



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

CAMILA OLIVEIRA KAMIMURA

**COMPARAÇÃO AMBIENTAL DE DUAS EMBALAGENS USANDO ACV:
ESTUDO DE CASO**



CAMILA OLIVEIRA KAMIMURA

**COMPARAÇÃO AMBIENTAL DE DUAS EMBALAGENS USANDO ACV:
ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Donnini

Mancini

Co-orientador: Prof. Dr. Bruno Fernando
Gianelli



Kamimura, Camila Oliveira.

Comparação Ambiental de Duas Embalagens usando ACV:
Estudo de Caso / Camila Oliveira Kamimura - Bauru,
2024

59 f.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Sandro Donnini

Mancini

Coorientador: Bruno Fernando Gianelli

1. Avaliação de Ciclo de Vida. 2. Embalagem. 3.
Fabricação. 4. Impactos Ambientais. I. Universidade
Estadual Paulista, Bauru. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CAMILA OLIVEIRA KAMIMURA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 27 dias do mês de novembro do ano de 2024, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de CAMILA OLIVEIRA KAMIMURA, intitulada **COMPARAÇÃO AMBIENTAL DE DUAS EMBALAGENS USANDO ACV: ESTUDO DE CASO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus Sorocaba, Prof. Dr. BENONE OTAVIO SOUZA DE OLIVEIRA (Participação Virtual) do(a) Engenharia Ambiental / Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Prof. Dr. GERSON ARAÚJO DE MEDEIROS (Participação Virtual) do(a) Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de São José dos Campos. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: aprovada . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI

Sandro Donnini
Mancini

Assinado de forma digital
por Sandro Donnini Mancini
Dados: 2024.11.27 11:35:52
-03'00"

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador professor Sandro Donnini Mancini e co-orientador Bruno Fernando Gianelli, já que sem eles esse trabalho não teria sido possível.

Agradeço também a minha família que sempre me apoiou nos meus estudos. Um agradecimento em especial a meu noivo que me incentivou a retornar o mestrado. Sou grata também a todos do programa de pós-graduação da UNESP em Engenharia Civil e Ambiental.

E por fim sou grata aos colaboradores da empresa Starrett e AMF Gráfica que disponibilizaram os dados para elaboração deste trabalho.

Resumo

O aumento da geração de resíduos tem sido um grande desafio para o direcionamento de políticas ambientais das empresas e poder público. Neste sentido, esta pesquisa se propôs a comparar os impactos ambientais decorrentes da mudança da embalagem de uma ferramenta largamente comercializada no Brasil e outros países. A embalagem (A) era fabricada em papel e plástico e foi descontinuada, abrindo espaço para uma nova, menor, fabricada somente com papel (B). A mudança visava adequação às políticas de redução do uso de plástico, exigência do mercado europeu, para onde parte da produção da ferramenta é vendida. Foi utilizada a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida, empregando como instrumento analítico o software OpenLCA e utilizando-se para tanto a base de dados EcoInvent e o método ReCiPe Midpoint (H) para avaliação do impacto de ciclo de vida. Foram mapeados os processos utilizados para fabricação das duas embalagens e quantificados os materiais utilizados nas embalagens A, de 6,34 gramas no total, e B, de 4,68 g no total. Estudou-se um total de 18 categorias de impacto, sendo que cerca de 80% do impacto ambiental da fabricação das embalagens A e B é proveniente das categorias de: ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade de água doce e eutrofização de água doce. A comparação entre as embalagens nessas três categorias de impacto mostrou que a embalagem B é de 33 a 74% menos impactante que a embalagem A, sendo que essa variação ocorreu devido a retirada do plástico e a redução do papel na composição da embalagem B. Outros ganhos não mensurados são menor geração de resíduos, menor geração de efluentes líquidos e um transporte mais eficiente.

Palavras – chave: Avaliação de Ciclo de Vida, embalagem, fabricação, impactos ambientais

Abstract

The increase of waste generation has been a major challenge for the guidance of environmental policies of companies and public authorities. In this way, this research aimed to compare the environmental impacts by changing the package of a widely commercialized tool in Brazil and other countries. Package (A) was manufactured of paper and plastic and was discontinued, opening space for a new, smaller one, manufactured only of paper (B). The change aimed to adapt policies of reduction of plastic, European market requirement, where part of the tool's production is sold. The methodology used was Life Cycle Assessment, using the OpenLCA software as an analytical tool, using the database Ecoinvent and ReCiPe Midpoint (H) method for life cycle impact assessment. The processes used to manufacture the two packages were mapped, and the materials used in package A were quantified, 6.34 grams in total and made of paper and plastic, and B, 4.68 g in total, made only of paper. A total of 18 impact categories were studied, with approximately 80% of the environmental impact of the A and B packages manufacture coming from the categories: marine ecotoxicity, freshwater ecotoxicity and freshwater eutrophication. The comparison between the packages in these three impact categories showed that package B has 33 to 74% less impact than package A, with this variation occurring due to the removal of plastic and reduction of paper in the composition of package B. Other unmeasured improvements are less waste generation, less liquid effluent generation and more efficient transportation.

Keywords: Life Cycle Assessment, package, manufacturing, environmental impacts.

Índice de Figuras

Figura 1 - Fases da avaliação de ciclo de vida e suas aplicações.	6
Figura 2 - Elementos de uma avaliação de impacto do ciclo de vida.	8
Figura 3 - Categorias Midpoint e Endpoint.	13
Figura 4 - Embalagens A e B.....	21
Figura 5 - Fluxograma do processo de fabricação das embalagens.....	23
Figura 6 - Entrada de matéria prima.	24
Figura 7 - Máquina de corte primário.	24
Figura 8 - Máquina de impressão das embalagens.....	25
Figura 9 - Máquina de envernizamento.....	25
Figura 10 - Máquina de corte vinco.....	26
Figura 11 - Embalagens individualmente destacadas.....	26
Figura 12 - Máquina de colagem.....	27
Figura 13 - Gráfico de Pareto das principais categorias de impacto resultantes da fabricação da embalagem A.	36
Figura 14 - Gráfico das matérias-primas da embalagem A que contribuíram para as principais categorias de impacto.	37
Figura 15 - Gráfico de Pareto das principais categorias de impacto resultantes da fabricação da embalagem B.....	39
Figura 16 - Gráfico das matérias-primas da embalagem B que contribuíram para as principais categorias de impacto.	40
Figura 17 - Comparativo das principais categorias de impactos das embalagens A e B.	42

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Entradas do processo Cellulose Acetate.	29
Tabela 2 – Nomes usados pela gráfica das matérias-primas utilizadas na fabricação das embalagens A e B e suas funções.....	30
Tabela 3 - Nomenclaturas das entradas no OpenLCA de cada insumo para a fabricação das embalagens.	31
Tabela 4 - Lista de matérias-primas utilizadas na fabricação de 100 mil embalagens A e 100 mil embalagens B.....	32
Tabela 5 - Percentual de sobra das embalagens A e B.	33
Tabela 6 - Transporte das embalagens A e B por viagem do veículo da gráfica para a indústria.	33
Tabela 7 - Categorias de impacto resultantes da fabricação de 100 mil embalagens tipo A. ..	34
Tabela 8 - Resultados em Milipoint das principais categorias de impacto resultantes da fabricação de 100 mil embalagens tipo A.....	35
Tabela 9 – Item “Outros” da Tabela 8: categorias de impacto da Embalagem A com menor relevância.....	35
Tabela 10 – Matérias-primas da embalagem A que contribuíram para as principais categorias de impacto	36
Tabela 11 - Categorias de impacto resultantes da fabricação de 100 mil embalagens tipo B.	37
Tabela 12 - Resultados em Milipoint das principais categorias de impacto resultantes da fabricação de 100 mil embalagens tipo B.....	38
Tabela 13 - Item “Outros” da Tabela 12: categorias de impacto da Embalagem B com menor relevância.....	39
Tabela 14 - Matérias-primas da embalagem B que contribuíram para as principais categorias de impacto.....	40
Tabela 15 - Comparação das 6 principais categorias de impacto da fabricação das embalagens A e B, por ordem de redução de impacto com a troca de embalagens.....	41

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
	2.1 OBJETIVO GERAL	3
	2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3	REVISÃO DA LITERATURA	4
	3.1 A METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA.....	4
	3.2 NORMATIVA ISO 14040	5
	3.3 FASES DE UMA ACV.....	6
	3.3.1 <i>Objetivo e escopo</i>	6
	3.3.2 <i>Análise de Inventário</i>	7
	3.3.3 <i>Avaliação de Impacto</i>	8
	3.3.4 <i>Interpretação</i>	9
	3.4 ECO-INDICADORES.....	9
	3.4.1 <i>Saúde Humana</i>	10
	3.4.2 <i>Qualidade do ecossistema</i>	10
	3.4.3 <i>Recursos Naturais</i>	10
	3.4.4 <i>Métodos de avaliação de impacto</i>	10
	3.4.5 <i>Métodos Midpoint e Endpoint</i>	12
	3.4.6 <i>Categorias de impacto</i>	13
	3.4.7 <i>Softwares e base de dados</i>	15
	3.5 EMBALAGENS	16
	3.6 ARTIGOS QUE ABORDAM ACVS COMPARATIVAS EM EMBALAGENS.....	17
4	METODOLOGIA	21
	4.1 OBJETIVO E ESCOPO	22
	4.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DAS EMBALAGENS.....	23
3.	RESULTADOS.....	32
4.	CONCLUSÕES	42
5.	REFERÊNCIAS.....	44

1 Introdução

Os plásticos de combustíveis fósseis trouxeram várias mudanças ao cotidiano das pessoas e revolucionaram vários setores. Porém as conveniências advindas com o plástico se transformaram em uma cultura de descarte em que a vida útil de sacolas e embalagens é muito curta (STEFANINI et al., 2024). Dessa forma, a poluição por resíduos plásticos se tornou uma grande preocupação do século 21, já que o plástico representa ameaça à biodiversidade em ecossistemas marinhos e terrestres. Grande parte dos plásticos advém de embalagens e devido a esse cenário, observam-se mudanças na legislação de países, principalmente da Europa, que visam o aumento do uso de embalagens mais sustentáveis (SANTOS et al., 2024).

Neste contexto, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) por ser uma poderosa ferramenta que além de quantificar os impactos ambientais dos produtos, processos, serviços, gera dados que auxiliam na tomada de decisão e otimização de processos (KUMAR et al., 2022). Além disso, pode promover informações importantes comparações entre produtos ou processos essenciais para definição de objetivos abrangentes sobre avaliação de impactos ambientais. Essa análise envolve o estudo desde a extração de matérias-primas, a produção, o transporte, a utilização e o descarte, avaliando variáveis como consumo de recursos naturais, emissões de poluentes, impactos sobre a biodiversidade e contribuições para as mudanças climáticas, traduzindo esses fatores em indicadores compreensíveis (OSMAN et al., 2024).

Apesar das vantagens de uma ACV, existem algumas limitações como por exemplo a possível subjetividade na definição do objetivo e escopo; limitações relacionadas aos métodos usados; falta de dados precisos, confiáveis e atuais; descrição impactos ambientais sem considerar os aspectos econômicos e sociais e o fato de não englobar o impacto local no estudo (OMETTO, 2020).

Nesse contexto, foram criados em 2015 os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que são ações urgentes a serem tomadas até 2030 pelos países desenvolvidos e em desenvolvimento em uma parceria global para erradicar a pobreza e fome, proteger o meio ambiente, melhorar a saúde e educação, empoderar mulheres e meninas, promover a paz e justiça, garantir a saúde e o bem-estar. O ODS mais relacionado a esse trabalho é o 13 que é voltado às ações urgentes de combate às mudanças e seus impactos (SDG, 2024).

Nesta pesquisa, será explorada a importância da ACV como uma ferramenta para comparar os impactos ambientais relacionados à fabricação de duas embalagens diferentes, mas

que atendem ao mesmo produto e propósito. Além disso, será examinado como a ACV se relaciona com a compreensão e a mitigação dos impactos ambientais.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) comparativa das matérias-primas de duas embalagens de uma ferramenta designadas como embalagens A e B e analisar qualitativamente os impactos ambientais relacionados aos efluentes, resíduos e transporte das embalagens.

2.1 Objetivos específicos

A análise visa identificar e quantificar os impactos ambientais associados a cada embalagem ao longo de todo o seu ciclo de vida.

As etapas metodológicas desta pesquisa são:

- a) Estudo do processo de fabricação das embalagens A e B para compreender quais são os processos, matérias primas e entradas envolvidos;
- b) Realizar coleta de dados de cada etapa do processo de fabricação das embalagens para elaboração do Inventário de Ciclo de Vida;
- c) Realizar a ACV comparativa das embalagens;
- d) Interpretar os resultados da ACV.

3 Revisão da literatura

3.1 A metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida

O crescimento da preocupação ambiental nos últimos anos possibilitou o uso mais frequente de ferramentas com enfoque sistemático para as análises de impactos ambientais associados aos processos de fabricação. Os produtos industrializados geram resíduos, consomem recursos naturais e necessitam de infraestrutura de instalação, mão de obra, água e energia, mas também deve-se levar em conta os impactos ambientais relativos ao seu acondicionamento (embalagens, por exemplo) e transporte, assim como seu descarte final (JUNIOR, 2016).

No Brasil, a importância de questões ambientais também se intensificou e um marco disso é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/2010) que tem como principais objetivos: eliminação de lixões, aumento na reciclagem, desenvolvimento de tecnologias limpas, rotulagem ambiental, consumo sustentável e inclusão da logística reversa (BRASIL, 2010). Porém, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), cerca de 39% (29,7 milhões de toneladas) dos resíduos coletados no Brasil são descartados em lixões (ABRELPE, 2022).

