

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Felipe Juliano Dutra

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UM LAMINADO SINTÉTICO  
ESPALMADO DE PVC PARA PRODUÇÃO DE PALMILHAS**

Sorocaba

2024

Felipe Juliano Dutra

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UM LAMINADO SINTÉTICO  
ESPALMADO DE PVC PARA PRODUÇÃO DE PALMILHAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadora: Profa. Dra. Virgínia Aparecida Silva Moris

Co-orientadora: Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva

Sorocaba

2024

Dutra, Felipe Juliano

Avaliação do ciclo de vida de um laminado sintético  
espalmado de PVC para produção de palmilhas / Felipe  
Juliano Dutra -- 2024.

66f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São  
Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Virgínia Aparecida Silva Moris

Banca Examinadora: José Augusto de Oliveira, Thiago  
Barreto Rocha

Bibliografia

1. ACV. 2. PVC. 3. Cadeia calçadista. I. Dutra, Felipe  
Juliano. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -  
CRB/8 6979



## **UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

---

### **Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Felipe Juliano Dutra, realizada em 08/04/2024.

#### **Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Virgínia Aparecida da Silva Moris (UFSCar)

Prof. Dr. Tiago Barreto Rocha (UNICAMP)

Prof. Dr. José Augusto de Oliveira (UNESP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

*Aos meus filhos, Isadora e Giuseppe.*

## AGRADECIMENTO

A Deus, autor e princípio da vida;

À minha esposa, por sonhar comigo este sonho;

Aos meus filhos, pela compreensão e carinho;

Aos meus pais, pela dedicação e perseverança;

Às minhas orientadoras Virgínia e Jane, por incomensuráveis ensinamentos;

Aos professores do PPGEPS, pelas valiosas lições;

Aos colegas do PPGEPS e do Grupo de Pesquisa EngS, por todo apoio e incentivo;

Ao Felipe Marques, pela dedicação e gentileza;

Às empresas que apoiaram este projeto, pela confiança e respeito;

Aos amigos Paulo Wagner e Cleber Morgado, por todo o apoio e confiança;

À Professora Ângela Maria Ramos, por ser uma incentivadora de pessoas;

A todos que indiretamente contribuíram para esta realização.

Quando não somos mais capazes de mudar uma situação, somos desafiados a mudar a nós mesmos.

*Viktor Frankl*

## RESUMO

DUTRA, Felipe J. Avaliação do ciclo de vida de um laminado sintético espalmado de PVC para produção de palmilhas. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2024.

Atualmente o Brasil é o quinto maior produtor de calçados do mundo, sendo responsável por 3,9% da produção global. No Brasil existe uma tendência de aumento do uso de laminados sintéticos em calçados, principalmente em função da variedade de cores, estampas, espessuras e aplicações, com destaque para os laminados de PU (poliuretano) e PVC (policloreto de vinila). Embora o PVC seja uma importante alternativa na fabricação de calçados, seu uso ainda é questionado do ponto de vista ambiental, principalmente pelas emissões ao longo do processo produtivo, como as dioxinas. Desta forma, o objetivo deste trabalho é apresentar os principais *hotspots* ambientais de um laminado sintético espalmado de PVC utilizado para confecção de palmilhas, através da realização de uma ACV do berço ao portão (*cradle to gate*), baseada em um estudo de caso. Com base na literatura foram avaliadas quatro categorias de impacto: depleção de recursos abióticos, eutrofização, toxicidade humana e aquecimento global. Os resultados apontam que os principais *hotspots* ambientais ocorrem à montante do processo de produção do laminado para três das quatro categorias analisadas: produção do plastificante (não-ftálico) para as categorias depleção de recursos abióticos e eutrofização, e produção da resina de PVC de emulsão (E) para a categoria toxicidade humana. O processo de produção do laminado objeto de estudo contribui diretamente com os impactos potenciais observados para a categoria aquecimento global. As possíveis ações para a redução dos impactos ambientais potenciais avaliadas no trabalho foram: a utilização de plastificantes vegetais e o uso de energia de fontes renováveis, dentre as quais, a substituição do plastificante (não-ftálico) por óleo de soja mostrou-se o cenário mais vantajoso do ponto de vista ambiental.

Palavras-chave: ACV; PVC; Cadeia calçadista; Impactos ambientais potenciais.

## **ABSTRACT**

DUTRA, Felipe J. Life cycle assessment of a PVC spread coating synthetic laminate to produce insoles. 2024. Dissertation (Master's in Production Engineering) – Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2024.

Brazil is currently the fifth largest footwear producer in the world, accounting for 3.9% of global production. In Brazil, there is a tendency to increase the use of synthetic laminates in footwear, mainly due to the variety of colors, prints, thicknesses, and applications with emphasis on PU (polyurethane) and PVC (polyvinyl chloride) laminates. Although PVC is an important alternative in the manufacture of footwear, its use is still questioned from an environmental point of view, mainly due to the emissions throughout the production process, such as dioxins. Therefore, the objective of this work is to present the main environmental hotspots of a synthetic PVC laminate used to make insoles, by carrying out an LCA from cradle to gate, based on a case study. Four impact categories were assessed, based on literature: abiotic depletion, eutrophication, human toxicity, and global warming. The results indicate that the main environmental hotspots occur upstream of the laminate production process for three of the four categories analyzed: production of plasticizer (non-phthalic) for the abiotic depletion and eutrophication categories, and production of emulsion PVC resin (E) for the human toxicity category. The production process of the assessed laminate directly contributes to the potential impacts observed for the global warming category. The possible actions to reduce potential environmental impacts assessed in this study are: the use of vegetable plasticizers and the use of energy from renewable sources, among which, the replacement of plasticizer (non-phthalic) by soybean oil proved to be the most advantageous scenario in the environmental point of view.

Keywords: LCA; PVC; Footwear chain; Potential environmental impacts.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Processo de produção do PVC.....	18
FIGURA 2 – Fluxograma do PRISMA .....	21
FIGURA 3 – Representação da cadeia de valor linear .....	22
FIGURA 4 – (a) Laminado sintético cortado em formato de palmilha; (b) Modelo de calçado em que a palmilha será utilizada .....	29
FIGURA 5 – Processo de espalmagem .....	30
FIGURA 6 – (a) Placas de laminado; (b) Aparas .....	32
FIGURA 7 – Composição do calçado .....	33
FIGURA 8 – Fronteiras do sistema .....	34
FIGURA 9 – Inventário de fluxos de materiais do sistema do produto .....	35
FIGURA 10 – Análise de contribuição proporcional por processo.....	39
FIGURA 11 – Resultados para a categoria depleção de recursos abióticos.....	41
FIGURA 12 – Resultados para a categoria aquecimento global.....	42
FIGURA 13 – Resultados para a categoria toxicidade humana .....	44
FIGURA 14 – Resultados para a categoria eutrofização.....	45
FIGURA 15 – Análise de contribuição entre cenários .....	52

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Resultados do sistema do produto por categoria de impacto.....	38
TABELA 2 – Contribuição proporcional dos principais <i>hotspots</i> do sistema do produto, por categoria de impacto .....	40
TABELA 3 – Resultados por categoria de impacto para o cenário 1.....	48
TABELA 4 – Resultados por categoria de impacto para o cenário 2.....	49
TABELA 5 – Resultados por categoria de impacto para o cenário 3.....	51

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Dados do modelo.....	63
---------------------------------	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABICALÇADOS	Associação Brasileira das Indústrias de Calçados
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
CdTe	Telureto de cádmio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Db	Diclorobenzeno
DLE	Dicloroetano
EBITDA	Lucro Antes dos Juros, Impostos, Depreciação e Amortização
ECHA	Agência Europeia de Substâncias Químicas
EVA	Etileno acetato de vinila
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
MDI	Metileno difenil diisocianato
MVC	Monômero cloreto de vinila
PE-LD	Poli(etileno) de baixa densidade
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PO <sub>4</sub>	Fosfato
PP	Poli(propileno)
PU	Poliuretano
PVC (E)	Poli(cloreto de vinila) emulsão
REACH	Registro, Avaliação, Autorização e Restrição de produtos químicos
RSL	Revisão sistemática da literatura
Sb	Antimônio
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
VOC	Compostos orgânicos voláteis

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 PRESSUPOSTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>17</b>
2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO PVC.....	17
2.2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: ACV DE CALÇADOS E ARTIGOS DE VESTUÁRIO .....	20
<b>2.2.1 Resultados da RSL .....</b>	<b>22</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>27</b>
3.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO. ....	28
<b>3.1.1 Objetivo .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.2 Escopo.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.3 Caracterização do produto e sistema .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.4 Unidade declarada.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.5 Fronteiras do sistema.....</b>	<b>33</b>
3.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA.....	34
3.3 METODOLOGIA DE AICV E TIPOS DE IMPACTO.....	35
<b>3.3.1 Limitações .....</b>	<b>37</b>
<b>4 RESULTADOS e discussões.....</b>	<b>38</b>
4.1 ANÁLISE DE <i>HOTSPOTS</i> .....	38
<b>4.1.1 Depleção de recursos abióticos.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1.2 Aquecimento Global.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1.3 Toxicidade Humana .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.4 Eutrofização .....</b>	<b>45</b>
4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	46
<b>4.2.1 Cenário 1 – substituição do plastificante (não-ftálico) por óleo de soja.....</b>	<b>47</b>
<b>4.2.2 Cenário 2 –uso de energia solar no processo de fabricação do laminado .....</b>	<b>49</b>

4.2.3 Cenário 3 – alteração de gramatura do laminado espalmado .....	50
4.2.4 Análise entre cenários .....	51
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>
<b>APÊNDICE A– Dados do modelo .....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O mercado global de moda movimentou em 2021 US\$ 1,55 trilhão (OBERLO, 2023), com uma produção global de 21,6 bilhões de pares de calçados, dos quais 848,6 milhões produzidos no Brasil, que figura como o quinto maior produtor de calçados do mundo (ABICALÇADOS, 2023).

Apesar do crescimento observado nos anos seguintes, a pandemia de COVID-19 trouxe importantes impactos para o segmento, reconfigurando aspectos da produção global. Espera-se que somente em 2025 seja possível retomar os níveis de produção e consumo pré-pandemia (ABICALÇADOS, 2022).

Mesmo assim, à medida que as restrições impostas pela pandemia começaram a ser suspensas, em 2021, a indústria da moda viu-se diante de uma explosão de demanda reprimida do consumidor. Embora alguns desafios permanecessem, como importantes interrupções na cadeia de suprimentos, as receitas globais cresceram 21% em 2021, enquanto a margem EBITDA média quase dobrou. A indústria manteve seu forte desempenho no início de 2022, com crescimento de receita de 13% no primeiro semestre (MCKINSEY & COMPANY, 2023).

Atualmente, o Brasil é o quinto maior produtor de calçados do mundo, sendo responsável por 3,9% da produção global, e também o quarto maior consumidor, com um volume de 718 milhões de pares consumidos em 2021, 6,7% a mais se comparado com o ano anterior. Em termos de materiais, os calçados brasileiros são composto majoritariamente por plástico e borracha (52,1%), laminados sintéticos (22,8%), couro (17,1%), têxteis (7,8%) e outros materiais diversos (0,2%) (ABICALÇADOS, 2023).

No Brasil, existe uma tendência de aumento do uso de laminados sintéticos em detrimento ao couro, com destaque para os laminados de PU (poliuretano) e PVC (policloreto de vinila), principalmente em função da variedade de cores, estampas, espessuras e aplicações, além da crescente preocupação com os impactos ambientais potenciais provenientes dos processos de tratamento do couro, que, em sua maioria, utilizam metais pesados, com destaque para os sais de cromo (KOHAN *et al.*, 2020).

Dentre os laminados sintéticos destacam-se os de poliuretano (PU) e policloreto de vinila (PVC). Embora versáteis e confortáveis, os laminados de PU possuem vida útil reduzida, por estarem sujeitos a hidrólise (*i. e.* reação do PU com água/ umidade), que promove a degradação completa do laminado, fazendo com que perca suas propriedades mecânicas rapidamente e dificultando o processo de reciclagem. Já os laminados de PVC são considerados

no Brasil como materiais de alta tecnologia com um bom custo/ benefício (KOHAN *et al.*, 2020).

O PVC, que até a década de 1990 era tido como um polímero não sustentável, sendo substituído por grandes marcas, ressurgiu nos anos 2000 como um material de alta tecnologia e assumiu posição de destaque em diversos ramos, como calçadista e automotivo, graças aos esforços da cadeia produtiva de PVC na Europa, que, através de um trabalho científico coordenado desenvolveu diversas ações para a promoção do controle de emissões de gases, reciclagem e uso sustentável de aditivos, energia e matéria-prima (KOHAN *et al.*, 2020).

Apesar dos diversos avanços ao longo da cadeia produtiva, ainda restam questionamentos quanto aos subprodutos e emissões gerados ao longo dos processos produtivos da cadeia do PVC, como as dioxinas (CUI & LEONAS, 2020), bem como por seus possíveis impactos para mudanças climáticas e depleção de recursos (QUANTIS, 2018).

Ainda que se tenha observado um crescimento nos últimos anos, apenas 3% do volume de PVC utilizado no mundo é aplicado como laminado sintético para os segmentos de calçados e vestuário. Estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV) para PVC, de maneira geral, apontam para a fase de produção das resinas de PVC e descarte pós-consumo como os principais pontos de impactos ambientais potenciais. O primeiro, pelos subprodutos gerados nos processos, e o segundo pela dificuldade da viabilização de processos robustos de reciclagem. (BOTTAUSCI *et al.*, 2021; CHU *et al.*, 2022)

Para uma verdadeira compreensão dos aspectos e impactos ambientais potenciais provenientes do uso de laminados de PVC na indústria calçadista faz-se necessária uma avaliação do ciclo de vida (ACV). A ACV enfoca os aspectos e impactos ambientais potenciais ao longo de todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração das matérias-primas até a disposição final (do berço ao túmulo) (ABNT, 2009).

Ao longo das últimas três décadas diversos estudos de ACV foram realizados com foco em calçados femininos (MILÀ *et al.*, 1998), adesivos utilizados na fabricação de calçados (MACIEL *et al.*, 2017), recuperação e reciclagem de calçados (STAIKOS & RAHIMIFARD, 2007a; TIPPAYAWONG & TIPPAYAWONG, 2017), dentre outros. Tais estudos apresentam inúmeras contribuições para o segmento e propiciam o questionamento: quais os principais *hotspots* ambientais ao longo do ciclo de vida de um laminado de PVC utilizado pela indústria calçadista?

Desta forma, o objetivo deste trabalho é apresentar os principais *hotspots* ambientais de um laminado sintético espalmado de PVC utilizado para confecção de palmilhas, através da realização de uma ACV do berço ao portão (*cradle to gate*), baseada em um estudo de caso. Espera-se também que os resultados encontrados fomentem ações que possam eliminar ou reduzir os riscos ambientais ao longo da cadeia.

O capítulo 2 apresenta os pressupostos teóricos e os principais estudos publicados sobre o tema. O capítulo 3 descreve o método utilizado para a condução da pesquisa, bem como os pressupostos e limitações do estudo. No capítulo 4 são apresentados os resultados encontrados e discutidos à luz dos pressupostos e limitações. Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo, além de sugestões para estudos futuros.

## 2 PRESSUPOSTOS TEÓRICOS

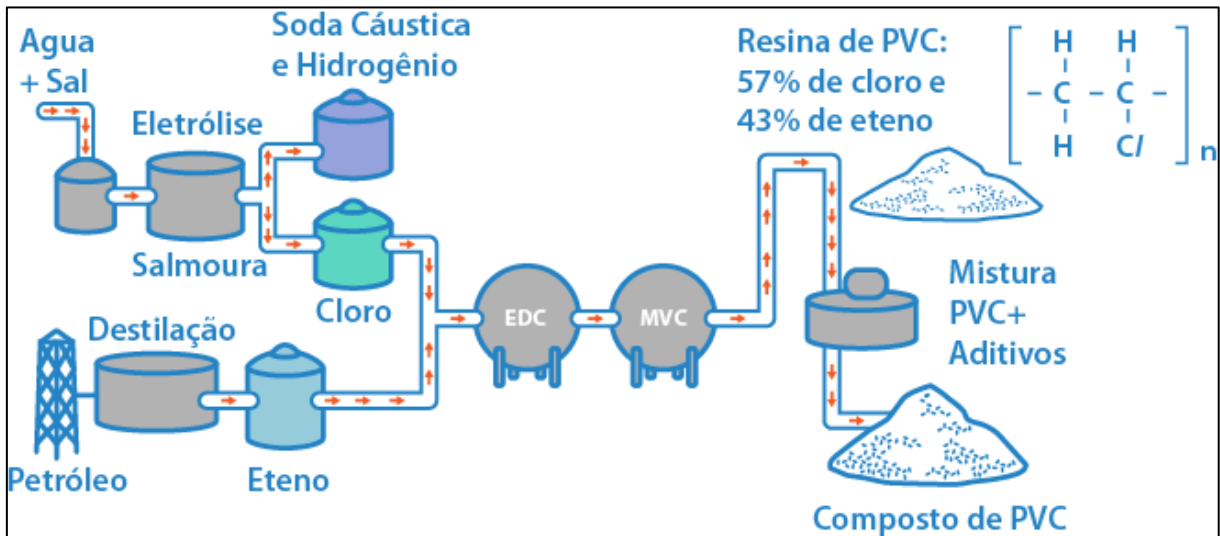
### 2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO PVC

A produção de plásticos ao redor do mundo superou a marca de 400 milhões de toneladas em 2022, sendo o PVC o terceiro polímero mais produzido, com 12,7% do volume global, ficando atrás do Polipropileno (PP; 18,9%) e do Polietileno de baixa densidade (PE-LD; 14,1%) (PLASTIC EUROPE, 2023). A popularidade do PVC deve-se, principalmente, a sua longa vida útil e boas propriedades de resistência mecânica, elétrica, química e térmica, além da versatilidade e diversidade de aplicações (MILIUTE-PLEPIENE *et al.*, 2021; INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC, 2023).

