

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMBALAGENS PARA DELIVERY

VINICIUS PEREIRA LARINI

SÃO CARLOS - SP
2021

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMBALAGENS PARA DELIVERY

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Francys Kley Vieira
Moreira

São Carlos - SP
2021



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Vinicius Pereira Larini

RA: 727429

TÍTULO: Análise do ciclo de vida de diferentes tipos de embalagens de delivery

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 18/11/2021, 08h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira	10,0	10,0
Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio	10,0	10,0
Média	10,0	10,0

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira e Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.



Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira

AGRADECIMENTO

Primeiramente, gostaria de agradecer meu professor e orientador Francys Kley Vieira Moreira pelo incentivo e acompanhamento durante todo o desenvolver deste projeto. À Universidade Federal de São Carlos e à Polytech Grenoble da Université Grenoble Alpes por comporem minha formação técnica promovendo ambientes de estímulo à pesquisa e aprendizado constante.

Gostaria, também, de agradecer aos meus pais e amigos próximos pelo apoio e incentivo em todos os meus projetos pessoais.

RESUMO

Embalagens de delivery de diferentes materiais - poliestireno expandido, poli(tereftalato de etileno) amorfo e papel cartão com tampa de polipropileno - foram comparadas quanto aos impactos ambientais relativos aos seus ciclos de vida considerando descarte em aterro sanitário. Em um segundo momento, foram comparados três cenários de fim de vida para as embalagens de papel cartão - aterro sanitário, compostagem industrial e digestão anaeróbica. Os ciclos de vida foram avaliados quanto às categorias: danos ao meio ambiente (aquecimento global, destruição da camada de ozônio, eutrofização de água doce e marítima, acidificação terrestre, e ecotoxicidade terrestre, marinha e de água doce), esgotamento de recursos (hídricos e fósseis, uso da terra agrícola e urbano), e saúde humana (toxicidade para humanos). Para todas as análises, foram considerados os impactos causados pelas etapas: produção da resina polimérica, produção da embalagem de papel, processamento do polímero e descarte. Os resultados da ACV mostraram que a embalagem de poli(tereftalato de etileno) amorfo (APET) teve os maiores impactos para todas as categorias - com exceção de uso do solo, onde o papel cartão teve o maior impacto - com importante contribuição do impacto relativo à produção da resina do PET para múltiplos indicadores. A embalagem de poliestireno teve o melhor resultado quanto aos indicadores destruição da camada de ozônio, eutrofização de água doce, e esgotamento de recursos hídricos. A embalagem de papel cartão obteve o melhor resultado para os indicadores aquecimento global, eutrofização marítima, acidificação terrestre, esgotamento de recursos fósseis, e ecotoxicidade terrestre, marítima e de água doce. Quanto ao indicador de impacto na saúde humana, as embalagens de poliestireno e papel cartão tiveram uma performance semelhante. Constatou-se também que para a maioria dos indicadores, o descarte foi a etapa de menor impacto relativo. Por fim, explorou-se as vantagens e consequências de diferentes cenários de fim de vida para a embalagem de papel cartão, como na geração de produtos com relevância econômica (como composto fertilizante e biogás). Para impactos como aquecimento global, destruição da camada de ozônio, impacto na saúde humana, e ecotoxicidade marítima e de água doce constatou-se o impacto positivo de evitar o descarte em aterro sanitário. Para os impactos de eutrofização de água doce e marítima, acidificação terrestre, esgotamento de recursos hídricos e fósseis, uso do solo e ecotoxicidade terrestre o impacto de descartes alternativos apresentou impacto comparável ao descarte por aterro sanitário.

Palavras-chave: embalagem de delivery, ACV, impacto ambiental, poliestireno expandido, poli(tereftalato de etileno), papel cartão, OpenLCA.

ABSTRACT

Delivery packages made up of different materials - expanded polystyrene, amorphous poly(ethylene terephthalate) and paperboard with a polypropylene lid - were compared regarding the environmental impacts related to their life cycles considering landfill disposal. In addition, three end-of-life scenarios for paperboard packaging were compared - landfill, industrial composting, and anaerobic digestion. These were evaluated according to the categories: damage to the environment (global warming, ozone depletion, eutrophication of fresh and marine water, terrestrial acidification, and terrestrial, marine, and freshwater ecotoxicity), depletion of resources (water and fossil, and land use), and human health (human toxicity). For all indicators, the impacts were analyzed by each step of the life cycles: polymer resin production, paper packaging production, polymer processing, and end-of-life scenario. The LCA results showed that the amorphous poly(ethylene terephthalate) (APET) packaging had the greatest impacts for all categories - apart from land use, where paperboard had the greatest impact - with an important contribution from the production of PET resin for most of them. Polystyrene packaging had the best result in terms of ozone layer depletion, freshwater eutrophication, and water resource depletion indicators. Paperboard packaging obtained the best result for global warming, maritime eutrophication, terrestrial acidification, depletion of fossil resources, and terrestrial, maritime, and freshwater ecotoxicity indicators. As for the indicator of impact on human health, polystyrene and paperboard packaging had a similar performance. It was also found that for most indicators, disposal was the step with the lowest relative impact. Finally, the advantages and consequences of different end-of-life scenarios for paperboard packaging were explored, such as the generation of economically relevant products (such as fertilizer compost and biogas). For impacts such as global warming, ozone layer depletion, impact on human health, and marine and freshwater ecotoxicity, there was a noticeable positive impact of avoiding landfill disposal. For the impacts of marine and freshwater eutrophication, terrestrial acidification, depletion of water and fossil resources, land use and terrestrial ecotoxicity, the impact of alternative disposals presented an impact comparable to that of the disposal by landfill.

Keywords: delivery packaging, life cycle analysis, environmental impact, expanded polystyrene, poly (ethylene terephthalate), paperboard, OpenLCA.

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

PET - Poli(tereftalato de etileno)

PP - Polipropileno

PE - Polietileno

APET - Poli(tereftalato de etileno) amorfo

PS - Poliestireno

EPS - poliestireno expandido

XPS - Poliestireno extrudado

ISO - *International Organization for Standardization*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1 Embalagens	2
2.2 Termoformagem.....	3
2.3 Moldagem por Injeção	5
2.4 PET - Poli(tereftalato de etileno)	6
2.5 Poliestireno Celular	9
2.6 Papel Cartão	12
2.7 Polipropileno	13
2.8 Avaliação do ciclo de vida (ACV)	15
2.9 Aterro Sanitário	16
2.10 Compostagem e Digestão Anaeróbia	18
3. REVISÃO DA LITERATURA	19
4. OBJETIVOS	23
5. MATERIAL E MÉTODOS	23
5.1 Escolha do Sistema.....	23
5.3.1 Definição do escopo e objetivo	24
5.3.2 Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV).....	27
5.3.4 Análise dos Impactos	27
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
6.1 Comparação das embalagens com fim de vida em aterro sanitário	29
6.1.1 Danos ao meio ambiente.....	29
6.1.2 Esgotamento de recursos	35
6.1.3 Saúde Humana	38
6.2 Diferentes cenários de fim de vida para as embalagens de Papel Cartão	39
6.2.1 Danos ao meio ambiente.....	40
6.2.2 Esgotamento de recursos	44
6.2.3 Saúde Humana	46
7. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

Na sociedade atual, debate-se frequentemente sobre os danos ambientais causados pela produção e descarte de resíduos poliméricos. Em todas as grandes cidades do mundo, o problema relacionado aos resíduos sólidos plásticos mostra-se um dos mais complexos de gestão pública e planejamento urbano. No caso de países em desenvolvimento, cuja infraestrutura e cultura do consumidor não permitem uma maior taxa de reciclagem para produtos plásticos, torna-se relevante, principalmente para decisões que tenham em conta o atual cenário brasileiro, quantificar o verdadeiro impacto ambiental em função da composição e o destino destes materiais.

Devido a fatores como o alto contingente populacional, o Brasil é o 4o maior produtor de resíduos sólidos do mundo. Resíduos estes que poderiam receber soluções economicamente viáveis e reinserção na economia, mas uma parte considerável continua a ser despejada em aterros, lançados na rede pública de saneamento ou incinerados. Em 2019, estima-se que aproximadamente 60% dos resíduos sólidos urbanos coletados, cerca de 43 milhões de toneladas, foram dispostos em aterros sanitários (Abrelpe, 2020). Por se tratar de um país em desenvolvimento, mesmo na presença de tecnologias necessárias, a falta de integração, logística, custos e outros fatores acabam atrasando o Brasil com relação à gestão de resíduos sólidos. (IPEA, 2020)

Embalagens plásticas pós-consumo representam uma parcela crescente de resíduos sólidos no Brasil, mais especificamente àquelas utilizadas para o delivery de alimentos, típico de aplicativos de entrega (“*delivery*”). Entre 2019 e 2020, foi registrado um aumento no consumo de embalagens de 7,2%, atingindo 2,05 milhões de toneladas. Em termos per capita, houve um aumento de 9,1 kg/habitante para 9,7 kg/habitante. (IPEA, 2020)

Em outro relatório de março de 2021, estimou-se que o valor bruto da produção em bilhões de reais saltou de 75,9 para 92,9 entre 2019 e 2020. Destes, aproximadamente 37 bilhões correspondem a materiais plásticos e cerca de 8 bilhões correspondem a papel cartão. (Associação Brasileira de Embalagem, 2020)

Com a pandemia da COVID-19, o aumento no consumo com aplicativos de entrega se transformou de uma conveniência a uma necessidade tanto para a sobrevivência econômica de estabelecimentos comerciais como para a sociedade no geral. Segundo relatórios, entre 2017 e março de 2021 a porcentagem de usuários de *smartphones* que usam aplicativos de delivery aumentou de 47% para 80%. E, devido às mudanças permanentes em relações econômicas pós-

pandemia, estima-se que o crescimento entre 2020 e 2024 será de 18 milhões para até 40 milhões de usuários (STATISTA, 2020). Tais índices frente ao estado atual de gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil incita o questionamento de quais são os impactos ambientais - e como mitigá-los - embutidos na escolha do material utilizado em embalagens para delivery.