Nas últimas décadas, houve um aumento na preocupação ambiental relacionada aos impactos dos produtos tanto na etapa de fabricação quanto na etapa de consumo, e isso desenvolveu as metodologias de análise como a avaliação do ciclo de vida (LUZ, 2017).

Dentro deste contexto, a avaliação de ciclo de vida é uma importante ferramenta de análise de impactos ambientais, prevista na PNRS. É possível através dessa técnica descobrir de forma mais precisa os impactos ambientais relacionados a cada etapa do processo de fabricação e, conseqüentemente, de um produto ou serviço como um todo. Portanto, a avaliação de ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta sistêmica utilizada para a tomada de decisões, através da avaliação de impactos e comparação do desempenho ambiental de produtos e serviços (CRV RESIDUOS, 2021). Numa ACV se levam em conta os resíduos gerados durante a vida útil de um produto, assim como outros impactos ambientais como consumo de água, geração de efluentes, consumo de energia etc.

A ACV também pode ser classificada de acordo com a parte do ciclo de vida do produto que será analisada, seguindo as seguintes denominações (APA, 2023):

- **Berço ao portão:** ACV ocorre desde a extração da matéria-prima até o pós produção, mas sem considerar a entrega ao cliente e seu descarte;
- **Portão a portão:** consiste na análise dentro da empresa, desde a chegada do produto até o processamento;
- **Berço ao berço:** análise da ACV é desde a extração da matéria-prima até o uso do material pelo consumidor, e são analisados os materiais reutilizados, reciclados ou reaproveitados.
- **Berço ao túmulo:** abrange todo o ciclo de vida do produto estudado, ou seja, desde a extração de sua matéria-prima, processamento, armazenamento, transporte e distribuição ao consumidor, uso do consumidor, manutenções e descarte final.

3.2 Normativa ISO 14040

Segundo a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009), avaliação de ciclo de vida é a compilação e avaliação das entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida.

Em resumo, a avaliação de ciclo de vida pode ser usada para apontar melhorias de desempenho ambiental de produtos; comparar o desempenho ambiental de produtos similares; auxiliar nas tomadas de decisões da indústria e das organizações governamentais ou não-governamentais; selecionar indicadores de desempenho ambiental relevantes e realizar *marketing* ambiental dos produtos, entre outros (ENCICLO, 2019).

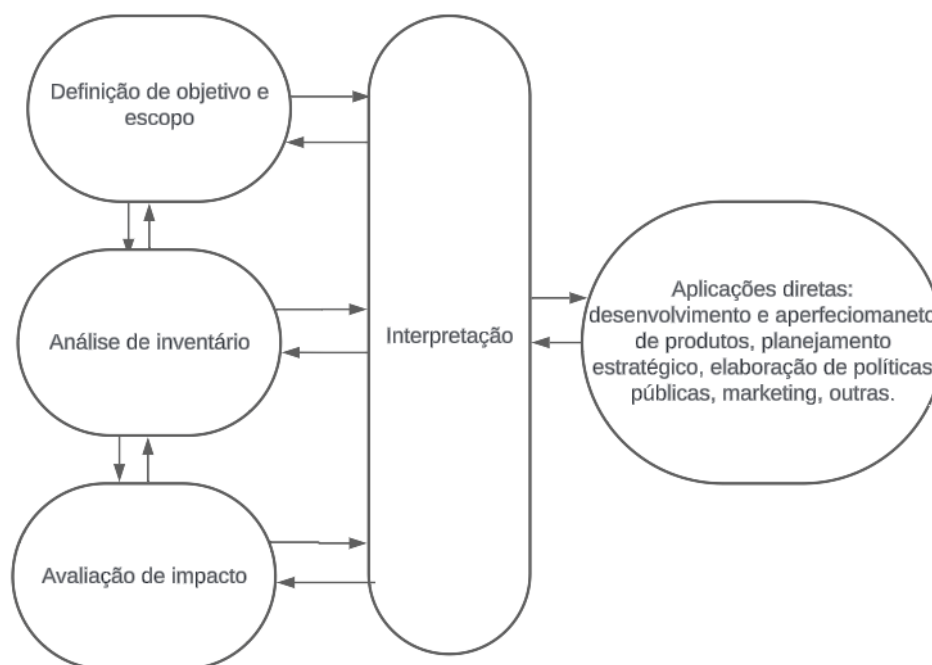
A abordagem sistêmica da avaliação de ciclo de vida tem o princípio do “berço ao túmulo”, que se refere ao levantamento de dados em todas as fases do ciclo de vida do produto, no entanto um estudo de ACV não precisa necessariamente ter esse espectro amplo, sendo comum a utilização de abordagens mais restritivas, de acordo com os interesses do estudo que se pretende realizar (IBICT, 2017).

Segundo a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009), a avaliação de ciclo de vida possui quatro fases principais:

- A) Objetivo e escopo
- B) Análise de inventário
- C) Avaliação de impacto
- D) Interpretação

As fases da avaliação de ciclo de vida e suas aplicações são demonstradas na Figura 1 a seguir.

Figura 1 - Fases da avaliação de ciclo de vida e suas aplicações.



FONTE: Adaptado de ABNT NBR ISO 14040:2009.

3.3 Fases de uma ACV

3.3.1 Objetivo e escopo

O início de uma ACV ocorre durante a etapa de definição do objetivo e escopo do estudo, neste momento, os processos, insumos, consumo de energia, entre outros devem ser delimitados, definindo assim quais itens deverão ser considerados durante o processo de avaliação. É feita a descrição do produto analisado, delimitação da fronteira de estudo e são justificados os motivos da realização do estudo, também pode ser feita a definição do método usado para coletado de dados, abrangência geográfica e unidade funcional empregada. (UNEP, 2020).

O objetivo de uma ACV define a aplicação pretendida, motivos para realização do estudo, público-alvo para comunicar os resultados e se há intenção em utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

Já para o escopo, a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009) especifica que os itens abaixo devem ser definidos:

Sistema de produto: é o conjunto de processos elementares que desempenha funções definidas e modela o ciclo de vida de um produto.

Unidade funcional: é uma medida quantitativa de um sistema de produto e serve como uma unidade de referência para comparações.

Fluxo de referência: é a medida das saídas de processos em um sistema de produto e é utilizado para realizar a função expressa pela unidade funcional.

Fronteira do sistema: especifica os processos elementares a serem incluídos em um sistema de produto. Importante para definir apenas entradas e saídas que irão alterar de forma significativa os resultados do estudo.

Alocação: é a distribuição dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produto.

Categorias de impacto: especifica a metodologia para avaliação de impactos e interpretação de dados.

Requisito de dados: é feito através de fluxograma do processo com dados primários e secundários (eletricidade, transporte, tratamento de resíduos etc.)

Pressupostos: são suposições/hipóteses consideradas para simplificar a ACV.

Requisitos de qualidade dos dados: descrevem as características dos dados necessários a serem estudados e estão relacionados à confiabilidade dos resultados.

3.3.2 Análise de Inventário

Nesta etapa é realizada a coleta de dados e procedimentos de cálculo das entradas e saídas relevantes de um sistema de produto. Conforme são coletados os dados, o conhecimento sobre o sistema é ampliado e podem ser necessárias revisões no objetivo ou escopo do estudo (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

Segundo a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009), os dados coletados podem incluir:

- energia, matéria-prima;
- produtos, subprodutos e resíduos;
- emissões atmosféricas, descarte de efluentes gasosos e líquidos, e

- outros aspectos ambientais.

O ciclo de vida deve ser representado de forma global com operações e processos interconectados, tendo os dados coletados para cada etapa do processo produtivo e agrupados conforme seu impacto ambiental (UNEP, 2020).

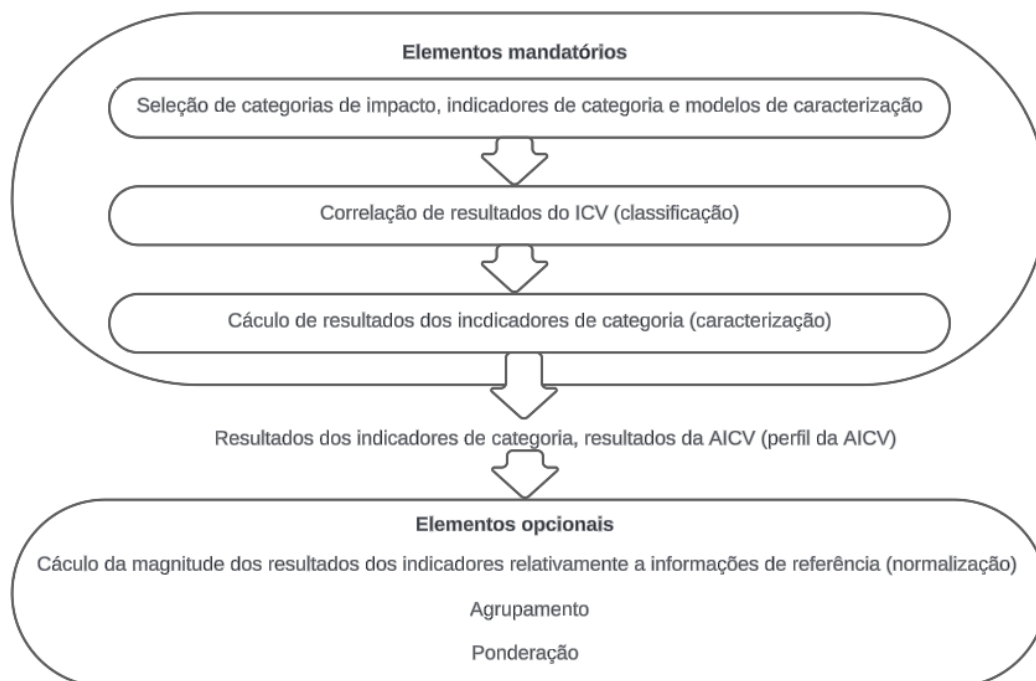
3.3.3 Avaliação de Impacto

A avaliação de impactos é um processo técnico, quantitativo e/ou qualitativo que avalia os efeitos ambientais identificados na análise de inventário (UNEP, 2020).

Nesta etapa, os dados de inventário são associados com categorias de impacto que podem ter impacto global (efeito estufa e depleção da camada de ozônio) ou local (efeitos toxicológicos e chuva ácida). Dentre alguns exemplos de categoria de impacto, podemos citar: aquecimento; acidificação; eutrofização; ecotoxicidade; saúde humana; uso do solo, combustíveis fósseis, entre outros (UNEP, 2020).

Segundo a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009), a avaliação de impacto do ciclo de vida é dividida em dois elementos principais, os mandatórios e os opcionais, os quais podem ser verificados na Figura 2.

Figura 2 - Elementos de uma avaliação de impacto do ciclo de vida.



FONTE: Adaptado de ABNT NBR ISO 14040, 2009.

Os elementos mandatórios são seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria, modelos de caracterização, correlação de resultados do impacto de ciclo de vida

(classificação) e cálculo de resultados dos indicadores de categoria (caracterização). Já o fator de caracterização está relacionado à contribuição de uma unidade de carga ambiental (exemplo 1 kg de CFC-11) para as categorias de impacto selecionadas (PETRONI et.al., 2015).

O modelo de caracterização é a simulação matemática do mecanismo ambiental de uma categoria de impacto que permite correlacionar o inventário do ciclo de vida ao resultado do indicador de categoria (IBICT, 2015).

Já os elementos opcionais da avaliação de impacto do ciclo de vida são normalização, agrupamento e ponderação.

A normalização está relacionada ao cálculo do impacto causado por um determinado elemento em comparação a uma referência, em um determinado período. Após a normalização, as informações expressas em diferentes unidades são transformadas em uma unidade adimensional (SOUSA, 2022). Normalmente são usados como valores de referência, os resultados de impactos em um local ou resultados globais (per capita). Esses resultados de impactos são chamados de “base de normalização” que é calculada a partir do inventário de cada categoria de impacto (ABNT ISO 14044, 2009).

O agrupamento consiste na agregação e ordenamento das categorias de impacto ambientais através de características (emissão atmosférica, recursos consumidos, impacto global, regional ou local, etc.) ou mediante hierarquia como alta, média, baixa prioridade (ABNT ISO 14044, 2009).

Na ponderação são atribuídos pesos às diferentes categorias de impacto ambiental, refletindo as preferências e importâncias de cada impacto.

3.3.4 Interpretação

A última etapa da ACV, a interpretação, fornece os resultados consistentes com o objetivo e escopo definidos, sendo obtidas as conclusões do estudo, limitações são explicadas e recomendações são fornecidas aos tomadores de decisão (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

3.4 Eco-Indicadores

Os Eco-Indicadores são usados para agrupar dados e assim melhorar a apresentação de resultados e interpretação, devendo apresentar três áreas de proteção (FREITAS et.al, 2021):

- Saúde humana;
- Qualidade do ecossistema e
- Recursos naturais

3.4.1 Saúde Humana

A categoria de impacto danos à saúde humana está relacionada às substâncias tóxicas no meio ambiente. Em uma ACV, os danos causados à saúde humana são provindos dos resíduos sólidos e efluentes líquidos e gasosos do processo em estudo (TAKAVOLI. BORA, 2023).