O PVC é composto, em peso, por 57% de cloro, obtido através da eletrólise do sal marinho, e 43% de eteno, derivado do petróleo. Da reação dos dois componentes é produzido o dicloro etano (DCE) obtendo então o monômero cloreto de vinila (MVC). As moléculas do MVC são submetidas ao processo de polimerização, que resulta no PVC, um pó fino, de cor branca e totalmente inerte (INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC, 2023).

A resina de PVC na sua forma pura não tem nenhuma aplicação industrial, é necessária a adição de produtos químicos à resina, formando o composto de PVC, que será utilizado em processos industriais para a fabricação dos mais diversos tipos de produtos presentes em nosso dia-a-dia. O tipo de resina e os aditivos utilizados determinarão as características finais do produto (INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC, 2023). A figura 1 ilustra o processo de produção do PVC.

FIGURA 1 – Processo de produção do PVC



Fonte: Instituto brasileiro do PVC, 2023.

Um subproduto do processo de produção do PVC é o MVC residual, proveniente da quantidade de MVC não reagida no processo de polimerização. O MVC residual é reconhecidamente um agente carcinogênico, o que exige que as plantas de produção e de polimerização de PVC sejam constantemente monitoradas e que atendam padrões internacionais de segurança (FERREIRA SILVA & GÓIS, 2013; INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC, 2023).

Embora seja um material 100% reciclável, o uso conjunto do PVC com aditivos químicos como estabilizantes, corantes e plastificantes, pode representar importantes riscos ambientais e à saúde ao longo de seu ciclo de vida, como, por exemplo, a eliminação progressiva de ftalatos, que são substâncias restritas pelo regulamento REACH (Registro, Avaliação, Autorização e Restrição de produtos químicos), da União Europeia, que vigora desde junho de 2007 (ECHA, 2023; MILIUTE-PLIPIENE *et al.*, 2021).

Os ftalatos formam uma família de produtos químicos sintéticos amplamente utilizados e que tem como principal função tornar os plásticos mais flexíveis e duradouros. Nem todos os ftalatos foram exaustivamente estudados, mas há provas de que alguns são nocivos à saúde humana, o que fez com que se tornassem substâncias restritas na Europa e em outras partes do mundo (ECHA, 2023).

As restrições impostas ao uso de ftalatos faz com que a demanda por plastificantes não-ftálicos tenha apresentado crescimento expressivo nos últimos anos. Os plastificantes não-

ftálicos mantêm as mesmas características dos ftalatos em termos de flexibilidade, porém a um custo maior (ALTUN & FELLAH, 2022).

Apesar das dificuldades encontradas, STICHNOTHE & AZAPAGIC, (2013) destacam que o uso de PVC reciclado em detrimento ao PVC virgem pode contribuir de forma significativa para a redução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Resultados similares foram encontrados por CHU *et al.* (2022), que apresentam que o principal fator de impacto para a categoria emissão de gases do efeito estufa ocorre no processo de produção do PVC virgem.

Em 2022 mais de 800.000 toneladas de PVC foram recicladas na Europa, sendo 62% de resíduos industriais pré-consumo e 38% de resíduos pós-consumo. Este volume representa aproximadamente 27% de todo o resíduo de PVC gerado no continente. Espera-se que em 2030 sejam recicladas 1 milhão de toneladas de PVC (VINYL PLUS, 2023).

Outras estratégias de fim de vida mostraram-se problemáticas para o PVC. No processo de incineração observa-se a formação de dioxinas e compostos clorídricos, danosos ao meio ambiente e à saúde humana. No processo de pirólise, além da baixa eficiência, observa-se a presença de ácido clorídrico como principal subproduto do processo, o que, além de perigoso, pode causar danos ao equipamento. Para viabilizar o processo de pirólise do PVC faz-se necessário um processo de descloração, o que acarreta em um significativo aumento do custo do processo (ANUAR SHARUDDIN *et al.*, 2016).

Já o descarte em aterros é o menos recomendado e tem sido proibido em diversos países, principalmente na Europa, em função do uso de aditivos considerados perigosos, que podem acarretar contaminação do solo e da água (MILIUTE-PLEPIENE *et al.*, 2021).

Com objetivo de mitigar os impactos provenientes da cadeia de valor do PVC, iniciativas como o uso de materiais biodegradáveis e plastificantes de origem vegetal em detrimento aos ftalatos tem apresentado resultados significativos, embora ainda em pequena escala. (CORREA *et al.*, 2019)

Considerando a importância do PVC no cotidiano da população, há poucos estudos de ACV sobre o tema, principalmente sobre os laminados de PVC aplicados à indústria de calçados e vestuário. Os estudos existentes demonstram que há desafios importantes a serem considerados, principalmente durante os processos produtivos das resinas e plastificantes e ao fim da vida útil dos artigos de PVC.

## 2.2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: ACV DE CALÇADOS E ARTIGOS DE VESTUÁRIO

A revisão sistemática de literatura (RSL) desempenha diversos papéis críticos (PAGE *et al.*, 2021), dentre eles, aprimorar a base de conhecimento de maneira sistemática, transparente e reprodutível (TRANFIELD *et al.*, 2003). Segundo estes mesmos autores, a RSL apresenta três etapas: planejamento, execução e divulgação

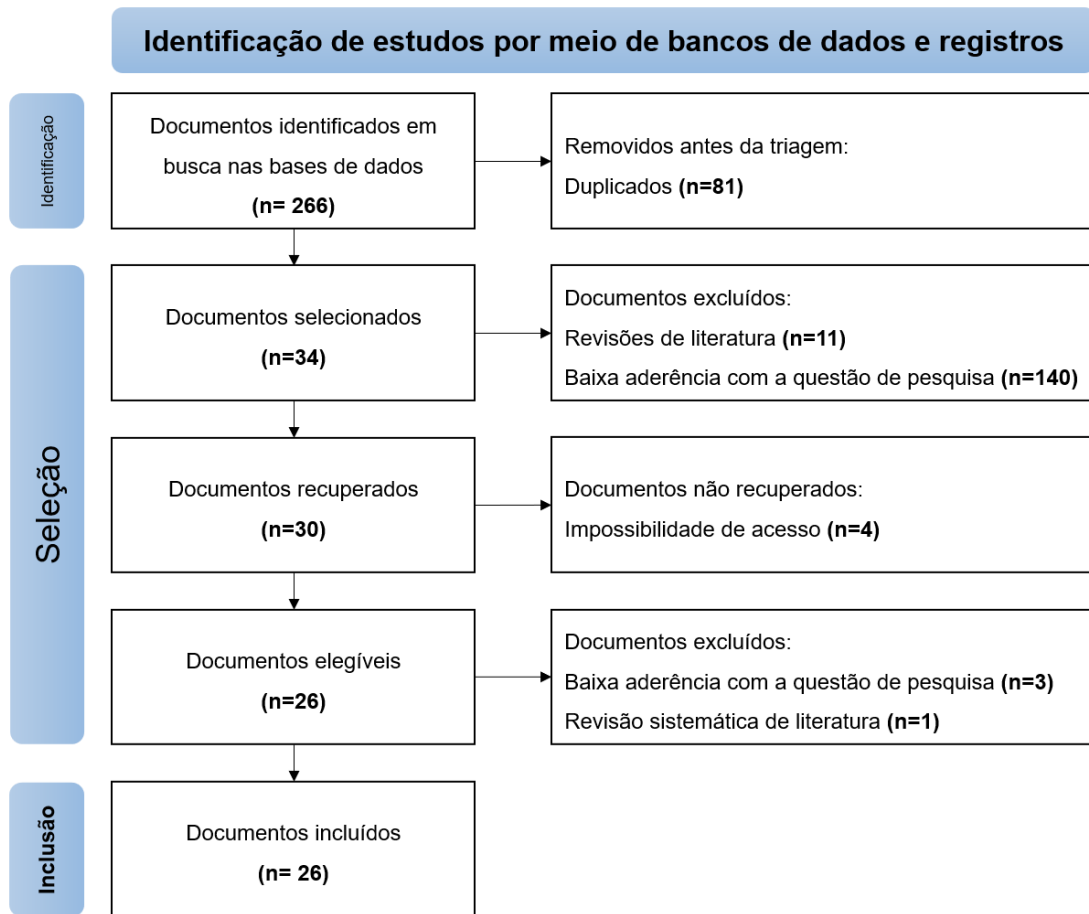
As etapas de planejamento e execução foram guiadas pelo protocolo PRISMA, de acordo com as recomendações de Page *et al.* (2021), para ajudar a relatar de forma transparente porquê a revisão foi feita, o que os autores fizeram e o que encontraram, considerando três fases: identificação, triagem (ou seleção) e inclusão.

Na fase de planejamento, foi realizada uma pesquisa em 07 de maio de 2022, nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, utilizando os termos de busca e operadores booleanos: *footwear OR apparel AND “life cycle assessment” OR lca OR “waste management” OR “circular econom\*”*, que retornou 266 documentos, sendo 125 resultados na base *Web of Science* e 141 na base *Scopus*.

A etapa de execução contou com auxílio da aplicação *Web Rayyan* que, segundo Ouzzani *et al.* (2016), tem por objetivo agilizar a triagem inicial de resumos e títulos, usando um processo semiautomatizado. Foram excluídos 81 documentos duplicados e realizada a leitura de título e resumo dos 185 documentos restantes, dos quais 34 foram selecionados para a fase de elegibilidade, por demonstrarem aderência ao tema e questão de pesquisa.

Na fase de elegibilidade os 34 documentos foram acessados e verificou-se a impossibilidade de acesso de 4 deles, restando 30 documentos para leitura e fichamento, dos quais outros 4 documentos foram excluídos por falta de alinhamento com a questão de pesquisa (n=3) e por se tratar de revisão sistemática (n=1). Os 26 documentos restantes foram incluídos na revisão sistemática e passaram para análise bibliométrica e de conteúdo. A figura 2 sintetiza as etapas de planejamento e execução desta revisão sistemática da literatura.

FIGURA 2 – Fluxograma do PRISMA



Fonte: Adaptado de Page *et al.* (2021)

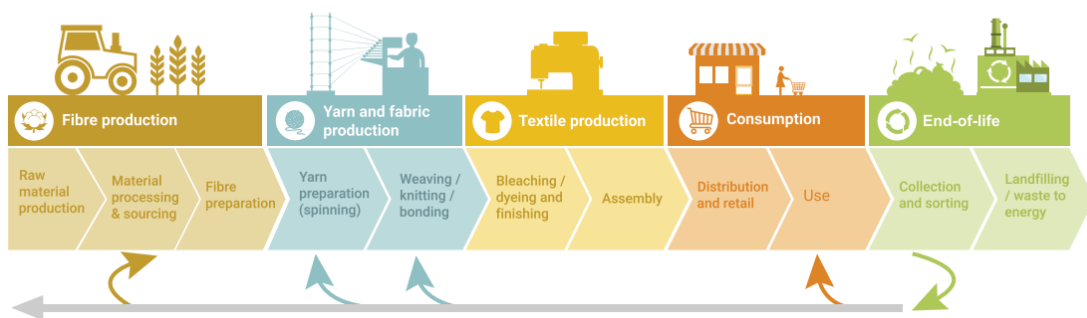
A etapa de divulgação contou com uma análise bibliométrica sobre os metadados dos documentos encontrados e uma análise de conteúdo que, segundo Bardin (2011), se aplica a discursos diversificados. Para auxiliar essa última análise foi utilizado o software livre IRAMUTEQ de Ratinaud & Déjean (2009) que, segundo Salviati (2017), auxilia na realização de análises estatísticas de textos, como classificação hierárquica descendente e outras análises lexicais que auxiliam na avaliação e interpretação de textos.

Através desta revisão sistemática da literatura evidenciou-se uma crescente preocupação com os impactos ambientais potenciais dos artigos de moda nas últimas três décadas, muito influenciada pela globalização da cadeia de valor e pelo aumento da demanda por estes artigos, promovida pela expansão do *fast fashion* (*i. e.* moda rápida)

### 2.2.1 Resultados da RSL

A cadeia de valor do segmento de moda, em sua maioria, ainda segue o modelo linear de produção, da extração de matéria prima até o fim da vida útil, passando por diversos processos produtivos e pelas fases de distribuição e uso (UNEP, 2020), como representado na figura 3.

FIGURA 3 – Representação da cadeia de valor linear



Fonte: UNEP, 2020

Na década de 1990 foram realizados os primeiros estudos sobre os impactos ambientais dos resíduos da cadeia têxtil, desde os industriais até os de pós-consumo, e os primeiros modelos de análise do ciclo de vida no segmento. Domina & Koch (1997) e Milà *et al.* (1998) propõe modelos simplificados de análise e interpretação das relações de interdependência entre os elos da cadeia de valor até a fase de pós-consumo no segmento têxtil e de vestuário, destacando que a geração de resíduos e práticas potencialmente nocivas ao meio ambiente ocorrem em todas as fases da cadeia.

Durante as primeiras etapas do ciclo de vida de roupas e calçados, o cultivo de algodão aparece como uma importante fonte de impacto, especialmente na categoria qualidade do ecossistema, muito influenciado pelo uso de pesticidas e emissões provenientes do campo (QUANTIS, 2018), bem como nas categorias depleção de água e ocupação de terras agrícolas (MOAZZEM *et al.*, 2021a). Uma das alternativas propostas para redução destes impactos é a substituição das fibras de algodão virgem por fibras recicladas, que podem contribuir para a diminuição de até 6.600 kg CO<sub>2eq</sub> (quilos de dióxido de carbono equivalente) para cada 1.000 kg de fibras consumidas (LIU *et al.*, 2020a).

Já os estudos de Cheah *et al.* (2013) e Serweta *et al.* (2019) identificaram no estágio de produção de calçados as mais importantes contribuições para a categoria potencial de aquecimento global, especialmente influenciado pelo alto consumo de energia na fase industrial. Propostas de soluções para o segmento envolvem o desenvolvimento e uso de materiais mais leves, que promovem redução de impactos em todas as etapas da cadeia de valor, e maior uso de materiais reciclados, principalmente, em substituição ao uso de poliéster e poliuretano no cabedal dos calçados (CHEAH *et al.*, 2013).

Para redução da pegada de carbono na produção de calçados, Serweta *et al.* (2019) apresentam também outras ações, como a substituição de adesivos a base de solventes por adesivos a base de água e redução de peso das caixas de papelão utilizadas para embalagem dos calçados.

Dentre os materiais mais utilizados na indústria calçadista destacam-se os sintéticos, tecidos e couro, que apesar de representar 25% do volume global de materiais utilizados no segmento, pode contribuir com até 80% dos impactos ambientais potenciais em determinadas categorias (QUANTIS, 2018), como, por exemplo, aquecimento global, acidificação e eutrofização, muito em função da emissão de gases nocivos, como o gás metano e amônia, e do uso de sais de cromo nos processos de curtimento (ROSSI *et al.*, 2021).

Apesar dos diversos avanços da indústria do couro nos últimos anos, especialmente o uso de materiais de fontes renováveis em detrimento aos sais de cromo, a dificuldade na obtenção de dados precisos dificulta a conclusão sobre as vantagens destes materiais (LAURENTI *et al.*, 2017).