Assim, em uma tentativa de contribuir com informações relevantes para o debate de possíveis otimizações ambientais na cadeia produtiva, o presente trabalho utilizou a avaliação do ciclo de vida (ACV) para estimar os potenciais impactos ambientais de diferentes embalagens para de delivery. Foram comparados modelos reais de embalagens poliestireno expandido extrudado, poli(tereftalato de etileno) e papel cartão com tampa de polipropileno - para estimar comparativamente qual é mais ou menos danosa para o meio ambiente, e uma estimativa quantitativa destes impactos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Embalagens

O uso de embalagens tornou-se essencial frente às diversas necessidades econômicas e formas modernas de consumo. As funções de uma embalagem tais como conter, proteger e valorizar os produtos desde seu fabricante, durante o armazenamento, até sua chegada no consumidor final, é o que permite escalabilidade, consistência e viabilidade financeira para diversos nichos de indústria e de consumo. Embalagens para alimentos compõem uma parte fundamental na indústria alimentícia e seu *design* e desempenho, muitas vezes, são fatores definidores para o uso e rentabilidade de um produto. (Robertson, 2013)

Além de proteger os produtos contra contaminação e vazamento durante estocagem e transporte, o uso de embalagens permite padronização e distribuição em larga escala. Quatro funções essenciais podem ser sublinhadas: contenção do produto, proteção contra agentes externos, conveniência e comunicação. Em todo design de embalagens - principalmente para transporte alimentício para o consumidor final - estas quatro dimensões devem ser analisadas. Trata-se de, segundo autores, englobar a relação da embalagem de forma interativa com diferentes meios - físico, ambiente e humano. A desconsideração da relação da embalagem com seu meio econômico, resulta em embalagens que não atingem seu objetivo, aumentam os custos e não traz adesão do cliente. (Robertson, 2013)

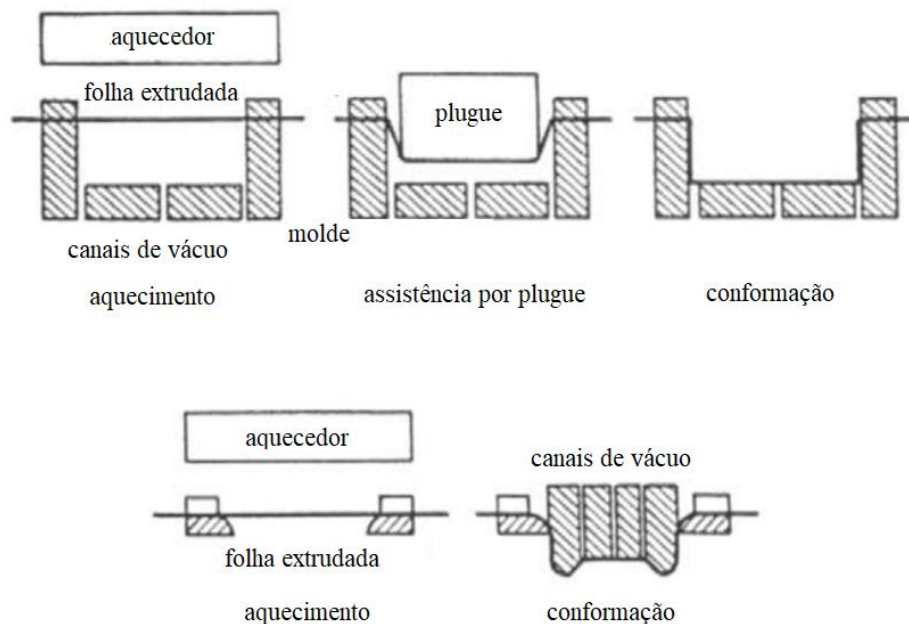
Utilizam-se diversos materiais para os diversos tipos de embalagem que são compreendidos ao longo das múltiplas cadeias produtivas que compõem a economia moderna.

Vale notar que serão discutidas neste trabalho as embalagens primárias, ou seja, que estão em contato direto com o produto. Embalagens secundárias, terciárias etc. são aquelas que atuam como invólucros de embalagens primárias ou de menor ordem. Entretanto, considerando a embalagem do distribuidor até o consumidor final (ou seja, sempre primária), nota-se uma alta predominância de termoplásticos e o crescimento de produtos alternativos como as embalagens de papel cartão. Propriedades como boa resistência mecânica específica, baixa densidade, custo e facilidade de processamento, e conservação de temperatura são ressaltadas como as mais importantes para a seleção de materiais para embalagens. (Robertson, 2013)

2.2 Termoformagem

No caso do presente estudo, para aumentar a qualidade comparativa dos resultados, foi dada ênfase às embalagens processadas através do método conhecido como termoformagem. Este é um processo bastante comum na produção de embalagens alimentícias. Trata-se de uma folha de material termoplástico aquecida e conformada contra os contornos de um molde com auxílio de meios mecânicos e/ou pneumáticos.

Figura 1 - Exemplos de sistemas utilizados para conformação em termoformagem. Tradução das legendas pelo próprio autor



Fonte: Rosato (2004, p. 309)

O processo de termoformagem pode ser detalhado através da descrição de suas etapas principais. Primeiramente, a placa previamente extrudada é fixada no molde e aquecida. Alguns polímeros podem exigir etapas suplementares de condicionamento, como a secagem de polímeros higroscópicos. Então, há a conformação com auxílio de mecanismos mecânicos como plugues macho/fêmea, com ar comprimido ou através de canais de vácuo. O polímero estirado começa a resfriar assim que há contato com as superfícies metálicas do molde. Uma vez que a peça tenha resfriado o bastante para ser removida sem causar distorções dimensionais, há a remoção da peça do molde. Finalmente, se necessário, há ajustes finais como cortes de rebarbas e o ciclo de transformação da matéria na peça é concluído. (Low Energy Plastics Processing, 2006)

Existem inúmeras estratégias utilizando diferentes geometrias de molde e pontos de vácuo para termoformagem de diferentes produtos. É importante focar nos pontos da peça que são mais intensamente estirados - e, portanto, formam espessuras mais finas - e como isso implica nas propriedades e aspecto do produto. Dentre as vantagens deste processo estão o baixo custo inicial relativo a equipamentos (consideravelmente inferior a equipamentos de moldagem por injeção, por exemplo) o que permite operações de menor escala, uso de pressões muito mais baixas para conformação das placas (entre 0,1 MPa para processos com uso de vácuo e 1 MPa para processos com uso de pressão mecânica, muito inferior aos 70 MPa utilizados por injeção) o que permite uso de materiais menos resistentes para a construção de moldes e maior vida útil, e, por fim, permite alta versatilidade na escolha do material, visto que quase todos os termoplásticos podem ser extrudados em folhas e posteriormente termoformados. (Klein, 2009)

As desvantagens normalmente associadas com o produto são o custo extra de comprar ou produzir o material previamente termoformado em rolos, a obtenção de paredes de espessura não-uniforme (o que não é um grande problema para as propriedades funcionais de embalagens para *delivery*), custo extra relacionado à operação de recorte e recuperação de rebarbas, e limitação quanto às geometrias que podem ser conformadas. (Klein, 2009)

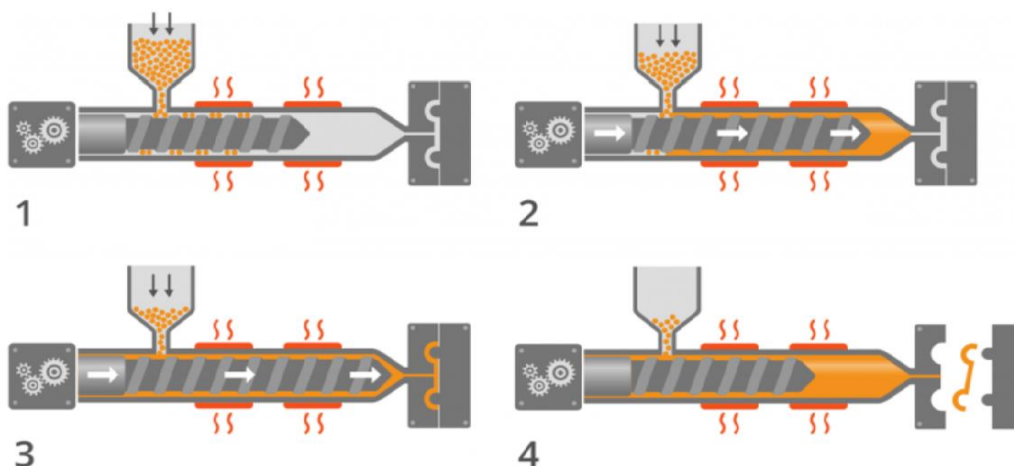
Tendo em vista isto, fica claro o motivo pelo qual este processo é tão utilizado na indústria de embalagens alimentícias. Não só as geometrias e precisão dimensional limitadas não são um grande problema, como há também ganhos por permitir operações de menor escala e com uso de uma vasta gama de termoplásticos distintos. Finalmente, devido ao tamanho relativamente pequeno de embalagens, muitas peças podem ser termoformadas por ciclo, aumentando a produtividade da fábrica. (Rosato, 2004; Gruenwald, 1987; Klein, 2009)

2.3 Moldagem por Injeção

A moldagem por injeção é o processo a partir do qual o polímero fundido é injetado dentro de um molde onde ele será resfriado, solidificando-se no formato do molde e ejetado. É um dos métodos mais utilizados para o processamento e conformação de materiais poliméricos, sendo altamente indicado no caso de aplicações de alta escala, como embalagens, objetos diversos como mesas e cadeiras, brinquedos, e outros recipientes e utensílios. Não somente isto, mas também uma miríade de outras aplicações tecnologicamente exigentes, já que esta rota de processamento permite geometrias complexas, excelente controle dimensional e está extremamente conectada com avanços em simulação computacional. (Rosato, 2000)

A descrição do processo de injeção é usualmente ilustrada através de seu funcionamento em ciclos (Figura 2). O ciclo inicia-se com processos atrelados aos de extrusão, com a diferença que a rosca neste caso é capaz de mover-se para realizar a injeção (denominada rosca recíproca). Ou seja, como no caso da extrusão, o material será alimentado sob a forma de *pellets* na zona de alimentação (onde ocorre a compactação do leito sólido e condução do material), fundido na zona de plastificação (onde há coexistência de material sólido e fundido, homogeneização e etapas complementares como degasagem) e zona de dosagem onde ocorre a dosagem do material - já completamente fundido - que será pressurizado para dentro da unidade de injeção. Este processo ocorre de maneira concomitante às etapas descritas a seguir.

Figura 2: Representação do ciclo de injeção. (1) alimentação dos pellets no funil, e compactação do material sólido; (2) plastificação e dosagem do material, avanço da rosca; (3) injeção do material, empacotamento e compressão, início do resfriamento; (4) recuo da rosca, alimentação, plastificação e dosagem de mais material, ejeção da peça.