A escala DALY (*Disability Adjusted Life Years*) é a mais utilizada e mostra os anos perdidos de uma pessoa devido a uma doença ou acidente (MIRZAEI et.al., 2023)

3.4.2 Qualidade do ecossistema

Danos à qualidade do ecossistema estão relacionados aos impactos causados na biodiversidade de espécies, e também é atribuído às emissões de toxinas, acidificação e uso da terra (TAKAVOLI. BORA, 2023). Duas escalas são utilizadas para mensurar os danos ao ecossistema: PAF (*Potentially Affected Fraction*) que envolve as espécies animais impactadas pela toxicidade no ecossistema e PDF (*Potentially Disappeared Fraction*) que considera as espécies de plantas afetadas pelos danos ao ecossistema (GOEDKOOOP et al., 2001).

3.4.3 Recursos Naturais

Essa análise de dados está relacionada ao fato de que quanto mais recursos minerais e fósseis são extraídos do ecossistema, mais difícil será para os mesmos serem obtidos no futuro. A escala de medida de danos aos recursos naturais é a mais complexa de ser obtida (TAKAVOLI. BORA, 2023).

3.4.4 Métodos de avaliação de impacto

A maioria dos métodos existentes para realizar a avaliação de impactos ambientais são de origem europeia, isso ocorre devido a Europa ser referência em pesquisas de ACV, e os métodos de avaliação de ACV mais utilizados são: Eco-Indicador 99, Recipe Endpoint, Recipe Midpoint, CML 2001, EDIP 2003 (SAADE *et al.*, 2014). As particularidades desses métodos de avaliação são mostradas no Quadro 1.

Quadro 1 – Quadro comparativo de particularidades dos métodos de avaliação de impactos.

	Significado da sigla	Órgão e país de origem	Etapas consideradas	Outras particularidades
Eco-indicator 99	-	Pré: Product Ecology Consultants, Holanda	Caracterização, Avaliação de danos, Normalização, Ponderação e Agrupamento	Há 3 versões: hierárquica, igualitária e individualista, e cada versão possui dois conjuntos de ponderação - Método orientado a danos.
Recipe Endpoint	-	Pré: Product Ecology Consultants, Holanda	Caracterização, Avaliação de danos, Normalização, Ponderação e Agrupamento	Há 3 versões: hierárquica, igualitária e individualista, e há dois tipos de conjunto de ponderação: para a Europa e para o mundo. Método orientado a danos.
Recipe Midpoint	-	Pré: Product Ecology Consultants, Holanda	Caracterização e Normalização	Há 3 versões: hierárquica, igualitária e individualista, e há dois tipos de conjunto de ponderação: para a Europa e para o mundo. Método clássico.
CML 2001	Center of Environmental Science	Universidade de Leiden, Holanda	Caracterização e Normalização	Há 3 tipos de ponderação: para a Holanda, para a Europa Ocidental e para o mundo. Método clássico.
EDIP 2003	Environmental Design of Industrial Products	Universidade Técnica da Dinamarca, Dinamarca	Caracterização, Normalização e Agrupamento	Método clássico.
Impact 2002+	-	Instituto Federal de Tecnologia Suíço (EPFL), Suíça	Caracterização, Avaliação de danos, Normalização, Ponderação e Agrupamento	Combinação de método clássico com método orientado a danos.

FONTE: Adaptado de SAADE *et al.*, 2014

O método ReCiPe 2016 e 2008/2014 incluem categorias de impacto Midpoint (orientado para o problema) e Endpoint (orientado para o dano), disponíveis para três diferentes perspectivas (SimaPro, 2024):

- Individualista (*Individualist/I*) tem como base o interesse de curto prazo, tipos de impacto indiscutíveis, otimismo tecnológico relacionado à adaptação humana;
- Hierárquica (*Hierarchist/H*) baseia-se nos princípios políticos mais comuns relacionados a intervalo de tempo e outras questões;
- Igualitária (*Egalitarian/E*) é a perspectiva mais conservadora, considerando o período de tempo mais longo e os tipos de impacto que ainda não estão completamente estabelecidos, mas alguma indicação está disponível.

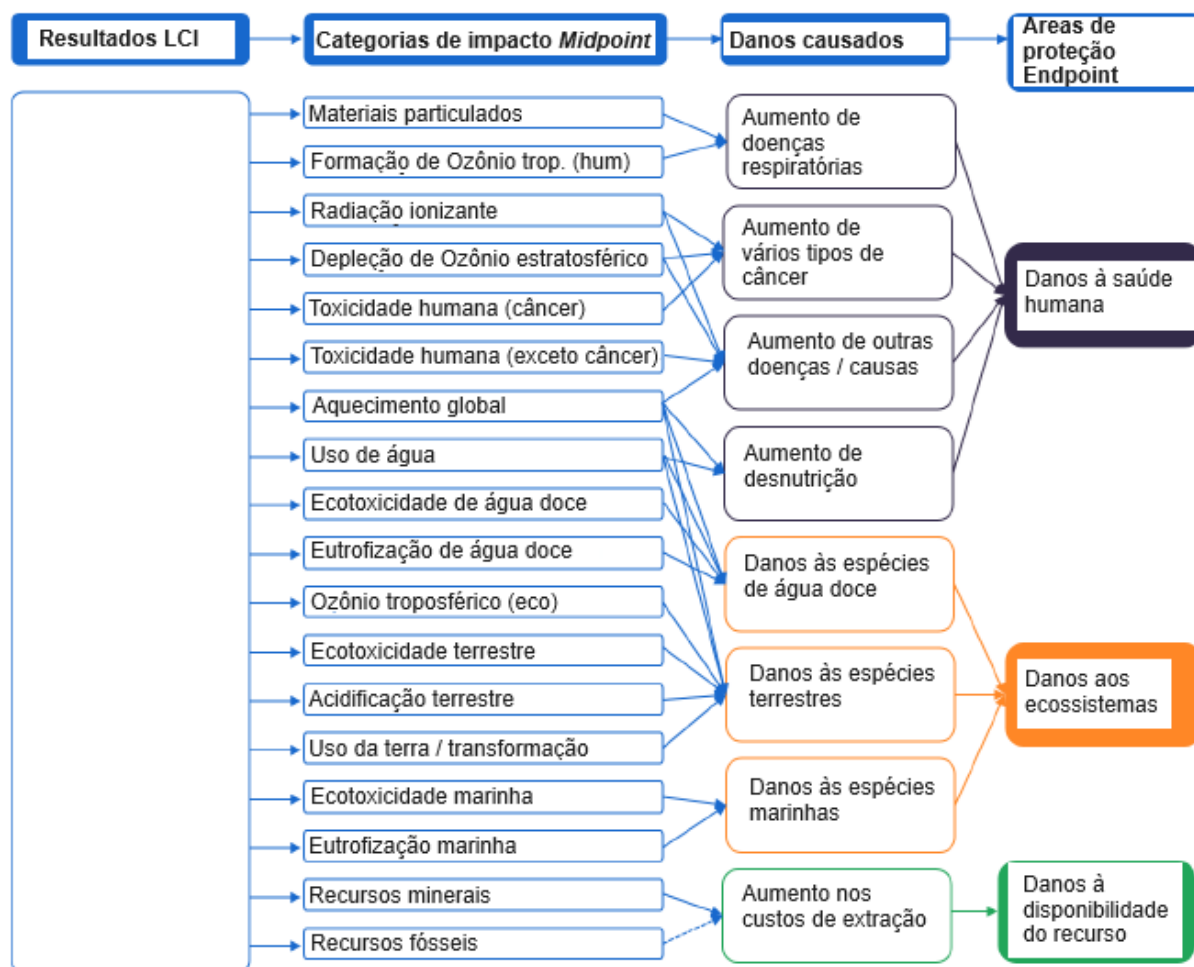
3.4.5 Métodos Midpoint e Endpoint

O método *Midpoint* representa um estágio intermediário na cadeia de causas e efeitos, e é calculado com base em fatores de caracterização que descrevem as emissões ou mudanças no meio ambiente que ocorrem antes de atingir o impacto final.

Já o método *Endpoint* representa o resultado final dos impactos ambientais que afetam a saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos, e são derivados dos fatores *Midpoint* com fator constante *mid-to-endpoint* para cada categoria de impacto. Os dois métodos são complementares, sendo que o *Midpoint* está mais relacionado com indicadores ambientais, enquanto o *Endpoint* por sua simplicidade de se trabalhar em relação a fluxos ambientais, é bastante utilizado pela indústria (HUIJBREGTS, et al, 2016).

A Figura 3 mostra a relação das categorias *Midpoint* e as 3 categorias *Endpoint*.

Figura 3 - Categorias Midpoint e Endpoint.



FONTE: Adaptado de SIMAPRO, 2024.

3.4.6 Categorias de impacto

Segundo a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009), categorias de impacto são classes que representam questões ambientais relevantes às quais os resultados da análise do inventário do ciclo de vida podem ser relacionados.

De acordo com Procópio, 2014 e SimaPro, 2024, as principais 18 categorias de impacto são:

Ocupação de Terras Agrícolas – está relacionado aos impactos da ocupação de terras agrícolas, principalmente as ocupações intensivas de florestas e ocupações intensivas em terras aráveis não irrigadas. A categoria de impacto é expressa em $m^2 \cdot a$: área de ocupação (m^2) multiplicada pelo tempo de ocupação (a).

Mudanças climáticas / Aquecimento Global – resultado de efeitos adversos sobre a saúde humana e ecossistema, está relacionada às emissões de gases de efeito estufa bi ar. A categoria de impacto é expressa em kg CO₂ eq: usado para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa com base na quantidade de dióxido de carbono que teria o mesmo potencial de aquecimento global (GWP).

Depleção Fóssil – relacionado à redução dos combustíveis fósseis, tendo como elementos com maior fator o carvão e gás natural. A categoria de impacto é expressa em kg petróleo eq: quantidade de energia que pode ser extraída de um quilograma de petróleo bruto.

Ecotoxicidade de Água Doce – relacionado aos impactos nos ecossistemas de água doce e que tem o níquel como elemento de maior fator de caracterização. A categoria de impacto é expressa em kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno equivalente).

Eutrofização de Água Doce – fator de caracterização sinaliza o destino da emissão de nutrientes que possuem fósforo em sua composição. A categoria de impacto é expressa em kg P eq: quilograma de fósforo equivalente.

Toxicidade Humana – relacionado à persistência ambiental e acumulação na cadeia alimentar humana e toxicidade de um elemento químico. A categoria de impacto é expressa em kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno equivalente).

Radiação Ionizante - está relacionada com as emissões de radionuclídeos durante a vida útil de um produto. Expresso em kg U235 eq: quilograma de Urânio 235.

Ecotoxicidade Marinha – referente aos impactos de substâncias tóxicas nos ecossistemas marinhos. A categoria de impacto é expressa em kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno equivalente).

Eutrofização Marinha – usado para determinar a relação fonte até deposição de amônia (NH₃) e (NO_x) nas emissões atmosféricas em zonas costeiras. A categoria de impacto é expressa em kg N eq: quilograma de Nitrogênio equivalente.

Depleção de Metal – analisadas substâncias que reduzem a quantidade de metais. A categoria de impacto é expressa em kg Fe eq: quilograma de Ferro equivalente.

Transformação Natural da Terra – relacionada a atividade de extração mineral que provocam perturbações e empobrecimento no solo. A categoria de impacto é expressa em m².

Depleção da Camada de Ozônio – avaliados elementos que causam a destruição da camada de ozônio. A categoria de impacto é expressa em kg CFC-11 eq: quilograma de triclofluorometano equivalente, o CFC 11 é um clorofluorcarboneto (CFC) integrante de um grupo de voláteis derivados de hidrocarbonetos e usados como fluidos refrigerantes que causam grande impacto na camada de ozônio.

Formação de Materiais Particulados – os principais processos responsáveis pela formação de materiais particulados são processos de extração relacionados ao Ni e Cr. A categoria de impacto é expressa em kg PM10 eq: quilograma de partículas finas (10 micrômetros) equivalente no ar.

Formação de Oxidante Fotoquímico – refere-se à criação de oxidantes, como ozônio troposférico, através de reações químicas fotoquímicas na atmosfera. A categoria de impacto é expressa em kg NMVOC: quilograma de compostos orgânicos voláteis não metano.

Acidificação Terrestre – o fator de caracterização usado é o Potencial de Acidificação (AP) que está relacionado às emissões de SO₂. A categoria de impacto é expressa em SO₂ eq: Dióxido de Enxofre equivalente.

Ecotoxicidade Terrestre – relacionado aos impactos de substâncias tóxicas nos ecossistemas terrestres. A categoria de impacto é expressa em kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno equivalente).

Ocupação de Terras Urbanas – fatores relacionados à ocupação de terras urbanas por um certo período. A categoria de impacto é expressa em m²*a: área de ocupação (m²) multiplicada pelo tempo de ocupação (a).

Depleção da Água – relacionado a diminuição na quantidade de água. A categoria de impacto é expressa em m³.

3.4.7 Softwares e base de dados

A execução de uma ACV está relacionada à coleta de dados de fluxo de matéria e energia e a correlação dos mesmos com os impactos ambientais. Normalmente, estudos de ACV possuem um grande volume de dados e cálculos, fazendo assim necessário o uso de um software. No caso da pesquisa deste artigo, é razoável supor grande dificuldade na obtenção de dados necessários de todo o ciclo de vida das embalagens (por exemplo, desde a plantação das árvores até a fabricação do papel). Por isso, a ACV utiliza as bases de dados (dados secundários) que contém esses levantamentos e o pesquisador entra com os dados (chamados dados

primários) apenas da fabricação da embalagem a partir do papel. Uma vez completa a entrada de dados primários e secundários, o software estima os impactos ambientais da embalagem a partir da correlação com categorias de impactos ambientais.

