

## **AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS PARA BOTAS FEMININAS DE COURO SINTÉTICO**

**TAILISE MASCARENHAS MARTINS**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS (UFSCAR)

**NATÁLIA RODRIGUES DE CARVALHO**

**LEANDRO DE OLIVEIRA SILVA**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS (UFSCAR)

**LILIANE RODRIGUES DE CAMARGO**

**YOVANA MARIA BARRERA SAAVEDRA**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS (UFSCAR)

### **Agradecimento à órgão de fomento:**

Agradecimento à Capes que fornece bolsa a duas estudantes de doutorado que são autoras do artigo.

## 1. INTRODUÇÃO

A Associação Brasileira das Indústrias de Calçados (Abicalçados) citou em 2023 que o Brasil produziu cerca de 865,6 milhões pares de calçados, firmando sua posição como um dos principais produtores mundiais (Abicalçados, 2024). Diante disso, o autor Bertoldo (2022) ressalta que este crescimento, estimulado pelo consumo demasiado e considerando ainda a redução da vida útil dos produtos, os impactos ambientais da indústria calçadista tem se agravado. Sendo que, a fabricação de calçados envolve uma variedade de materiais que demandam recursos naturais significativos, como fibras sintéticas, algodão, produtos químicos e borracha e geram resíduos e emissões preocupantes.

Entre esses materiais, destaca-se o couro sintético, uma alternativa ao couro animal geralmente produzida a partir de polímeros como poliuretano (PU) e PVC. Segundo Muthu (2013) sua produção é baseada em fontes fósseis e apresenta baixa biodegradabilidade, contribuindo para a geração de resíduos sólidos, micro plásticos e compostos tóxicos, demonstrando, portanto, um desafio relevante do ponto de vista ambiental, principalmente no descarte e na durabilidade.

Estudos apontam que processos baseados em economia circular e materiais reciclados oferecem oportunidades para reduzir os impactos ambientais dos materiais utilizados na produção de calçados (PANTAZI-BĂJENARU, M. et al. 2023). Além disso, pesquisas recentes destacam o potencial de materiais sustentáveis, como compósitos de celulose, que apresentam propriedades semelhantes às do couro animal, além de maior permeabilidade e menor impacto ambiental (CHANGHYUN NAM e YOUNG-A LEE, 2019). Grand View Research (2024) afirma que o mercado de calçados sustentáveis, estimado em US\$ 8,46 bilhões em 2023, tende a crescer impulsionado pela demanda por produtos mais ecológicos.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo a análise e propostas de melhoria ambiental de botas femininas produzidas com couro sintético e propor melhorias sustentáveis, com destaque para a substituição desse material por alternativas de menor impacto ambiental.

## 2. METODOLOGIA

A presente pesquisa é de natureza qualitativa e exploratória. E sua metodologia baseia-se na aplicação parcial do Guia de Melhoramento de Produtos de McAloone e Bey (2013), que possui uma estrutura metodológica orientando o redesenho de produtos sob a ótica ambiental. Adicionalmente, utilizam-se informações identificadas na literatura, que em seguida são organizadas com base em três principais ferramentas metodológicas: a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a Matriz de Melhoria da Qualidade Ambiental (MEQO) e a avaliação de critérios de sustentabilidade.

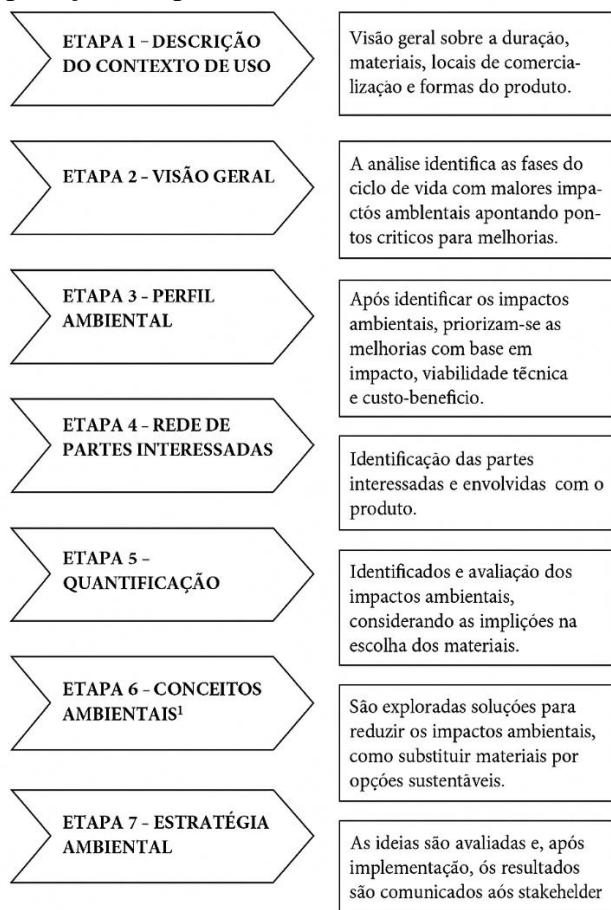
A aplicação do Guia de Melhoramento de Produtos, proposto por McAloone e Bey (2013), serviu como abordagem central para estruturar o processo de ecodesign, orientando a identificação de melhorias ambientais viáveis a partir de critérios como impacto ambiental, custo-benefício e viabilidade técnica, conforme ilustrado na Figura 1.