Fonte: Injection Molding World. Injection Molding Process

O ciclo da injeção propriamente dito inicia-se com (i) o fechamento do molde e avanço da rosca a altas velocidades que move-se para frente e injeta o material para dentro do molde; (ii) a etapa de pressurização e empacotamento dá-se com o controle da máquina através da pressão exercida (e não mais da velocidade de deslocamento da rosca) e com o empacotamento há compensação do encolhimento do material para evitar o encolhimento; (iii) esta etapa continua até o congelamento do *gate*, ou seja, congelamento da região que antecede a peça, momento a partir do qual não há mais fluxo de material para dentro da geometria da peça (não ocorrendo mais variação na massa da peça); (iv) etapa de descompressão, onde há recuo da rosca e portanto novamente as etapas descritas relativas à extrusão (alimentação, plastificação e dosagem); (v) e finalmente ejeção da peça uma vez que ela tenha resfriado o bastante para apresentar uma rigidez mínima para ser empurrada para fora. É importante notar que o tempo de resfriamento se inicia assim que há contato do material polimérico com as paredes metálicas do molde. (Rosato, 2000)

Durante a injeção, o material é submetido a altas taxas de cisalhamento através de geometrias, tanto de canais como do molde da peça final, que tornam o processo bastante complexo. Assim, há inevitavelmente o estiramento e orientação das macromoléculas (ou mesmo de aditivos do tipo carga com geometrias alongadas) que serão congeladas durante o resfriamento. Por se tratar de uma rota de transformação da matéria com muitos parâmetros e das respostas viscoelásticas e reológicas do material, utiliza-se muito a simulação computacional para auxiliar no processo diminuindo as chances de defeitos na peça final. (Rosato, 2000)

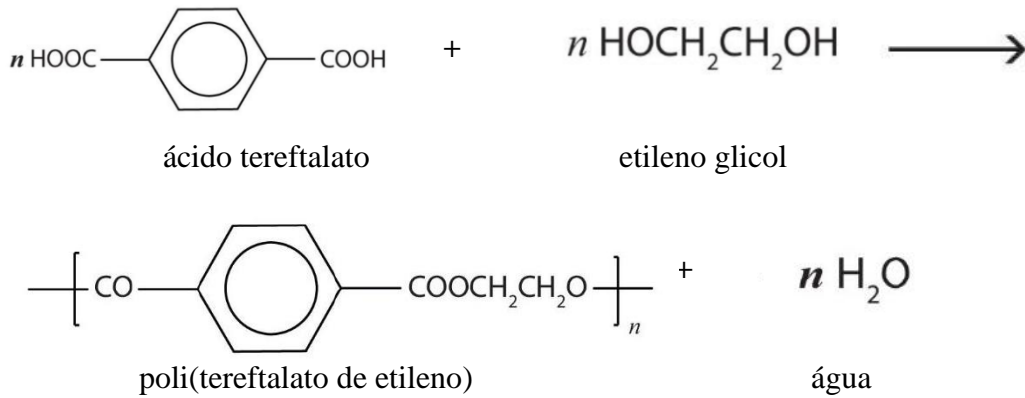
2.4 PET - Poli(tereftalato de etileno)

O poli(tereftalato de etileno) (PET) é o polímero mais utilizado dentre os poliésteres. O PET é um dos polímeros mais utilizados no mercado de embalagens plásticas de uso único devido a sua alta versatilidade, boas propriedades de barreira, facilidade de processamento e baixo custo.

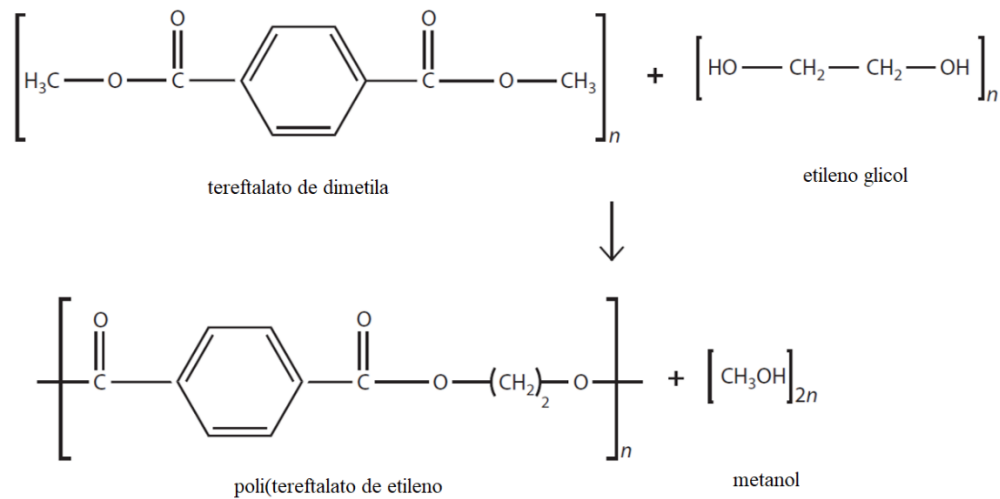
O PET é um termoplástico sintetizado a partir de uma polimerização de condensação entre o etileno glicol e o dimetil tereftalato - produzindo o polímero e metanol através de transesterificação - ou o ácido tereftálico - produzindo o polímero e água através de esterificação direta (Figura 3). (Robertson, 2013; Selke & Culter, 2016)

Figura 3: Reações para a formação do poli(etileno tereftalato) (PET); (a) através de ácido tereftálico, (b) através de dimetil tereftalato.

a) Esterificação do ácido tereftálico com etileno glicol



b) Transesterificação do dimetil tereftalato com etileno glicol



Fonte: Selke & Cutler (2016, p. 130); Robertson (2013, p. 36). Tradução feita pelo próprio autor

O PET é um termoplástico transparente com capacidade de se cristalizar sob certas condições. Entretanto, no caso de embalagens que são termoformadas, utiliza-se o PET em sua forma amorfa (APET - *amorphous PET*) através da copolimerização. Estas embalagens mantêm uma elevada transparência, não necessitando da orientação biaxial costumeiramente exigida para aplicações como garrafas.

O APET é extrudado em formato de chapa e estocado em formato de rolos. Este rolo é então aquecido e termoformado. Por fim, é altamente utilizado para embalagens termoformadas competindo primariamente com o policarbonato, mantendo-se, porém, muito menos financeiramente custoso, o que é bem-vindo no caso de embalagens para *delivery* de uso único. (Gruenwald, 1987; Klein, 2009)

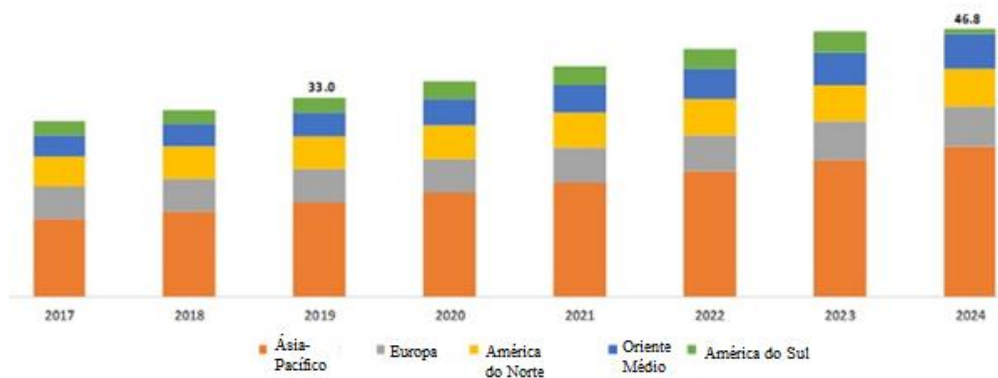
Tabela 1: valores típicos para as principais propriedades do PET

Temperatura de transição vítrea (T_g)	73 – 80 °C
Temperatura de fusão (T_m)	245 – 265 °C
Densidade	1,29 – 1,40 g/cm ³
Resistência à tração	48,2 – 72,3 MPa
Módulo de elasticidade	2756 – 4135 MPa
Permeabilidade ao oxigênio (25°C)	1,2 – 2,4 x 10 ³ cm ³ μm/m ² d atm
Permeabilidade ao dióxido de carbono (25°C)	5,9 – 9,8 x 10 ³ cm ³ μm/m ² d atm

Fonte: Selke & Cutler, (2016, p. 131)

Segundo informes econômicos, o mercado de APET foi estimado em 33 bilhões de dólares em 2019 com projeções de atingir até 47 bilhões de dólares até 2024. Tal crescimento pode ser atribuído ao crescimento em seu uso para os mercados de embalagens de bebidas e de alimentos. O relatório ressalta também seu uso em embalagens farmacêuticas. Com o aumento do poder aquisitivo da população mundial e uma mudança em hábitos de consumo - em direção a soluções pronta para consumo (*on-the-go*) como *deliveries* - também constituem este quadro de crescimento em consumo. Segundo os mesmos informes, há também a consideração que este consumo pode ser desacelerado com novas restrições e incentivos em direção a embalagens de menor impacto ambiental. (Markets and Markets, 2019)

Figura 4: Gráfico de previsão da evolução do mercado de poli(tereftalato de etileno), por região, em USD, de 2017 a 2024



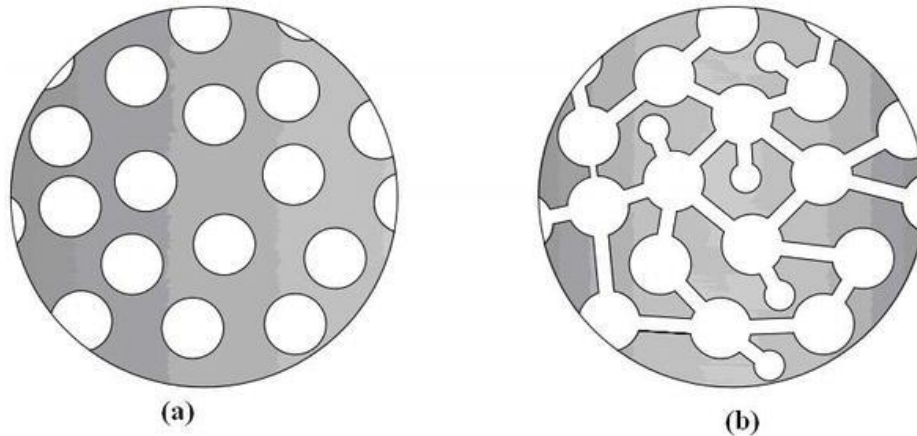
Fonte: Markets and Markets Analysis, 2019.

2.5 Poliestireno Celular

O poliestireno (PS) sob a forma de espuma ou celular (“*foamed materials*”) são com frequência utilizados no transporte de diferentes tipos de produto, configurando-se como um material amplamente utilizado tanto para embalagens primárias como secundárias, terciárias etc. para transporte de curtas e longas distâncias. Suas características mais importantes advêm do formato celular com ar estagnado no material, o que confere densidade extremamente baixa e capacidade de absorver choques (resistência ao impacto específica) e isolamento térmico. Todas estas propriedades são muito desejadas em transporte de alimentos para entrega.

