, uma matéria-prima renovável, podendo ser aplicada nas etapas de curtimento, recurtimento e acabamento. Assim, é possível substituir produtos químicos e transformar os resíduos sólidos gerados durante o processo em compósitos de valor agregado, com diversas aplicações. Assim, a celulose contribui para minimizar os impactos ambientais da indústria do couro.

O material de micélio, por sua vez, apresenta-se como uma alternativa promissora, especialmente para consumidores que buscam produtos veganos. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) desse material revelou que a categoria de impacto ambiental de mudança climática – fóssil é a mais significativa, devido aos processos intensivos em energia. A etapa de pós-tratamento impacta todas as categorias analisadas, destacando a necessidade de

melhorias para reduzir a pegada ambiental. Com uma pegada de carbono de 7,86 kg CO₂-eq/m², o material de micélio demonstra potencial para promover a sustentabilidade na indústria têxtil. Este estudo ressalta a importância de mais pesquisas comparativas de ACV e incentiva a adoção de materiais à base de micélio para impulsionar a inovação e a sustentabilidade.

Por fim, foram analisadas as principais características do couro e do material de micélio, seus métodos de processamento e impactos ambientais. O couro é valorizado por sua durabilidade, conforto e luxo, mas seu processamento gera um impacto ambiental considerável. O micélio, por sua vez, se destaca como uma alternativa promissora para aplicações sustentáveis, com um menor impacto ambiental, especialmente com relação ao consumo de água, ao uso de produtos químicos e requisitos de terra. Embora o couro tenha vantagens em propriedades mecânicas, o micélio apresenta um grande potencial ecológico e pode ser aprimorado com mais pesquisas.

Em suma, esta tese de doutorado argumenta que tanto para couro como para material de micélio, ambos materiais renováveis, processamento mais sustentável é viável.

Referências

- ABNT. ABNT ISO/TR 14062 Gestão ambiental - Integração de aspectos ambientais no projeto e desenvolvimento do produto. . 2004.
- ABNT. NBRISO14040 DE 05/2009 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. . 2009.
- ABNT. NBRISO14044 DE 05/2009 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. . 2014.
- AGÊNCIA DO SENADO. **Aprovada urgência para projeto da Política Nacional de Economia Circular.** Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/03/12/aprovada-urgencia-para-projeto-da-politica-nacional-de-economia-circular>>. Acesso em: 13 jun. 2024.
- AGUSTINI, C. B.; DA COSTA, M.; GUTTERRES, M. Biogas from Tannery Solid Waste Anaerobic Digestion Is Driven by the Association of the Bacterial Order Bacteroidales and Archaeal Family Methanosaetaceae. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 192, n. 2, p. 482–493, 1 out. 2020.
- AMOBONYE, A. et al. Fungal mycelium as leather alternative: A sustainable biogenic material for the fashion industry. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 38, p. e00724, 1 dez. 2023.
- ANDERSSON, S. et al. Sustainable development—Direct and indirect effects between economic, social, and environmental dimensions in business practices. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 29, n. 5, p. 1158–1172, 2022.
- APPELS, F. V. W. et al. Fungal mycelium classified in different material families based on glycerol treatment. **Communications Biology**, v. 3, n. 1, p. 1–5, 26 jun. 2020.
- BARCELOS, S. M. B. D. et al. Introductory background for Life Cycle Assessment (LCA) of pure silk fabric. **Independent Journal of Management & Production**, v. 4, n. 1, p. 170–187, 30 jun. 2013.
- BIRNER, R. Bioeconomy Concepts. Em: LEWANDOWSKI, I. (Ed.). **Bioeconomy: Shaping the Transition to a Sustainable, Biobased Economy**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 17–38.
- BRUNDTLAND GH, et al. **Our common future ; by world commission on environment and development.** [s.l.] Oxford: Oxford University Press., 1987.
- CARUS, M.; DAMMER, L. The Circular Bioeconomy—Concepts, Opportunities, and Limitations. **Industrial Biotechnology**, v. 14, n. 2, p. 83–91, abr. 2018.
- CHASE, J. et al. **Deacetylation and crosslinking of chitin and chitosan in fungal materials and their composites for tunable properties.** , 19 set. 2019. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/WO2019178406A1/en>>. Acesso em: 13 jun. 2024
- CHEN, C. et al. Tannic acid: a crosslinker leading to versatile functional polymeric networks: a review. **RSC Advances**, v. 12, n. 13, p. 7689–7711, 2022.
- CHINA, C. R. et al. Alternative tanning technologies and their suitability in curbing environmental pollution from the leather industry: A comprehensive review. **Chemosphere**, v. 254, p. 126804, set. 2020.
- COLLET, C. Biotextiles: Evolving Textile Design Practices for the Bioeconomy and the Emerging Organism Industry. Em: **SOFT LANDING**. [s.l: s.n.].
- CTIQ. **Boas práticas para o setor de curtumes.** [s.l: s.n.].
- DA LUZ, L. M. **Integração Da Avaliação Do Ciclo De Vida Ao Processo De Desenvolvimento De Produto: Uma Proposta Metodológica.** [s.l.] Universidade Técnica Federal do Paraná, 2017.