Existem diversos softwares utilizados para ACV que possuem um banco de dados acoplados contendo informações de diversos processos produtivos. Cada software possui especificidades na entrada de dados e demonstração dos resultados. Alguns dos softwares mais utilizados no mercado são: OpenLCA, SimaPro, GaBi, Umberto, e Quantis Suite (JUNIOR, 2016).

OpenLCA é um software gratuito e criado em 2006 pela empresa GreenDelta GmbH com o objetivo de construir uma estrutura rápida, transparente, confiável para avaliação de sustentabilidade e modelagem do ciclo de vida e que permite ao usuário a criação dos seus próprios módulos. O software é usado por indústrias, consultorias, instituições de educação e pesquisas (OPENLCA, 2024).

A base de dados Ecoinvent é suíça e possui mais de 20 anos e aborda vários setores a nível global e regional e possui mais de 20.000 atividades / conjuntos de dados com informações sobre o processo industrial ou agrícola de inventários de ciclo de vida (ECOINVENT, 2023).

3.5 Embalagens

As embalagens têm como função conter, proteger, manusear, identificar e preservar produtos desde o fabricante até o consumidor (REIS, 2014). Além disso, a embalagem pode ser considerada como a manifestação visual do produto e ser um aspecto relevante para a decisão de sua compra, sendo assim um recurso de auxílio à venda. Já as embalagens para alimentos estão em contato direto com alimentos e possui a função de protegê-los de agentes externos, alterações, contaminações e de adulterações (GOERSCH, 2022).

O setor de embalagens pode contribuir de forma positiva para o consumo sustentável, se usado, por exemplo, materiais menos agressivos ao meio ambiente e reduzindo materiais desnecessários. Na Europa, foram criadas legislações ambientais que visam atingir em 75% a reciclagem das embalagens até 2030 e incentivo para indústrias criarem produtos verdes no mercado (TEODOR et al., 2020). Segundo a Associação Brasileira de Embalagens (2022), o valor bruto da produção física de embalagens atingiu em 2022 o montante de R\$ 123,2 bilhões no Brasil, tendo assim um aumento de 3,9% na produção física de embalagens em relação a 2021.

Existe uma alta preocupação relacionada às embalagens plásticas devido ao seu amplo uso. Cerca de 8,3 milhões de toneladas de resíduos plásticos são descartados anualmente nos oceanos, representando ameaças crescentes à biodiversidade em ecossistemas marinhos. Aproximadamente 40% total da produção de plástico é usada para a fabricação de embalagens e 60% destas embalagens são usadas pela indústria alimentícia. Além disso, 99% das embalagens produzidas são de origem fóssil e a maioria de utilização única. Em resposta a esse cenário, a União Europeia fez mudanças na sua legislação como a criação da Diretiva (UE) n.º 2019/904, que tem como objetivo reduzir os impactos ambientais de produtos plásticos e aumentar a quantidade de produtos reutilizáveis sustentáveis (SANTOS et al., 2024).

3.6 Artigos que abordam ACVs comparativas em embalagens

A avaliação de ciclo de vida também é muito usada no mundo como base de ações de melhoria de desempenho do produto e na inovação de processos de produção, considerando sempre os fatores ambientais. Além disso, a ACV tem contemplado cada vez mais aspectos econômicos e sociais, completando todo o tripé da sustentabilidade. No Brasil, o número de avaliações de ciclo de vida cresceu desde o final do século passado, devido aos dados de bancos internacionais não representarem a realidade dos processos nacionais, já que no Brasil existem algumas particularidades locais como a base energética diferente da europeia (UGAYA et al., 2019).

No primeiro artigo analisado, é feita a busca da seleção de embalagens de alimentos que possuam menos impactos ambientais. A ACV deste artigo usou o software GaBi para modelar e obter os resultados. A unidade funcional definida foi a distribuição de 1.000 toneladas de frutas e vegetais em caixas de plástico ou de papelão. Já o fluxo de referência foi de 66,667 unidades de caixas de plástico e 66,667 caixas de papelão, considerando que ambas suportam 15 kg do produto. Uma limitação deste artigo foi considerar equivalentes as principais características das embalagens de plástico e papelão, apesar de estudos demonstrarem que diferentes embalagens apresentam diferentes performances em aspectos como taxas de resfriamento, uniformidade de temperatura e consumo de energia. Outra limitação do estudo foi considerar a distância de 100 km entre a geração de resíduos e o local de incineração, o que difere da realidade. A pesquisa mostrou que a embalagem de plástico foi a opção mais ecológica em determinadas aplicações, quando comparada com as de papelão, pois estas possuem maior impacto ambiental relacionado à fase de fabricação como silvicultura e produção de madeira (ABEJÓN et al., 2019).

No segundo artigo a ACV usou o software SimaPro para avaliar a influência dos atributos das embalagens na reciclagem e no comportamento do desperdício de alimentos. Os resultados mostraram que o tubo leve (embalagem para carne picada) é a melhor alternativa ambiental comparado com a bandeja quando apenas efeitos diretos são considerados. Já quando os efeitos indiretos e o comportamento do usuário são levados em consideração, a bandeja passa a ser a melhor opção devido às maiores taxas de reciclagem e menor desperdício durante o uso. Os impactos ambientais diretos estão relacionados ao tipo de material usado, peso, concentração. Já os indiretos estão relacionados com o comportamento do usuário em relação às embalagens, por exemplo, maior ou menor desperdício de alimentos dependendo do tipo de embalagem usada e a devida reciclagem da embalagem (WIKSTRÖM et al., 2016).

Outro artigo de ACV comparou através do software SimaPro o desempenho ambiental de dois tipos de embalagens para frutos do mar na Espanha: caixas de poliestireno expansível descartável (EPS) e caixas de plástico reutilizáveis (RPC) feitas de polietileno de alta densidade. A unidade funcional foi definida como o transporte de 1260 toneladas de frutos do mar, necessitando 196.875.000 unidades de embalagens EPS e 101.000 RPC para o transporte. Os resultados mostraram desempenho ambiental semelhantes para os dois tipos de embalagens, embora as embalagens reutilizáveis tenha sido uma escolha mais utilizada devido às crescentes preocupações ambientais dos consumidores (SANTOS et al., 2024).

No estudo de ACV de comparação de embalagens para produtos sanitários foram utilizados quatro materiais diferentes no SimaPro: polietileno de baixa densidade (R-LDPE) obtidos de restos de filme de polietileno de baixa densidade; Biopolímero A - bioplástico biodegradável e compostável composto por amido de milho e alguns plastificantes; Mistura biodegradável B - bioplástico biodegradável e compostável composto por 70% de polibutileno adipato cotereftalato (PBAT), 10% de poliácido láctico, 20% de talco como enchimento; polietileno de baixa densidade (LDPE). A unidade funcional foi considerada uma embalagem contendo 10 absorventes. Duas fases não foram consideradas na análise: distribuição aos clientes finais e fase de uso dos produtos. Os resultados mostraram que o consumo de energia elétrica durante a produção da embalagem é um dos fatores mais impactantes, independentemente do tipo de material utilizado, e isso ocorre principalmente pela fase de extrusão. Os bioplásticos não resultaram como a melhor opção ambiental, principalmente o que contém PBAT devido aos altos impactos durante a produção de matérias-primas e alto desperdício durante seu processamento. O material que teve melhor resultado ambiental foi o LDPE (STEFANINI et al., 2024).

Sazdovski et al. (2024) analisou através do software GaBi o desempenho circular com base no ciclo de vida e análise de fluxo de materiais de caixas de plásticos reutilizáveis e caixas de papelão descartáveis. Circularidade está relacionada à eliminação de resíduos, regeneração da natureza e circularidade de produtos e materiais. A unidade funcional utilizada foi a distribuição de 1.000 toneladas de produto in natura, resultando na distribuição de 6.666.700 embalagens com 15 kg de produtos. Os resultados mostraram que as caixas de plásticos reutilizáveis são mais circulares dos que as caixas de papelão de uso único.

A pesquisa de Baher et al. (2024) comparou através do software Umberto, os impactos ambientais das embalagens necessárias para a realização de gerenciamento convencional de medicamentos em papel (PBMM) e administração digital de medicamentos em circuito fechado (CLMA). A CLMA foi introduzida com o intuito de tornar os processos mais eficientes em termos de tempo, custo e aumentando a segurança do paciente. Estudos mostram que o PBMM está associado a um alto grau de erros de medicação. O CLMA reduz erros de medicação introduzindo o uso de bolsas plásticas de dose única embaladas automaticamente, enquanto no PBMM a medicação é dispensada manualmente. Outra diferença entre os dois sistemas é que o PBMM requer caixas pequenas com bolhas e o CLMA utiliza embalagens grandes e engarrafadas. A unidade funcional foi definida como uma embalagem necessária para a administração de um mesmo comprimido. Os resultados mostraram que os materiais de embalagem necessários para realizar o CLMA geralmente estão associados a maiores impactos ambientais do que os materiais de embalagens necessários para o PBMM.

Os resultados do estudo de ACV de Jonghun et al. (2024) obtidos do SimaPro indicaram que os impactos ambientais das embalagens retornáveis do comércio eletrônico são relacionados principalmente pela distância total de viagem e pelo número de reutilizações.

O objetivo da ACV de Kim et al. (2023) foi de comparar os impactos ambientais de carga unitária inicial e otimizada através do SimaPro. A otimização foi feita através do aumento da rigidez das tábuas dos paletes e reduzindo o papelão de suas caixas. A unidade funcional foi definida como cargas unitárias duplas (paletes de madeira com caixas de papelão ondulado) empilhadas com a mesma capacidade máxima de carga segura para empilhamento no piso. Os resultados mostraram que a otimização da carga unitária reduziu em até 23% os impactos ambientais principalmente devido à redução do papelão.

A ACV de Azam et al. (2022) demonstrou através do SimaPro que o hidrocraqueamento de polietileno de alta densidade possui menos impactos ambientais (10 das 11 categorias de impacto) do que a pirólise de polietileno de alta densidade. Os dois processos de pirólise e hidrocraqueamento de polietileno de alta densidade são utilizados como método de reciclagem

química de plásticos de embalagens. A unidade funcional foi considerada como a capacidade de reciclagem de 1000kg de polietileno de alta densidade por hora.

Na pesquisa de Cappiello et al. (2022), a ACV compara através do SimaPro diferentes embalagens utilizadas para armazenamento de leite. A unidade funcional utilizada foi a de embalagem necessária para armazenar 1 litro de leite de vida útil estendida (ESL) e garantir uma vida útil do leite de 30 dias. Os menores impactos ambientais foram encontrados nas embalagens biocompostáveis em que apenas as categorias de impacto eutrofização terrestre e depleção da água tiveram valores altos. As embalagens de vidro tiveram os piores resultados devido ao alto impacto da produção de matéria-prima. Nenhum transporte relacionado à distribuição foi considerado na ACV.

4 Metodologia

Para realizar a avaliação de ciclo de vida foram coletados dados de entradas e saídas de todos os processos envolvidos na produção de dois tipos de embalagens de uma determinada ferramenta de uma grande fabricante do setor. A ferramenta escolhida foi a serra copo 25 mm, uma das mais vendidas pela empresa. Esta ferramenta possui uma lâmina serra de formato anular usado por profissionais e amadores para furar painéis, paredes, quadros, PVC, alvenaria, gesso, azulejo, cerâmica, vidro e outros. Este tipo de serra é usado em furadeiras e normalmente tem uma broca piloto (suporte) no centro para evitar a movimentação dos dentes da serra (MATTEDE, 2018).

Até o ano de 2022 era utilizada a embalagem A, confeccionada de papel e plástico, para acondicionar a serra copo 25 mm. A partir de 2022 houve a alteração para a embalagem B, com dimensões reduzidas e constituída somente de papel (Figura 4).

Figura 4 - Embalagens A e B.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados primários foram fornecidos pelas empresas Starrett do Brasil, fabricante das ferramentas e localizada na cidade de Itu, SP e AMF Gráfica, fabricante das embalagens e localizada na cidade de São Paulo, SP. Os dados secundários foram obtidos na base de dados EcoInvent 3.7.1.

4.1 Objetivo e escopo

O objetivo deste trabalho é realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) comparativa de duas embalagens de serra copo de 25 mm de diâmetro, conforme mencionado no item 2. A ACV deste trabalho foi limitada no conceito de *Portão a Portão*.

Escopo

O escopo deste estudo abrange a análise completa do ciclo de vida das duas embalagens de serra copo, desde a confecção das embalagens, até a disposição do produto na gráfica. O estudo seguirá a metodologia padronizada pela ISO 14040, que envolve a definição do sistema de produto, a escolha da unidade funcional, a delimitação da fronteira do sistema, a coleta e a qualidade dos dados, e a avaliação das categorias de impacto relevantes. A seguir, detalham-se os elementos específicos do escopo:

- Sistema de Produto

O sistema de produto inclui todos os processos envolvidos na produção. Os processos considerados incluem: processamento de matérias-primas e fabricação das embalagens. A ACV realizada só levou em consideração as matérias-primas utilizadas, não considerando-se os efluentes, resíduos e transporte, embora tenham sido obtidos dados que permitem avaliar, quantitativamente, os impactos relacionados a efluentes, resíduos e transporte.

- Unidade Funcional e Fluxo de Referência

A unidade funcional foi definida como o armazenamento de 100.000 serras copo de 25mm.

O fluxo de referência, portanto, são 100.000 embalagens de cada tipo (A e B), garantindo que a comparação entre as duas seja baseada na mesma quantidade de produto embalado.

- Fronteira do Sistema e Alocação

A fronteira do sistema adotada para este estudo é o recebimento da matéria-prima na gráfica, contemplando toda a etapa de confecção das embalagens, até a estocagem das embalagens na gráfica.