Existem duas principais categorias para materiais sob a forma de espuma/celular: células abertas - onde há canais de comunicação entre as células, e células fechadas - onde a fase estagnada está completamente confinada por material polimérico. No caso de contato com produtos alimentícios, é mais interessante o uso de células fechadas, já que as células abertas absorvem umidade, o que seria um problema do ponto de vista do transporte e uso por parte do consumidor. O poliestireno expandido de células majoritariamente abertas é comumente utilizado no transporte de itens maiores e para isolamento térmico em construção civil. (Altan, 2017; Robertson, 2013; Selke & Cutler, 2016)

Figura 5: esquematização da estrutura de um poliestireno espumado com (a) estrutura de células fechadas (“closed cell structure”), (b) estrutura de células abertas (“open cell structure”)



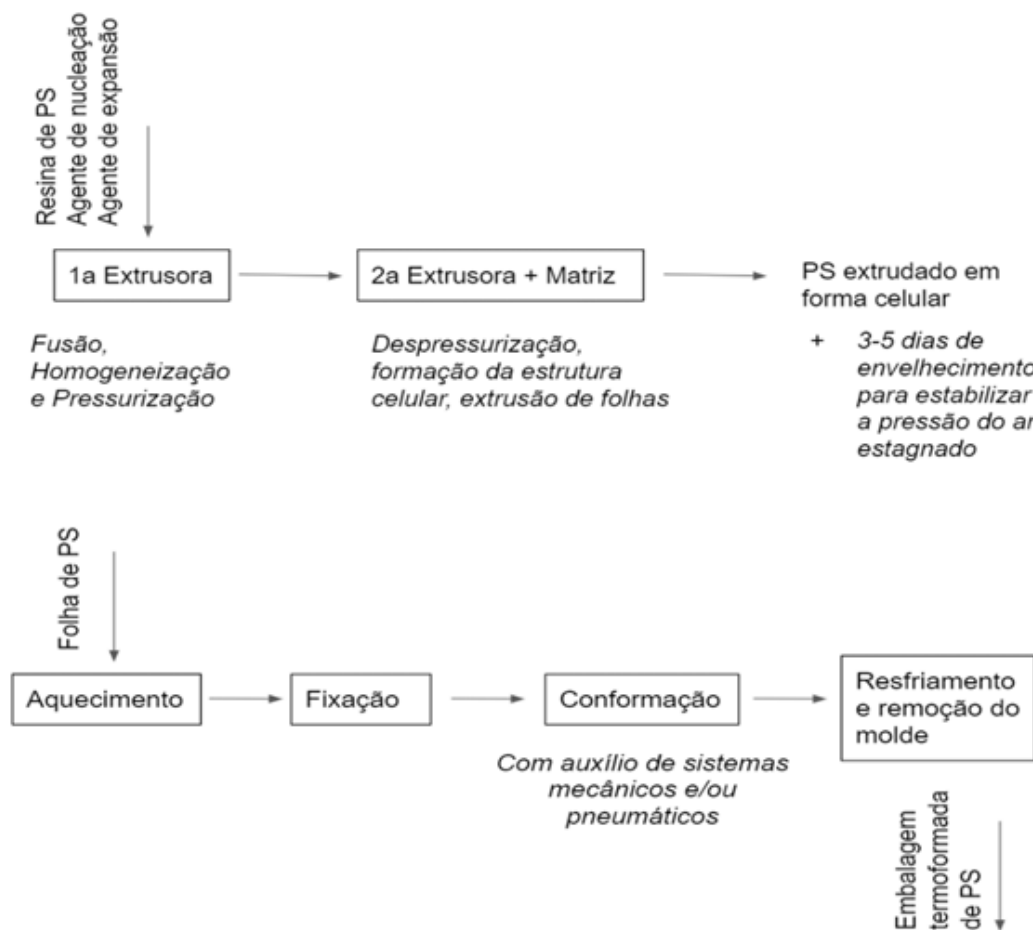
Fonte: Altan (2017)

Para a extrusão de PS celular, é necessário primeiramente obter a resina polimérica. A resina de PS é composta do homopolímero estireno linear e atático. Por se tratar de um polímero vinílico que será expandido, utiliza-se a polimerização em suspensão via radicais livres. Neste mecanismo, o iniciador dissolvido no polímero é mantido em suspensão em meio aquoso e mantido na forma de pequenas gotas com auxílio de um agente de suspensão e constante agitação. Assim, com aumento da temperatura, o iniciador se decompõe formando dois radicais livres (ou centros ativos), que serão responsáveis por induzir a destabilização das ligações duplas dos monômeros, dando início à polimerização. A transferência do centro ativo é feita de monômero a monômero, causando a propagação e, assim, o crescimento da cadeia polimérica dentro destas gotas em suspensão. Uma vez que a reação é terminada - por mecanismos que causem o desaparecimento do centro ativo - recolhe-se o produto de reação em forma de pérolas porosas. (Canevarolo, 2002)

A resina de poliestireno é então alimentada em uma extrusora e, com auxílio de um agente de expansão e nucleadores se obtém o tamanho e uniformidade das células formadas. O agente de expansão, normalmente um hidrocarboneto como o pentano, tem como objetivo criar o design celular com a sua expansão dentro das células. Este é injetado na extrusora como um líquido ou mesmo gás pressurizado. O material fundido é mantido sob pressão até sua saída do cabeçote, onde a queda de pressão causa vaporização imediata, expandindo o fundido.

Para que não haja ruptura do fundido, o poliestireno normalmente é resfriado antes de ser despressurizado. Comumente utilizam-se duas extrusoras em série. Na primeira, há adição do agente de expansão e nucleador, e, na segunda, ocorre o resfriamento, extrusão através de uma matriz e expansão. Em seguida a espuma extrudada é cortada e enrolada. Estes rolos serão reaquecidos para a termoformagem das embalagens e respectivas tampas. Vale notar que estes rolos devem ser envelhecidos por alguns dias para garantir o equilíbrio entre a pressão do gás aprisionado nas células e o ar exterior. As propriedades finais do PS extrudado são altamente dependentes de condições de processo, como quantidade de agente de nucleação e de expansão, obtendo densidades entre 60-100 kg/m³ e condutividade térmica entre 0.025 e 0.040W/m·K. (Altan, 2017; Robertson, 2013; Selke & Cutler, 2016)

Figura 6: Esquematização do processo de fabricação de embalagens termoformadas a partir de espuma de poliestireno extrudado.



Fonte: Próprio Autor

2.6 Papel Cartão

O papel cartão é um material que vem mostrando crescimento em manufatura ao redor do mundo há diversas décadas devido a sua grande versatilidade, boas propriedades mecânicas, baixa densidade e alto desempenho na estampagem e impressão. Não só isto, a produção de papel possui um histórico importante em diversas partes do mundo: aplicações como jornais, livros, papel dinheiro, aplicações industriais e embalagens configuram as principais áreas onde papel e variações do papel são amplamente empregados.

O papel cartão é composto de redes entrelaçadas de fibras de celulose. Ou seja, é um material baseado em recursos renováveis como matéria prima. O controle do processamento permite obter propriedades muito interessantes para embalagens, sendo possível obter um produto bastante flexível ou bastante rígido. Uma das formas de classificação mais utilizadas na indústria é a “gramagem”, medida em peso por metro quadrado. A diferença entre o papel comum e o papel cartão (e outros produtos à base de celulose) se dá, primariamente, por esta diferença. O papel cartão é, segundo a ISO, um material com gramagens acima de 200 g/m². (Kirwan, 2005)

O papel cartão é amplamente utilizado em embalagens pois atinge os principais critérios para esta aplicação (conter o produto, protegê-lo de dano físico e convir informações visuais ao consumidor). Entretanto, muitas vezes ele é acoplado a uma camada polimérica - realizando uma bicamada através de coextrusão - para não só aumentar as propriedades mecânicas, porém sanar sua principal limitação que é a permeabilidade à água, vapor d'água, óleos (como gorduras), e gases como o oxigênio. Isto normalmente é realizado com o revestimento com PE, PP, PET, entre outros. No caso do presente estudo, a embalagem analisada emprega o polietileno como camada de barreira. (Kirwan, 2005; Robertson, 2013)

Para a produção do papel cartão, parte-se da madeira - composta, dentre outros constituintes, de microfibrilas de celulose que conferem as propriedades mecânicas à árvore e ao material processado. Por isto, diversas das propriedades dependem do tipo de madeira utilizado e diversos outros parâmetros de processo.

A produção da embalagem de papel perpassa, de maneira geral, o processamento a seguir. Inicialmente, há o corte e pré-processamento da madeira (retirada de galhos e folhas, descascamento, lavagem etc.) obtendo a matéria prima em cavacos, ou seja, pequenos fragmentos de madeira. Em seguida, há o cozimento da madeira com auxílio de agentes químicos e meio mecânicos para a dissolução da lignina e eliminação de impurezas, obtendo-se a polpa da celulose. Então, há a adição de água à polpa convertendo a solução em uma folha

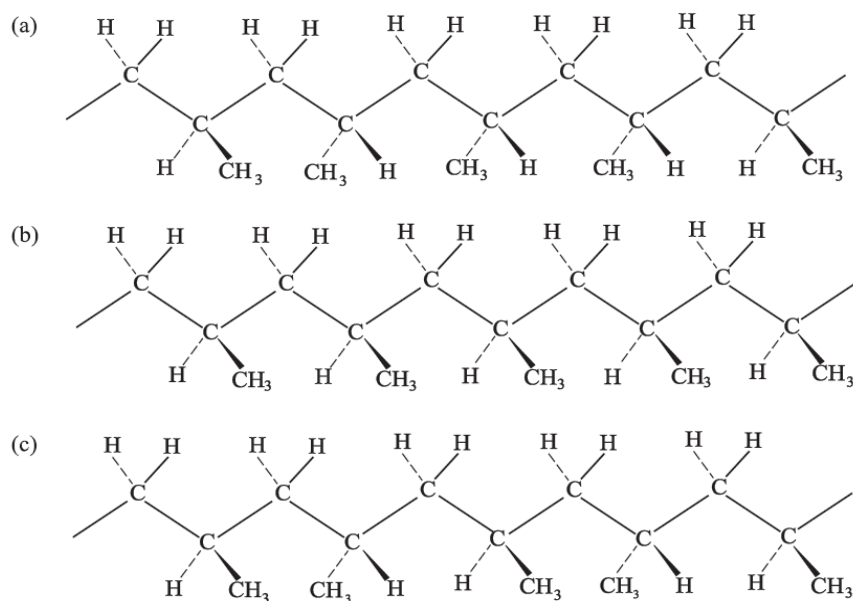
através de múltiplos rolos e prensas sobre telas formadoras de folhas. Nesta operação há o escoamento da água e definição da espessura da folha final. Finalmente, há a formação da estrutura de múltiplas camadas, secagem final e, posteriormente, co-extrusão de material polimérico sobre o papel, obtendo a estrutura bicamada que traz as propriedades desejadas. Este produto então é estocado em bobinas que são enviados para corte, dobramento e processamentos futuros para a formação da embalagem final. (Kirwan, 2005; Klock, de Andrade, Hernandez, 2013)