DANNINGER, D. et al. MycelioTronics: Fungal mycelium skin for sustainable electronics. **Science Advances**, v. 8, n. 45, p. eadd7118, 11 nov. 2022.

DANTAS, T. E. T. **Desenvolvimento de um método para a avaliação integrada da circularidade e impactos econômico-ambientais do ciclo de vida de organizações**. Centro Tecnológico Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Ambiental: Universidade Federal De Santa Catarina, 2023.

DE CASTRO BIZERRA, V. et al. Opportunities for cleaner leather processing based on protease enzyme: Current evidence from an advanced bibliometric analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 191, p. 114162, 1 mar. 2024.

DE SOUZA, F. DA R. et al. Extraction of keratin from unhairing of bovine hide. **Chemical Engineering Communications**, v. 209, n. 1, p. 118–126, 2 jan. 2022.

DENG, L. et al. Recent advances in circular bioeconomy based clean technologies for sustainable environment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 46, p. 102534, 1 abr. 2022.

ELKINGTON, J. **Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business**. [s.l.] New Society Publishers, 1998.

ELSACKER, E. et al. A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. **Science of The Total Environment**, v. 725, p. 138431, 10 jul. 2020.

FUCK, W.; BRANDELLI, A.; GUTTERRES, M. Special review paper: Leather dyeing with biodyes from filamentous fungi. **Journal of the American Leather Chemists Association**, v. 113, p. 299–310, 2018.

GRAND VIEW RESEARCH. **Leather Goods Market Size, Share & Trends Analysis Report**. Grand View Research. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/leather-goods--market>>. Acesso em: 16 jun. 2024.

HANEEF, M. et al. Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 41292, 24 jan. 2017.

HANSEN, É. et al. Impact of post-tanning chemicals on the pollution load of tannery wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 269, p. 110787, 1 set. 2020.

HÖLKER, U.; LENZ, J. Solid-state fermentation — are there any biotechnological advantages? **Current Opinion in Microbiology**, Ecology and industrial microbiology/Edited by Sergio Sánchez and Betty Olson · Techniques/Edited by Peter J Peters and Joel Swanson. v. 8, n. 3, p. 301–306, 1 jun. 2005.

HUARACHI, D. A. et al. Life Cycle Thinking for a Circular Bioeconomy: Current Development, Challenges, and Future Perspectives. **Sustainability**, v. 15, n. 11, p. 8543, jan. 2023.

HUDEPOL, N. **Processing of mycelium leather: the search to a fully biodegradable leather-alternative**. Master Thesis—[s.l.: s.n.].

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**. Disponível em: <<https://antigo.ibict.br/informacao-para-a-sociedade/avaliacao-do-ciclo-de-vida-acv>>. Acesso em: 13 jun. 2024.

JACOB-LOPES, E.; COSTA DEPRÁ, M.; QUEIROZ ZEPKA, L. **Sustainability Metrics and Indicators of Environmental Impact**. [s.l.] Elsevier, 2021.

JONES, M. et al. Waste-Derived Low-Cost Mycelium Nanopapers with Tunable Mechanical and Surface Properties. **Biomacromolecules**, v. 20, n. 9, p. 3513–3523, 9 set. 2019.