A alocação de impactos ambientais foi realizada de acordo com as normas ISO, aplicando-se, sempre que possível, uma alocação baseada na massa das embalagens.

- Requisito de Dados; Pressupostos e Requisitos de Qualidade dos Dados

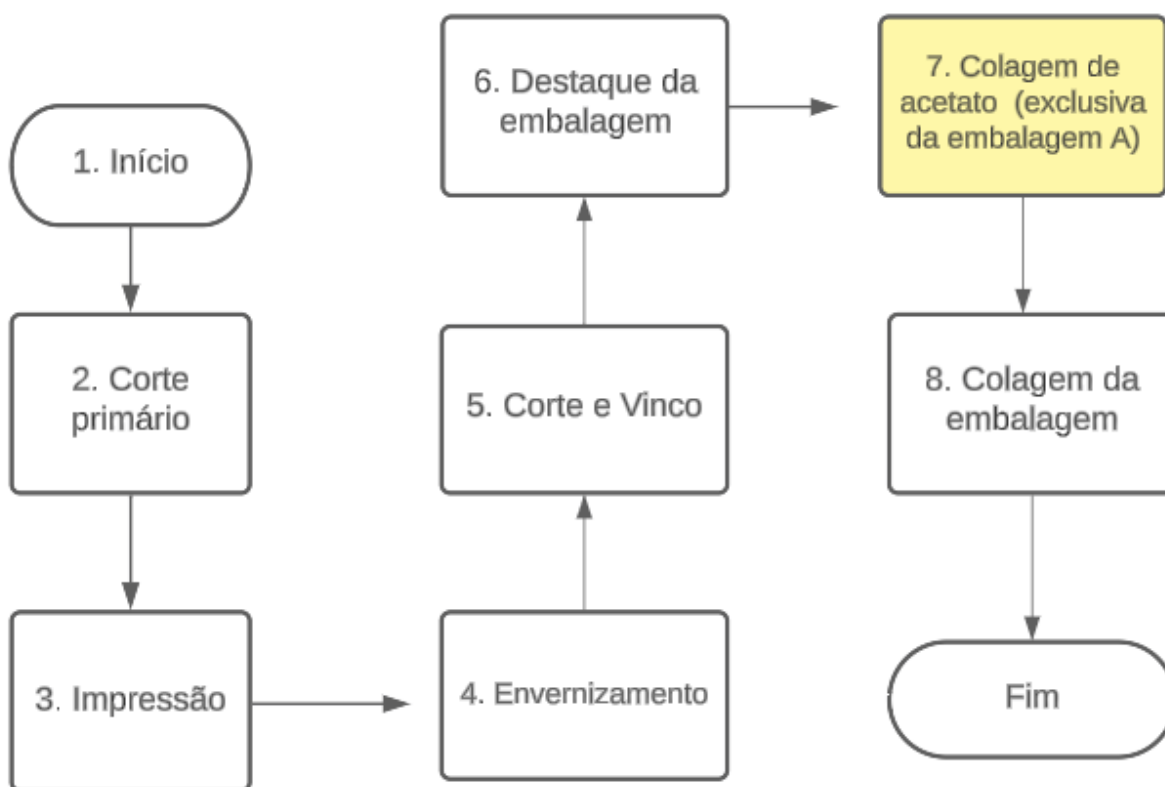
Requisito de Dados: dados incluem informações sobre os processos de fabricação de matérias-primas. Os dados foram coletados de fontes primárias (fornecidos pela Starrett e AMF Gráfica) e secundárias (base de dados EcoInvent 3.7.1).

Uma hipótese simplificadora adotada foi considerar apenas a fabricação das embalagens até a estocagem delas na gráfica, e não considerar o transporte das embalagens, nem a montagem e distribuição. Também não foram considerados o uso das embalagens e a disposição final dos resíduos.

4.2 Processo de fabricação das embalagens

O fluxo de processo de fabricação das embalagens é descrito na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma do processo de fabricação das embalagens



FONTE: Elaborado pela autora.

- 1) Início: a matéria prima, papel duplex com gramatura de 240 g, adquirida de uma empresa localizada em Suzano – SP, é transportada à gráfica por um caminhão com carreta basculante (de 12 metros de comprimento) e armazenada diretamente na empresa em São Paulo – SP (Figura 6). As compras de papel duplex são realizadas de 2 a 3 vezes por ano, enquanto as compras de verniz, tinta e cola usadas nas outras etapas de produção da embalagem são feitas 1 ou 2 vezes por mês.

Figura 6 - Entrada de matéria prima.



Fonte: Elaborado pela autora.

- 2) Corte primário: o papel é movimentado até a máquina de corte (Figura 7), no qual será cortado em 4 partes.

Figura 7 - Máquina de corte primário.



Fonte: Elaborado pela autora.

- 3) Impressão: essa fase consiste na impressão da arte final da embalagem no papel (Figura 8).

Figura 8 - Máquina de impressão das embalagens.



Fonte: Elaborado pela autora.

- 4) Envernizamento: neste processo é aplicado o verniz e é feita a secagem da folha de impressão (Figura 9).

Figura 9 - Máquina de envernizamento.



Fonte: Elaborado pela autora.

- 5) Corte e Vinco: é realizado o corte das folhas, assim como os pré cortes da embalagem e seus vincos (dobras). Após seu término, o papel fica destacável nos limites das embalagens individuais (Figura 10).

Figura 10 - Máquina de corte vinco.



Fonte: Elaborado pela autora.

- 6) Destaque da embalagem: é realizado de forma manual o destaque das embalagens individuais na folha (Figura 11).

Figura 11 - Embalagens individualmente destacadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

- 7) Colagem de acetato: etapa exclusiva da embalagem A, na qual é realizada a colagem do acetato de forma manual.
- 8) Colagem da embalagem: o processo de colagem da tampa, fundo e laterais da embalagem é feito através de máquina específica (Figura 12).

Figura 12 - Máquina de colagem.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em 2022 parou-se de fabricar a embalagem A (antiga) e em 2023 foi realizada a migração total desta para a embalagem B (nova). A disposição da quantidade de embalagens por folha de papel é apresentada da seguinte forma:

- Embalagem A – 6 embalagens por folha de papel 38,5x56,5 cm
- Embalagem B – 8 embalagens por folha de papel 38,5x56,5 cm

O processo de transporte das embalagens A e B ocorre da mesma forma, através de um carro da marca / modelo: Fiat Fiorino ou Hyundai HR. Após a saída da embalagem da gráfica em São Paulo, SP, ela é transportada até Itu - SP para a realização da montagem manual. A gráfica embala com papel kraft as embalagens e armazena 1000 embalagens em cada pacote. Neste projeto, considerou-se que foi utilizado o veículo Hyundai HR e que nele são

transportados 7 pallets (tamanho 66x96cm) por viagem, sendo que em cada pallet são armazenadas 13.000 embalagens A e 20.000 embalagens B.

A embalagem da serra copo 25 mm, Starrett, representa 20% do mix de produção da AMF Gráfica, sendo que este mix permaneceu inalterado quando da troca da embalagem A pela B. Esse dado é importante pois o consumo de eletricidade da gráfica para a produção de embalagens foi considerado 20% do total consumido pela empresa, antes e após a transição de uma embalagem para outra, ou seja, a transição não trouxe impactos em termos de energia elétrica e essa é considerada uma limitação do estudo. Vale destacar que este produto possui um mix de venda correspondente a 70% das vendas para a Escócia, 20% para EUA e 10% para o Brasil.

Conforme informações obtidas, a fabricante da ferramenta contrata um fornecedor para onde envia seus produtos finais (no caso a serra copo) para que este faça o preenchimento das embalagens e o empacotamento em embalagens secundárias maiores (caixas). Estas caixas voltam à fabricante e ficam no estoque, até a distribuição a clientes finais.

O software utilizado para análise dos impactos ambientais baseados na avaliação de ciclo de vida foi o OpenLCA versão 1.10.3, empregando a base de dados Ecoinvent, versão 3.7.1.

Neste trabalho, a normalização foi baseada no método ReCiPe Midpoint, hierárquico, versão 1.11, em termos de unidades de impactos para “Mundo [pessoa/ano]”, que contém fatores de normalização para a Europa e o Mundo. Optou-se pela perspectiva hierárquica por se basear nos princípios políticos mais comuns relacionados a intervalo de tempo. A metodologia utilizada na avaliação de ciclo de vida é baseada na norma ABNT NBR ISO 14040 (2009).

Os fatores de ponderação do ReCiPe são baseados em uma análise detalhada realizada especificamente no nível da categoria de dano, conhecida como Endpoint. Para cada perspectiva considerada, há um conjunto específico de ponderações disponível, refletindo as variações nos valores atribuídos a diferentes impactos ambientais. Além desses conjuntos específicos, o resultado médio da avaliação realizada também está disponível e é frequentemente empregado como um conjunto de ponderações. A versão hierárquica do ReCiPe, que utiliza a média das ponderações, é escolhida como padrão, pois seus valores são amplamente reconhecidos e aceitos na comunidade científica, sendo considerados os mais robustos e cientificamente sólidos (SIMAPRO, 2024).

A matéria prima “acetato”, o polímero que compõe a embalagem A, não foi encontrada na base de dados Ecoinvent, por esse motivo, optou-se por criar separadamente o processo deste material diretamente no OpenLCA seguindo os dados da dissertação Application of Life Cycle Assessment for Corporate Sustainability (MANDA, 2014). O processo foi chamado de Cellulose Acetate e as entradas constam na Tabela 1.

Tabela 1 - Entradas do processo Cellulose Acetate.

Nomenclatura base de dados	Nomenclatura base de dados (tradução)	Quantidade (por kg de acetato)
<i>acetic acid, without water, in 98% solution state</i>	ácido acético, sem água, em solução a 98%	1,02 kg
<i>acetic anhydride</i>	anidrido acético	2,00 kg
<i>cellulose fibre</i>	fibra de celulose	0,60 kg
<i>electricity, medium voltage</i>	eletricidade, média tensão	2,34 MJ
<i>steam, in chemical industry</i>	vapor, em indústria química	7,50 kg
<i>sulfuric acid</i>	ácido sulfúrico	0,10 kg
<i>tap water</i>	Água de torneira	25,00 kg

Os nomes usados pela gráfica das matérias-primas utilizadas para fabricação das embalagens A e B e suas respectivas funções são mostradas na Tabela 2, enquanto as nomenclaturas das entradas usadas no software são mostradas na Tabela 3. Observa-se que são mais insumos para a fabricação da embalagem A do que para a fabricação da embalagem B.

Tabela 2 – Nomes usados pela gráfica das matérias-primas utilizadas na fabricação das embalagens A e B e suas funções.

Nome	Função	Embalagem(ns)
Acetato	Material da embalagem	A
Água	Utilizado para lavagem da rolaria das máquinas	A e B
Álcool Isopropílico	Utilizado para lavagem da rolaria das máquinas	A e B
Cola Artecol 4701	Colagem das bordas	A e B
Cola Riclacol 1700 AC	Colagem do acetato na embalagem A	A
Papel	Material da embalagem	A e B
Pó Anti - Imaculador	Evita que a parte impressa borre a impressão de outros	A e B
RC95 - acido fosforico	Solvente	A e B
RC95 - nafta	Solvente	A e B
Restaurador de Blanqueta	Utilizado para lavagem da rolaria das máquinas	A e B
Solvente A-70	Solvente	A e B
Solvente Clean SB	Utilizado para lavagem da rolaria das máquinas	A e B
Tinta Offset	Impressão	A e B
Verniz CaL A-96	Envernizamento	A e B

As nomenclaturas das entradas no software de cada insumo para a fabricação das embalagens são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Nomenclaturas das entradas no OpenLCA de cada insumo para a fabricação das embalagens.

Nome (usado pela gráfica)	Nomenclatura base de dados (usado no OpenLCA)	Nomenclatura base de dados (tradução)	UUID (Identificador Universalmente Único)
Acetato	<i>Cellulose Acetate</i>	Acetato de celulose	ff20faad-80b3-4e94-8a27-f858030a2b65
Água	<i>tap water</i>	Água de torneira	c5adb1fb-872e-4446-a3bb-c4b61aa4bd45
Álcool Isopropílico	<i>Isopropanol</i>	Isopropanol	a755ae96-2e6b-4ce2-ae2a-8f36682c1f6e
Cola Artecol 4701	<i>vinyl acetate</i>	acetato de vinila	dd65feb0-363f-4785-9084-9083e570451f
Cola Riclacol 1700 AC	<i>ethylene vinyl acetate copolymer</i>	copolímero de acetato de vinila etileno	e6406c60-b8cf-4ee5-af0b-df43c146018c
Papel	<i>kraft paper</i>	papel kraft	8ef02d68-0b80-4c12-81ee-3dd678d2915b
Pó Anti - Imaculador	<i>maize starch</i>	amido de milho	c4ed73ce-ed64-4823-96d9-5661c11c6941
RC95 - acido fosforico	<i>Phosphoric acid</i>	Ácido fosfórico	5d0058e0-ad1b-4c15-b0ff-a665bb04154f
RC95 - nafta	<i>naphtha</i>	nafta	27a3ac7b-e31a-48da-84f5-8dbdcb96e565
Restaurador de Blanqueta	<i>Benzene, Toluene, Xylene (BTX)</i>	Benzeno, Tolueno, Xileno (BTX)	af2f584d-55d7-4bc7-a2f4-174ce54ad943
Solvente A-70	<i>ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene</i>	etanol, sem água, em solução 99,7% de etileno	3a0d77a5-6488-4977-966a-731350be864a
Solvente Clean SB	<i>solvent for paint</i>	solvente para tinta	c8f690ff-9611-4d67-85fa-c1ce5b5f8e20
Tinta Offset	<i>printing ink, offset, without solvent, in 47.5% solution state</i>	tinta de impressão, offset, sem solvente, em solução 47,5%	13f4bda2-1e95-40e5-9f1e-97feb2142cd0
Verniz CaL A-96	<i>ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene</i>	etanol, sem água, em solução 99,7% de etileno	3a0d77a5-6488-4977-966a-731350be864a

Para este estudo, foram consideradas 100.000 embalagens, A ou B, para obter uma melhor apresentação dos resultados. As entradas de matérias-primas, embalagens e resíduos foram ajustadas para unidade quilograma e suas quantidades são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Lista de matérias-primas utilizadas na fabricação de 100 mil embalagens A e 100 mil embalagens B.