Embora haja uma predominância do uso de materiais como couro, tecidos e materiais sintéticos, a produção de um par de sapatos pode envolver o uso de mais de 40 tipos de materiais diferentes (KOHAN *et al.*, 2020). No Brasil, os laminados sintéticos representam mais de 22% do volume de materiais utilizados na produção de calçados (ABICALÇADOS, 2022), sendo o policloreto de vinila (PVC) a matéria-prima mais utilizada na indústria de calçados plásticos (CARVALHO FILHO *et al.*, 2019), muito em função de sua versatilidade em termos de cores, estampas e texturas (KOHAN *et al.*, 2020). No entanto, há poucos estudos sobre os impactos ambientais potenciais provenientes do uso de laminados sintéticos de PVC.

Essa gama de diferentes materiais faz com que os adesivos ganhem papel de destaque na produção de calçados. Em função da variedade e volume de adesivos utilizados no Brasil, Maciel *et al.* (2017) realizaram uma ACV comparativa entre três diferentes adesivos de

poliuretano no contexto brasileiro. Foram analisados os impactos ambientais potenciais de um adesivo com base solvente, um base água e um adesivo termoplástico (em pó). Os resultados apontam para vantagens no uso de adesivos em pó, sendo estes os menos nocivos ao meio ambiente, apresentando benefícios nas categorias depleção da camada de ozônio, aquecimento global, uso de fontes de energia não renováveis e pegada hídrica.

Além destas, outras alternativas, como adesivos à base de óleos vegetais e aplicação de plasma de baixa pressão, também vem ganhando destaque nos últimos anos e a expectativa é que sejam soluções tecnicamente viáveis e ambientalmente menos nocivas, representando avanços significativos em termos de redução de impactos ambientais no setor calçadista (ARÁN-AIS *et al.*, 2021).

Moazzem *et al.* (2021) salientam que há uma potencialização dos impactos potenciais do setor advindas do *fast fashion* (*i. e.* moda rápida) e destaca o importante papel dos varejistas no processo de transformação dos padrões de consumo e reeducação dos consumidores, uma vez que ações para redução dos impactos ambientais do segmento podem ocorrer tanto nos processos produtivos, como o uso de materiais mais leves, materiais reciclados e processos mais eficientes, quanto na fase de uso e pós-consumo, como a redução do uso de máquinas de lavar e secar, e a extensão da vida útil dos artigos. Este elo entre fabricantes e consumidores (*i.e.* varejistas) acaba assumindo papel de destaque no sentido da promoção de ações convergentes à montante e à jusante da cadeia de valor.

A extensão e complexidade da cadeia de valor das roupas e calçados exige uma análise ampla e multidirecional dos impactos ambientais potenciais, que estão diretamente relacionados com diversos fatores, como tipo de fibra, *design* do artigo, processo produtivo, método de venda, frequência de uso, opções de descarte etc., o que denota não haver uma solução única e definitiva que elimine ou reduza os impactos negativos do segmento (MOAZZEM *et al.*, 2021).

Outro aspecto importante e que não deve ser negligenciado é a globalização da cadeia, cada vez mais dispersa ao redor do planeta, de modo que os impactos ambientais de um único artigo podem estar espalhados por diversos países, principalmente considerando que as roupas e calçados consumidos nos países mais desenvolvidos são, geralmente, produzidos em países mais pobres (PETERS *et al.*, 2021).

Ainda segundo Peters *et al.* (2021) o impacto climático global do consumo de roupas e calçados aumentou de 1,0 para 1,3 GtCO<sub>2eq</sub> (giga toneladas de dióxido de carbono equivalente)

entre os anos 2000 e 2015, principalmente influenciado pelo consumo energético na fase de produção dos artigos de moda e potencializado pela expansão do *fast fashion*.

Os impactos ambientais provenientes do *fast fashion* vão além do aumento da necessidade de extração de recursos e produção industrial para atender à crescente demanda por novos artigos de vestuário e calçados, como também afeta diretamente a quantidade de resíduo produzido na fase de pós-consumo, pois o descarte destes artigos ocorre de forma cada vez mais precoce (MOAZZEM *et al.*, 2021; PETERS *et al.*, 2021).

Staikos & Rahimifard (2007) apresentam um modelo para tomada de decisão para gestão de resíduos na indústria calçadista, que aponta para quatro possibilidades de estratégia de fim de vida para os calçados: reuso; reciclagem; geração de energia; e descarte. Os autores destacam que a chave para a escolha da melhor estratégia de fim de vida é a viabilidade econômica, atrelada ao menor risco ambiental possível.

O reuso do calçado é sem dúvida a primeira estratégia a ser considerada, embora seja limitada pelas condições do calçado ao fim de sua vida útil. Também não é uma estratégia definitiva, pois, por mais que se possa estender a fase de uso, em algum momento o calçado precisará ser descartado, o que exigirá uma nova estratégia. A reciclagem dos calçados, embora ambientalmente interessante, passa por diversos desafios técnicos, principalmente, influenciados pela quantidade de diferentes materiais utilizados em um único par de sapatos, sem mencionar o uso de adesivos. (STAIKOS & RAHIMIFARD, 2007; TIPPAYAWONG & TIPPAYAWONG, 2017)

Dentre as estratégias de geração de energia através dos calçados no fim de sua vida útil, Tippayawong & Tippayawong (2017) e Rensburg, Van *et al.* (2021) apresentam o processo de pirólise como um dos meios mais eficazes para obtenção de energia através dos calçados pós-consumo. De acordo com Czajczynska *et al.* (2017) a pirólise é a desvolatilização termoquímica de materiais orgânicos ou inorgânicos a temperaturas elevadas em uma atmosfera inerte. Como benefícios do processo, destacam maior eficiência energética se comparado ao processo de incineração, e possibilidade de uso de materiais mistos, muito comuns nos segmentos de moda.

Globalmente, em torno de 87% dos produtos têxteis são descartados em aterros sanitários, dos quais 90% poderiam ser reutilizados ou reciclados (MOAZZEM *et al.*, 2021b). Os benefícios da reciclagem de artigos de vestuário e calçados são evidenciados por diversos autores como Staikos & Rahimifard (2007), Tippayawong & Tippayawong (2017), Rensburg, Van *et al.* (2021) e Moazzem *et al.* (2021), bem como seus desafios, que envolvem questões

comportamentais, culturais e técnicas, como, por exemplo, a variedade de materiais utilizados para confecção de roupas e calçados (STAIKOS & RAHIMIFARD, 2007b; LEE & RAHIMIFARD, 2012; KIM *et al.*, 2021).

Larney & Aardt, Van (2010) apresentam o cenário da reciclagem de roupas e calçados no contexto sul-africano e expõe os principais desafios desta estratégia, como as limitações tecnológicas, a inviabilidade econômica e a percepção dos consumidores quanto a qualidade de artigos de vestuário reciclados.

Os resultados e discussões demonstraram que expressivos impactos ambientais potenciais são identificados ao longo de toda a cadeia de valor, desde emissões ao ar na fase agrícola, passando pelo consumo energético e geração de resíduos nas etapas industriais, e consumo de água e energia na fase de uso, até o descarte destes artigos no final de sua vida útil. Foram apresentados também os desafios na promoção da circularidade nos segmentos de moda, com destaque para a necessidade de uma revisão dos padrões de consumo e uma abordagem estratégica das inter-relações entre os diversos membros da cadeia de valor.

Estes trabalhos deixam clara a necessidade da adoção de estratégias proativas de redução dos impactos do segmento, pensadas desde a origem dos produtos. Não foram identificados estudos de ACV específicos sobre laminados de PVC aplicados em calçados, o que ressalta a importância desta pesquisa.

Esta revisão sistemática da literatura foi publicada com o título “AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE CALÇADOS E ARTIGOS DE VESTUÁRIO: UMA REVISÃO DE LITERATURA” no XXIX SIMPEP (Simpósio de Engenharia de Produção), que aconteceu entre os dias 09 e 11 de Novembro de 2022.

### 3 METODOLOGIA

A ACV é uma técnica de avaliação de desempenho ambiental de um produto ou serviço ao longo do ciclo de vida, isto é, desde a extração de recursos até sua disposição final, quantificando os impactos ambientais potenciais para categorias de impacto pré-determinadas, o que a torna uma ferramenta eficaz para análise de *hotspots* (i. e. pontos da cadeia de valor em que acontecem os impactos ambientais mais relevantes) (UNEP, 2020).

A crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental e os possíveis impactos associados aos produtos, tanto na sua fabricação quanto no consumo, têm aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e lidar com aqueles impactos. Uma das técnicas em desenvolvimento com esse objetivo é a avaliação do ciclo de vida (ACV). [...] A ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais (por exemplo, uso de recursos e as consequências de liberações para o meio ambiente) ao longo de todo o do ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final (isto é, do berço ao túmulo) (ABNT, 2009, p. 5).

De acordo com a norma NBR ISO 14.044 (2009) um estudo de ACV é composto por quatro fases:

1. Definição de objetivo e escopo;
2. Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV);
3. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV);
4. Interpretação dos resultados

Na etapa de “Definição de objetivo e escopo” foi definido o propósito do estudo, que consiste em apresentar os principais *hotspots* ambientais de um laminado sintético espalhado de PVC utilizado para confecção de palmilhas, através da realização de uma ACV do berço ao portão (*cradle to gate*), baseada em um estudo de caso. Nesta etapa também foram definidas a unidade declarada, o fluxo de referência, as fronteiras do sistema, os aspectos e impactos ambientais relevantes para o estudo, os pressupostos e limitações.

De acordo com Bjørn *et al.* (2018) a etapa de “Análise do Inventário do Ciclo de Vida” (ICV) é a que demanda maior tempo de execução. Nesta etapa foram coletados e compilados os dados sobre fluxos de materiais de todos os processos no sistema de produto estudado. A saída desta etapa é um inventário de fluxos de materiais, que é a base da fase de “Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida” (AICV).

A etapa de AICV é composta por três passos: seleção das categorias de impacto; classificação; e caracterização. É nela que as informações do inventário são correlacionadas

com os impactos ambientais (ROSENBAUM *et al.*, 2018). Nesta etapa são utilizados softwares de ACV para correlação dos dados, além da execução da análise de sensibilidade.

Por fim, na etapa de “Interpretação dos resultados”, os resultados das outras fases são considerados em conjunto e analisados à luz das incertezas e dos pressupostos que foram feitos e documentados ao longo do estudo (HAUSCHILD, BONOU e OLSEN, 2018).

### **3.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO.**

#### **3.1.1 Objetivo**

Cerca de 8,1% dos impactos climáticos globais são provenientes das indústrias de vestuário e calçados, sendo os calçados responsáveis por 1,4% destes impactos. De acordo com o relatório “*MEASURING FASHION: environmental impact of the global apparel and footwear industries study*” (QUANTIS, 2018), embora os calçados de couro representem um quarto da produção global, entre 30% e 82% dos impactos ambientais do segmento são provenientes destes, sendo a categoria Qualidade do Ecossistema (*ecosystem quality*) a mais impactada. Já os calçados sintéticos apresentam impactos importantes nas categorias: Depleção de Recursos (*resources*) e Mudanças Climáticas (*climate change*), com um resultado de 54% e 50% dos impactos do segmento, respectivamente.

Tais resultados reforçam a importância do questionamento referente aos impactos ambientais dos laminados sintéticos espalmados aplicados em calçados, não somente durante seu processo de fabricação, mas também ao longo de toda sua vida útil.

Desta forma, o objetivo deste estudo é apresentar os principais *hotspots* ambientais de um laminado sintético espalmado de PVC utilizado para confecção de palmilhas, através da realização de uma ACV do berço ao portão (*cradle to gate*), baseada em um estudo de caso. Espera-se ainda que os atores da cadeia de valor calçadista, bem como a sociedade em geral, possam utilizar-se dos resultados encontrados para a promoção de ações que reduzam ou eliminem os potenciais riscos ambientais do segmento.

#### **3.1.2 Escopo**

Para execução deste estudo foram realizadas uma revisão sistemática de literatura e um estudo de caso, baseado em duas empresas focais, uma produtora de laminados sintéticos

espalmados (aqui denominada Empresa X) e uma fabricante de calçados (Empresa Y), que utiliza o laminado produzido na Empresa X para confecção de palmilhas.

A Empresa X é uma empresa brasileira, fabricante de revestimentos sintéticos, com 60 anos de atuação no mercado de químicos e plásticos, com sede no interior de São Paulo, onde emprega aproximadamente 1.000 pessoas. Já a empresa Y, também empresa brasileira, fabricante de calçados, com mais de 50 anos de atuação, conta com 5 unidades fabris, sendo o produto componente deste estudo produzido no Ceará, e emprega mais de 17.000 pessoas. A figura 4 apresenta, o laminado, já em formato de palmilha, e o modelo de calçado em que a palmilha será utilizada.

FIGURA 4 – (a) Laminado sintético cortado em formato de palmilha;  
(b) Modelo de calçado em que a palmilha será utilizada



(a)



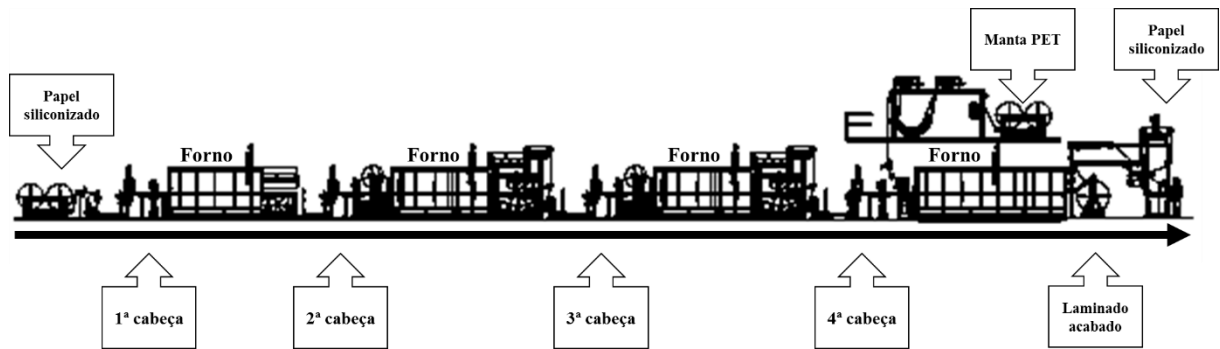
(b)

Fonte: Imagens disponibilizadas pela empresa Y.

### 3.1.3 Caracterização do produto e sistema

O produto objeto de estudo trata-se de um laminado sintético de PVC produzido através do processo de espalmagem. O processo é caracterizado pela deposição de camadas de plastisol sobre um papel siliconizado e impregnação de um substrato, neste caso, uma manta de Politereftalato de etileno (PET). O plastisol é um sistema líquido que contém resina de PVC dispersa em plastificante (VON MOODY & NEEDLES, 2004). Cada camada de plastisol passa por fornos de gelificação, fusão e cura (PACHECO *et al.*, 2017). A figura 5 ilustra de forma simplificada o processo de espalmagem.

FIGURA 5 – Processo de espalmagem



Fonte: Adaptado de Olbrich, 2023

O laminado espalmado objeto de estudo é composto por quatro camadas de PVC, depositadas sobre um papel siliconizado, responsável pela definição da textura do produto:

- Na primeira camada, a mais superficial, é aplicada uma laca de proteção, que consiste em uma mistura de solventes orgânicos, veículo acrílico e aditivos, que tornam o laminado mais resistente a fricção com o pé durante o uso do calçado;
- Na segunda camada é aplicado um filme de PVC compacto. Esta camada define a cor do produto e tem influência direta sobre a resistência do material acabado;
- Na terceira camada aplica-se PVC aditivado com agente de expansão, responsável pela espessura e dureza do laminado;
- Por fim, na quarta camada aplica-se um plastisol adesivo, que garante a adesão do laminado à manta de PET.

Após o processo de espalmagem o produto é revisado, embalado em bobinas e despachado para o fabricante de calçados (Empresa Y), que o utilizará para confecção das palmilhas.

As palmilhas, de maneira geral, podem ser feitas de diversos materiais, como EVA (etileno acetato de vinila), espuma de poliuretano, borracha esponjosa, ou até mesmo materiais planos, como papelão. A aplicação de PVC na sola dos calçados e palmilhas cresceu significativamente no mercado brasileiro nos últimos anos, principalmente como alternativa ao uso de borrachas termoplásticas, que apresentam baixa compatibilidade com diversos adesivos

e exigem tratamentos que viabilizem o processo de colagem, como limpeza química e abrasão mecânica (KOHAN *et al.*, 2020; RUZAFSA-SILVESTRE *et al.*, 2022).