Como ferramenta complementar, foi empregada a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme as diretrizes de Guinée (2002) e Fava et al. (1991), permitindo mensurar e comparar os impactos ambientais associados às diferentes fases do ciclo de vida do produto. Essa abordagem possibilitou mapear pontos críticos tanto nas botas de couro sintético quanto nas alternativas sustentáveis avaliadas.

Adicionalmente, a Matriz de Melhoria da Qualidade Ambiental do Produto (MEQO), proposta por Tischner et al. (2000), foi utilizada para apoiar a identificação sistemática de aspectos ambientais prioritários e para orientar sugestões de melhoria ao longo do ciclo de vida do produto.

Por fim, a avaliação de critérios de sustentabilidade foi estruturada com base nas diretrizes de Seuring e Müller (2008), que defendem a integração dos aspectos ambientais, sociais e econômicos no processo de tomada de decisão sobre produtos sustentáveis. O uso combinado dessas ferramentas forneceu uma base sólida para a proposição de estratégias de melhoria ambiental, alinhadas aos princípios da economia circular e ao desenvolvimento de produtos mais sustentáveis.

FIGURA 1 - Etapas de aplicação dos passos escolhidos do Guia de McAloone e Bey (2013)



Fonte: Elaborado pelos autores, com base no guia de McAloone e Bey (2013)

### 3. ANÁLISE E RESULTADOS DA APLICAÇÃO PARCIAL DO GUIA DE MELHORAMENTO DE PRODUTOS

Seguindo as etapas do guia desenvolvido por McAloone e Bey (2013) inicialmente na **etapa 1- descrição do contexto de uso**: a escolha de botas femininas de cano alto com couro sintético se baseou em sua popularidade entre mulheres adultas brasileiras, especialmente em regiões de clima frio, combinando conforto, funcionalidade e estilo. Com uma vida útil média de dois anos, o produto atende às expectativas de durabilidade e uso cotidiano estabelecidos pelos autores para análise.

Na **etapa 2- visão geral**: Observou-se que, ao longo do ciclo de vida do produto, diversos impactos ambientais foram identificados. Na fase de produção, destacam-se os processos relacionados ao couro sintético, como o uso de colas, cura, tingimento e empacotamento, os quais envolvem produtos químicos e elevado consumo de água (MUTHU, 2013; NAVARRO et al., 2020). Durante o transporte, as emissões de poluentes também são significativas, especialmente considerando as longas distâncias percorridas no Brasil

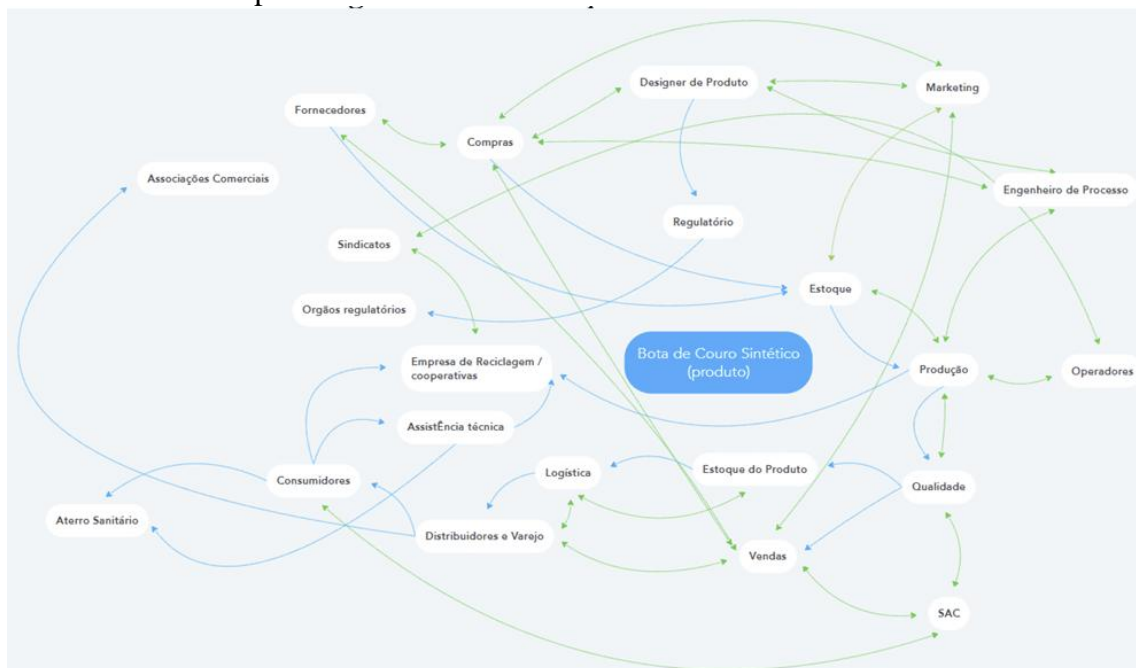
(GOTTFRIDSSON; ZHANG, 2015). Já na fase de uso, o consumo de energia associado à lavagem e secagem artificial se torna um ponto crítico. Por fim, no momento do descarte, os impactos incluem a decomposição lenta em aterros e a liberação de micro plásticos (WILFORD, 1997; GOTTFRIDSSON; ZHANG, 2015).