Embalagens de papel, de maneira resumida, são o resultado do entrelaçamento de fibras de celulose. Sua origem com madeira reflorestada, alto potencial para reciclagem e possibilidade de compostagem tornam o papel cartão uma opção altamente interessante para minimizar o impacto de embalagens plásticas não biodegradáveis no meio ambiente. (Robertson, 2013)

2.7 Polipropileno

O polipropileno (PP) é um material termoplástico de baixo custo e com ampla variedade de uso. Ele é polimerizado via radicais livres, similarmente ao processo descrito para o poliestireno. Em 2015, estimou-se que o mercado global deste material foi em torno de 60 milhões de toneladas (Smruk-Kazyna, 2017), configurando-se como o segundo polímero mais consumido, atrás somente do polietileno. É produzido a partir da polimerização do propeno ou propileno, caracterizando-se, portanto, como uma poliolefina. Trata-se de um polímero linear cuja principal característica é sua taticidade, podendo ser um polímero isotático, sindiotático ou atático. (Devesh, 2002)

Figura 7: taticidade do homopolímero polipropileno. (a) atático, (b) isotático e (c) sindiotático



Fonte: Selke & Cutler, (2016, p. 43)

As principais propriedades do PP são consequência de fatores como distribuição e massa molar, e taticidade - e, portanto, grau de cristalinidade, que, quando não-atático, pode variar de 30% a 70%. Em sua versão atática, o polipropileno é fabricado sem catalisação estéreo-específica e encontra poucos usos por produzir uma peça final amorfa com pouca resistência mecânica e a solventes. Comumente, utiliza-se catálise estéreo-específica de Ziegler Natta obtendo-se sua forma isotática, forma comercial mais utilizada do PP como homopolímero (iPP). Esta regularidade permite a cristalização que traz resistência mecânica e resistência química, necessárias para produção de peças por injeção. Além de ser de baixo custo, pode-se ressaltar sua atoxicidade, baixa absorção de umidade, fácil moldagem e coloração e boa estabilidade térmica, principalmente nas faixas de temperatura que serão encontradas em aplicações alimentícias. (Devesh, 2002)

O PP apresenta T_g entre -20°C e 10°C , T_m em torno de 160°C e 180°C , e densidade em torno de $0,89\text{-}0,92\text{ g/cm}^3$. É facilmente orientado quando processado, o que permite melhor transparência, e justifica seu uso na indústria de embalagens de alimentos. Finalmente, por ser susceptível à oxidação - e, portanto, degradação das cadeias, o que causa perda em propriedades - todas suas versões comerciais têm adição de agentes antioxidantes. (Robertson, 2013, Selke, 2016)

A alta demanda e utilização de polipropileno no mercado moderno resultou em muitos desenvolvimentos relativos à sua reciclagem. Sua ampla utilização em múltiplas indústrias e boa reciclabilidade tornou este processo rentável para a indústria, reduzindo consumo de matéria prima e estando em linha com diretrizes de redução no consumo de recursos fósseis e atenuação dos impactos ambientais.

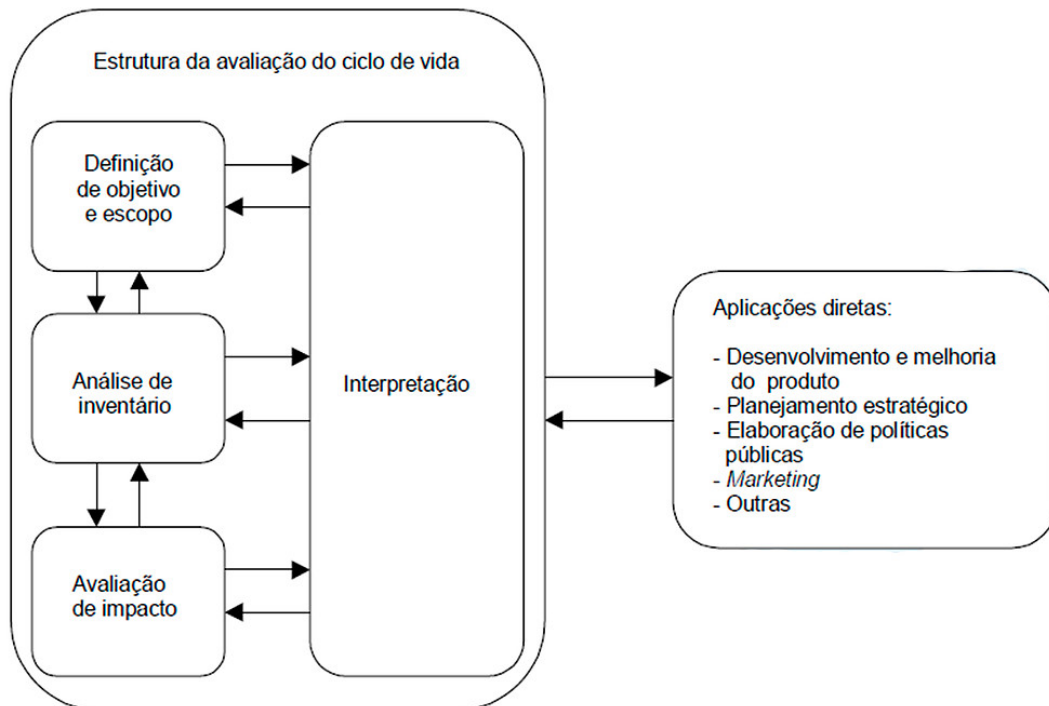
2.8 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

A metodologia base utilizada para o desenvolvimento deste estudo é a Avaliação do Ciclo de Vida (do inglês, *Life Cycle Assessment - LCA*). O objetivo é estimar os potenciais impactos ambientais associados a um produto desde a etapa de aquisição da matéria prima, aspectos energéticos e produtos secundários relativos à produção, distribuição, uso pelo público-alvo e disposição final/tipo de descarte do produto. Uma ACV é feita a partir da criação de um inventário de fluxos de entrada e saída de cada etapa do ciclo de vida, permitindo uma compreensão mais holística de todos os consumos e consequências relacionados à comercialização do produto. Tais fluxos de entrada e saída são, assim, equacionados em indicadores que serão responsáveis por quantificar o impacto ambiental do ciclo de vida de um dado produto quanto à aquecimento global, toxicidade humana e ambiental, esgotamento de recursos abióticos, destruição da camada de ozônio, eutrofização, entre outros. (Acero; Rodriguez; Ciroth 2017).

De acordo com a norma ISO 14040, uma ACV completa deve envolver etapas iterativas e inter-relacionadas (Figura 9):

- i. Definição do objetivo e escopo: definição das etapas compreendidas neste ciclo de vida (*boundary conditions*), unidade funcional (quantidades ou massa/ano, por exemplo, o que busca assegurar comparabilidade e valores expressivos para análise) fluxos de referência, hipóteses e suposições, e limitações intrínsecas.
- ii. Coleta e análise de dados/inventário: definição de base de dados e análise da origem destes, definição de fluxos com consequências ambientais - como efluentes líquidos, emissões gasosas, gastos indiretos relativos à transporte e síntese de matérias primas, entre outros.
- iii. Avaliação dos impactos ambientais: conversão dos dados coletados em indicadores capazes de quantificar o impacto ambiental em diferentes frentes de estudo - aquecimento global, toxicidade etc.
- iv. Interpretação dos dados gerados.

Figura 9: visualização esquemática da ACV



Fonte: ISO 14040

Embora a ACV seja uma técnica estabelecida há algumas décadas, o surgimento de softwares *open source* - como o OpenLCA e SimaPro - e o potencial moderno de agregação de informação em bases de dados, a implementação desta técnica de análise tem se popularizado e agregado valor no modelo de negócios de diversos produtos. Ou seja, esta metodologia vem orientando tomadas de decisões em direção a soluções mais ou menos ambientalmente corretas. (Acero; Rodriguez; Ciroth 2017) A ACV, assim, agrega valor no design e desenvolvimento de produtos e processos, planejamento estratégico - como na escolha de materiais mais adequados -, marketing, e melhorias em processamento e formas de descarte, visando sempre mitigar os impactos ambientais causados pela adoção de um determinado bem ou serviço.

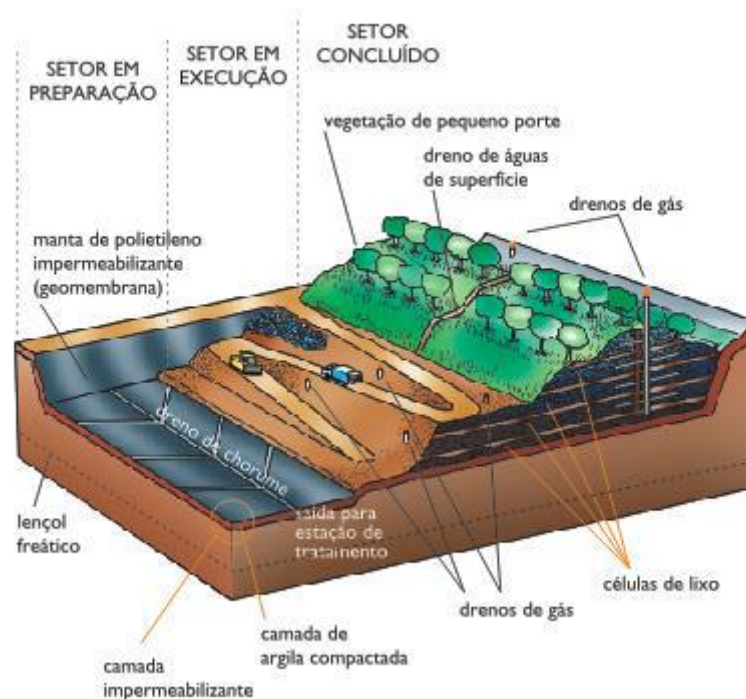
2.9 Aterro Sanitário

Definido pela norma ABNT 8419/1992, aterro sanitário é uma obra de engenharia para disposição de resíduos sólidos urbanos, com soluções para mitigar danos causados ao meio ambiente e à saúde pública. A norma ABNT 13896/1997 também prevê que a construção de

um aterro deve ser prevista para uma vida útil de, no mínimo, dez anos e monitoramento de, no mínimo, dez anos após o encerramento deste. Trata-se de uma solução tecnológica muito superior ao descarte inadequado em lixões, que afetam de forma muito mais agressiva o meio ambiente e a qualidade de vida de seres humanos da região onde há o depósito incorreto de resíduos. Além disso, lixões são altamente susceptíveis a enchentes, proliferação de animais que transmitem doenças e contaminação de corpos d'água.