De acordo com o fabricante (Empresa X), a principal vantagem do laminado sintético de PVC objeto de estudo se comparado a outros laminados de PVC é a aplicação direta no calçado, sem a necessidade de dublagem (*i. e.* acoplamento de espuma ao laminado), o que elimina uma etapa do processo de produção do calçado e reduz a quantidade de cola e espuma aplicadas no produto final (calçado pronto pra uso).

O uso do laminado ocorre em duas etapas na empresa Y, produção da palmilha e montagem do calçado. A primeira etapa da produção da palmilha é o corte das placas no balancim, cada placa tem a medida de duas palmilhas, conforme apresentado na figura 6 (a). Após o corte, as placas seguem para a etapa de serigrafia, onde será impressa a logomarca do calçado e outras estampas, conforme necessidade do modelo. A próxima etapa é o corte da palmilha através do processo de corte e solda por contato de alta frequência.

As palmilhas, já serigrafadas e cortadas seguem para a o processo de montagem, enquanto as aparas (figura 6 (b)) são enviadas para a central de tratamento de resíduos, onde serão enfardadas e enviadas para um triturador que fará a separação do PVC da manta de PET. O PVC será micronizado e retornará para o processo de injeção dos cabedais para alguns modelos específicos (o modelo componente deste estudo não utiliza o PVC recuperado), enquanto as sobras de manta serão enviadas para coprocessamento em fornos de cimento.

O processo de coprocessamento em fornos de cimento consiste na substituição de parte dos combustíveis por resíduos industriais. Trata-se de uma prática amplamente difundida e reconhecidamente eficaz para destruição térmica de resíduos e passivos ambientais, em função das altas temperaturas atingidas pelos fornos (até 2.000 C°) (SNIC, 2021).

FIGURA 6 – (a) Placas de laminado;  
(b) Aparas



(a)

(b)

Fonte: Imagens disponibilizadas pela empresa Y.

Na linha de montagem dos calçados é aplicado um adesivo na parte inferior da palmilha, que passará por uma estufa para ativação da cola, antes de ser inserida no cabedal. Após a montagem da palmilha será colocado o enfeite e o calçado estará pronto para revisão, embalagem e expedição.

Há incontáveis modelos de calçados disponíveis no mercado, com aplicação dos mais diversos tipos de materiais e produzidos através de processos variados. Conforme apresentado na figura 7, o calçado que utiliza o laminado objeto do estudo pode ser dividido em 4 partes componentes principais: o cabedal, que é a parte superior do calçado; a palmilha, componente que proporciona maior conforto ao usuário; o reforço da palmilha; e o enfeite.

FIGURA 7 – Composição do calçado



Fonte: Imagem disponibilizada pela empresa Y.

### 3.1.4 Unidade declarada

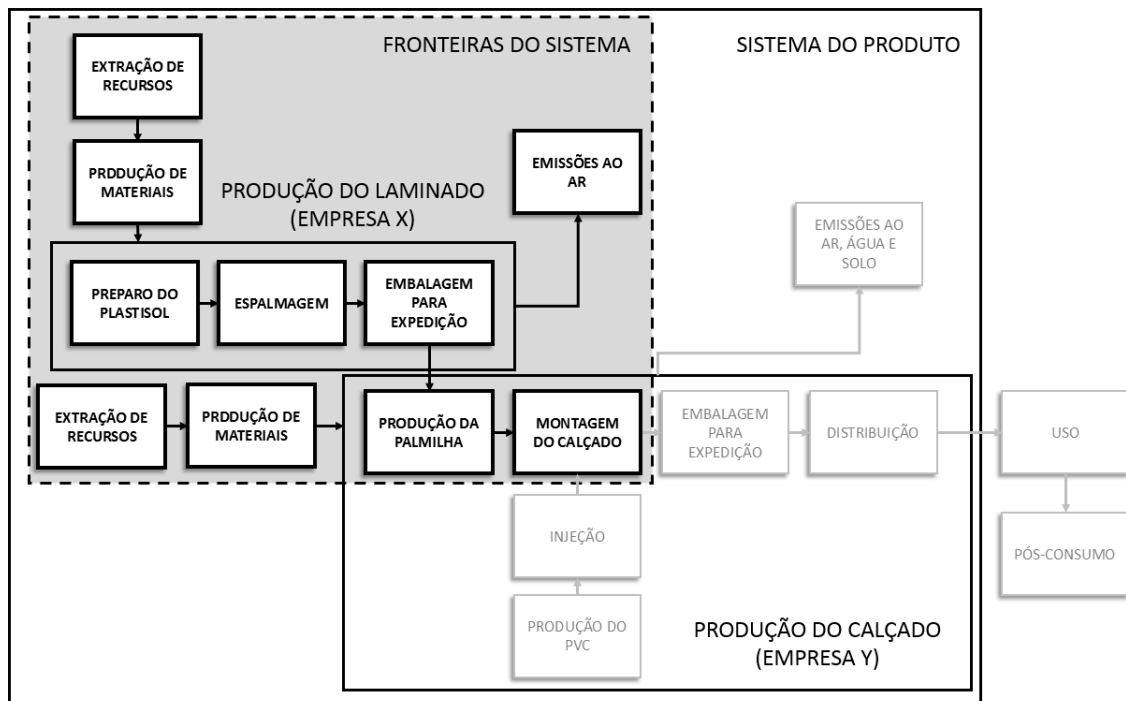
De acordo com a NBR ISO 14067 (2023) a unidade declarada expressa a quantidade de um produto utilizada como referência na quantificação de um estudo parcial. Considerando a abordagem do berço ao portão (*cradle to gate*), que exclui as etapas de uso e pós-uso das fronteiras do sistema, definiu-se como unidade declarada a produção de 217 quilos de laminado espalmado de PVC, quantidade que corresponde a 120 m<sup>2</sup> de laminado (consideradas as variações do produto e do processo). A quantidade escolhida foi definida como a produção de um lote mínimo de palmilhas, que corresponde a 3.000 palmilhas de tamanho 35 para o modelo de calçado componente deste estudo. Em função do tipo de abordagem do estudo, o fluxo de referência será igual a unidade declarada.

### 3.1.5 Fronteiras do sistema

Conforme apresentado na seção 3.1.3, o estudo aborda duas empresas focais, uma fabricante de laminados sintéticos e uma fabricante de calçados. Para efeito de estudo, o

processo de fabricação do laminado sintéticos espalmado foi dividido em três etapas (preparo do plastisol, espalmagem e embalagem para expedição), enquanto o processo de fabricação do calçado dividiu-se em cinco partes (produção do PVC, injeção, produção da palmilha, montagem e embalagem e expedição), das quais apenas duas estão dentro das fronteiras do sistema (produção da palmilha e montagem do calçado). Nota-se que a palmilha após cortada segue diretamente para o processo de montagem de calçado, sem que haja necessidade de dublagem de espuma, o que corrobora o exposto pela fabricante do laminado de PVC objeto de estudo. A figura 8 ilustra os processos que compõe o sistema do produto e as fronteiras do sistema consideradas no estudo.

FIGURA 8 – Fronteiras do sistema



Fonte: autoria própria.

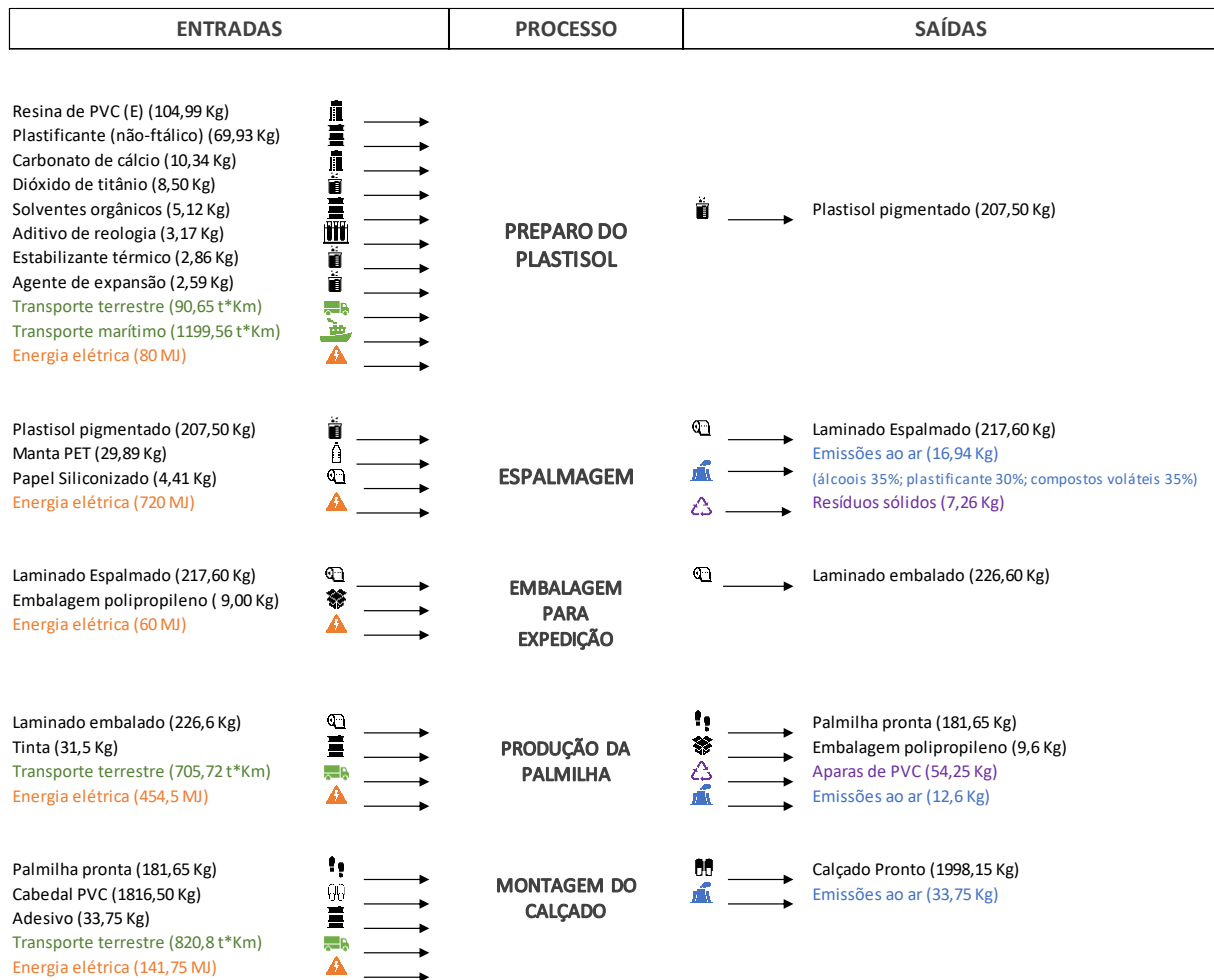
### 3.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

A etapa de análise do inventário do ciclo de vida (ICV) é a que demanda maior tempo de execução (Bjørn *et al.*, 2018). A coleta de dados de primeiro plano na empresa X deu-se de forma presencial, através de acesso direto as bases de dados da empresa e entrevistas com representantes das áreas técnica e comercial. Já os dados de primeiro plano da empresa Y foram

disponibilizados através de relatórios e entrevistas com representantes das áreas técnica e de sustentabilidade, além da consulta de documentos disponíveis no site da empresa.

O resultado desta etapa é o inventário de fluxos de materiais, apresentado na figura 9.

FIGURA 9 – Inventário de fluxos de materiais do sistema do produto



Fonte: Autoria própria.

### 3.3 METODOLOGIA DE AICV E TIPOS DE IMPACTO

A avaliação de impactos classifica e combina os fluxos de materiais, energia e emissões para dentro e para fora de cada sistema de produto pelo tipo de impacto que seu uso ou liberação tem no meio ambiente (QUANTIS, 2018). De acordo com a NBR ISO 14.044 (2009) a seleção das categorias de impacto, indicadores e modelos de caracterização utilizados na metodologia da AICV deve ser consistente com o objetivo do estudo.

Com base nos estudos de ACV realizados por Luca *et al.* (2018), QUANTIS (2018), UNEP (2020), Peters *et al.* (2021), Rossi *et al.* (2021) e Moazzem *et al.* (2021) foram selecionadas quatro categorias de impacto: aquecimento global (*global warming*); eutrofização (*eutrophication*); toxicidade humana (*human toxicity*); e depleção de recursos abióticos (*abiotic depletion potential*).

A categoria Aquecimento Global avalia o impacto potencial das emissões de gases de efeito estufa associados a um produto, processo ou organização, nas mudanças climáticas, expresso em termos de uma substância de referência e horizonte de tempo especificado (QUANTIS, 2018). Os impactos ambientais potenciais da categoria são expressos em quilos de dióxido de carbono equivalente ( $\text{kg CO}_{2\text{eq}}$ ). A quantidade de operações industriais componentes da cadeia de valor calçadista, aliada ao volume global de produção fazem com que o segmento calçadista contribua significativamente com esta categoria de impacto (UNEP, 2020).

A categoria Eutrofização, expressa em quilos de fosfato equivalente ( $\text{kg PO}_{4\text{---eq}}$ ), refere-se ao aumento no suprimento de nutrientes em corpos de água doce, podendo também ser aplicada a águas marinhas e até mesmo ao solo. A ação humana tem impacto direto sobre este aumento na concentração de nutrientes, que pode causar desequilíbrio no ecossistema (SMITH *et al.*, 1999). O mercado de moda pode contribuir significativamente para esta categoria, uma vez que as emissões de óxido de nitrogênio provenientes da combustão e os resíduos de água industriais são suas principais fontes de impacto (ROOS *et al.*, 2015).

A categoria Toxicidade Humana considera os danos potenciais provenientes da liberação de substâncias que afetam os seres humanos, com base na capacidade de cada substância em causar danos à saúde humana (QUANTIS, 2018). A diversidade de produtos químicos e processos industriais presentes na cadeia calçadista tem impacto direto sobre a categoria (UNEP, 2020; ROSSI *et al.*, 2021). Os resultados desta categoria são expressos em quilos de 1,4-diclorobenzeno equivalente ( $\text{kg-1,4 Db}_{\text{eq}}$ ).

A categoria Depleção de Recursos Abióticos, expressa em quilos de antimônio equivalente ( $\text{kg Sb}_{\text{eq}}$ ), quantifica a contribuição relativa de um sistema de produto para o esgotamento dos recursos minerais (OERS, VAN *et al.*, 2020). Esta categoria é diretamente impactada pelo consumo de combustíveis fósseis para geração de energia, bem como pela extração de recursos utilizados na indústria calçadista (MOAZZEM *et al.*, 2021).

Definidas as categorias, optou-se pelo uso do método CML-IA *baseline* para a categoria depleção de recursos abióticos, de acordo com a recomendação do IBICT (2019). O mesmo

método foi utilizado para análise das categorias aquecimento global, toxicidade humana e eutrofização.

A modelagem do sistema estudado foi realizada por meio do software OpenLCA, versão 2.0.3. Os dados de entrada e saída do sistema estudado foram coletados diretamente com as empresas focais, enquanto os dados secundários, foram obtidos através das bases de dados ELCD, Ecoinvent 3.9 e LCA Commons.

Após execução da modelagem foi realizada a análise de sensibilidade, onde foram propostos três cenários alternativos ao cenário base, e seus resultados normalizados e comparados aos resultados do cenário base, de forma a identificar-se qual o cenário mais vantajoso do ponto de vista ambiental.

### **3.3.1 Limitações**

Os dados de inventário, tanto de consumo quanto de transportes e emissões, foram disponibilizados pelas empresas focais do estudo. Não foram executadas medições *in loco*.

Não foram encontrados dados secundários para os fluxos “aditivo de reologia” e “estabilizante térmico”, por isso os impactos provenientes destes componentes não foram considerados no estudo.

Para cálculo dos fluxos de transporte considerou-se a distância marítima dos materiais importados e a distância do porto de destino até a fábrica, porém não foram consideradas as distâncias do produtor até o porto de origem, em função da indisponibilidade de dados.