Nome	Massa utilizada para produzir 100 mil embalagens A (kg)	Massa utilizada para produzir 100 mil embalagens B (kg)
Solvente Clean SB	0,25	0,19
Tinta Offset	2,50	1,88
Álcool Isopropílico	0,93	0,70
Restaurador de Blanqueta	0,06	0,05
Água	5,28	3,96
Pó Anti – Imaculador	0,04	0,03
RC95 – nafta	0,03	0,02
RC95 – ácido fosfórico	0,03	0,02
Acetato	51,00	0,00
Papel	583,00	468,00
Verniz CaL A-96	6,94	5,21
Solvente A-70	2,78	2,08
Cola Riclacol 1700 AC	1,11	0,00
Cola Artecol 4701	1,11	0,83

É possível observar pela Tabela 4 que todas as matérias-primas para obter a embalagem B foram utilizadas em menor quantidade do que para fabricar a embalagem A, o que sugere o menor impacto ambiental da nova embalagem em relação à antiga. Isso permite afirmar que, embora não tenham sido incluídos neste estudo de ACV, resíduos e efluentes provavelmente serão gerados em menores quantidades na fabricação da embalagem B em relação a A, gerando menos impactos ambientais.

3. Resultados

Como já mencionado, a troca da Embalagem A pela B (Figura 4) trouxe uma melhora no aproveitamento do papel de impressão. A Tabela 5 apresenta essa melhora em termos do número de embalagens por folha e do percentual de sobra (que são posteriormente cortadas e descartadas).

Tabela 5 - Percentual de sobra das embalagens A e B.

Embalagem	Número de embalagens por folha	% de sobra
A	6	20
B	8	12

Observa-se pela Tabela 5 que, além de se conseguir um maior número de embalagens por folha, a Embalagem B gera 8% menos resíduos, fatores que acarretam indiretamente na redução de manutenção das máquinas de corte, impressão, colagem e envernizamento, já que com uma maior eficiência de embalagens por folha, o acionamento das máquinas é reduzido para uma mesma produção de embalagens. Um exemplo grande disso é a redução da lavagem de máquinas.

A Tabela 6 apresenta o transporte das embalagens A e B considerando uma viagem do veículo da gráfica para a indústria.

Tabela 6 - Transporte das embalagens A e B por viagem do veículo da gráfica para a indústria.

Item	Embalagens por pallet	Pallets por viagem	Total de embalagens transportadas
Embalagem A	13.000	7	91.000
Embalagem B	20.000	7	140.000
Aumento em Porcentagem			53,85%

Dado que a embalagem B possui dimensões menores em comparação com a embalagem A, cada viagem realizada pelo veículo era capaz de transportar 91.000 unidades da embalagem A, enquanto atualmente consegue transportar 140.000 unidades da embalagem B. Esse aumento no número de embalagens transportadas por viagem representa um incremento de 53,85% na capacidade de transporte, evidenciando uma melhoria significativa na eficiência logística. No entanto, é importante notar que a análise de ciclo de vida (ACV) realizada não considerou os aspectos relacionados à logística e ao consumo de combustível durante o transporte das embalagens. Os resultados das categorias de impacto gerados pelo OpenLCA correspondente à fabricação de 100 mil embalagens tipo A são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Categorias de impacto resultantes da fabricação de 100 mil embalagens tipo A.

Categoria de impacto	Unidade	Resultado
Ocupação de Terras Agrícolas	m ² *a	3.408,46
Depleção da Água	m ³	3.377,24
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq	869,49
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	464,88
Depleção Fóssil	kg oil eq	341,23
Radiação Ionizante	kg U235 eq	312,55
Ocupação de Terras Urbanas	m ² *a	36,21
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	28,44
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq	26,91
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq	4,96
Formação de Oxidante Fotoquímico	kg NMVOC	4,70
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	2,39
Formação de Materiais Particulados	kg PM10 eq	1,90
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	0,93
Depleção de Metal	kg Fe eq	0,85
Eutrofização Marinha	kg N eq	0,69
Transformação Natural da Terra	m ²	0,21
Depleção da Camada de Ozônio	kg CFC-11 eq	<0,01

Já os resultados normalizados em milipoint (mPt) das principais categorias de impacto resultantes da fabricação de 100 mil embalagens tipo A são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados em Milipoint das principais categorias de impacto resultantes da fabricação de 100 mil embalagens tipo A.

Categoria de impacto	Resultado (mPt)	Porcentagem	Porcentagem acumulada
Ecotoxicidade Marinha	1,78E-09	45%	45%
Ecotoxicidade de Água Doce	1,08E-09	27%	72%
Eutrofização de Água Doce	5,25E-10	13%	85%
Toxicidade Humana	2,33E-10	6%	91%
Ocupação de Terras Agrícolas	1,02E-10	3%	94%
Ecotoxicidade Terrestre	6,56E-11	2%	95%
Outros	1,86E-10	5%	100%
Total	3,97E-09	100%	---

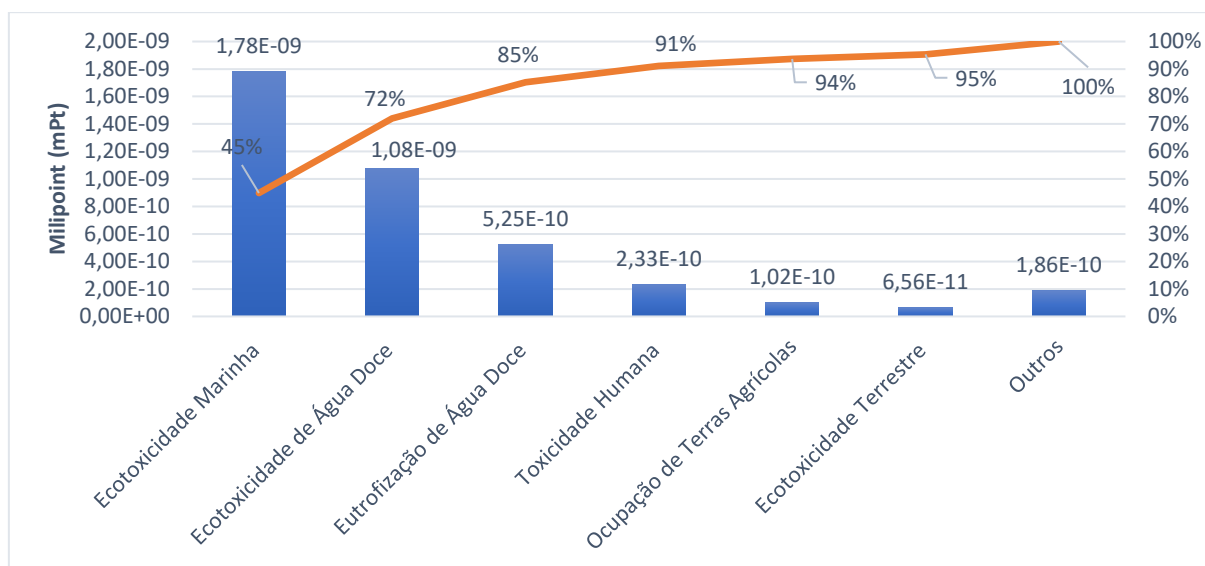
O item “Outros”, cujo somatório para a embalagem A é de 5%, é formado por outras 12 categorias de impacto (ver Tabela 9), sendo o maior resultado depleção fóssil com valor de 4,32E-11 mPt e o menor valor encontrado foi a depleção da água com valor nulo.

Tabela 9 – Item “Outros” da Tabela 8: categorias de impacto da Embalagem A com menor relevância.

Categoria de impacto	Resultado (mPt)	Porcentagem (%)
Depleção Fóssil	4,32E-11	1%
Radiação Ionizante	3,87E-11	1%
Formação de Materiais Particulados	2,21E-11	1%
Acidificação Terrestre	2,12E-11	1%
Mudanças Climáticas	2,06E-11	1%
Eutrofização Marinha	1,53E-11	0%
Formação de Oxidante Fotoquímico	1,35E-11	0%
Ocupação de Terras Urbanas	7,63E-12	0%
Transformação Natural da Terra	2,82E-12	0%
Depleção da Camada de Ozônio	4,33E-13	0%
Depleção de Metal	3,12E-13	0%
Depleção da Água	0,00E+00	0%

A Figura 13 apresenta os resultados da Tabela 8 na forma de gráfico de Pareto.

Figura 13 - Gráfico de Pareto das principais categorias de impacto resultantes da fabricação da embalagem A.



Através da Tabela 8 e Figura 13 pode-se concluir que 80% dos impactos ambientais ocasionados pela produção de 100 mil embalagens A advém de ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade de água doce e eutrofização de água doce. As matérias-primas da embalagem A que contribuíram para as seis principais categorias de impacto são mostradas na Tabela 10 em que se observa que mais de 90% dos impactos ambientais são devidos ao acetato e papel.

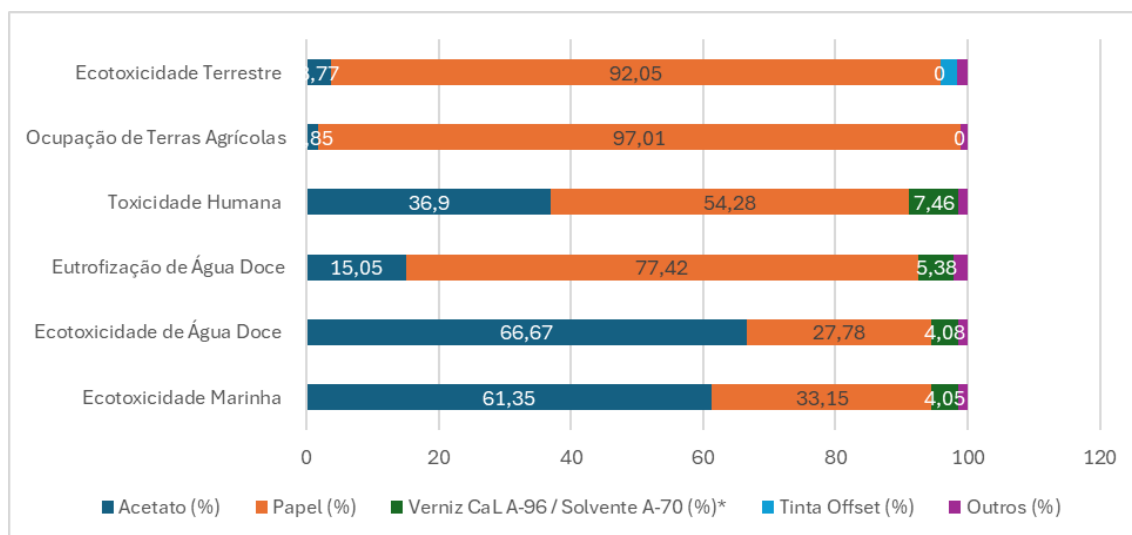
Tabela 10 – Matérias-primas da embalagem A que contribuíram para as principais categorias de impacto

Categoria de impacto / matéria-prima	Acetato (%)	Papel (%)	Verniz CaL A-96 / Solvente A-70 (%)*	Tinta Offset (%)	Outros (%)
Ecotoxicidade Marinha	61,35	33,15	4,05	0,00	1,45
Ecotoxicidade de Água Doce	66,67	27,78	4,08	0,00	1,47
Eutrofização de Água Doce	15,05	77,42	5,38	0,00	2,15
Toxicidade Humana	36,9	54,28	7,46	0,00	1,36
Ocupação de Terras Agrícolas	1,85	97,01	0,00	0,00	1,14
Ecotoxicidade Terrestre	3,77	92,05	0,00	2,51	1,67

*Verniz / Solvente – esses dois materiais foram inseridos juntos devido a composição desses dois materiais ser a mesma e consequentemente ter a mesma base de dados no OpenLCA.

A Figura 14 mostra em formato de gráfico os resultados da Tabela 10.

Figura 14 - Gráfico das matérias-primas da embalagem A que contribuíram para as principais categorias de impacto.



Os resultados das categorias de impacto gerados pelo software da fabricação de 100 mil embalagens tipo B são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Categorias de impacto resultantes da fabricação de 100 mil embalagens tipo B.