Nesse contexto, na **etapa 3- perfil ambiental** os resultados da aplicação da Matriz MEQO (Matriz de Melhoria da Qualidade Ambiental do Produto) proposta por Tischner et al. (2000), foram essenciais para avaliar e priorizar ações que otimizem a qualidade ambiental ao longo do ciclo de vida do produto. Neste estudo foi possível analisar que são originados do uso de matérias-primas e produtos químicos na produção, além da grande geração de gás carbono no processo de transporte do produto para distribuição.

Na **etapa 4- rede de partes interessadas** os autores Seuring e Müller (2008) apontam a gestão colaborativa da cadeia de suprimentos, com foco em fornecedores e padrões de sustentabilidade, como fundamental para gestão sustentável. A Figura 2 ilustra essa complexa rede de interações, destacando fluxos de recursos, informações e responsabilidades ambientais.

Além disso, os consumidores têm se mostrado cada vez mais exigentes quanto à origem, descarte e informações transparentes, valorizando atributos sustentáveis (THØGERSEN, 2006).

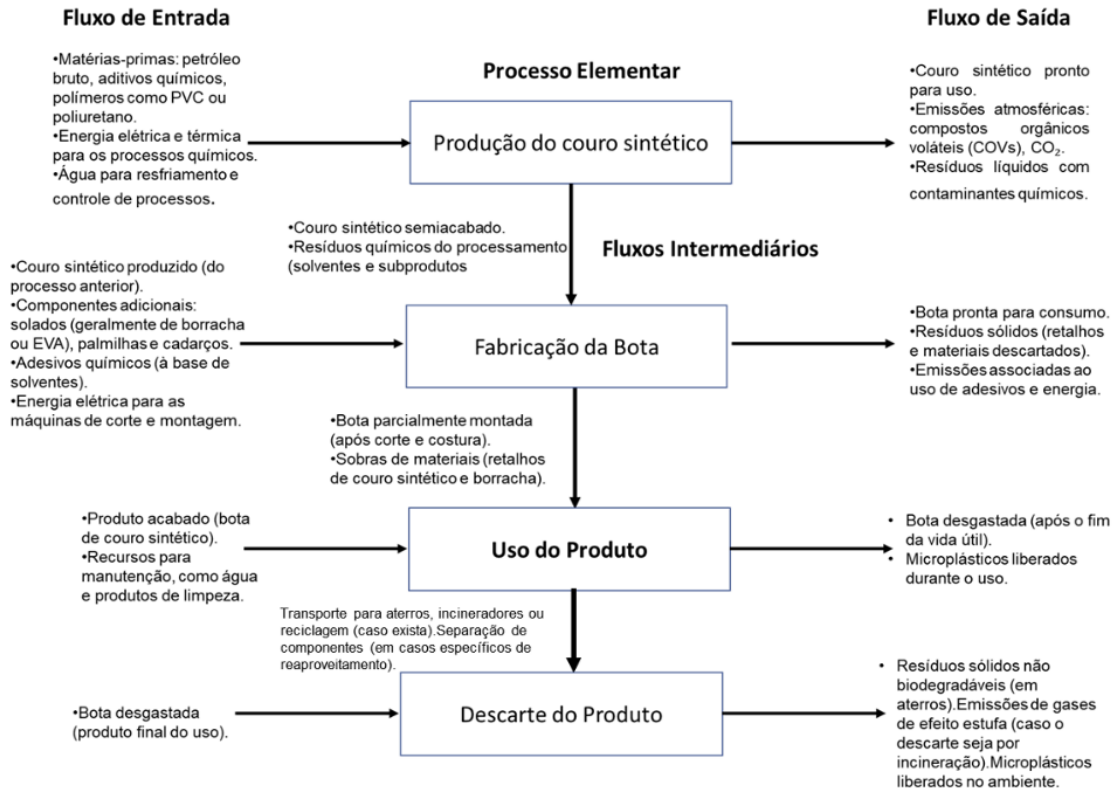
FIGURA 2 - Rede de partes interessadas



Fonte: Elaborado pelos autores

Já na **etapa 5- quantificação** dos impactos os resultados foram obtidos a partir de trabalhos que usaram ACV para quantificar os impactos de calçado sintético (GUNDOGAN, 2020; NAVARRO et al., 2020; GHIMOUZ; KENNÉ; HOF, 2023; GOTTFRIDSSON; ZHANG, 2015). A Figura 2 a seguir demonstra o sistema de produto da bota de couro sintético feita por meio de informações da análise bibliográfica.

FIGURA 2 - Sistema de produto para ACV da bota de couro sintético



Fonte: Elaborado pelos autores com base em GUNDOGAN, 2020; NAVARRO et al., 2020; GHIMOUZ; KENNÉ; HOF, 2023; GOTTFRIDSSON; ZHANG, 2015.