A fase de uso do calçado, bem como as estratégias de fim de vida foram excluídas das fronteiras do sistema, devido à dificuldade de obtenção de dados sobre estas duas etapas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme apresentado na seção 3.3, foram avaliadas 4 categorias de impacto para o sistema de produto, através do método CML-IA *baseline*. Os resultados absolutos encontrados para cada categoria são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 – Resultados do sistema do produto por categoria de impacto

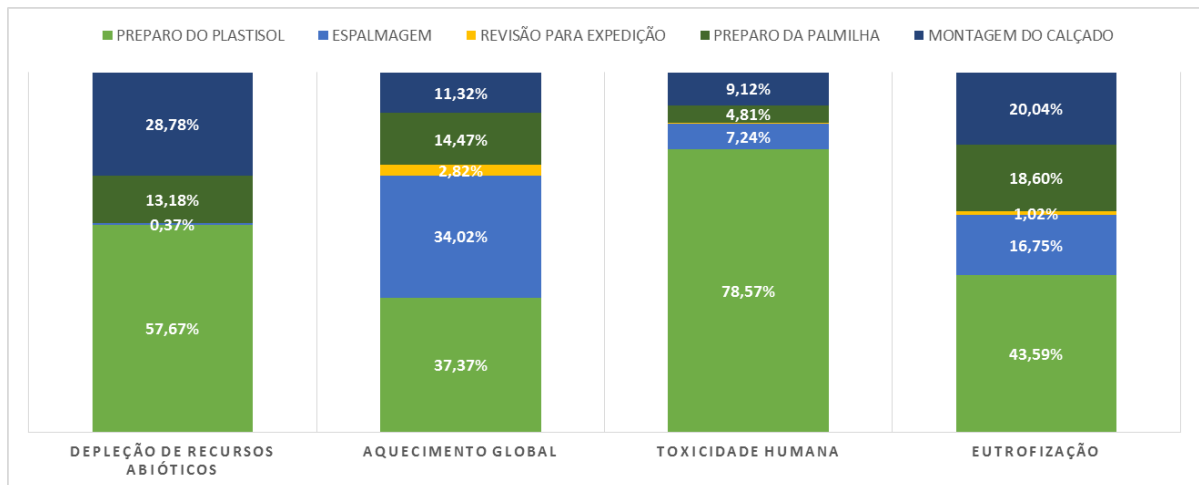
<b>CATEGORIA</b>	<b>IMPACTO</b>	<b>UNIDADE DE MEDIDA</b>
<i>Depleção de recursos abióticos</i>	0,00623	kg Sb <sub>eq</sub> / un. declarada
<i>Aquecimento global</i>	1.109,11092	Kg CO <sub>2eq</sub> / un. declarada
<i>Toxicidade humana</i>	1.620,59414	kg-1,4 Db <sub>eq</sub> / un. declarada
<i>Eutrofização</i>	1,40622	kg PO <sub>4--eq</sub> / un. declarada

Fonte: Aatoria própria

### 4.1 ANÁLISE DE HOTSPOTS

Os resultados encontrados para cada categoria de impacto foram avaliados de acordo com a etapa do processo em que observados, conforme apresentado na figura 10. Os impactos potenciais referentes aos dados de segundo plano das matérias-primas utilizadas em cada processo foram alocados nos processos em que são utilizadas.

FIGURA 10 – Análise de contribuição proporcional por processo.



Fonte: Autoria própria

O processo de preparo do plastisol foi diretamente afetado pelos impactos ambientais potenciais observados durante a fabricação das matérias-primas utilizadas em sua execução. Conforme apresentado na Tabela 2, grande parte dos impactos ambientais potenciais ocorrem à montante do processo de preparo e produção do laminado, durante os processos de extração e produção dos materiais utilizados como matérias-primas, como, por exemplo, o processo de produção do plastificante (não-ftálico), que ocorre através do processo de esterificação do ácido tereftálico com 2-etil hexanol em pressão e temperaturas elevadas, o que demanda alto consumo energético (ALTUN & FELLAH, 2022)

O processo de espalmagem apresentou maior influência na categoria Aquecimento Global, resultado proveniente do alto consumo energético desta etapa do processo. Resultado similar foi observado nos processos de preparo da palmilha e montagem do calçado, embora este seja minimizado pelo uso de energia de fontes renováveis na empresa Y, enquanto a empresa X utiliza energia elétrica da rede de distribuição.

Na Tabela 2 são apresentados os dados percentuais de contribuição de cada *hotspot* para cada categoria de impacto avaliada. Dentre todas as etapas do sistema do produto analisadas, o processo de produção do plastificante (não-ftálico), o uso de energia e o processo de produção da resina de PVC (E) foram as que apresentaram maiores contribuições. Os resultados encontrados para cada categoria de impacto serão apresentados e discutidos à seguir.

TABELA 2 – Contribuição proporcional dos principais *hotspots* do sistema do produto, por categoria de impacto

	<i>DEPLEÇÃO DE RECURSOS ABIÓTICOS</i>	<i>AQUECIMENTO GLOBAL</i>	<i>TOXICIDADE HUMANA</i>	<i>EUTROFIZAÇÃO</i>
<i>ADESIVOS</i>	28,73%	9,85%	9,14%	18,30%
<i>AGENTE DE EXPANSÃO</i>	9,95%	1,99%	2,72%	7,84%
<i>APARAS DE LAMINADO</i>	0,00%	0,18%	3,64%	3,92%
<i>DIÓXIDO DE TITÂNIO</i>	0,00%	3,87%	0,93%	4,58%
<i>MANTA PET</i>	0,00%	13,55%	0,86%	3,92%
<i>PLASTIFICANTE (NÃO-FTÁLICO)</i>	<b>47,83%</b>	16,48%	15,56%	<b>22,22%</b>
<i>RESINA DE PVC (E)</i>	0,00%	14,54%	<b>59,26%</b>	8,24%
<i>TINTA</i>	13,16%	10,32%	4,69%	14,38%
<i>TRANSPORTES</i>	0,00%	4,18%	0,19%	7,58%
<i>USO DE ENERGIA</i>	0,00%	<b>25,04%</b>	2,47%	9,02%
<i>OUTROS</i>	0,32%	0,00%	0,55%	0,00%

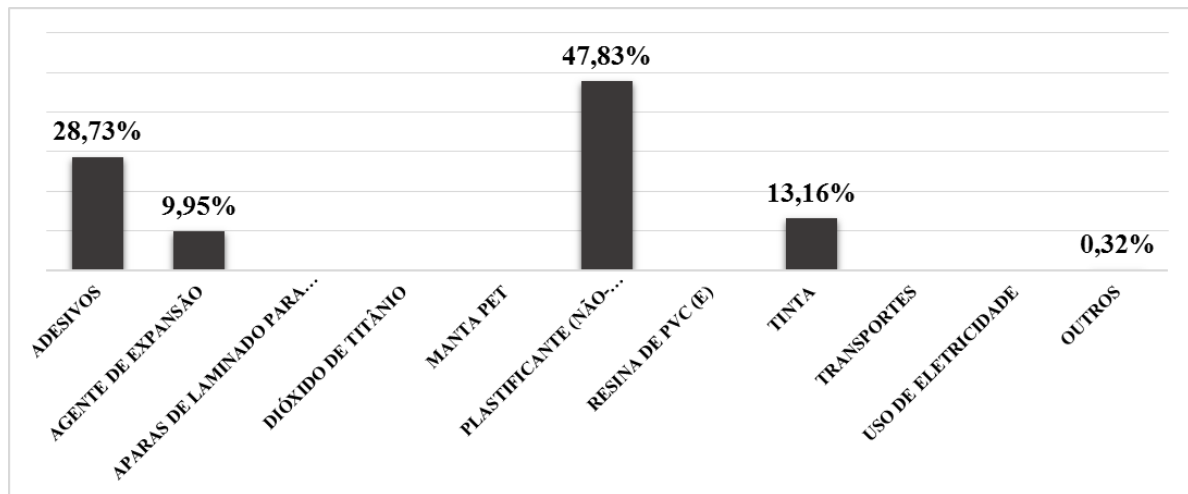
Fonte: Autoria própria

#### 4.1.1 Depleção de recursos abióticos

A categoria Depleção de Recursos Abióticos quantifica a contribuição relativa de um sistema de produto para o esgotamento dos recursos minerais (OERS, VAN *et al.*, 2020). Esta categoria é diretamente impactada pela extração de recursos utilizados na indústria (MOAZZEM *et al.*, 2021).

O principal *hotspot* ambiental observado na categoria Depleção de Recursos Abióticos refere-se ao processo de produção do plastificante (não-ftálico), conforme observado na figura 11, seguido pelo uso do adesivo para colagem da palmilha no cabedal do calçado.

FIGURA 11 – Resultados para a categoria depleção de recursos abióticos



Fonte: Autoria própria

O uso de plastificantes, adesivos e tintas com base petroquímica tem impacto direto nesta categoria, pois originam-se de fontes não renováveis, suscetíveis a esgotamento. A busca por materiais de fontes renováveis em detrimento aos de base petroquímica tem sido tema de diversos estudos, pois tratam-se de materiais bastante presentes no cotidiano das pessoas (AL-SAMHAN *et al.*, 2022; BELAY, 2023; MOHAMED *et al.*, 2023).

De acordo com Zhang *et al.* (2022) a substituição de produtos à base de petróleo por materiais naturais, que além de renováveis, podem também ter menor custo, é de extrema importância para o desenvolvimento sustentável da indústria de polímeros. Destacam porém, que ainda há desafios que precisam ser superados, como o aumento de produtividade dos compostos de biomassa, que são produzidos através de processos químicos complexos.

Os plastificantes são algumas das principais matérias-primas para a produção de laminados espalmados de PVC, pois são responsáveis por conferir flexibilidade e durabilidade ao produto. Existem mais de 100 tipos de plastificantes diferentes disponíveis no mercado, a maioria deles ftalatos, que compõe uma família de produtos químicos sintéticos amplamente utilizados. Embora nem todos os ftalatos tenham sido estudados exaustivamente, resultados indicam que, pelo menos alguns deles, podem ser nocivos à saúde humana, o que tem tornado seu uso cada vez mais restrito, principalmente na Europa (ALTUN & FELLAH, 2022; ECHA, 2023)

As restrições impostas ao uso de ftalatos acarreta no aumento pela busca de plastificantes não-ftálicos, que, embora considerados menos nocivos ao ambiente e à saúde

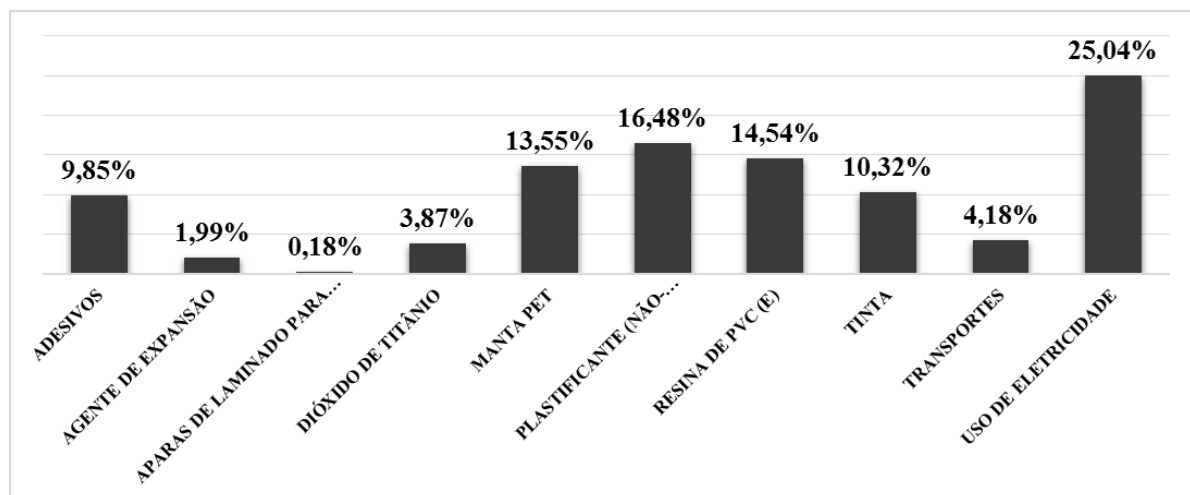
humana, são produzidos através de processos complexos, com alto consumo energético na fase industrial, o que também contribui para o esgotamento de recursos (ALTUN & FELLAH, 2022).

#### 4.1.2 Aquecimento Global

A categoria Aquecimento Global avalia o impacto potencial das emissões de gases de efeito estufa associados a um produto, processo ou organização, nas mudanças climáticas (QUANTIS, 2018). A quantidade de operações industriais componentes da cadeia de valor calçadista, aliada ao volume global de produção, fazem com que o segmento calçadista contribua significativamente com esta categoria de impacto (UNEP, 2020).

Os impactos observados na categoria aquecimento global estão distribuídos de forma mais uniforme para os *hotspots* avaliados, com maior impacto observado pelo uso de eletricidade ao longo do sistema de produto, conforme a figura 12.

FIGURA 12 – Resultados para a categoria aquecimento global



Fonte: Autoria própria

As atividades humanas, principalmente em função das emissões de gases do efeito estufa, causam incontestavelmente o aquecimento global. Tais emissões vem aumentando desde o início do período industrial, impactadas diretamente pelo uso de energia e padrões de consumo e produção. Dentre os gases emitidos pela atividade humana destaca-se como

principal fonte de preocupação o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que tem como principal fonte de emissão a queima de combustíveis fósseis e os processos industriais (IPCC, 2023).

O consumo de energia durante os processos do sistema do produto avaliado foi responsável pelos impactos mais significativos, resultados similares aos apresentados por Cheah *et al.* (2013) e Serweta *et al.* (2019), embora outras etapas da cadeia, como o processo de produção do plastificante (não-ftálico) e o processo de produção da manta de PET não devam ser desprezados, pois juntos apresentam contribuição superior a 35% dos impactos observados na categoria.

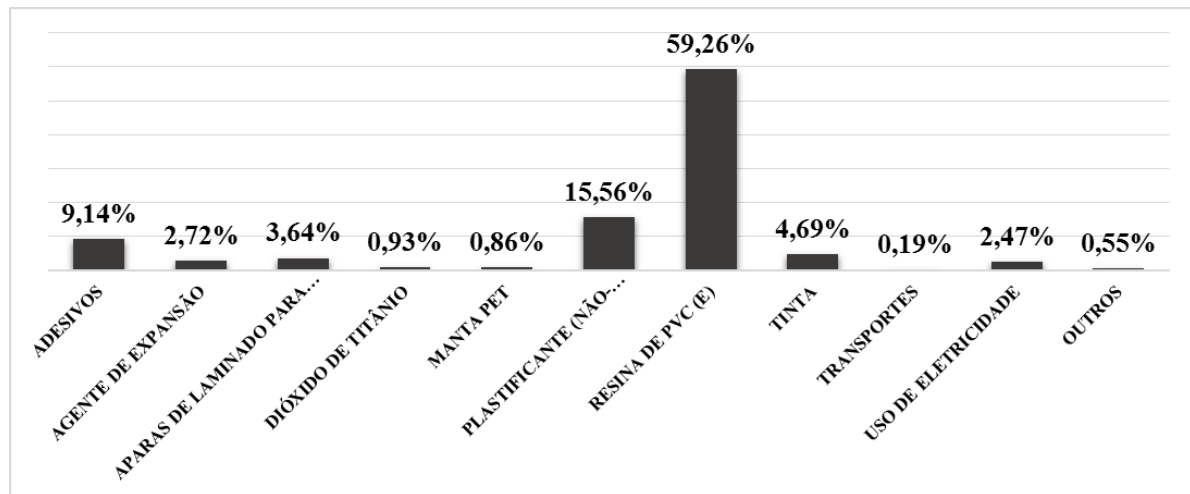
Os plastificantes (não-ftálicos) são produzidos através de processos complexos, com alto consumo energético e quantidades significativas de emissões de monóxido de carbono (CO) na fase industrial (ALTUN & FELLAH, 2022), mesmas características observadas durante o processo de fabricação da manta de PET, que, além do consumo energético e emissões, utiliza diversos compostos químicos durante sua fabricação (UEKERT *et al.*, 2023).

#### **4.1.3 Toxicidade Humana**

A categoria Toxicidade Humana considera os danos potenciais provenientes da liberação de substâncias que afetam os seres humanos, com base na capacidade de cada substância em causar danos à saúde humana (QUANTIS, 2018).

O processo produtivo da resina de PVC (E) influenciou diretamente os resultados observados para a categoria toxicidade humana, conforme a figura 13.

FIGURA 13 – Resultados para a categoria toxicidade humana



Fonte: Autoria própria

As resinas de PVC utilizadas no laminado objeto de estudo são produzidas por meio da polimerização em emulsão, processo em que o monômero de cloreto de vinila (MVC, do inglês *monomeric vinyl chloride*) é disperso em gotas extremamente pequenas em meio a uma fase aquosa contínua, por meio de agitação vigorosa e da presença de um agente emulsificante. Neste processo a quantidade de MVC convertido para PVC encontra-se normalmente ente 85% e 95% (RODOLFO JR, NUNES & ORMANJI, 2006).