Categoria de impacto	Unidade	Resultado
Ocupação de Terras Agrícolas	m ² *a	2.657,69
Depleção da Água	m ³	1.250,60
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq	306,84
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	230,60
Depleção Fóssil	kg oil eq	90,90
Radiação Ionizante	kg U235 eq	57,00
Ocupação de Terras Urbanas	m ² *a	24,32
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq	8,15
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	7,42
Formação de Oxidante Fotoquímico	kg NMVOC	2,24
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq	1,91
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	1,82
Formação de Materiais Particulados	kg PM10 eq	0,69
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	0,62

Eutrofização Marinha	kg N eq	0,48
Depleção de Metal	kg Fe eq	0,20
Transformação Natural da Terra	m ²	0,05
Depleção da Camada de Ozônio	kg CFC-11 eq	0,00

Os resultados normalizados representados em milipoint (mPt) das maiores categorias de impacto resultantes da fabricação de 100 mil embalagens tipo B são mostrados na Tabela 12. Os resultados numéricos serão comparados com os da embalagem A posteriormente, porém nota-se que são as mesmas seis categorias de impacto representando quase a totalidade (95% na embalagem A e 96% na embalagem B), com a diferença que a segunda categoria mais impactante da embalagem A é Ecotoxicidade de Água Doce, que está em terceiro na embalagem B. Para a embalagem B a segunda principal é Eutrofização de Água doce, a terceira na embalagem A.

Tabela 12 - Resultados em Milipoint das principais categorias de impacto resultantes da fabricação de 100 mil embalagens tipo B.

Categoria de impacto	Resultado (mPt)	Porcentagem	Porcentagem acumulada
Ecotoxicidade Marinha	5,40E-10	36%	36%
Eutrofização de Água Doce	3,51E-10	24%	60%
Ecotoxicidade de Água Doce	2,81E-10	19%	79%
Toxicidade Humana	1,16E-10	8%	87%
Ocupação de Terras Agrícolas	7,99E-11	5%	92%
Ecotoxicidade Terrestre	4,99E-11	3%	96%
Outros	6,50E-11	4%	100%
Total	1,48E-09	100%	---

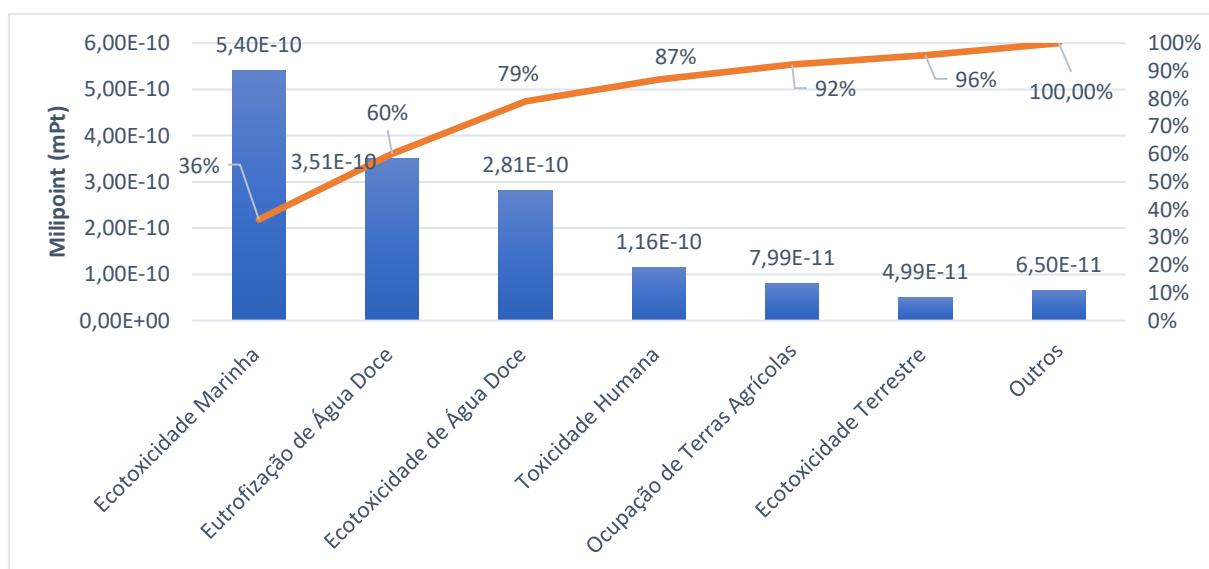
O item “Outros”, cujo somatório para a embalagem B é 4%, é formado por 12 categorias de impacto (ver Tabela 13), sendo o maior resultado depleção fóssil com valor de 1,15E-11 mPt e o menor valor encontrado foi a depleção da água com valor nulo.

Tabela 13 - Item “Outros” da Tabela 12: categorias de impacto da Embalagem B com menor relevância.

Categoria de impacto	Resultado (mPt)	Porcentagem
Depleção Fóssil	1,15E-11	1%
Eutrofização Marinha	1,06E-11	1%
Acidificação Terrestre	8,16E-12	1%
Formação de Materiais Particulados	8,00E-12	1%
Mudanças Climáticas	7,27E-12	0%
Radiação Ionizante	7,07E-12	0%
Formação de Oxidante Fotoquímico	6,45E-12	0%
Ocupação de Terras Urbanas	5,12E-12	0%
Transformação Natural da Terra	6,84E-13	0%
Depleção da Camada de Ozônio	1,28E-13	0%
Depleção de Metal	7,25E-14	0%
Depleção da Água	0,00E+00	0%
Total	1,48E-09	100%

A Figura 15 apresenta os resultados da Tabela 12 na forma de gráfico de Pareto.

Figura 15 - Gráfico de Pareto das principais categorias de impacto resultantes da fabricação da embalagem B.



Através da Tabela 12 e Figura 15, pode-se concluir que 80% dos impactos ambientais ocasionados pela produção de 100 mil embalagens B advém de ecotoxicidade marinha, eutrofização de água doce e ecotoxicidade de água doce, ou seja, resultados parecidos para as duas embalagens. As matérias-primas da embalagem B que contribuíram para as seis principais

categorias de impacto são mostradas na Tabela 14 em que pode em que se observa que mais de 85% dos impactos ambientais são devidos ao papel.

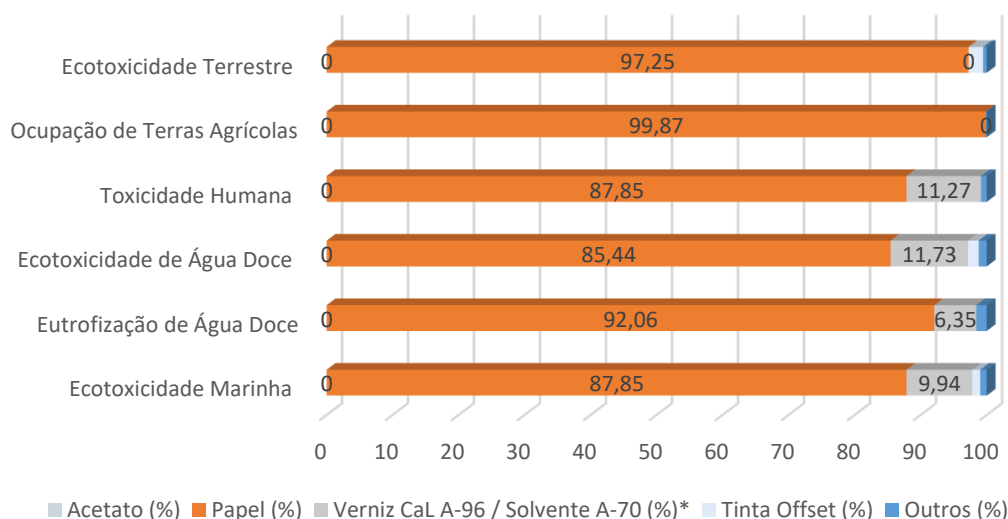
Tabela 14 - Matérias-primas da embalagem B que contribuíram para as principais categorias de impacto

Categoria de impacto / matéria-prima	Acetato (%)	Papel (%)	Verniz CaL A-96 / Solvente A-70 (%)*	Tinta Offset (%)	Outros (%)
Ecotoxicidade Marinha	0,00	87,85	9,94	1,23	0,98
Eutrofização de Água Doce	0,00	92,06	6,35	0,00	1,59
Ecotoxicidade de Água Doce	0,00	85,44	11,73	1,62	1,21
Toxicidade Humana	0,00	87,85	11,27	0,00	0,88
Ocupação de Terras Agrícolas	0,00	99,87	0,00	0,00	0,13
Ecotoxicidade Terrestre	0,00	97,25	0,00	2,20	0,55

* Verniz / Solvente – esses dois materiais foram inseridos juntos devido a composição desses dois materiais ser a mesma e conseqüentemente ter a mesma base de dados no OpenLCA.

A Figura 16 mostra em formato de gráfico os resultados da Tabela 14.

Figura 16 - Gráfico das matérias-primas da embalagem B que contribuíram para as principais categorias de impacto.



A Tabela 15 mostra o comparativo das 6 principais categorias de impacto resultantes da fabricação de 100 mil embalagens A de 100 mil embalagens B.

Tabela 15 - Comparação das 6 principais categorias de impacto da fabricação das embalagens A e B, por ordem de redução de impacto com a troca de embalagens.

Categoria de Impacto	Embalagem A	Embalagem B	Redução
Ecotoxicidade de Água Doce	1,08E-09	2,81E-10	74%
Ecotoxicidade Marinha	1,78E-09	5,40E-10	70%
Toxicidade Humana	2,33E-10	1,16E-10	50%
Eutrofização de Água Doce	5,25E-10	3,51E-10	33%
Ecotoxicidade Terrestre	6,56E-11	4,99E-11	24%
Ocupação de Terras Agrícolas	1,02E-10	7,99E-11	22%

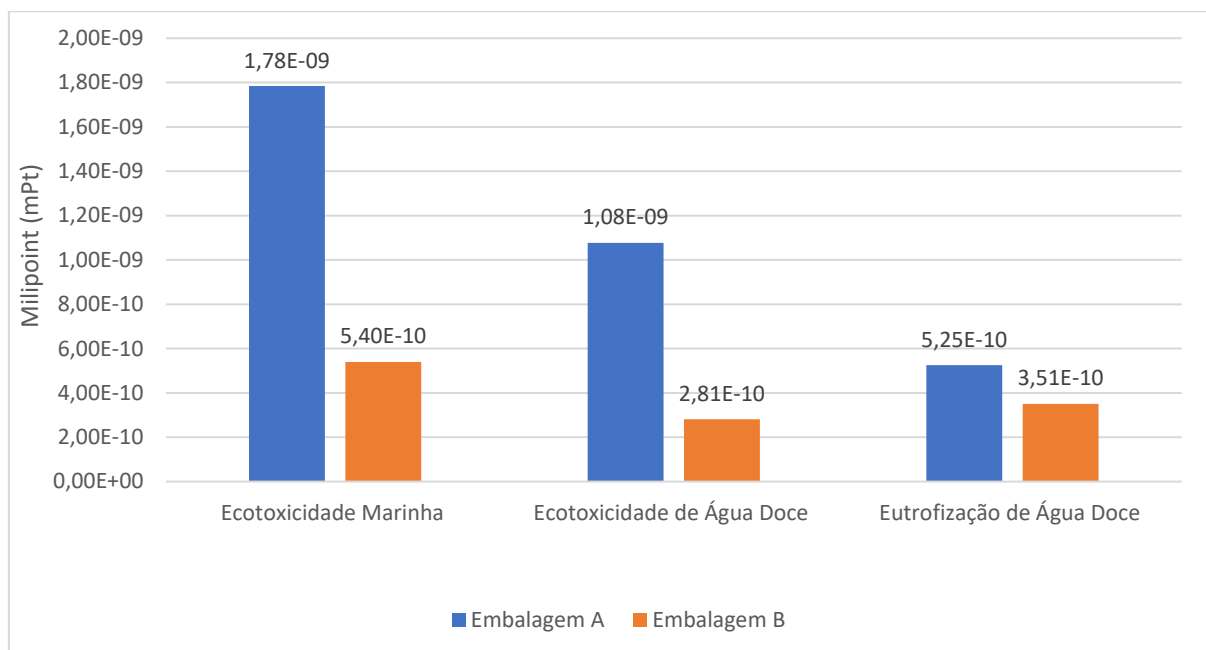
A análise de todos os resultados revelou que ambas as embalagens geram impactos ambientais, em maior ou menor intensidade, em todas as seis principais categorias de impacto. Essas reduções podem ser atribuídas à eliminação do acetato e à redução de 19,72% no uso de papel na fabricação da embalagem B em comparação com a embalagem A, evidenciando assim uma melhoria considerável na sustentabilidade ambiental do processo de produção da nova embalagem. Comportamento semelhante foi apresentado para as outras 12 categorias de impacto que compunham o item “Outros”, das Tabelas 8 e 12.

Novamente, a grande diferença entre elas é a ausência do plástico na embalagem B. Porém, esta ainda usa menos papel e, conseqüentemente, menos insumos como tintas, vernizes e outros para imprimir a área menor. Assim, quando comparadas nota-se que a categoria de impacto com a maior redução foi a ecotoxicidade em água doce, apresentando uma diminuição de 74% na fabricação da embalagem B em comparação com a embalagem A. Outro impacto na água doce, a eutrofização, teve redução de 33%. Esses impactos adicionais na embalagem A provavelmente estão relacionados ao uso de água de abastecimento e de vapor para a produção do acetato de celulose (ver Tabela 1) (Manda, 2014). Em segundo lugar, observou-se uma redução de 70% na ecotoxicidade marinha durante a produção da embalagem B em relação à embalagem A, possivelmente relacionados a efluentes industriais da fabricação do acetato de celulose não devidamente tratados impactando o ambiente marinho. Entre as seis principais categorias avaliadas, as menores reduções se deram nas categorias relacionadas à terra (ecotoxicidade terrestre, com 24% e ocupação de terras agrícolas, com 22%). Essa redução provavelmente está relacionada à menor área necessária para a plantação de árvores, tanto para

fazer o papel das embalagens, quanto para fazer a fibra de celulose usada na fabricação do acetato de celulose.