Dentre os principais impactos observados na produção de couro sintético, destacam-se o uso intensivo de recursos não renováveis, como polímeros derivados do petróleo, a emissão de compostos orgânicos voláteis (COVs) e o emprego de substâncias de baixa biodegradabilidade, que retardam a decomposição e liberam micro plásticos em aterros. Além disso, a fabricação desse material demanda elevados volumes de água e energia, ampliando sua pegada ambiental (GUNDOGAN, 2021; HILDEBRANDT et al., 2021; NAVARRO et al., 2020; PANTAZI-BĂJENARU et al., 2023). Os impactos foram sistematizados no Quadro 1, de modo a oferecer uma visão consolidada das evidências encontradas na literatura.

QUADRO 1 - Impactos ambientais do couro sintético

Impacto Ambiental	Descrição	Autor(es)
Consumo de recursos não renováveis	Uso de polímeros derivados de petróleo, como poliuretano e o PVC.	Gundogan (2021), Hildebrandt et. al.
Emissão de compostos orgânicos voláteis	Emissões durante o processo de cura, tingimento e fabricação.	Gundogan (2021), Pantazi-Bájenaru et. al. (2023).
Baixa biodegradabilidade	Lenta decomposição em aterros, contribuindo para acúmulo de resíduos sólidos e microplásticos.	Navarro et al. (20-202). Pantazi-Bájenaru et. al. (2023)
Consumo intensivo de energia	Alta demanda energética em processos industriais de fabricação.	Gundogan (2021), Hildebrandt et. al.
Uso intensivo de água	Consumo significativo em etapas de tingimento e acabamento.	Gundogan (2021) Pantazi-Bájenaru et. al. (2023).

Fonte: Elaborado pelos autores com base em GUNDOGAN, 2021; HILDEBRANDT; THRÄN; BEZAMA, 2021; NAVARRO et al., 2020; PANTAZI-BĂJENARU et al., 2023.

Na **etapa 6- conceitos ambientais** nesta etapa foi possível apresentar algumas propostas de melhorias sustentáveis. Ou seja, após os autores analisarem o guia de melhoria criado sugeriu-se alternativas como, redesenho do produto para facilitar a desmontagem sem uso de cola, a redução de substâncias tóxicas, o reaproveitamento de resíduos, a implementação de logística reversa e o uso mais eficiente de água e energia.

Essas estratégias contribuem para minimizar impactos ao reduzir a extração de recursos naturais, facilitar a reutilização de componentes, diminuir a geração de resíduos e emissões, e otimizar o consumo de insumos ao longo da cadeia produtiva. A abordagem está alinhada aos princípios do ecodesign, que busca integrar critérios ambientais desde a concepção do produto, promovendo soluções sustentáveis sem comprometer a funcionalidade, o desempenho ou a estética. Dessa forma, essas melhorias não apenas elevam o desempenho ambiental do produto, mas também reforçam seu valor competitivo em um mercado cada vez mais consciente e exigente.

Por fim, na **Etapa 7- estratégia ambiental** este estudo propõe no próximo subitem a substituição de matérias-primas convencionais por alternativas que reduzam os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo do produto.

#### 4. ANÁLISE PARA ESCOLHA DE MATÉRIA-PRIMA

Para apoiar a comparação entre as alternativas, foi elaborado um quadro de avaliação baseado em critérios de ACV, considerando impactos ambientais da fabricação, durabilidade no uso, descarte e potencial de reaproveitamento. A classificação utiliza dados de materiais como couro bovino, poliuretano e fibras naturais, seguindo os parâmetros propostos por Gundogan et al. (2021). É importante ressaltar que o estudo de Gundogan et al. (2021) foi aplicado em outro contexto, porém os materiais e processos avaliados – como o curtimento do couro bovino, a produção de poliuretano e o uso de alternativas bio-based – são equivalentes aos empregados na fabricação de calçados, permitindo a utilização como referência comparativa. O Quadro 2 apresenta essa análise adaptada.

QUADRO 2 - Avaliação comparativa de materiais alternativos ao couro sintético para botas femininas com base em critérios de ACV e impactos ambientais

Material	Processo de fabricação	Uso da bota com o material	Descarte	Potencial de Recuperação	Impactos Ambientais Associados
Couro bovino	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto Consumo de Água, emissões de gases de efeito estufa e impacto no descarte devido a baixa biodegradabilidade
Couro Sintético (Poliuretano)	Alto	Médio	Alto	Médio	Uso de Recursos Fósseis, Alta emissão de compostos orgânicos voláteis e dificuldade no descarte devido a baixa biodegradabilidade
Couro de fibras naturais	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixa demanda energética, Alta biodegradabilidade, menor durabilidade no uso
Couro de cacto	Baixo	Médio	Baixo	Médio	Produção com baixo consumo hídrico e menor impacto ambiental, menor resistência mecânica em comparação a materiais sintéticos
Pinatex (fibras de abacaxi)	Médio	Médio	Médio	Médio	Aproveitamento de resíduos agrícolas, reduzindo impactos, mas com desafios na durabilidade e reciclagem
Nylon 12 (poliamida)	Médio	Alto	Médio	Alto	Alta durabilidade, possibilidade de reciclagem, produção com consumo energético elevado
Poliuretano termoplástico (TPU)	Médio	Alto	Médio	Alto	Alta durabilidade, boa reciclabilidade, depende de fontes não renováveis
Compósitos celulósicos	Baixo	Médio	Baixo	Médio	Alta biodegradabilidade, bom desempenho térmico e mecânico, menos resistentes que materiais sintéticos
Nanocelulose microbiana	Médio	Médio	Baixo	Médio	Alta sustentabilidade no processo de fabricação, limitações no descarte e na durabilidade do uso

Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados de Gundogan et al. (2021); Navarro et al. (2020); Wilford (1997); Muthu (2013); Hildebrandt, Thrän e Bezama (2021); Wjunow et al. (2023); Desserto (2025); Pantazi-Băjenaru et al. (2023); Ghimouz et al. (2023); Nam e Lee (2020); Schiros et al. (2022); Yang et al. (2024).

Diante dos impactos observados, a substituição de polímeros derivados de petróleo, como o poliuretano e o PVC, por materiais de origem renovável surge como uma alternativa viável. Entre os materiais identificados na revisão da literatura, destaca-se o couro alternativo de origem vegetal produzido a partir do cacto pera espinhosa, que se caracteriza pelo baixo consumo hídrico, ausência de produtos químicos tóxicos e potencial de biodegradação, configurando-se como uma alternativa sustentável aos materiais sintéticos convencionais (WJUNOW et al., 2023; DESSERTO, 2025 Já o Piñatex, desenvolvido a partir de fibras de abacaxi, exemplifica a lógica da economia circular ao transformar resíduos agrícolas em materiais de alto valor agregado (PANTAZI-BĂJENARU et al., 2023; WJUNOW et al., 2023).

Avanços tecnológicos também reforçam o potencial sustentável da produção calçadista. A manufatura aditiva (impressão 3D) tem sido aplicada com sucesso, como demonstrado por Ghimouz et al. (2023), que utilizaram poliamida 12 (Nylon 12) e poliuretano termoplástico (TPU) em sistemas de montagem mecânica, proporcionando leveza, resistência e durabilidade ao calçado.

Outros estudos exploram materiais têxteis e compósitos naturais como alternativas ao couro tradicional. Nam e Lee (2020) apontaram que combinações de denim, cânhamo e celulose bacteriana apresentam propriedades superiores em termos de permeabilidade e resistência mecânica. Hildebrandt, Thrän e Bezama (2021) destacaram os compósitos lignocelulósicos e os poliuretanos *bio-based* por seus menores impactos ambientais ao longo da ACV.

Inovações mais recentes apontam para o uso de nano celulose microbiana (SCHIROS et al., 2022) e de materiais híbridos, como celulose bacteriana combinada com resíduos industriais (YANG et al., 2024). Carvalho et al. (2024) ainda demonstraram que resíduos micronizados de poliuretano podem ser utilizados como aditivos em compósitos elastoméricos, melhorando o desempenho mecânico dos solados.

## 5. CONSIDERAÇÕES APÓS ESCOLHA DE MATÉRIA-PRIMA

A análise do Quadro 2 evidencia diferenças significativas entre os materiais avaliados quanto aos impactos ambientais, durabilidade, descarte e potencial de recuperação. O couro bovino e o couro sintético (poliuretano) apresentam os maiores impactos ambientais, especialmente na etapa de fabricação (GUNDOGAN, 2021; NAVARRO et al., 2020). O couro bovino possui uma alta pegada ecológica devido ao uso intensivo de recursos naturais, como água e terra, e ao emprego de produtos químicos agressivos, comprometendo sua sustentabilidade ao longo do ciclo de vida (HILDEBRANDT; THRÄN; BEZAMA, 2021). Já o couro sintético, por ser derivado de petróleo, contribui para a extração de recursos fósseis não renováveis e apresenta baixa biodegradabilidade, o que acentua seus efeitos negativos no descarte (WILFORD, 1997; MUTHU, 2013).

Em relação à durabilidade, o couro bovino permanece como o material mais resistente, seguido do couro sintético (GUNDOGAN, 2021; NAVARRO et al., 2020). Ambos superam os materiais alternativos, como o couro de fibras naturais, que, embora menos durável, ainda se apresenta como uma opção viável e de menor impacto ambiental (NAM; LEE, 2020). Por outro lado, o potencial de recuperação é limitado em ambos os tipos de couro convencionais, dada a escassez de sistemas de reciclagem estruturados. Frequentemente, esses materiais têm como destino final os aterros sanitários, agravando a geração de resíduos sólidos (GOTTFRIDSSON; ZHANG, 2015).

Dentre os materiais alternativos, o couro sustentável derivado do cacto desponta como uma solução promissora. Com baixo consumo hídrico, ausência de químicos tóxicos e boa durabilidade, ele alia desempenho técnico e menor impacto ambiental, sendo ainda biodegradável e com potencial de reciclagem em expansão (WJUNOW et al., 2023; DESSERTO, 2025). Essas características o tornam atrativo para o mercado da moda sustentável e consumidores conscientes.