JONES, M. et al. Leather-like material biofabrication using fungi. **Nature Sustainability**, v. 4, n. 1, p. 9–16, jan. 2021.

KALACĀ, P. A review of edible mushroom radioactivity. **Food Chemistry**, v. 75, n. 1, p. 29–35, 1 out. 2001.

KAVANAGH, K. **Fungi: Biology and Applications**. 3rd. ed. [s.l: s.n.].

KHAMBHATY, Y. Applications of enzymes in leather processing. **Environmental Chemistry Letters**, v. 18, n. 3, p. 747–769, 1 maio 2020.

LIU, Y. et al. Characterization of Chitin-Glucan Complex of Ganoderma lucidum Extract and Its Application as Hemostatic Hydrogel. **Waste and Biomass Valorization**, v. 13, n. 7, p. 3297–3308, 1 jul. 2022.

LTDA, T. E. E C. **ABNT ISO/TR 14062 ABNT ISO/TR14062 Gestão ambiental - Integração de**. Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/38655/abnt-iso-tr14062-gestao-ambiental-integracao-de-aspectos-ambientais-no-projeto-e-desenvolvimento-do-produto>>. Acesso em: 13 jun. 2024.

MATERIAL INNOVATION INITIATIVE. **2023 State of the Industry Report: Next-Gen Materials**. Disponível em: <<https://materialinnovation.org/reports/2023-state-of-the-industry-report-next-gen-materials/>>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MATTHEW, H. S.; T. HENDRICKSON, C.; MATTHEWS, D. **Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions that Matter**. [s.l: s.n.].

MELLA, B. et al. Preparation and characterization of activated carbon produced from tannery solid waste applied for tannery wastewater treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 7, p. 6811–6817, 1 mar. 2019.

MEYER, M. et al. Comparison of the Technical Performance of Leather, Artificial Leather, and Trendy Alternatives. **Coatings**, v. 11, n. 2, p. 226, fev. 2021.

MEYER, R. Bioeconomy Strategies: Contexts, Visions, Guiding Implementation Principles and Resulting Debates. **Sustainability**, v. 9, n. 6, p. 1031, 2017.

MEYER, V. et al. Growing a circular economy with fungal biotechnology: a white paper. **Fungal Biology and Biotechnology**, v. 7, n. 1, p. 5, 2 abr. 2020.

MOKTADIR, MD. A. et al. Circular economy practices in the leather industry: A practical step towards sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119737, 1 abr. 2020.

NAWAWI, W. M. F. B. W. et al. Nanomaterials Derived from Fungal Sources—Is It the New Hype? 2020.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 13 jun. 2024.

ORTIZ-MONSALVE, S. **Micorremediação de efluentes de tingimento de couro usando cepas de fungos nativos**. [s.l: s.n.].

ORTIZ-MONSALVE, S. O. et al. **Degradation of a Leather-Dye by the Combination of Depolymerised Wood-Chip Biochar Adsorption and Solid-State Fermentation with Trametes Villosa SCS-10**, 7 out. 2020. Disponível em: <<https://www.researchsquare.com/article/rs-85912/v1>>. Acesso em: 13 jun. 2024

PAN, H. et al. Synergistic effects of hydrophilic nano-SiO₂/graphene oxide @ copolymer nanocomposites in tanning leather. **Advanced Powder Technology**, v. 31, n. 9, p. 3910–3920, 1 set. 2020.

PINHEIRO, N. S.; PEREZ-LOPEZ, O. W.; GUTTERRES, M. Solid leather wastes as adsorbents for cationic and anionic dye removal. **Environmental Technology**, v. 43, n. 9, p. 1285–1293, 16 abr. 2022.

QUA, F. J. S. (FRANCES J. S. (Im)Material : a qualitative study on sustainable materials for design through a comparative review of leather and its modern alternatives. Thesis—[s.l.] Massachusetts Institute of Technology, 2019.

RAMAN, J. et al. Mycofabrication of Mycelium-Based Leather from Brown-Rot Fungi. **Journal of Fungi**, v. 8, n. 3, p. 317, mar. 2022.

ROMERO-PERDOMO, F.; GONZÁLEZ-CURBELO, M. Á. Integrating Multi-Criteria Techniques in Life-Cycle Tools for the Circular Bioeconomy Transition of Agri-Food Waste Biomass: A Systematic Review. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 5026, 12 mar. 2023.