O MVC, é um agente reconhecidamente cancerígeno, facilmente absorvido pelo sistema respiratório, e que pode causar irritação brônquica, sonolência, comprometimento do sistema nervoso central, inconsciência e até a morte se absorvido em altas doses (OMAR, 2023), por isso as plantas de polimerização atendem normas rígidas de saúde e os níveis de MVC permanecem em constante monitoramento. O MVC não reagido é recuperado em uma primeira etapa e posteriormente eliminado de maneira forçada pelo aquecimento com vapor da lama de PVC (RODOLFO JR, NUNES & ORMANJI, 2006).

Além disso, a resina de PVC sozinha, não tem nenhuma aplicação industrial, é necessária a adição de produtos químicos à resina, o que pode potencializar impactos ambientais e riscos à saúde humana (ECHA, 2023; MILIUTE-PLIPIENE *et al.*, 2021).

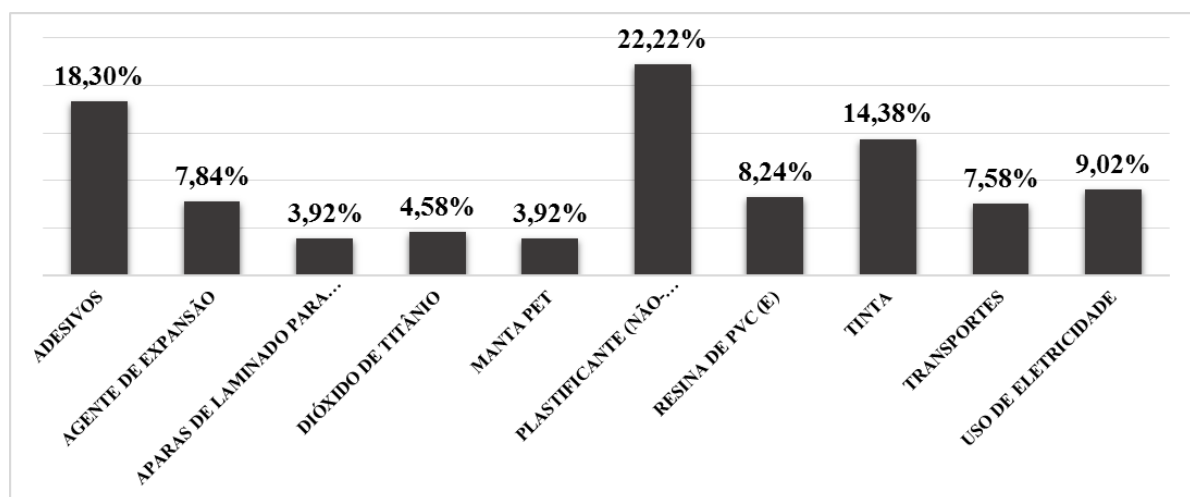
Deve-se considerar que a Resina de PVC (E) utilizada na fabricação do laminado objeto de estudo é importada da Alemanha, o que aponta em direção à globalização dos impactos ambientais potenciais do segmento de moda, conforme abordagem de Peters *et al.* (2021)

#### 4.1.4 Eutrofização

A categoria Eutrofização, refere-se ao aumento no suprimento de nutrientes em corpos de água doce, podendo também ser aplicada a águas marinhas e até mesmo ao solo. O mercado de moda pode contribuir significativamente para esta categoria, uma vez que as emissões de óxido de nitrogênio (NO) provenientes da combustão e os resíduos de água industriais são suas principais fontes de impacto (ROOS *et al.*, 2015)

Os resultados para a categoria eutrofização estão bastante pulverizados, conforme observado na figura 14, com maior impacto observado nos processos de produção do plastificante (não-ftálico) e dos adesivos.

FIGURA 14 – Resultados para a categoria eutrofização



Fonte: Autoria própria

O uso de adesivos para colagem da palmilha tem impactos significativos, resultados diretamente influenciados pela emissão de metileno difenil diisocianato (MDI), presentes nos adesivos de PU. As emissões durante o uso de adesivos ocorrem em função da necessidade de exposição ao calor no processo, para ativação da cola. A presença de MDI pode ocasionar problemas nas vias aéreas e, quando em contato com a água, a formação de compostos carcinogênicos (MACIEL *et al.*, 2017; KARLSSON *et al.*, 2022)

A tinta utilizada no processo de serigrafia das palmilhas apresentou impacto superior a 15% em função do uso de resinas alquídicas, amplamente utilizadas na indústria de tintas. As resinas alquídicas apresentam secagem rápida e boa resistência a água, no entanto, o alto índice

de compostos orgânicos voláteis (VOC), representa importantes riscos ambientais potenciais (UZOH *et al.*, 2019)

Os transportes, tanto marítimo quanto terrestre, apresentaram contribuições menos expressivas se comparados aos processos de fabricação de materiais, o que corrobora os resultados encontrados por Peters *et al.* (2021).

## 4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

De acordo com a NBR ISO 14044 (2009) a análise de sensibilidade é um procedimento sistemático para estimar os efeitos das escolhas feitas em termos de métodos e dados nos resultados de um estudo.

Neste estudo foram propostos três cenários alternativos, pensados a partir da identificação dos principais *hotspots* do sistema do produto. Para os cenários 1 e 2 foram propostas práticas de produção mais limpa, enquanto o cenário 3 baseou-se em estabilidade de processo e conforto ao usuário.

A produção mais limpa é um processo de melhoria contínua baseado no uso eficiente de recursos e minimização da geração de resíduos e emissões, com objetivo de reduzir impactos ambientais e gerar benefícios econômicos e mudanças organizacionais (VIEIRA & AMARAL, 2016). Dentre as principais práticas de produção mais limpa nas indústrias brasileiras destacam-se: o planejamento e controle de produção com foco ambiental; a criação em parceria com fornecedores para o desenvolvimento de matérias-primas mais sustentáveis; e o projeto de produtos ecoeficientes, visando o uso de materiais mais ecológicos (OLIVEIRA NETO *et al.*, 2015).

Os cenários propostos são:

**Cenário 1 - substituição do plastificante (não-ftálico) por óleo de soja:** considerando o potencial de impactos ambientais e a possibilidade de esgotamento dos recursos fósseis, a substituição de plastificantes de origem mineral por plastificantes de fontes renováveis tem sido tema de diversos estudos nos últimos anos. Dentre estes plastificantes, o óleo de soja aparece como solução eficaz, econômica e ambientalmente (LIU *et al.*, 2020b).

**Cenário 2 – uso de energia solar no processo de fabricação do laminado:** a energia solar é uma fonte universal de energia, inesgotável e facilmente explorável se comparada a muitas outras fontes. Os ganhos ambientais do uso de energia solar são factuais e comprovados por diversos estudos (RASHEDI & KHANAM, 2020).

**Cenário 3 - alteração de gramatura do laminado espalmado:** este cenário foi sugerido baseando-se em uma proposta do corpo técnico da empresa X, fabricante do laminado de PVC objeto de estudo, que considera o aumento da camada de PVC no produto como uma alternativa viável à variações de processo, no entanto, preocupa-se com os impactos ambientais potenciais provenientes desta solução.

Os resultados obtidos para cada cenário foram comparados ao cenário base e posteriormente comparados entre si, de modo a identificar-se o cenário mais vantajoso do ponto de vista ambiental.

#### **4.2.1 Cenário 1 – substituição do plastificante (não-ftálico) por óleo de soja**

A substituição do plastificante (não-ftálico) por plastificante de origem vegetal representa expressivas reduções de impacto nos resultados do sistema de produto para todas as categorias de impacto analisadas, principalmente para a categoria aquecimento global. Os resultados para este cenário são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 – Resultados por categoria de impacto para o cenário 1

<i>CATEGORIA</i>	<i>UNIDADE</i>	<i>CENÁRIO BASE</i>	<i>CENÁRIO 1</i>	<i>IMPACTO</i>
<i>Depleção de recursos abióticos</i>	kg Sb <sub>eq</sub>	0,00623	0,00326	-47,67%
<i>Aquecimento global</i>	Kg CO <sub>2eq</sub>	1.109,11092	-1.464,83604	-232,07%
<i>Toxicidade humana</i>	kg-1,4 Db <sub>eq</sub>	1.620,59414	368,9851	-77,23%
<i>Eutrofização</i>	kg PO <sub>4--eq</sub>	1,40622	-0,63812	-145,38%

Fonte: Autoria própria

O uso de plastificantes petroquímicos apresenta diversos riscos ambientais potenciais, conforme descrito nas seções 4.1.1 e 4.1.2. Uma alternativa bastante discutida ao uso de plastificantes petroquímicos são os plastificantes vegetais, que apresentam vantagens significativas nas emissões de gases do efeito estufa e pegada de carbono dos produtos plásticos (BOTTAUSCI *et al.*, 2021).

Os expressivos ganhos ambientais observados neste cenário devem-se ao potencial de sequestro de carbono da soja. De acordo com Tolo *et al.* (2023) o sequestro de carbono proveniente das plantações de soja no Brasil é superior às emissões antropogênicas durante a fase de cultivo, podendo chegar a 221 vezes no bioma amazônico e 39 vezes no bioma cerrado.

Madaleno *et al.* (2009) conclui que os plastificantes de origem vegetal assemelham-se aos petroquímicos em termos de performance mecânica e química e seu uso como alternativa mais sustentável é viável, no entanto, alguns tipos de plastificantes vegetais podem apresentar forte exsudação, o que pode provocar alterações nas propriedades físico/ químicas dos laminados, principalmente na fase inicial de envelhecimento. O processo de exsudação, ou perda de substâncias pelo sistema polimérico, é um ponto de bastante atenção, pois pode afetar as propriedades do PVC, além de interagir com o meio em que o PVC está exposto (JAFICZAK & TADYCH, 1984).

Neste sentido, existe uma preocupação por parte das áreas técnicas das empresas X e Y quanto a migração em função do uso de plastificantes vegetais, justamente pelo fato da palmilha

ficar em contato direto com o pé do usuário do calçado. Há uma lacuna de estudos e pesquisas, tanto acadêmicos quanto técnicos, relacionados ao uso de plastificantes vegetais em calçados, o que corrobora as preocupações expostas por ambas as empresas colaboradoras deste projeto.

Embora os bioplásticos (*i.e.* plásticos produzidos com base vegetal, biodegradáveis ou não) apresentem ganhos ambientais significativos, não são a solução última para eliminação dos riscos provenientes da cadeia do PVC (BOTTAUSCI *et al.*, 2021). No mundo, a produção de bioplásticos ainda é inferior a 1% (PLASTIC EUROPE, 2023).

#### 4.2.2 Cenário 2 –uso de energia solar no processo de fabricação do laminado

Para o processo de fabricação do laminado sintético espalmado a empresa X utiliza-se energia elétrica da rede de distribuição, enquanto a empresa Y utiliza energia de fonte solar. Se substituída a fonte de energia utilizada pela empresa X, observam-se melhorias em três, das quatro categorias analisadas, principalmente na categoria aquecimento global. Os resultados para este cenário são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 – Resultados por categoria de impacto para o cenário 2

<i>CATEGORIA</i>	<i>UNIDADE</i>	<i>CENÁRIO BASE</i>	<i>CENÁRIO 2</i>	<i>IMPACTO</i>
<i>Depleção de recursos abióticos</i>	kg S <sub>beq</sub>	0,00623	0,00623	0,00%
<i>Aquecimento global</i>	Kg CO <sub>2eq</sub>	1.109,11092	680,03371	<b>-38,69%</b>
<i>Toxicidade humana</i>	kg-1,4 Db <sub>eq</sub>	1.620,59414	1.579,98785	<b>-2,51%</b>
<i>Eutrofização</i>	kg PO <sub>4---eq</sub>	1,40622	1,2629	<b>-10,19%</b>

Fonte: Autoria própria

Nos últimos anos o custo da energia solar vem caindo continuamente, superando a marca de 85% de decréscimo em algumas regiões do planeta, no período entre 2010 e 2019, tendo menor custo que a energia de combustíveis fósseis em diversos locais. A medida que os

custos caem aumenta a capacidade instalada e mais pessoas e empresas passam a utilizar esta tecnologia (IPCC, 2023).

Em um estudo que correlaciona a geração de energia eólica e solar, o desenvolvimento econômico, o consumo de combustíveis fósseis e as emissões de CO<sub>2</sub>, Rehman *et al.* (2022) apresentam a energia solar como a segunda melhor opção em termos de redução das emissões de CO<sub>2</sub>, atrás apenas da energia eólica.

Embora as vantagens do uso da energia solar sejam evidentes, Rashedi & Khanam (2020) destacam que há impactos ambientais potenciais relevantes durante os processos de fabricação e instalação dos painéis solares. Através de uma ACV das principais tecnologias utilizadas para produção de energia solar fotovoltaica, os autores apresentam impactos potenciais para as categorias depleção da camada de ozônio, acidificação terrestre, e eutrofização, influenciadas por emissões na fase de produção do silício utilizado nos painéis.

Uma possível alternativa é o uso de painéis de telureto de cádmio (CdTe), que consome menor quantidade de materiais e produtos químicos durante o processo de fabricação e cuja única emissão significativa encontrada é a descarga de íons de cádmio na água, porém em quantidade relativamente baixa (RASHEDI & KHANAM, 2020).

#### **4.2.3 Cenário 3 – alteração de gramatura do laminado espalmado**

Uma das alternativas tecnicamente viáveis para garantir maior estabilidade no processo produtivo e conforto para o usuário do calçado é o aumento da camada de PVC no laminado utilizado na fabricação da palmilha. Um aumento de 10% na quantidade geral de PVC no laminado, que representa um acréscimo de 8,74% no peso da palmilha, acarreta em aumento dos impactos ambientais potenciais em todas as categorias de impacto analisadas, principalmente na categoria toxicidade humana. Os resultados para este cenário são apresentados na tabela 5.

TABELA 5 - Resultados por categoria de impacto para o cenário 3

<i>CATEGORIA</i>	<i>UNIDADE</i>	<i>CENÁRIO BASE</i>	<i>CENÁRIO 3</i>	<i>IMPACTO</i>
<i>Depleção de recursos abióticos</i>	kg Sb <sub>eq</sub>	0.00623	0.00662	6,26%
<i>Aquecimento global</i>	Kg CO <sub>2eq</sub>	1.109,11092	1.126,03087	1,53%
<i>Toxicidade humana</i>	kg-1,4 Db <sub>eq</sub>	1.620,59414	1.756,36091	8,38%
<i>Eutrofização</i>	kg PO <sub>4--eq</sub>	1,40622	1,47050	4,57%

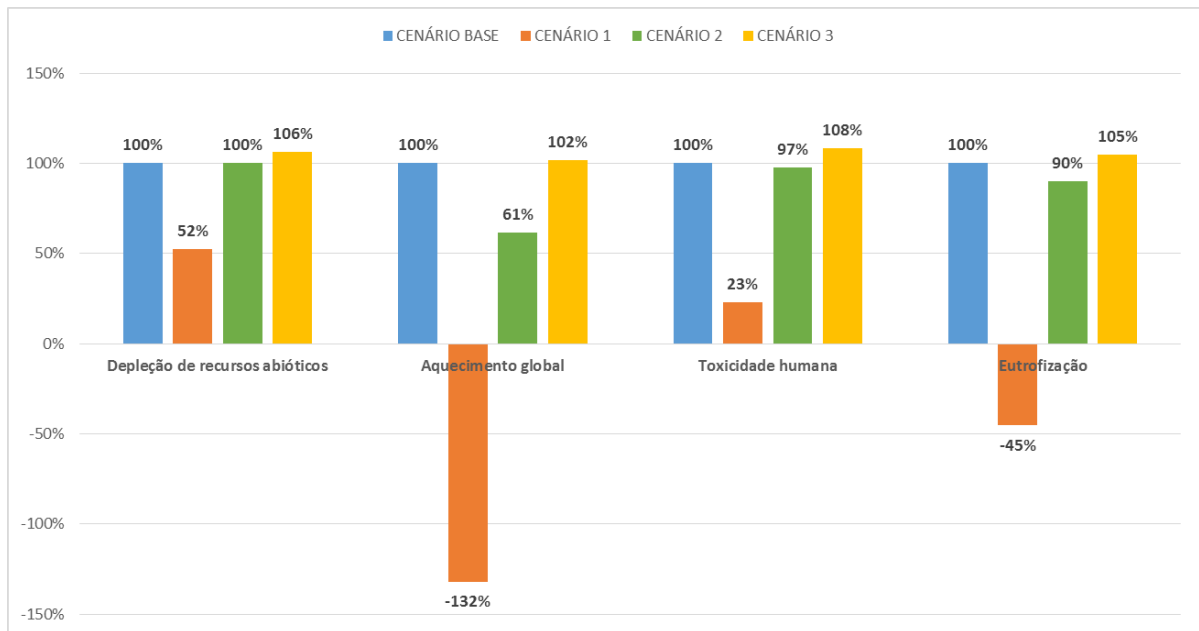
Fonte: Autoria própria

O resultado observado neste cenário é diretamente influenciado pelo aumento da quantidade de resina de PVC (E) no produto objeto de estudo, uma vez que a resina contribui majoritariamente com os resultados obtidos para a categoria toxicidade humana já no cenário base, principalmente influenciada por seu processo produtivo, conforme descrito no item 4.1.3.