O método configura uma base e laterais impermeáveis - normalmente de polietileno de alta densidade (HDPE) - responsável por reter o vazamento de líquidos e evitar a contaminação dos lençóis freáticos e os ecossistemas adjacentes; sistema de drenagem de gases, possibilitando a coleta de biogás (metano, dióxido de carbono e vapor d'água), que deve ser realocado para queima ou mesmo reaproveitamento na geração de energia; recobrimento das camadas de resíduo com argila ou outro material para proteger contra infiltração de água e contaminação do ar; contenção da geração de chorume (líquido rico em matéria orgânica e muitas vezes metais pesados, altamente danoso ao meio ambiente se não recuperado e tratado); e monitoramento da quantidade de material e da área reservada para isto.

Figura 8: Representação esquemática de um aterro sanitário



Fonte: Aterro Sanitário: Suas Definições e Conceitos / Meio Ambiente - Cultura Mix.

Um dos pontos mais importantes para aterros sanitários é a drenagem e tratamento do chorume, evitando sua acumulação e decréscimo da vida útil da instalação. Com auxílio de canais de drenagem internos, o lixiviado deve ser encaminhado para centrais de tratamentos, como: aeróbios ou anaeróbios - lagoas, filtros biológicos, lodos ativados etc. -, processos físico-químicos - diluição, filtração, sedimentação, oxidação química etc. -, ou encaminhamento para estações de tratamento de esgoto. (Ghislane, 2007, Karin 2007)

Na ausência de metodologias eficazes de coleta e disposição do resíduo sólido - como por escassez de recursos, ausência de diretrizes que visam a atenuação de impactos ambientais, falta de eficácia em gestão pública - há alto risco de degradação do sólido e contaminação de corpos d'água e lençóis freáticos, alta emissão de biogás, e conseqüentemente forte impactos em indicadores de aquecimento global.

Por fim, vale notar que a estratégia tecnológica possibilitada pelo uso de aterros sanitários não só exige uma logística de coleta municipal funcional, como é ambientalmente inferior a técnicas alternativas de fim de vida como reciclagem, compostagem, reuso etc. Ou seja, deve-se optar, sempre que possível, por estratégias que tragam ganhos mais robustos para o meio ambiente, com diminuição do esgotamento de novos recursos, e extensão da vida útil de um dado material. Embora teoricamente funcionais, aterros também atingem socioeconomicamente os entornos, desvalorizando regiões em seu entorno, com frequente trabalho de pessoas em situações insalubres e ineficiência nos processos de contenção e recuperação de dejetos líquidos e gasosos.

2.10 Compostagem e Digestão Anaeróbia

Compostagem e digestão anaeróbia são dois métodos associados com o processamento de resíduos de materiais biodegradáveis e resíduos orgânicos (restos de alimentos e resíduos agropecuários). Ambos os métodos trabalham com a decomposição da matéria por microorganismos através de reações bioquímicas e são processos de fim de vida bastante almejáveis de um ponto de vista ambiental, pois ambos transformam o resíduo orgânico em produtos de valor que podem ser reinseridos em diferentes atividades econômicas.

Tanto a compostagem como a digestão anaeróbia partem da preparação do resíduo, como pesagem e documentação para garantir a qualidade e conteúdo do que será alimentado no processo (que pode conter poluentes que venham a inviabilizar o produto final), trituração, fermentação inicial sob temperatura para eliminação de agentes patogênicos, e fermentação principal e maturação (onde ocorrerão os processos de decomposição), filtragem, ajustes finais

e estocagem em silos, e recolhimento dos produtos secundários, como gases e líquidos. (*BioCycle*, 2014; US Environmental Protection Agency, 2007)

A compostagem produz como produto composto fertilizante, água e gases como amônia e dióxido de carbono. Por sua vez, a digestão anaeróbia produz um material líquido (*digestate*) que pode ser secado por meios mecânicos e utilizado como fertilizante e, mais importante, o biogás (principalmente metano, mas também dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e vapor d'água), que tem o potencial para ser convertido em energia.

A principal diferença entre estes processos é que a compostagem é feita na presença de oxigênio e a digestão na ausência deste. Isto significa que para compostagem, há necessidade de constante aeração do material orgânico, enquanto para a digestão anaeróbia o material é mantido enclausurado. No caso da compostagem, utiliza-se em torno de 50% de umidade com ventilação constante. Já no caso da digestão anaeróbia, opera-se com até 100% de umidade relativa, preenchendo todos os poros da matéria orgânica, impedindo ao máximo o contato com oxigênio. Por fim, a compostagem é comumente feita em bateladas, com degradação da matéria orgânica até que não ocorra mais biodegradação, que define o momento de retirada do material decomposto. Com a digestão anaeróbia, utiliza-se um processo contínuo, com substrato “novo” e “antigo” misturados juntos, produzindo o biogás a diferentes taxas, porém de maneira contínua. (*BioCycle*, 2014)

3. REVISÃO DA LITERATURA

Quanto à literatura sobre ACV de embalagens, encontram-se algumas publicações de relevância para expandir a discussão presente.

Maga *et al* (2019) realizaram um denso estudo comparando por ACV nove sistemas diferentes de bandejas para carnes. Dentre os sistemas investigados estavam: bandejas baseadas em PS extrudado (PS extrudado e PS extrudado contendo etileno vinil álcool), PET (PET reciclado, com e sem camada de polietileno e PET amorfo), PP, e PLA. O principal impacto ambiental discutido foi o relativo ao aquecimento global, sendo o do APET consideravelmente maior que o do EPS tanto no total quanto para a produção da resina polimérica. Entretanto, ao se tratar de esgotamento de recursos fósseis, o EPS performou pior que o APET. Concluiu-se que o PS extrudado teve o melhor desempenho (mais benigno ao meio ambiente) em todas as doze categorias estudadas, com exceção de esgotamento de recursos naturais, e que embalagens multicamadas tiveram o pior desempenho ambiental (maior impacto).

Koskela *et al.* (2014) propuseram uma comparação por ACV de dois sistemas com materiais e estratégias distintas: embalagem de HDPE lavável e reutilizada (estimada em até 700 ciclos de reuso) comparada com a caixa de papel corrugado. O material transportado foram produtos de uma padaria que entrega diariamente para diferentes regiões da Finlândia. Com a cooperação da empresa, foi possível estimar e modelar gastos, fluxos e transportes com bastante fidedignidade ao ciclo de vida estudado; o que, em contrapartida, torna os resultados bastantes particulares aos sistemas e contexto geográfico e econômico deste estudo. Em termos de indicadores ambientais, as etapas de transporte foram as principais responsáveis pela maioria dos impactos analisados. Com relação ao material, o reuso na ordem de múltiplas centenas de vezes da embalagem de HDPE tornou-a comparável àquela de papel corrugado; porém, com a reciclagem deste, pode-se dizer que os impactos foram menores em todos os indicadores analisados. Por fim, supondo menores distâncias e mantendo algumas hipóteses, notou-se que a eutrofização de corpos d'água passa a ser relativamente mais importante no caso do papel corrugado. A conclusão do estudo indicou que as embalagens à base de papel corrugado mostraram-se globalmente como a opção mais ambientalmente adequada.

Brooke *et al.* (2018) realizaram ACV focado nos modos de descarte do EPS comparando reuso, reciclagem e descarte em aterro. O artigo afirma também que, embora a fabricação de EPS envolve uma quantidade relativamente baixa de tipos de materiais diferentes, trata-se de materiais com esgotamento abiótico importante (dado que hidrocarbonetos advindos de combustíveis fósseis são utilizados para produzir o monômero e o agente de expansão). No fim de vida, segundo a *Environmental Protection Agency* dos Estados Unidos, apenas 0,6% do EPS é recuperado após uso. Além de apresentar diversos problemas quanto a emissões danosas ao meio ambiente quando descartado em aterro, o EPS é pouco reciclado por ser pouco rentável a operação de transporte de um material tão pouco denso. Finalmente, conclui-se que os ganhos em energia ao reciclar e reutilizar ainda são consideráveis quando considerados os ganhos em não reproduzir o EPS virgem, mesmo com o transporte notoriamente ineficiente. Além disto, notou-se que há pouca literatura comparando a reciclagem vs. reuso do EPS, e não há nenhuma menção da quantificação de incineração seja no corpo do artigo, seja na revisão bibliográfica deste.

Ocampo *et al* (2015) analisaram diferentes materiais para a produção de bandejas de ovos. Mais especificamente, foram comparadas embalagens feitas a base de poliestireno e de papel reciclado com o objetivo de constatar qual seria o material mais benigno ao meio ambiente. O artigo focou sobre os indicadores aquecimento global, acidificação e consumo energético. Baseado nos cálculos, conclui-se que o ciclo de vida da embalagem de papel

reciclado emitiu consideravelmente uma menor quantidade de gases danosos ao meio ambiente, e, portanto, mostrou-se mais benigna segundo todos os indicadores estudados. Entretanto, é importante notar que foi suposto o uso de 100% papel reciclado frente a 100% de poliestireno virgem. Ou seja, fluxos e emissões relativos à produção inicial do papel não foram considerados, fator que não foi discutido em forma de análise de sensibilidade.

Madival *et al.* (2008) aplicaram a ACV para comparar os impactos ambientais de embalagens de morangos constituídas de PLA, PET e PS. Este estudo focou a contribuição das etapas de produção da resina, extrusão, termoformagem e transporte para diferentes tipos de indicadores. Observou-se que a etapa de transporte foi a maior responsável pelo impacto na maioria das categorias analisadas. Não só isto, como foi observado que o uso do sistema ferroviário é substancialmente menos danoso que o uso do sistema rodoviário. Uma análise detalhada foi proposta para diversas categorias de impacto, destacou-se um impacto do PET superior ao PS quanto à produção de resina e transformação da matéria na maioria das categorias estudadas. Finalmente, ao discutir o descarte/fim de vida destes materiais, dentre outras observações, concluiu-se que, ao comparar 100% aterro frente a 50% aterro e 50% incineração, não houve diferença quanto a consumo energético, e o aterro completo mostrou-se ligeiramente menos danoso quanto a emissão de dióxido de carbono. Os autores ressaltam, como conclusão, a relevância das etapas de transporte dado o extenso trabalho de localização de cada etapa e os pormenores logísticos que isto implicava. Assim, como principal conclusão, foi proposto que uma parte importante do problema se tratava de logística (*supply chain*), e não somente escolha do material.