SALVADOR, R. et al. Life Cycle Assessment (LCA) as a tool for business strategy. **Independent Journal of Management & Production**, v. 5, n. 3, p. 733–751, 1 set. 2014.

SALVADOR, R. et al. Key aspects for designing business models for a circular bioeconomy. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 124341, 1 jan. 2021.

SCHALTEGGER, S.; HÖRISCH, J.; FREEMAN, R. E. Business Cases for Sustainability: A Stakeholder Theory Perspective. **Organization & Environment**, v. 32, n. 3, p. 191–212, 1 set. 2019.

SILVA, M. R. DA et al. Preparation of Polyols and Polyurethane Foams from Olein By-Product of Tanning Industry. **Journal of the American Leather Chemists Association**, v. 117, n. 11, p. 489–497, 1 nov. 2022.

SIMIONI, T. et al. Enhancement of biogas production by anaerobic co-digestion of leather waste with raw and pretreated wheat straw. **Energy**, v. 253, p. 124051, 15 ago. 2022.

SIVAKUMAR, V.; MOHAN, R.; MURALIDHARAN, C. Alternative methods for Salt free / Less salt short term preservation of hides and skins in leather making for sustainable development – A review. **Textile & Leather Review**, v. 2, n. 1, p. 46–52, 8 mar. 2019.

SMIT & ZOON. **Is leather renewable? | Renewability of Leather**. Disponível em: <<https://www.smitzoon.com/en/knowledge/renewability-of-leather/>>. Acesso em: 16 jun. 2024a.

SMIT & ZOON, T. **Renewable materials - Whitepaper**. Disponível em: <<https://www.smitzoon.com/en/knowledge/whitepaper-renewability-of-materials-in-the-leather-value-chain/>>. Acesso em: 16 jun. 2024b.

SPIER, F.; GUTTERRES, M. Biodegradation Of Acacia And Chestnut Tannins By Native Isolates Of The Genus Penicillium And Aspergillus. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 36, p. 753–761, 1 jun. 2019.

TISMA, M. et al. Trametes versicolor in lignocellulose-based bioeconomy: State of the art, challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 330, p. 124997, 1 jun. 2021.

UNEP. **Greening the Economy Through Life Cycle Thinking**. , 2012. Disponível em: <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2013/03/2012_LCI_10_years_28.3.13.pdf>

UNEP. **The Business Case For Life Cycle Thinking**. , 2019. Disponível em: <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2019/03/unep_nairobi_V7-LR.pdf>

VIANA, S. R. F. [UNESP. **Influência de diferentes condições de preparo do spawn na capacidade de aumento de produtividade de Pleurotus ostreatus**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2018.

VOLK, R. et al. Life cycle assessment of mycelium-based composite materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 205, p. 107579, 1 jun. 2024.

WAGH, M. S. et al. Valorisation of agro-industrial wastes: Circular bioeconomy and biorefinery process – A sustainable symphony. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 183, p. 708–725, 1 mar. 2024.

WHABI, V.; YU, B.; XU, J. From Nature to Design: Tailoring Pure Mycelial Materials for the Needs of Tomorrow. **Journal of Fungi**, v. 10, n. 3, p. 183, mar. 2024.

WIJAYARATHNA, E. R. K. B. et al. Fungal textile alternatives from bread waste with leather-like properties. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 179, p. 106041, 1 abr. 2022.

WILLIAMS, E. et al. Life cycle assessment of MycoWorks’ Reishi™: the first low-carbon and biodegradable alternative leather. **Environmental Sciences Europe**, v. 34, n. 1, p. 120, 20 dez. 2022.

YORGANCIOGLU, A.; BAYRAMOGLU, E.; RENNER, M. Preparation of Antibacterial Fatliquoring Agents Containing Zinc Oxide Nanoparticles for Leather Industry. **Journal of the American Leather Chemists Association**, v. 114, n. 5, 1 jan. 2019.

YOUNES, I.; RINAUDO, M. Chitin and Chitosan Preparation from Marine Sources. Structure, Properties and Applications. **Marine Drugs**, v. 13, n. 3, p. 1133–1174, 2 mar. 2015.