#### 4.2.4 Análise entre cenários

Os três cenários avaliados na análise de sensibilidade mostram que alterações no sistema do produto podem acarretar diferentes resultados para cada categoria de impacto avaliada. A figura 15 apresenta os resultados da comparação entre os impactos observados para cada cenário. Para esta análise foi realizada a normalização dos dados e a avaliação percentual dos resultados de cada cenário frente ao cenário base.

FIGURA 15 – Análise de contribuição entre cenários



Fonte: Autoria própria

A substituição do plastificante (não-ftálico) por óleo de soja (Cenário 1) apresenta significativa redução de impactos para todas as categorias avaliadas, com destaque para as categorias Aquecimento global e Eutrofização, em que se observam ganhos ambientais. Já para as categorias Depleção de recursos abióticos e Toxicidade humana, os impactos observados são os mais baixos se comparados aos demais cenários propostos.

O cenário 2 (uso de energia solar para fabricação do laminado) apresentou melhor resultado para três das quatro categorias avaliadas, principalmente para a categoria Aquecimento Global. Os resultados encontrados foram significativamente menores na comparação com o cenário base, mas maiores que os resultados do cenário 1. Já para as categorias Toxicidade humana e Eutrofização, os resultados são ligeiramente melhores que o cenário base, e bastante inferiores aos resultados do cenário 1.

Finalmente, os resultados observados para o cenário 3 (aumento da quantidade de PVC no produto) foram maiores que os demais cenários para todas as categorias avaliadas, o que denota inviabilidade da aplicação desta proposta do ponto de vista de impactos ambientais.

Conclui-se, portanto, que a substituição do plastificante (não-ftálico) por óleo de soja é a alternativa mais viável para redução dos impactos ambientais potenciais para o produto objeto de estudo.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os principais *hotspots* ambientais de um laminado sintético espalmado de PVC utilizado para confecção de palmilhas. Para isso foi executada uma revisão de literatura e um estudo de caso, em que se realizou uma ACV, com abordagem do berço ao portão (*cradle to gate*).

Os resultados demonstraram que podem-se observar impactos ambientais ao longo de toda a cadeia de valor analisada, com ênfase na diversidade de materiais utilizados para a produção do laminado objeto de estudo e do calçado. Diversos estudos apontaram para a complexidade e variedade de processos e materiais como fator fundamental para os impactos do segmento. Vale ressaltar que a maioria dos impactos ambientais potenciais observados para o sistema de produto ocorre à montante do processo de produção do laminado e do calçado.

O uso de produtos químicos complexos, como plastificantes, adesivos e aditivos, foi determinante para os resultados observados, que apresentam a produção de plastificante (não-ftálico) como principal *hotspot* para as categorias depleção de recursos abióticos, com 47, 83% de contribuição, e eutrofização, com 24,22% dos impactos, resultados diretamente influenciados pela exploração de fontes não renováveis, suscetíveis a esgotamento e pelas emissões na fase de produção.

A produção de resina de PVC (E) aparece como principal *hotspot* para a categoria toxicidade humana, com um índice de contribuição superior a 59% dos impactos, principalmente pelo potencial de risco proveniente do MVC não reagido, que é um agente reconhecidamente cancerígeno, facilmente absorvido pelo sistema respiratório, e que pode causar diversos efeitos prejudiciais à saúde.

O uso de energia ao longo do sistema do produto contribuiu significativamente para os impactos observados na categoria aquecimento global, representando 29,3% dos impactos potenciais para a categoria. As emissões ao ar são as principais responsáveis pelos resultados encontrados.

Algumas possíveis soluções para o segmento envolvem o uso de energia de fontes renováveis, como a solar, por exemplo, já utilizada pela empresa Y. A análise de sensibilidade demonstra que haveria significativos impactos para 3 das categorias analisadas no caso de uso de energia solar fotovoltaica pela empresa X, fabricante do laminado de PVC.

Em convergência com os estudos de Moazzem et al. (2021) e Cheah et al. (2013) o uso de materiais mais leves demonstra trazer benefícios consideráveis, uma vez que o aumento da quantidade de PVC, analisado no cenário 3, acarretou aumento dos impactos ambientais para todas as categorias analisadas.

Contudo, a solução mais viável do ponto de vista ambiental é a substituição do plastificante (não-ftálico) por plastificante vegetal, mais especificamente o óleo de soja. Observaram-se expressivas reduções de impacto para todas as categorias analisadas em um cenário de substituição do plastificante. Vale destacar que é necessário um aprofundamento quanto a viabilidade técnica desta opção para o produto objeto de estudo, pois a possível exsudação do plastificante vegetal é um tema sensível e pouco explorado para o segmento.

Sugere-se que estudos futuros sejam realizados no mesmo sistema de produto, comparando a performance do laminado de PVC com alternativas para palmilhas, como EVA, couro e borracha. Além disso, a inclusão das fases de uso e fim de vida nas fronteiras do sistema pode apresentar contribuições relevantes para novos estudos sobre os mesmos materiais.

## REFERÊNCIAS

- ABICALÇADOS. Relatório Setorial da Associação Brasileira de Calçados. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: [www.abicalcados.com.br](http://www.abicalcados.com.br).
- ABICALÇADOS. Relatório Setorial da Associação Brasileira de Calçados. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: [www.abicalcados.com.br](http://www.abicalcados.com.br).
- AL-SAMHAN, Meshal; AL-FADHLI, Jamal; AL-OTAIBI, Ahmad M.; AL-ATTAR, Fatma; BOURESLI, Rashed; RANA, Mohan S. Prospects of refinery switching from conventional to integrated: An opportunity for sustainable investment in the petrochemical industry. *Fuel*, [s. l.], v. 310, n. PB, p. 122161, 2022. ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2021.122161. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122161>.
- ALTUN, Ayca; FELLAH, Mehmet Ferdi. A mini-review on different synthesis reactions of dioctyl terephthalate (DOTP) and properties of DOTP plasticized PVC. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, [s. l.], v. 28, n. 7, p. 1001–1013, 2022. ISSN 1300-7009. DOI 10.5505/pajes.2021.48840.
- ANUAR SHARUDDIN, Shafferina Dayana; ABNISA, Faisal; WAN DAUD, Wan Mohd Ashri; AROUA, Mohamed Kheireddine. A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, [s. l.], v. 115, p. 308–326, 2016. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2016.02.037. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>.
- ARÁN-AIS, F.; RUZAFSA-SILVESTRE, C.; CARBONELL-BLASCO, M. P.; PÉREZ-LIMIÑANA, M. A.; ORGILÉS-CALPENA, E. Sustainable adhesives and adhesion processes for the footwear industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, [s. l.], v. 235, n. 3, p. 585–596, 2021. ISSN 20412983. DOI 10.1177/0954406220957706.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. [s. l.], 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. [s. l.], 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14067. Gases de efeito estufa – Pegada de carbono de produtos – Requisitos e orientações sobre quantificação. [s. l.], 2023.
- BARDIN, Laurence. *Análise de Conteúdo*. [S. l.: s. n., s. d. ISBN 9724408981.
- BELAY, Mezigebe. Preparation of Biodegradable Reduced Graphene Oxide/Agar Composites by In Situ Reduction of Graphene Oxide. *International Journal of Polymer Science*, [s. l.], v. 2023, 2023. ISSN 16879430. DOI 10.1155/2023/4583522.
- BJØRN, Anders et al. Life Cycle Inventory Analysis: Chapter 9. In: HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irving (ed.). *Life Cycle Assessment: theory and practice*. Switzerland: Springer, 2018. p. 1-1215.

BOTTAUSCI, Sara; UNGUREANU-COMANITA, Elena Diana; GAVRILESCU, Maria; BONOLI, Alessandra. Environmental impacts quantification of PVC production. *Environmental Engineering and Management Journal*, [s. l.], v. 20, n. 10, p. 1693–1702, 2021. ISSN 18433707. DOI 10.30638/eemj.2021.158.

CARVALHO FILHO, José; NUNHES, Thaís Vieira; OLIVEIRA, Otávio José. Guidelines for cleaner production implementation and management in the plastic footwear industry. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 232, p. 822–838, 2019. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.05.343.

CHEAH, Lynette et al. Manufacturing-focused emissions reductions in footwear production. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 44, p. 18–29, 2013. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2012.11.037. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.037>.

CHU, Jianwen; ZHOU, Ya; CAI, Yanpeng; WANG, Xuan; LI, Chunhui; LIU, Qiang. Life-cycle greenhouse gas emissions and the associated carbon-peak strategies for PS, PVC, and ABS plastics in China. *Resources, Conservation and Recycling*, [s. l.], v. 182, n. November 2021, p. 106295, 2022. ISSN 18790658. DOI 10.1016/j.resconrec.2022.106295. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106295>.

CORREA, Carlos Alberto; SANTI, Cristiano Ribeiro DE; LECLERC, André. Green-PVC with full recycled industrial waste and renewably sourced content. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 229, n. 2019, p. 1397–1411, 2019. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.04.383.

CUI, Hao; LEONAS, Karen K. Blockchain Technology in Footwear Supply Chain. In: *Leather and Footwear Sustainability*. [S. l.: s. n.], 2020. p. 298. ISBN 978-981-15-6296-9.

CZAJCZYŃSKA, Dina et al. Potentials of pyrolysis processes in the waste management sector. *Energy Procedia*, [s. l.], v. 123, p. 387–394, 2017. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2017.07.275. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.275>.

DOMINA, Tanya; KOCH, Kathy. The textile waste lifecycle. *Clothing and Textiles Research Journal*, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 96–102, 1997. ISSN 0887302X. DOI 10.1177/0887302X9701500204.

EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. Compreender o regulamento REACH. Disponível em: <https://echa.europa.eu/pt/regulations/reach/understanding-reach>. Acesso em: 12 fev. 2024.

EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. Ftalatos. Disponível em: <https://echa.europa.eu/pt/hot-topics/phthalates>. Acesso em: 12 fev. 2024.

FERREIRA SILVA, Silva Ferreira; GÓIS, Luis Mário Nelson DE. Tecnologias Para a Produção e Purificação do PVC. *Revista CIATEC-UPF*, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 12–26, 2013. DOI 10.5335/ciatec.v5i1.3119.

HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irving. Life Cycle Assessment: Theory and Practice. [S. l.: s. n.], 2017. 1–1216 p. ISBN 9783319564753. DOI 10.1007/978-3-319-56475-3.

IBICT. Recomendação de modelos de avaliação de impacto do ciclo de vida para o contexto brasileiro. [S. l.: s. n.], 2019. 165 p. ISBN 978-85-7013-154-6.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC. O que é PVC. Disponível em: <https://pvc.org.br/o-que-e-pvc/>. Acesso em: 12 ago. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC. Resinas. Disponível em: <https://pvc.org.br/resinas/>. Acesso em: 12 fev. 2024.

IPCC, 2023: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

JAFICZAK, W.; TADYCH, G. Phthalate and Chlorinated Paraffin. *SCIENCE* [s. l.], v. 126, p. 122–126, 1984.

KARLSSON, Daniel; MERZ, Thomas; NUTHMANN, Volker. Emission of methylene diphenyl diisocyanate and methylene dianiline during use of cure-in-place methylene diphenyl diisocyanate-based consumer products. *Toxicology and Industrial Health*, [s. l.], v. 38, n. 9, p. 643–652, 2022. ISBN 0748233722107. ISSN 14770393. DOI 10.1177/07482337221079433.

KIM, Inhwa; JUNG, Hye Jung; LEE, Yuri. Consumers' value and risk perceptions of circular fashion: Comparison between secondhand, upcycled, and recycled clothing. *Sustainability* (Switzerland), [s. l.], v. 13, n. 3, p. 1–23, 2021. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su13031208.

KOHAN, Lais; MARTINS, Cristiane Reis; SANTOS, Heloisa Nazare dos; FERNANDES, Palloma Renny Beserra; BRANDAO, Fernando; BARUQUE-RAMOS, Julia. Brazilian Sustainability Outlook in Footwear Sector. In: *Leather and Footwear Sustainability*. [S. l.: s. n.], 2020. p. 298. ISBN 978-981-15-6296-9.

LARNEY, M.; AARDT, A. M. VAN. Case study: Apparel industry waste management: A focus on recycling in South Africa. *Waste Management and Research*, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 36–43, 2010. ISSN 0734242X. DOI 10.1177/0734242X09338729.

LAURENTI, Rafael; REDWOOD, Michael; PUIG, Rita; FROSTELL, Björn. Measuring the Environmental Footprint of Leather Processing Technologies. *Journal of Industrial Ecology*, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 1180–1187, 2017. ISSN 15309290. DOI 10.1111/jiec.12504.

LEE, Michael James; RAHIMIFARD, Shahin. An air-based automated material recycling system for postconsumer footwear products. *Resources, Conservation and Recycling*, [s. l.], v. 69, p. 90–99, 2012. ISSN 09213449. DOI 10.1016/j.resconrec.2012.09.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.008>.

LIU, Dekai et al. Synthesis of an efficient bio-based plasticizer derived from waste cooking oil and its performance testing in PVC. *Polymer Testing*, [s. l.], v. 90, n. May, p. 106625, 2020. ISSN 01429418. DOI 10.1016/j.polymertesting.2020.106625. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106625>.

LIU, Yun; HUANG, Haihong; ZHU, Libin; ZHANG, Cheng; REN, Feiyue; LIU, Zhifeng. Could the recycled yarns substitute for the virgin cotton yarns: a comparative LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, [s. l.], v. 25, n. 10, p. 2050–2062, 2020. ISSN 16147502. DOI 10.1007/s11367-020-01815-8.

LUCA, Alexandra; DOMENE, David Sanchez; AIS, Francisca Aran. Life cycle assessment of two alternative end-of-life scenarios for leather safety shoes. *ICAMS Proceedings of the International Conference on Advanced Materials and Systems*, [s. l.], p. 575–580, 2018. ISSN 20680783. DOI 10.24264/icams-2018.XI.6.

MACIEL, Vinícius Gonçalves; BOCKORNY, Geovana; DOMINGUES, Nei; SCHERER, Moara Britz; ZORTEA, Rafael Batista; SEFERIN, Marcus. Comparative Life Cycle Assessment among Three Polyurethane Adhesive Technologies for the Footwear Industry. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, [s. l.], v. 5, n. 9, p. 8464–8472, 2017. ISSN 21680485. DOI 10.1021/acssuschemeng.7b02516.

MADALENO, Emerson; ROSA, Derval Dos S.; ZAWADZKI, Sonia F.; PEDROZO, Tiago H.; RAMOS, Luiz P. Study of the use of plasticizer from renewable sources in PVC compositions. *Polimeros*, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 263–270, 2009. ISSN 01041428. DOI 10.1590/s0104-14282009000400004.

MCKINSEY & COMPANY; BUSINESS OF FASHION. The State of Fashion Industry. Premium, [s. l.], p. 108, 2023. Disponível em: <https://www.businessoffashion.com/reports/news-analysis/the-state-of-fashion-2023-industry-report-bof-mckinsey/>.

MILÀ, Llorenç; DOMÈNECH, Xavier; RIERADEVALL, Joan; FULLANA, Pere; PUIG, Rita. Application of life cycle assessment to footwear. *International Journal of Life Cycle Assessment*, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 203–208, 1998. ISSN 09483349. DOI 10.1007/BF02977570.

MILIUTE-PLIPIENE, Jurate; FRÅNE, Anna; ALMASI, Alexandra Maria. Overview of polyvinyl chloride (PVC) waste management practices in the Nordic countries. *Cleaner Engineering and Technology*, [s. l.], v. 4, n. October 2020, p. 100246, 2021. ISSN 26667908. DOI 10.1016/j.clet.2021.100246. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100246>.

MOAZZEM, Shadia; CROSSIN, Enda; DAVER, Fugen; WANG, Lijing. Assessing environmental impact reduction opportunities through life cycle assessment of apparel products. *Sustainable Production and Consumption*, [s. l.], v. 28, p. 663–674, 2021a. ISSN 23525509. DOI 10.1016/j.spc.2021.06.015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.06.015>.