Ongmongkolkul *et al.* (2019) trabalharam com o ciclo de vida de papelão ondulado, considerando tanto peças produzidas a partir da polpa virgem como reciclada. É importante notar que este trabalho teve em vista diversos fatores próprios da cadeia produtiva e logística tailandesa. O estudo observou que o aterro foi a etapa com impacto individual mais importante para os indicadores de aquecimento global, acidificação (representando um terço do total de todo o ciclo em ambos) e eutrofização. Em um segundo momento, foi estudado como a variação na taxa de aterro com relação ao total descartado. Ao comparar esta taxa de 20% a 70% nota-se uma redução de 15% a 30% nos indicadores observados. Por fim, a publicação propõe alterações que poderiam impactar os indicadores, destacando-se um aumento no reuso, melhorias nas fontes energéticas tailandesas, mas principalmente gestão de gases emitidos durante aterro - considerando uma captação de até 50% - e mudança no design da embalagem, considerando-a cúbica de mesmo volume.

Yi Yi *et al.* (2017) estudaram comparativamente o impacto ambiental e consumo energético de embalagens para transporte a base de papelão ondulado e sacos plásticos à base de polipropileno, de acordo com dados relativos ao E-Commerce em Shanghai. É importante notar que a unidade funcional foi uma embalagem, o que significou 160g para a embalagem de papelão e 10g para o saco plástico, e que representa uma diferença substancial em peso de cada embalagem. Isso fez com que o impacto para todas as categorias tenha sido superior no caso da embalagem de papel corrugado. O ciclo de vida completo para cada sistema consumiu 10,7 MJ e 1,42 MJ para o papelão e sacola de PP, respectivamente. Segundo o estudo, o impacto mais proeminente se deu na categoria aquecimento global para as duas formas de embalagem. Na análise de sensibilidade, estudou-se os ganhos de trocar a embalagem de papel corrugado de duas camadas por uma de uma camada; foi concluído que, desconsiderando diferenças técnicas, há uma redução média de 40% no gasto de energia e 60% ao longo dos indicadores de impacto ao meio ambiente. Por fim, constatou-se os benefícios ao longo de todos os indicadores - com o impacto percentualmente mais relevante no caso do indicador relativo ao aquecimento global - ao reciclar ambos os tipos de embalagem frente à incineração.

Moretti *et al.* (2021) realizaram a ACV em copos de uso único de poli(ácido láctico), polipropileno e PET. O estudo focou a maior parte de seus esforços para quantificar os impactos do PLA ao meio ambiente, e concluiu que as etapas de fermentação do ácido láctico e a polimerização foram os principais responsáveis pelos principais impactos abordados. Em um segundo momento, o artigo comparou o PLA, PET e PP e concluiu que o PLA apresentou o menor impacto quanto a indicadores de aquecimento global e esgotamento de recursos fósseis. Entretanto, o PLA apresentou maior impacto quanto a destruição da camada de ozônio, acidificação de ecossistemas e eutrofização terrestre. Embora seja um biopolímero com bastante potencial, o artigo se posicionou afirmando que o PP possui um menor impacto ambiental de um ponto de vista global. Para que o PLA se torne uma alternativa mais ambientalmente correta que o polipropileno, os autores ressaltam a necessidade de aumentar a taxa de PLA com fim de vida por compostagem ou reciclagem e uso de fontes de energia renováveis para a etapa de produção do ácido láctico.

Tendo em vista a revisão bibliográfica apresentada, justifica-se o foco em estudar as embalagens de PS expandido, PET e papel cartão para delivery. Primeiramente, poucos estudos focalizados em embalagens para delivery foram encontrados, dado que a maioria dos estudos analisados abordaram principalmente outros tipos de embalagens. Assim, tendo isto em mente, foi reforçado o interesse em abordar estas embalagens poliméricas tão comuns na economia brasileira, principalmente tendo-se em vista o contexto pandêmico, considerando tanto o

cenário de fim de vida mais comum - aterro sanitário - bem como discutindo possibilidades alternativas para a embalagem de papel cartão - compostagem e digestão anaeróbia.

4. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo global aplicar a avaliação do ciclo de vida para comparar o impacto ambiental de três tipos de embalagens para delivery. Os três sistemas de embalagem estudados foram EPS (poliestireno expandido extrudado), APET e Papel Cartão revestido com PE.

Os objetivos específicos foram:

1. Analisar comparativamente o impacto ambiental dos ciclos de vida por tipo de material;
2. Analisar comparativamente o impacto de cada uma das etapas consideradas na modelagem do ciclo de vida de cada embalagem;
3. Analisar os possíveis cenários de fim de vida para a embalagem baseada em papel cartão.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Escolha do Sistema

A escolha dos ciclos de vida estudados neste trabalho visou comparar diferentes tipos de embalagem que tiveram aumento de seu uso devido ao contexto da pandemia, especificamente as embalagens para delivery. Foram escolhidas as embalagens de EPS e PET, comparando dois materiais poliméricos comumente utilizados e processados por termoformagem, e a embalagem de papel cartão produzida por prensagem e dobragem com tampa de PP injetada.

Assim, serão comparados os seguintes sistemas -

1. PET com fim de vida em aterro sanitário.
2. EPS com fim de vida em aterro sanitário.
3. Papel cartão com tampa de PP fim de vida em compostagem, digestão aeróbica e aterro sanitário.

5.2 Avaliação do ciclo de vida (ACV)




De acordo com a norma ISO 14040, para a realização de uma ACV, é fundamental aplicar os princípios e etapas definidos pela norma, maximizando a reprodutibilidade e relevância dos resultados encontrados. Como citado previamente, tais etapas são: definição do escopo e objetivo da ACV, análise de inventário, avaliação dos impactos dos indicadores selecionados, e interpretação dos resultados. As ACV foram realizadas com o software OpenLCA, versão 1.10 (GreenDelta, Alemanha).

5.3.1 Definição do escopo e objetivo

O objetivo de estudar os diferentes ciclos de vida relativos a embalagens para delivery presunha diferentes materiais que apresentavam qualidades técnicas comparáveis, pois todas estão cumprindo com suas principais funções (contenção do material, proteção contra vazamentos etc.). E, como se trata de uma embalagem responsável por conservar o alimento entre o ponto de distribuição e o cliente final, diferenças em permeabilidade ou outras propriedades relativas à funcionalidade, que alterariam o *shelf life* do produto, por exemplo, não foram levadas em consideração.

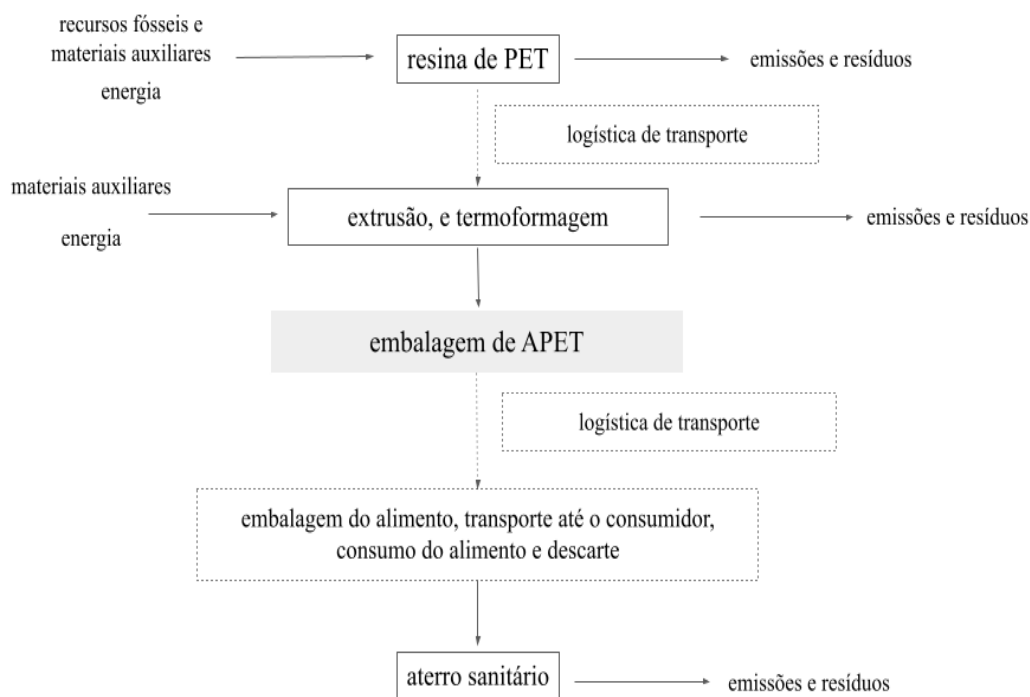
Na Tabela 2, a descrição dos constituintes, massa e material das embalagens modelizadas. É importante notar que, por questões de simplicidade, não foram considerados cenários de fim de vida para a tampa de polipropileno e nem a etapa de co-extrusão de termoplástico no interior da embalagem de papel cartão, devido ao baixo peso relativamente à embalagem completa.