A Figura 17 apresenta um gráfico com os resultados da Tabela 15 para as categorias de impacto ecotoxicidade marinha, eutrofização de água doce e ecotoxicidade de água doce, pois representam mais de 80% dos impactos obtidos pela fabricação das embalagens A e B.

Figura 17 - Comparativo das principais categorias de impactos das embalagens A e B.



Dois hipóteses justificam o valor baixo da categoria de impacto Mudanças Climáticas no processo de fabricação das embalagens A e B: considerar que a mudança de embalagem não impactou no consumo de energia e não considerar os impactos relacionados ao transporte das embalagens.

4. Conclusões

O objetivo deste trabalho é realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) comparativa das matérias-primas de duas embalagens de uma ferramenta designadas como embalagens A e B, sendo uma feita com papel e plástico (embalagem A) e outra somente com papel, e ainda cerca de 20% menos papel que a anterior (B), e analisar qualitativamente os impactos ambientais relacionados aos efluentes, resíduos e transporte das embalagens. A análise visa identificar e quantificar os impactos ambientais associados a cada embalagem ao longo de todo o seu ciclo de vida.

Os resultados dessa ACV mostraram que mais de 80% dos impactos ambientais da produção das embalagens A e B estão relacionados às categorias de impacto relacionadas à

água, seja doce ou marinha. Porém, observa-se que a embalagem A é mais impactante que a B em quaisquer das categorias de impacto estudadas, com reduções de impacto que chegam a 74%.

Além dos resultados mostrados na ACV, é importante ressaltar também que houve redução de 8% na quantidade de sobras para produzir a embalagem B em relação à embalagem A. Foi calculado também um aumento de 53,85% nas embalagens transportadas em cada viagem, representando assim uma melhor eficiência de transporte da embalagem B em relação ao transporte da embalagem A. Também é possível inferir uma menor geração de efluentes líquidos, pelo uso de menos matéria prima líquida (tinta, água, verniz, agentes de limpeza e solventes) na fabricação da embalagem B em relação à A. A logística e uso de combustível no transporte das embalagens, bem como a geração de resíduos e efluentes líquidos, não foram considerados nesta ACV. A mudança no tipo de embalagem resultou em ganhos ambientais na fabricação, manutenção das máquinas e transporte. Além disso, houve provavelmente também ganhos econômicos devido à nova embalagem utilizar menos matéria prima e ter uma melhor eficiência no seu transporte. Assim, em que pesem todas as dificuldades para o projeto e viabilização de uma nova embalagem e a descontinuidade de outra, observa-se que a eliminação do plástico e a redução de seu tamanho trouxeram realmente vários benefícios.

5. Referências

ABEJÓN, R.; BALA, A.; VÁZQUEZ-ROWE, I.; ALDACO, R.; PALMER, P. **When plastic packaging should be preferred: Life cycle analysis of packages for fruit and vegetable distribution in the Spanish peninsular market.** Disponível em: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/20908/WhenPlasticPackaging.pdf?sequence=3> Acesso em 22/11/2023

ABNT ISO 14040:2009. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.**

ABNT NBR ISO 14044:2009. **Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações.**

ABRE. Estudo macroeconômico da embalagem e cadeia de consumo. Disponível em: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2022-2/> Acesso em 21/11/2023.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil.** Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/> Acesso em 21/11/2023.

APA. SC5 – **Avaliação do Ciclo de Vida.** Disponível em: https://apambiente.pt/sites/default/files/_Avaliacao_Gestao_Ambiental/Qualif_Certif_Normal/Normaliza%C3%A7%C3%A3o/Workshop%20CT150_2023/SC%205%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20ciclo%20de%20vida%20.pdf Acesso em 02/12/2024

AZAM, M.U.; VETE A.; AFZAL, W. **Process Simulation and Life Cycle Assessment of Waste Plastics: A Comparison of Pyrolysis and Hydrocracking.** Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/22/8084> Acesso em 17/10/2024.

BAHER, J.; VÖLKER, L.G.; BAEHR, M.; MUTHUHUMAR, H.; LAPA, N.; SCHEBEK, L. **Life cycle assessment of pharmaceutical and clinical packaging required for medication administration practices.** Disponível em: <https://link-springer-com.ez87.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11367-023-02270-x> Acesso em 17/10/2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF.** 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em 08/05/2018.

CAPPIELLO, G.; AVERSA, C.; GENOVESI, A.; BARTLETTA, M. **Life cycle assessment (LCA) of bio-based packaging solutions for extended shelf-life (ESL) milk.** Disponível em: <https://link-springer-com.ez87.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11356-021-17094-1> Acesso em 17/10/2024.

CENTRAL DE FERRAMENTAS. **Serra Copo 25mm Starrett.** Disponível em: <https://www.centraldeferramentas.com.br/serra-copo-025mm-starrett-8710.05040/p> Acesso em 21/11/2023.

CRV RESÍDUOS. **A importância da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).** Disponível em: <https://www.cvresiduos.pt/pt/comunicacao/2021/04/16/a-importancia-da-avaliacao-de-ciclo-de-vida-acv> Acesso em 10/06/2024.

ECOINVENT. **About ecoinvent.** Disponível em: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-association/> Acesso em: 20/12/2023.

ENCICLO. **OpenLCA.** Disponível em: <https://www.enciclo.com.br/openlca> Acesso em: 13/06/2022.

FREITAS, L.C.F.; et al. **Avaliação do Ciclo de Vida do Café – Análise Comparativa e Gestão de Melhorias.** Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/29850/23532> Acesso em 10/06/2024.

GOEDKOOOP, M.; SPRIENSMA, R. **The eco-indicator99: A damage oriented method for life cycle impact assessment: Methodology report.** 2001.

GOERSCH, M.C.S. **Embalagens.** Disponível em: <https://dspace.uniceplac.edu.br/bitstream/123456789/1161/1/Embalagens.pdf> Acesso em: 16/10/2024.

HUIJBREGTS, M. A. J., et al. **ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level.** Disponível em: <https://www-scopus.ez87.periodicos.capes.gov.br/record/display.uri?eid=2-s2.0-85003864867&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=3c083bbb1229dfa70c881293319550f2&sot=b&sdt=b&s=TITLE%28ReCiPe2016%3A+a+harmonised+life+cycle+impact%29&sl=33&sessionSearchId=3c083bbb1229dfa70c881293319550f2> Acesso em: 14/09/2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **O que é Avaliação do Ciclo de Vida.** 2017. Disponível em: <http://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/> Acesso em: 14/10/2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Manual do Sistema ILCD.** 2014. Disponível em: <https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2016/01/Manual-ILCD-com-capa.pdf> Acesso em: 01/04/2024.

Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. **Avaliação de Ciclo de Vida – Ontologia Terminológica.** 2015. Disponível em: <https://acv.ibict.br/documentos/publicacoes/529-ontologia-terminologica/> Acesso em: 05/04/2024.

JONGHUN, P.; WAQAR, Z.; SNYDER, W.R. **Environmental analysis of returnable packaging systems in different eCommerce business and packaging management models.** Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.13537> Acesso em: 17/10/2024.

JUNIOR, E. M. (2016). **Avaliação de ciclo de vida em processos de fabricação de rolamento.** Bauru: UNESP.

KIM, S.; HORVATH, L.; RUSSELL, J.D.; JONGHUN, P. **Sustainable and Secure Transport: Achieving Environmental Impact Reductions by Optimizing Pallet-Package Strength Interactions during Transport.** Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/17/12687> Acesso em: 17/10/2024

KUMAR, S.; JADHAV, S. V.; THORAT, B. N. **Life cycle assessment of tomato drying in heat pump and microwave vacuum dryers.** Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321080688> Acesso em 27/03/2024

LUZ, L. M. **Integração da Avaliação do Ciclo de Vida ao Processo de Desenvolvimento de Produto: Uma Proposta Metodológica.** Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2452/1/PG_PPGE_D_Luz%20Leila%20Mendes%20da_2017.pdf Acesso em: 02/03/2022.

MANDA, B. M. K. **Application of Life Cycle Assessment for Corporate Sustainability.** Utrecht, Universidade de Utrecht, 2014.

MATTEDE, H. **Serra copo, como usar e como fazer limpeza?** Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/serra-copo-como-usar-e-como-fazer-limpeza> Acesso em: 14/06/2023.

MIRZAEI, J.; PARASHKOOHI, M. G.; ZAMANI, D. M.; AFSHARI, H. **Examining energy use efficiency and conducting an environmental life cycle assessment through the application of artificial intelligence: A case study on the production of cumin and fennel.** Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez87.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2590123023006497?via%3Dihub> Acesso em: 01/04/2024.

OMETTO, A. R. **ACV – Geral.** Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5776412/mod_resource/content/1/ACV%20Geral.pdf Acesso em 27/03/2024.

OPENLCA. **The world's leading, high performance, open source Life Cycle Assessment software.** Disponível em: <https://www.openlca.org/> Acesso em 27/03/2024.

OSMAN, A. I.; FARGHALI, M.; RASHWAN, A. K. **Life cycle assessment of biochar as a green sorbent for soil remediation.** Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez87.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2452223624000038?via%3Dihub> Acesso em: 27/03/2024.

PANTELAKI, E.; CASPANI A. C.; MAGGI, E. **Impact of home-school commuting mode choice on carbon footprint and sustainable transport policy scenarios.** Disponível em: <https://www-scopus.ez87.periodicos.capes.gov.br/record/display.uri?eid=2-s2.0-85176382505&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=a047beaa936e538558f2ff72058df6e4&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28carbon+footprint%29&sl=31&sessionSearchId=a047beaa936e538558f2ff72058df6e4> Acesso em 21/11/2023.

PETRONI, A.; CAMPOS, M. C.; AZEVEDO; F. S. **Análise de Ciclo de Vida (ACV).** Disponível em: https://pessoas.feb.unesp.br/vagner/files/2014/12/GA_Texto-Sem-8.pdf Acesso em: 05/04/2024.

PROCÓPIO, C. **ESTUDO COMPARATIVO DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELA PRODUÇÃO DE AÇO.** Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28233/1/CP_COEME_2014_2_10.pdf Acesso em: 03/10/2023.

REIS, V.S. **A Importância da Embalagem na Vida do Consumidor Brasileiro**. Disponível em: https://uniesp.edu.br/sites/_biblioteca/revistas/20170509160856.pdf Acesso em: 16/10/2024.

SANTOS, S.C.; SIYSA, D.B.; GARCÍA, P.G.; LASO, J.; MARGALLO, M.; ALDACO, R. **Exploring the environmental impacts of plastic packaging: A comprehensive life cycle analysis for seafood distribution crates**. Disponível em: <https://www-scopus-com.ez87.periodicos.capes.gov.br/record/display.uri?eid=2-s2.0-85201321306&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=84386cd839c0518bc4893434c77b3631&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28LCA+package%29&sl=26&sessionSearchId=84386cd839c0518bc4893434c77b3631&relpos=2> Acesso em: 16/10/2024.

SAADE, M. R.; SILVA, M. G.; GOMES, V. **A Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, e a etapa de avaliação de impactos ambientais: considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais**. Disponível em: http://www.naturezaonline.com.br/natureza/conteudo/pdf/02_SaadeMRMetal_109-116.pdf Acesso em: 13/12/2023.

SAZDOVSKI, I.; BAYER, L.B.; BALA, A.; MARGALLO, M.; AZARKAMANDA, S.; ALDACO, R.; PALMER, P.F. **Comparative assessment of two circularity indicators for the case of reusable versus single-use secondary packages for fresh foods in Spain**. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez87.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2405844024039537?via%3Dihub> Acesso em: 17/10/2024.

SDG. **The 17 Goals**. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals> Acesso em: 02/12/2024.

SOUSA, C.L.F. **Avaliação do Impacto Ambiental do Processo Produtivo de uma Empresa Têxtil**. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/142560/2/571502.pdf> Acesso em: 10/05/2024.

STEFANINI, R.; PAINI, A.; VIGNALI, G. **Plastic Versus Bioplastic as Packaging for Sanitary Products: The Environmental Impacts Comparison**. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pts.2814> Acesso em: 16/10/2024.

TAKAVOLI, N.A.B.; BORA, K.M. **Life cycle assessment of urban waste management in Rasht, Iran**. Disponível em: <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ieam.4751> Acesso em: 06/05/2024.

TEODOR, C.; TRICA, C. L.; GINAT, R.; DRACEA, R. **Good Practices of Efficient Packaging Waste Management**. Disponível em: https://www.amfiteatruconomic.ro/temp/Article_2941.pdf Acesso em: 27/03/2024.

SIMAPRO. **SimaPro database manual**. Disponível em: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2024/04/DatabaseManualMethods.pdf> Acesso em: 06/05/2024.

UGAYA, C. M.; BRAGA, T. E. N.; RODRIGUES, T. O.; SAMPAIO, C.; FOLEGATTI, M. I. S.; GERHARDT, J. **Rota estratégica para o Banco de Dados de ACV Brasileiro**. Disponível em: https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2019/09/Rota-Estrategica-ACV_v5_versao-preliminar.pdf Acesso em: 28/03/2024.

UNEP. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020. Disponível em: <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2021/01/Guidelines-for-Social-Life-Cycle-Assessment-of-Products-and-Organizations-2020-22.1.21sml.pdf>
Acesso em: 28/03/2024.

WIKSTRÖM, F.; WILLIAMS, H.; VENKATESH, G. **The influence of packaging attributes on recycling and food waste behaviour – An environmental comparison of two packaging alternatives.** Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616309933?via%3Dihub> Acesso em: 22/11/2023.