Portanto, o couro sustentável derivado do cacto se destaca como a alternativa mais equilibrada entre impacto ambiental, desempenho técnico e viabilidade de mercado. Essa escolha também está alinhada às tendências de consumo sustentável e às exigências regulatórias crescentes (WJUNOW et al., 2023; DESSERTO, 2025; GRAND VIEW RESEARCH, 2024).

Comparado as fibras naturais, que, possui desempenho muito bom também, se sobressai, devido ao potencial de recuperação limitado do couro de fibras naturais (GOTTFRIDSSON; ZHANG, 2015).

Com base nessa análise, foram definidas áreas prioritárias de melhoria, com ênfase em práticas sustentáveis ao longo do ciclo de vida do produto. A substituição de produtos químicos tóxicos por alternativas verdes, conforme proposto por Walker et al. (2018), representa um avanço importante na proteção à saúde humana e ao meio ambiente. Além disso, a escolha por matérias-primas como o couro sustentável derivado do cacto permite que, ao fim da vida útil do calçado, seus resíduos sejam reaproveitados em processos como compostagem, fertilização de cactos e até mesmo cogeração de energia via plantas de biogás — integrando conceitos de simbiose industrial e economia circular (LIFSET & ECKELMAN, 2013; WJUNOW et al., 2023; DESSERTO, 2025).

A conservação de recursos hídricos também se torna viável por meio da adoção de tecnologias de fabricação a seco e reutilização de água no processo produtivo (MILFORD et al., 2013). Paralelamente, a eficiência energética e a substituição por fontes renováveis, como energia solar e eólica, são medidas fundamentais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. A aplicação de tecnologias como tingimento com corantes à base d'água e sistemas de reciclagem de efluentes contribui para a redução de COVs e do consumo hídrico.

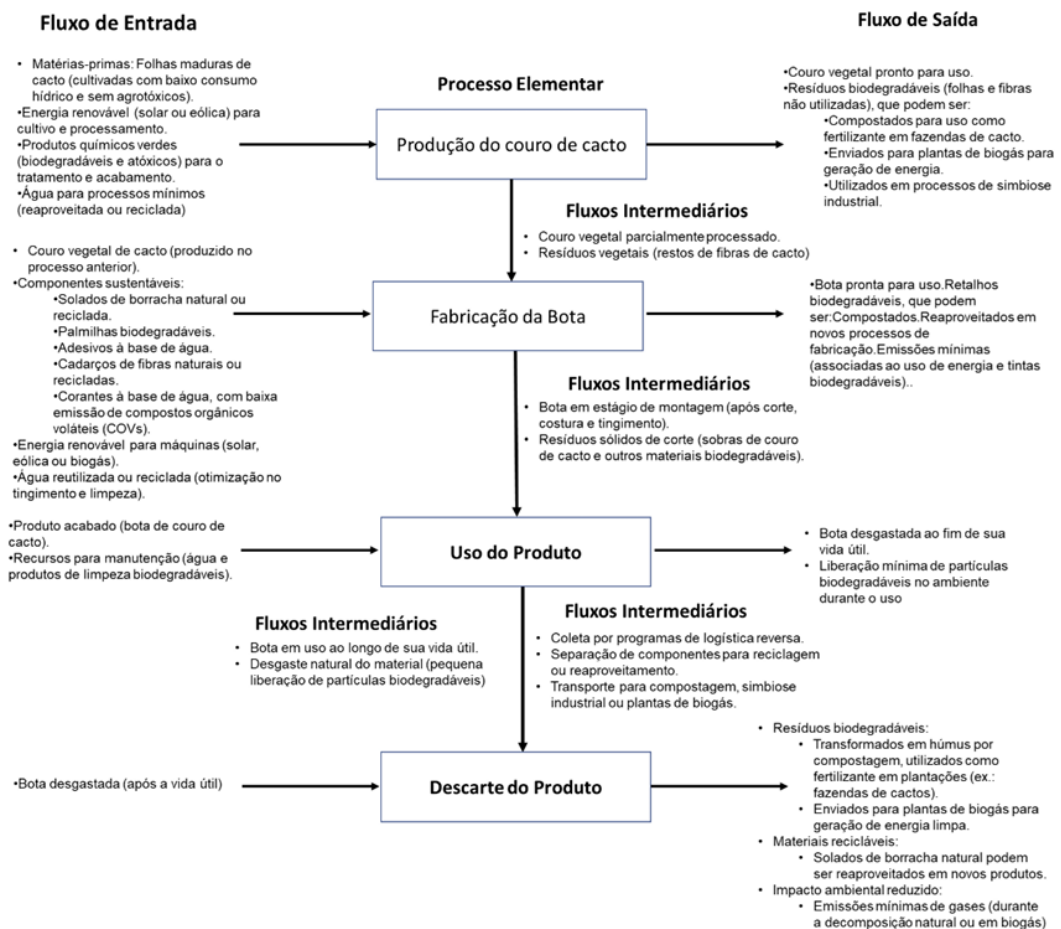
Para fechar o ciclo de sustentabilidade, torna-se essencial a promoção de campanhas de conscientização sobre o descarte correto dos produtos, associadas à implementação de

programas de logística reversa. Essas ações favorecem a mitigação da contaminação por micro plásticos e estimulam a recuperação de materiais de valor (WALKER et al., 2018).