MOAZZEM, Shadia; WANG, Lijing; DAVER, Fugen; CROSSIN, Enda. Environmental impact of discarded apparel landfilling and recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, [s. l.], v. 166, n. May 2020, p. 105338, 2021b. ISSN 18790658. DOI 10.1016/j.resconrec.2020.105338. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105338>.

MOHAMED, Nur Raihan; OTHMAN, Nadras; SHUIB, Raa Khimi; HAYEEMASAE, Nabil. Perspective on opportunities of bio-based processing oil to rubber industry: a short review. *Iranian Polymer Journal (English Edition)*, [s. l.], v. 32, n. 11, p. 1455–1475, 2023. ISBN 0123456789. ISSN 17355265. DOI 10.1007/s13726-023-01203-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13726-023-01203-7>.

OBERLO. APPAREL INDUSTRY STATISTICS (2014–2027). Disponível em: <https://www.oberlo.com/statistics/apparel-industry-statistics>. Acesso em: 20 nov. 2023.

OERS, Lauran VAN; GUINÉE, Jeroen B.; HEIJUNGS, Reinout. Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited—updating ultimate reserve estimates and introducing time series for production data. *International Journal of Life Cycle Assessment*, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 294–308, 2020. ISSN 16147502. DOI 10.1007/s11367-019-01683-x.

OLBRICH. Production lines for technical textiles. Disponível em: [https://www.olbrich.com/fileadmin/Downloads/Neu/Broschuere\\_Techntextilien\\_GB\\_8S\\_RZ\\_SCREEN.pdf](https://www.olbrich.com/fileadmin/Downloads/Neu/Broschuere_Techntextilien_GB_8S_RZ_SCREEN.pdf). Acesso em: 12 fev. 2024.

OLIVEIRA NETO, G. C. .. b DE; FILHO, M. G. ..; GANGA, G. M. D. ..; NAAS, I. A. ..; VENDRAMETTO, O.. Princípios e ferramentas da produção mais limpa: um estudo exploratório em empresas Brasileiras. *Gestao e Producao*, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 326–344, 2015. ISSN 0104530X. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84939520259&partnerID=40&md5=913f953e47f45973638203b34cc3684e>.

OMAR, Mohamed Y. Quantitative Human Health Risk Assessment of Vinyl Chloride Monomer ( VCM ) from Petrochemical Industries. [s. l.], n. Vcm, p. 1–16, 2023.

OUZZANI, Mourad; HAMMADY, Hossam; FEDOROWICZ, Zbys; ELMAGARMID, Ahmed. Rayyan-a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 1–10, 2016. ISSN 20464053. DOI 10.1186/s13643-016-0384-4. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>.

PACHECO, Diego et al. Estratégias De Redução Da Variabilidade De Processos Na Indústria Calçadista. *Revista Ingenieria Industrtrial*, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 37–54, 2017. ISBN 0000000279802. ISSN 07188307. DOI 10.22320/s07179103/2017.03.

PAGE, Matthew J. et al. The prisma 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Medicina Fluminensis*, [s. l.], v. 57, n. 4, p. 444–465, 2021. ISBN 1364302101. ISSN 18476864. DOI 10.21860/medflum2021\_264903.

PETERS, Greg; LI, Mengyu; LENZEN, Manfred. The need to decelerate fast fashion in a hot climate - A global sustainability perspective on the garment industry. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 295, p. 126390, 2021. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.126390. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126390>.

PLASTIC EUROPE. Plastics Europe launches Plastics – the fast Facts 2023. [s. l.], p. 5–11, 2023. Disponível em: <https://plasticseurope.org/media/plastics-europe-launches-the-plastics-the-fast-facts-2023/>.

QUANTIS. Measuring Fashion: Insights from the Environmental Impact of the Global Apparel and Footwear Industries study. *Quantis*, [s. l.], p. 1–65, 2018. Disponível em: <https://quantis-intl.com/measuring-fashion-report-2018/>.

RASHEDI, A.; KHANAM, Taslima. Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by mid-point and end-point indicators of ReCiPe method. *Environmental Science and Pollution Research*, [s. l.], v. 27, n. 23, p. 29075–29090, 2020. ISSN 16147499. DOI 10.1007/s11356-020-09194-1.

REHMAN, Shazia; REHMAN, Erum; MUMTAZ, Ayesha; JIANGLIN, Zhang. A Multicriteria Decision-Making Approach in Exploring the Nexus Between Wind and Solar Energy Generation, Economic Development, Fossil Fuel Consumption, and CO2 Emissions. *Frontiers in Environmental Science*, [s. l.], v. 9, n. January, p. 1–15, 2022. ISSN 2296665X. DOI 10.3389/fenvs.2021.819384.

RENSBURG, Melissa Lisa VAN; NKOMO, S'Phumelele Lucky; MKHIZE, Ntandoyenkosi Malusi. Characterization and pyrolysis of post-consumer leather shoe waste for the recovery of valuable chemicals. *Detritus*, [s. l.], v. 14, p. 92–107, 2021. ISSN 26114135. DOI 10.31025/2611-4135/2021.14064.

RODOLFO JR, Antonio; NUNES, Luciano Rodrigues; ORMANJI, Wagner. *Braskem. Tecnologia do PVC*. 2. ed. São Paulo: Proeditores Associados Ltda, 2006. 448 p.

ROOS, Sandra; SANDIN, Gustav; ZAMANI, Bahareh; PETERS, Greg. Environmental assessment of Swedish fashion consumption. *Five garments - sustainable futures*. [s. l.], n. June, 2015. DOI 10.13140/RG.2.1.3084.9120.

ROSENBAUM, Ralph K. et al. Life Cycle Impact Assessment: Chapter 10. In: HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irving (ed.). *Life Cycle Assessment: theory and practice*. Switzerland: Springer, 2018. p. 1-1215.

ROSSI, Marta; PAPETTI, Alessandra; MARCONI, Marco; GERMANI, Michele. Life cycle assessment of a leather shoe supply chain. *International Journal of Sustainable Engineering*, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 686–703, 2021. ISSN 19397046. DOI 10.1080/19397038.2021.1920643. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1920643>.

RUZAFSA-SILVESTRE, C.; CARBONELL-BLASCO, M. P.; PÉREZ-LIMIÑANA, M. A.; ARÁN-AIS, F.; ORGILÉS-CALPENA, E. Robotised atmospheric plasma treatment to improve the adhesion of vulcanised and thermoplastic rubber materials for a more sustainable footwear. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, [s. l.], v. 117, 2022. ISSN 0143-7496. DOI 10.1016/j.ijadhadh.2021.103010

SALVIATI, Maria Elisabeth. Manual do Aplicativo Iramuteq (versão 0.7 Alpha 2 e R Versão 3.2.3). [s. l.], p. 1–37, 2017. Disponível em: <http://www.iramuteq.org/documentation/html>.

SERWETA, Wioleta; GAJEWSKI, Robert; OLSZEWSKI, Piotr; ZAPATERO, Alberto; ŁAWIŃSKA, Katarzyna. Carbon footprint of different kinds of footwear - A comparative study. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, [s. l.], v. 137, n. 5, p. 94–99, 2019. ISSN 23007354. DOI 10.5604/01.3001.0013.2907.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚTRIA DO CIMENTO. Coprocessamento. Disponível em: <http://snic.org.br/sustentabilidade-coprocessamento.php>. Acesso em: 12 fev. 2024

SMITH, V. H.; TILMAN, G. D.; NEKOLA, J. C. Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, [s. l.], v. 100, n. 1–3, p. 179–196, 1999. ISSN 02697491. DOI 10.1016/S0269-7491(99)00091-3.

STAIKOS, J. T.; RAHIMIFARD, S. Post-consumer waste management issues in the footwear industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, [s. l.], v. 221, n. 2, p. 363–368, 2007b. ISSN 09544054. DOI 10.1243/09544054JEM732SC.

STAIKOS, T.; RAHIMIFARD, S. An end-of-life decision support tool for product recovery considerations in the footwear industry. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, [s. l.], v. 20, n. 6, p. 602–615, 2007a. ISSN 0951192X. DOI 10.1080/09511920701416549.

STICHNOTHE, Heinz; AZAPAGIC, Adisa. Life cycle assessment of recycling PVC window frames. *Resources, Conservation and Recycling*, [s. l.], v. 71, p. 40–47, 2013. ISSN 09213449. DOI 10.1016/j.resconrec.2012.12.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.005>.

TIPPAYAWONG, K. Y.; TIPPAYAWONG, N. Fuel Recovery from Thermal Processing of Post-consumer Footwear Waste. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, [s. l.], v. 114, n. 3, p. 7–16, 2017. ISSN 15460118. DOI 10.1080/01998595.2017.11863761.

TOLOI, Marley Nunes Vituri; BONILLA, Silvia Helena; TOLOI, Rodrigo Carlo; ALENCAR NÄÄS, Irenilza DE. Potential for carbon sequestration in different biomes and CO2 emissions in soybean crop. *Environment, Development and Sustainability*, [s. l.], n. 0123456789, 2023. ISBN 0123456789. ISSN 15732975. DOI 10.1007/s10668-022-02824-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02824-3>.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003. ISSN 10453172. DOI 10.1111/1467-8551.00375.

UEKERT, Taylor et al. Technical, Economic, and Environmental Comparison of Closed-Loop Recycling Technologies for Common Plastics. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 965–978, 2023. ISSN 21680485. DOI 10.1021/acssuschemeng.2c05497.

UNEP. Sustainability and Circularity in the Textile Value Chain. *Global Stocktaking.*, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/publication/sustainability-and-circularity-textile-value-chain-global-roadmap>. Acesso em: 12 fev. 2024

UZOH, Chigozie Francolins; ONUKWULI, Okechukwu Domnic; OZOFOR, Ikenna Henry; ODERA, Raphael Stone. Encapsulation of urea with alkyd resin-starch membranes for controlled N2 release: Synthesis, characterization, morphology and optimum N2 release. *Process Safety and Environmental Protection*, [s. l.], v. 121, p. 133–142, 2019. ISSN 09575820. DOI 10.1016/j.psep.2018.10.015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2018.10.015>.

VIEIRA, Letícia Canal; AMARAL, Fernando Gonçalves. Barriers and strategies applying Cleaner Production: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 113, p. 5–16, 2016. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.11.034. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.034>.

VINYL PLUS. Progress report 2023. Disponível em: [https://www.vinylplus.eu/wp-content/uploads/2023/07/VinylPlus\\_ProgressReport\\_Digital\\_2023.pdf](https://www.vinylplus.eu/wp-content/uploads/2023/07/VinylPlus_ProgressReport_Digital_2023.pdf). Acesso em: 12 fev. 2024

VON M.; NEEDLES, H.L. Polyvinyl Chloride Plastisol Coating. Tufted Carpet, [S.L.], p.115-123, 2004. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-188420799-0.50011-7>.

ZHANG, Chaoqun et al. From plant phenols to novel bio-based polymers. *Progress in Polymer Science*, [s. l.], v. 125, p. 101473, 2022. ISSN 00796700. DOI 10.1016/j.progpolymsci.2021.101473. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101473>.

## APÊNDICE A– DADOS DO MODELO

No quadro 1 são apresentados os dados e provedores utilizados para modelagem no software OpenLca, versão 2.0.3.

QUADRO 1 – Dados do modelo

PRO-CESSO	ENTRADAS			
	FLUXO	QUANTIDADE	UNIDADE	PROVEDOR
P1	azodicarbonamide	2.6	kg	market for azodicarbonamide   azodicarbonamide   Cutoff, U - GLO
	Calcium carbonate, ground, fine treated, 3 micron, at plant - US	10.35	kg	Calcium carbonate, ground, fine treated, 3 micron, at plant - US
	CUTOFF pesticide; Aliphatic petroleum hydrocarbons; at point-of-sale; kg AI	5.2	kg	
	dioctyl terephthalate	70.0	kg	dioctyl terephthalate production   dioctyl terephthalate   Cutoff, U - GLO
	electricity from hydroelectric power plant	80.0	MJ	Electricity from hydroelectric power plants, production mix, at power plant, AC, < 1kV - RER
	polyvinylchloride resin (E-PVC)	105.0	kg	Polyvinylchloride resin (E-PVC), production mix, at plant, emulsion polymerisation - RER
	Rheology Additive	3.3	kg	
	thermal stabilizer	2.9	kg	
	Titanium dioxide, chloride and sulphate processes, >80% TiO <sub>2</sub> , production mix, at plant	8.43	kg	Titanium Dioxide, production mix, at plant, Chloride and sulphate processes, > 80% TiO <sub>2</sub> - GLO
	transport in t*km	0.41	t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
	transport in t*km	9.93	t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
	transport in t*km	1.69	t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
	transport in t*km	1.52	t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
transport in t*km	8.39	t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	

	transport in t*km	68.24	t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
	transport in t*km	62.37	t*km	Container ship ocean, technology mix, 27.500 dwt pay load capacity - RER
	transport in t*km	1102.41	t*km	Container ship ocean, technology mix, 27.500 dwt pay load capacity - RER
	transport in t*km	34.78	t*km	Container ship ocean, technology mix, 27.500 dwt pay load capacity - RER
	<b>SAÍDAS</b>			
	<b>FLUXO</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>PROVEDOR</b>
	Plastisol	207.78	kg	
<b>P2</b>	<b>ENTRADAS</b>			
	<b>FLUXO</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>PROVEDOR</b>
	electricity from hydroelectric power plant	288.0	MJ	Electricity from hydroelectric power plants, production mix, at power plant, AC, < 1kV - RER
	paper, woodfree, coated	4.32	kg	market for paper, woodfree, coated   paper, woodfree, coated   Cutoff, U - RER
	Plastisol	207.78	kg	Preparo do plastisol
	polyethylene terephthalate fibres (PET)	29.9	kg	Polyethylene terephthalate fibres (PET), production mix, at plant, via dimethyl terephthalate (DMT), PET granulate without additives - EU-27
	transport in t*km	0.55	t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
	transport in t*km	2.24	t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
	transport in t*km	42.88	t*km	Container ship ocean, technology mix, 27.500 dwt pay load capacity - RER
	<b>SAÍDAS</b>			
	<b>FLUXO</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>PROVEDOR</b>
	Laminado	217.0	kg	
	waste polyvinylchloride product	8.0	kg	market for waste polyvinylchloride product   waste polyvinylchloride product   Cutoff, U - RoW
	Alcohols, unspecified	5.92	kg	
Phthalate, dioctyl-	5.16	kg		
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	5.92	kg		
<b>P3</b>	<b>ENTRADAS</b>			

	<b>FLUXO</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>PROVEDOR</b>	
	Cardboard tube	8.0	kg		
	CUTOFF Polypropylene-film (oriented) (PP) - RNA	1.6	kg		
	electricity from hydroelectric power plant	43.0	MJ	Electricity from hydroelectric power plants, production mix, at power plant, AC, < 1kV - RER	
	Laminado	217.0	kg	Produção do laminado	
	transport in t*km	0.48	t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	
	<b>SAÍDAS</b>				
	<b>FLUXO</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>PROVEDOR</b>	
	Laminado pronto	226.6	kg		
<b>P4</b>	<b>ENTRADAS</b>				
		<b>FLUXO</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>PROVEDOR</b>
		CUTOFF Electricity, solar, unspecified, at power plant - RNA	454.5	MJ	
		Laminado pronto	226.6	kg	Revisão e expedição
		printing ink, rotogravure, without solvent, in 55% toluene solution state	31.5	kg	printing ink production, roto-gravure, product in 55% toluene solution state   printing ink, rotogravure, without solvent, in 55% toluene solution state   Cutoff, U - RER
		transport in t*km	25.92	t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
		transport in t*km	651.0	t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
		<b>SAÍDAS</b>			
		<b>FLUXO</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>PROVEDOR</b>
		Palmilha pronta	181.65	kg	
		Cardboard tube	8.0	kg	
		CUTOFF Polypropylene-film (oriented) (PP) - RNA	1.6	kg	
		Recovered energy, for polyvinyl chloride, CTR - RNA	54.25	MJ	
	Cyclohexanone	12.6	kg		
<b>P5</b>	<b>ENTRADAS</b>				
		<b>FLUXO</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>PROVEDOR</b>
		Cabedal calçado	1816.5	kg	
		CUTOFF Electricity, solar, unspecified, at power plant - RNA	820.8	MJ	
		Palmilha pronta	181.65	kg	Preparo da palmilha
	polyurethane adhesive	33.75	kg	polyurethane adhesive production   polyurethane adhesive   Cutoff, U - GLO	

transport in t*km	141.75	t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
<b>SAÍDAS</b>			
<b>FLUXO</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>PROVEDOR</b>
Montagem do calçado	1998.15	kg	
Aromatic hydrocarbon solvent	33.75	kg	

Fonte: Aatoria própria