Por fim, a incorporação de conceitos como o design para lixo zero e o reaproveitamento de resíduos fortalece a simbiose industrial e contribui para a transição rumo a modelos de produção mais circulares. Ferramentas como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e certificações ambientais (ex.: ISO 14001) reforçam o compromisso com a melhoria contínua e com a sustentabilidade ao longo da cadeia de valor (WALKER et al., 2018; MILFORD et al., 2013).

A Figura 5 apresenta o sistema de produto da bota confeccionada com o material de menor impacto ambiental identificado na análise — o couro vegetal alternativo à base de cacto —, evidenciando a redução dos impactos ambientais alcançada por meio das melhorias propostas com base no Guia de Melhorias Sustentáveis de McAlloone e Bey (2013).

FIGURA 5 - Sistema de produto para a ACV da bota confeccionada com couro vegetal de cacto



Fonte: Elaborado pelos autores com base em WJUNOW, C., 2023 e DESSERTO

Dessa maneira, pode-se concluir que realizando uma comparação entre os sistemas de produção da bota de couro sintético e da bota confeccionada com couro vegetal de cacto, observa-se uma redução significativa nos impactos ambientais quando se opta por materiais alternativos de origem renovável. O modelo baseado no couro vegetal de cacto demonstrou vantagens em termos de menor consumo de água, menor uso de substâncias tóxicas e maior potencial de reaproveitamento dos resíduos, especialmente quando integrado a estratégias de simbiose industrial. Assim, o uso de materiais sustentáveis, aliado ao ecodesign e a práticas circulares, revela-se uma alternativa viável e promissora para mitigar os impactos negativos do setor calçadista, atendendo às crescentes exigências ambientais e de mercado.

## 6. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo principal analisar o ciclo de vida de botas femininas fabricadas com couro sintético e propor melhorias ambientais sustentáveis, com base no Guia de Melhoramento de Produtos de McAlloone e Bey (2013). Utilizando a ferramenta de Análise do Ciclo de Vida (ACV), conforme as diretrizes das normas ISO 14040 e 14044, foi possível identificar pontos críticos de impacto ambiental ao longo das etapas de extração, produção, uso e descarte do produto.

Os resultados demonstraram que o couro sintético, embora amplamente utilizado na indústria calçadista, apresenta elevada pegada ambiental, devido ao uso de recursos fósseis, baixa biodegradabilidade, consumo intensivo de energia e emissões de compostos orgânicos voláteis. Em contrapartida, a análise comparativa com materiais alternativos destacou o couro de cacto como a opção mais promissora. Este material, de origem vegetal, mostrou-se mais eficiente em termos ambientais, com menor uso de água e energia em sua produção, ausência de produtos químicos tóxicos e maior potencial de biodegradação ao final do ciclo de vida.

A escolha do couro vegetal de cacto permitiu a proposição de um novo sistema de produto mais sustentável, incorporando práticas como design modular, montagem mecânica (sem cola) e maior viabilidade de desmontagem e reaproveitamento de materiais. Essas melhorias resultaram em ganhos significativos na redução de impactos ambientais, especialmente no descarte e na possibilidade de integração com estratégias de economia circular, como compostagem ou uso energético de resíduos.

Conclui-se que a substituição do couro sintético por alternativas de menor impacto, como o couro de cacto, é tecnicamente viável e ambientalmente vantajosa, reforçando a importância do ecodesign e da ACV como ferramentas-chave na transição para modelos de produção mais sustentáveis. Para estudos futuros, recomenda-se aprofundar a análise quantitativa dos impactos por meio de softwares especializados de ACV e investigar a viabilidade econômica e logística da produção em escala, incluindo parcerias para logística reversa e reaproveitamento de resíduos.

## REFERÊNCIAS

BERTOLDO, N. **Ecoshoe**: uma ferramenta de Ecodesign para melhorar o ambiente sustentável na Indústria do Calçado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Ambiental e Territorial) – Politécnico de Milão, 2021/2022.

CARVALHO, A. P. et al. **Sustainable Composites**: Analysis of Filler–Rubber Interaction in Natural Rubber–Styrene–Butadiene Rubber/Polyurethane Composites Using the Lorenz–Park Method and Scanning Electron Microscopy. *Polymers*, v. 16, n. 4, p. 471, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16040471>.

CHANGHYUN, N.; LEE, Y.-A. **Multilayered Cellulosic Material as a Leather Alternative in the Footwear Industry**. *Clothing and Textiles Research Journal*, v. 37, n. 1, p. 20-34, 2019.

DESSERTO. E-LCA – Environmental Lifecycle Analysis. Disponível em: <https://desserto.com.mx/e-lca>. Acesso em: 10 Dez. 204.

FAVA, J. A. et al. **A technical framework for life cycle assessment**. Washington, DC: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), 1991.

GHIMOUZ, C.; KENNÉ, J. P.; HOF, L. A. **On sustainable design and manufacturing for the footwear industry** – Towards circular manufacturing. *Materials & Design*, v. 233, 112224, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112224>.

GOTTFRIDSSON, M.; ZHANG, Y. **Impactos ambientais do consumo de calçados combinando análise de fluxo de produto com um modelo de ACV para a Suécia**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ecologia Industrial) – Universidade de Tecnologia Chalmers, Suécia.

Grand View Research, (2024). **Sustainable Footwear Market Size, Share & Trends Analysis Report by Type** (Athletic, Non-athletic), By End-user (Men, Women, Children), By Region, And Segment Forecasts, 2024 – 2030. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/sustainable-footwear-market>

GUNDOGAN, P., **Life Cycle Assessment of Leather and Leather-Like Materials Bovine, Polyurethane and Mycelium Leather Applied to Headphone Earpads**. KTH Royal Institute of Technology.

GUINÉE, J. B. **Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards**. Dordrecht: Springer, 2002.

HILDEBRANDT, J., THRÄN, D., & BEZAMA, A. (2021). **The circularity of potential bio-textile production routes**: Comparing life cycle impacts of bio-based materials used within the manufacturing of selected leather substitutes. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125470. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125470>

LIFSET, R., & ECKELMAN, M. (2013). **Material efficiency in a multi-material world**. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1986), 20120002. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0002>

MILFORD, R., PAULIUK, S., ALLWOOD, J., & MÜLLER, D. (2013). **The roles of energy and material efficiency in meeting steel industry CO<sub>2</sub> targets**. *Environmental Science & Technology*, 47(7), 3455–3462. <https://doi.org/10.1021/es3031424>

MUTHU, S. S. **The environmental impact of footwear and footwear materials**. SGS (HK) Limited, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/349490657\\_The\\_environmental\\_impact\\_of\\_footwear\\_and\\_footwear\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/349490657_The_environmental_impact_of_footwear_and_footwear_materials). Acesso em: 11 jul. 2025.

McALOONE, T. C.; BEY, N. **Melhoria ambiental por meio do desenvolvimento de produtos: guia**. Danish Environmental Protection Agency, 2013. Disponível em: <http://www.kp.mek.dtu.dk/English/Research/areas/ecodesign/guide.aspx>. Acesso em: 11 jul. 2025.

NAM, C., & LEE, Y.-A. (2020). **Multilayered Cellulosic Material as a Leather Alternative in the Footwear Industry**. *Clothing and Textiles Research Journal*, 37(1), 1-15. <https://doi.org/10.1177/0887302X18784214>

NAVARRO, D., WU, J., LIN, W., PALMER, P., e PUIG, R., 2020. **Life cycle assessment and leather production**. *Journal of Leather Science and Engineering* 2:26

PANTAZI-BĂJENARU, M. et al. **The environmental impact of sustainable footwear.** National Research Development Institute for Textiles and Leather – Leather and Footwear Research Institute, Romania, 2023.

SEURING, S.; MÜLLER, M. **From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management.** Journal of Cleaner Production, v. 16, n. 15, p. 1699-1710, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020>.

SCHRIROS, T. N., ANTROBUS, R., FARIAS, D., CHIU, Y.-T., JOSEPH, C. T., Esdaille, S., SANCHIRICO, G. K., MIQUELON, G., An, D., & RUSSELL, S. T. (2022). **Microbial nanocellulose biotextiles for a circular materials economy.** Environmental Science Advances, 1(3), 10.1039/d2va00050d.

TISCHNER, U.; SCHMINKE, E.; RUBIK, F.; MOHNKE, H. *Como produzir ecoprodutos: ferramentas para o design ecológico de produtos e serviços.* 1. ed. São Paulo: Editora SENAC São Paulo, 2000.

THØGERSEN, J. **Norms for environmentally responsible behavior: an extended model of the theory of planned behavior.** Journal of Environmental Psychology, v. 26, n. 1, p. 1-12, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2005.09.004>.

WALKER, S., Coleman, N., HODGSON, P., COLLIINS, N., & BRIMACOMBE, L. (2018). **Evaluating the environmental dimension of material efficiency strategies relating to the circular economy.** Sustainability, 10(3), 666. <https://doi.org/10.3390/su10030666>

WILFORD, A. **Environmental aspects of footwear and leather products manufacture.** In: LEATHER AND LEATHER PRODUCTS INDUSTRY PANEL SESSION, 13., 1997, Bologna. Proceedings. Bologna, 1997. Disponível em: [https://leatherpanel.org/sites/default/files/publicationsattachments/environmenta\\_aspects\\_of\\_footwear\\_and\\_leather\\_products\\_manufacture.pdf](https://leatherpanel.org/sites/default/files/publicationsattachments/environmenta_aspects_of_footwear_and_leather_products_manufacture.pdf)

WJUNOW, Cornelia et al. Sustainable Textiles from Unconventional Biomaterials—Cactus Based. Eng. Proc. 37(1), 58, MDPI, 2023. <https://doi.org/10.3390/ECP2023-14652>

YANG, F., ZHANG, Z., YUAN, J., XU, J., JI, Q., & BAI, Y. (2024). **Eco-friendly production of leather-like material from bacterial cellulose and waste resources.** Journal of Cleaner Production, 476, 143700. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143700>