Tabela 2: valores de massa medidos com relação às embalagens de referência

Tipo de Embalagem	Componente	Massa Média (g)	Material	Foto da Embalagem Modelo
Embalagem de PET	Corpo da Embalagem	15,6	APET	
	Tampa da Embalagem	9,4	APET	
Embalagem de EPS	Corpo da Embalagem	6,2	EPS	
	Tampa da Embalagem	6,4	EPS	
Embalagem de Papel Cartão	Corpo da Embalagem	15,2	Papel Cartão	
	Tampa da Embalagem	6,3	PP	

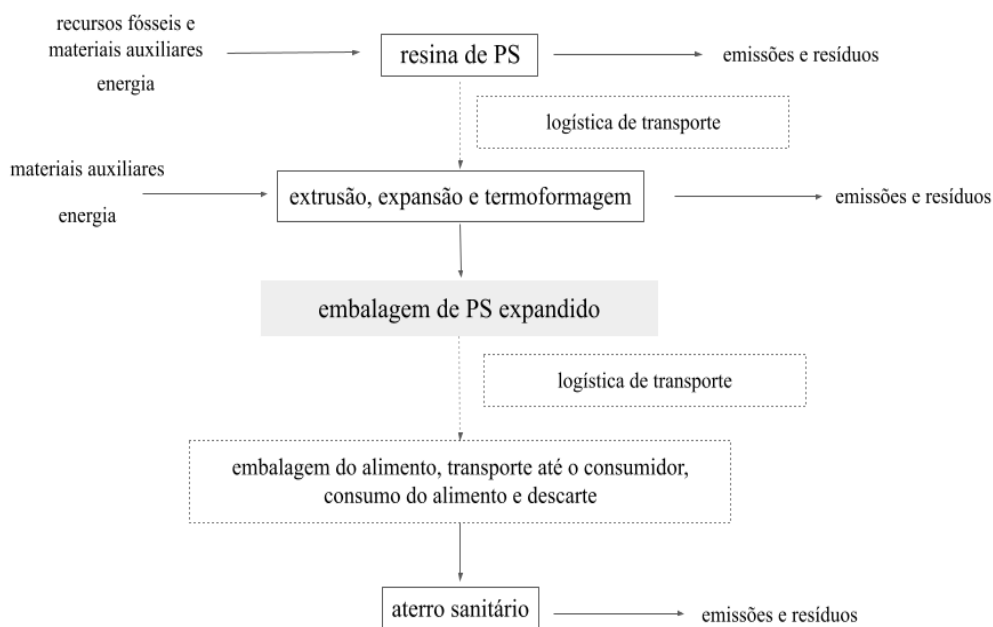
Abaixo, uma representação das etapas consideradas (*boundary conditions*) para cada sistema de embalagem. Tratou-se principalmente da etapa de produção da embalagem - produção da resina e processamento, e o destino no fim de vida. Não foram consideradas etapas relativas ao transporte da resina até a fábrica, nem do transporte ao longo da região metropolitana para a entrega, pois a definição de um ponto arbitrário de entregar iria favorecer ou prejudicar um tipo de embalagem em função da localidade física da fábrica. Dentro das caixas com linha contínua estão as etapas cujos impactos foram contabilizados na ACV. Já as caixas com linha pontilhada configuram as etapas que não foram contabilizadas.

Figura 10: Ciclo de vida para embalagem de APET termoformada.



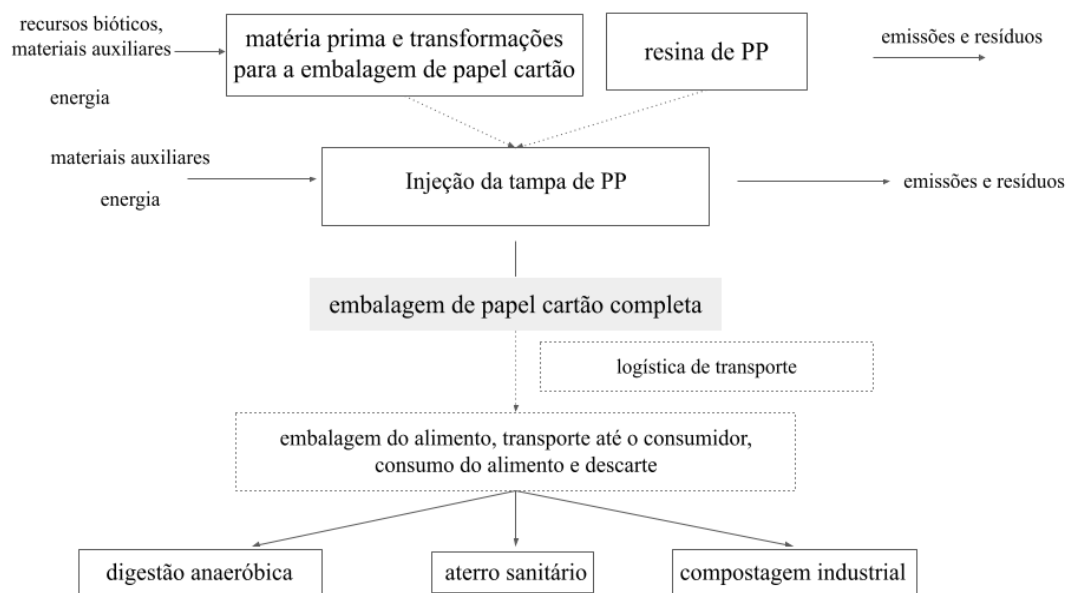
Fonte: próprio autor

Figura 11: Ciclo de vida para embalagem de EPS termoformada.



Fonte: próprio autor

Figura 12: Ciclo de vida para embalagem de papel cartão



Fonte: próprio autor

5.3.2 Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

Esta etapa da ACV consiste na coleta e seleção dos fluxos de entradas e saídas para todas as etapas consideradas nos ciclos de vida das embalagens (inventários do ciclo de vida – ICV). Para isto, os ICV foram elaborados e completados utilizando as bases de dados Ecoinvent v3.7 e ELCD. Para a massa das embalagens, tomou-se por referência produtos reais de empresas nos arredores de São Paulo (Tabela 2). Estas foram pesadas e sua composição determinada a partir de inspeção visual e confirmação nos sites das empresas.

Foram utilizados dados da base de dados Ecoinvent v3.7 e ELCD para descrever de maneira aproximada os fluxos que compõem os ciclos de vida considerados. Vale dizer que valores relativos a gastos como energia elétrica, área ocupada, consumo de água etc. são resultados de médias já inclusas no provedor escolhido. No Apêndice A, B, e C estão, respectivamente, a caracterização dos fluxos de entrada e saída de acordo com a modelagem proposta para o ciclo de vida das embalagens.

5.3.4 Análise dos Impactos

Para a quantificação dos impactos a partir do software OpenLCA, foi utilizado o método de avaliação ReCiPe (H). As categorias escolhidas buscaram abranger ao menos uma

categoria de cada tipo relacionada aos impactos globais. Em outras palavras, tratou-se de analisar indicadores de impacto sobre para a qualidade do meio ambiente, sobre o esgotamento de recursos naturais, e sobre o impacto sobre a saúde humana. Tal abordagem é convergente com o que indica as normas de ACV (NBR ISSO, 14040).

Mais especificamente, foram selecionadas as seguintes categorias:

1. danos ao meio ambiente: aquecimento global (kg CO₂-Eq), destruição da camada de ozônio (kg CFC-11-eq), eutrofização de água doce (kg P-eq), eutrofização marítima (kg N-eq), acidificação terrestre (kg SO₂-eq), e ecotoxicidade para ecossistema terrestres, marítimos e de água doce (kg 1,4-DCB-eq);
2. esgotamento de recursos: esgotamento de recursos hídricos (m³), uso da terra agrícola e urbana (m²a crop-eq), e esgotamento de recursos fósseis (kg oil-eq);
3. saúde humana: toxicidade humana (kg 1,4-DCB-eq).

A unidade funcional escolhida para cada ciclo de vida foi de 10 milhões de embalagens. A escolha do valor permite que impactos cujo valor absoluto do indicador seja mais expressivo e representativo do impacto ambiental real destas embalagens, segundo a modelização proposta.

Finalmente, vale notar que os modelos de ciclo de vida dependem da disponibilidade de dados e métodos contidos no software de análise. Os valores obtidos são resultados dos dados disponíveis nas bases de dados, resultado de médias estimadas para cada provedor, sujeitos a aproximações no cálculo e resultados das decisões tomadas durante a modelagem aproximada do processo frente ao que foi possível encontrar nos bancos de dados e provedores válidos. Isto inclui, principalmente, a desconsideração do fim de vida da tampa de PP, o recobrimento interno de PE da embalagem de papel, e os transportes logísticos relativos a todas as etapas da cadeia produtiva desses produtos. Ou seja, todos estes fatores devem ser mantidos em mente ao comparar tais resultados com os resultados obtidos por outros grupos de estudos e publicações.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de melhor interpretar os dados gerados, os indicadores relativos às três categorias *endpoint* supracitadas - danos ao meio ambiente, esgotamento de recursos e saúde humana - foram comparados em dois momentos. No primeiro momento, foram comparadas as três

embalagens diferentes, todos com cenário de fim de vida em aterro sanitário, observando as contribuições de diferentes etapas de cada ciclo de vida. Em um segundo momento, três ciclos de vida diferentes para a embalagem de papel cartão foram analisados quanto aos impactos absoluto e relativo da etapa de fim de vida. Vale notar que a embalagem de APET teve o pior índice em todos os indicadores, com exceção do índice de uso da terra, que tem uma contribuição altamente significativa na etapa de produção do papel relativo ao ciclo de vida da embalagem de papel cartão, e ecotoxicidade terrestre, onde a embalagem de PS e APET tiveram impactos semelhantes.

6.1 Comparação das embalagens com fim de vida em aterro sanitário

É importante pontuar que os valores encontrados a seguir são decorrentes não só da modelização do ciclo de vida realizado previamente, mas também da escolha dos fluxos de entrada e da escolha do provedor de dados. Ou seja, os resultados obtidos buscam analisar tendências gerais relativos à escolha das embalagens à base de diferentes materiais escolhidas. Não só isso, valores relativos à, por exemplo, gastos energéticos, baseiam-se em médias gerais que consideram diferentes regiões e bases de dados. As bases utilizadas são, em sua maioria, contribuições de institutos que as atualizam na medida em que há alterações na composição elementar dos fluxos e avanços/mudanças relativas a processos industriais.

Os indicadores traduzem as diferentes emissões em quilogramas equivalentes de uma emissão representativa para aquele impacto. Por exemplo, uma emissão em peso de metano terá seu impacto representado na forma equivalente de CO₂ para o indicador de aquecimento global, ou equivalente a clorofluorcarbonetos no caso do indicador de destruição da camada de ozônio. Essas emissões equivalentes são, portanto, o resultado de todos os fluxos elementares relativos à produção da matéria prima, à geração de energia e outras operações unitárias industriais.

6.1.1 Danos ao meio ambiente

Os resultados relativos às contribuições para o aquecimento global e destruição da camada de ozônio demonstraram que a embalagem de APET possui a contribuição mais danosa para o meio ambiente. Quanto ao aquecimento global, a embalagem de PS teve impacto de aproximadamente 55% relativo ao impacto da embalagem de APET e a de papel cartão cerca de 48%, mostrando-se a alternativa de menor impacto total para o mesmo cenário de fim de

vida (Gráfico 1). Para as embalagens de polímero sintético, a etapa de produção da resina polimérica foi a principal responsável pelo impacto total, enquanto para a embalagem de papel cartão houve uma distribuição mais homogênea da contribuição de cada uma das etapas para o impacto total. Este valor de impacto relativo à polimerização, no caso do APET, é governado pelas emissões de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄). Quando decomposto em fluxos mais elementares, esta etapa de produção da resina conta com 87% da contribuição de emissões de CO₂ e cerca de 11% da contribuição de emissões de CH₄.

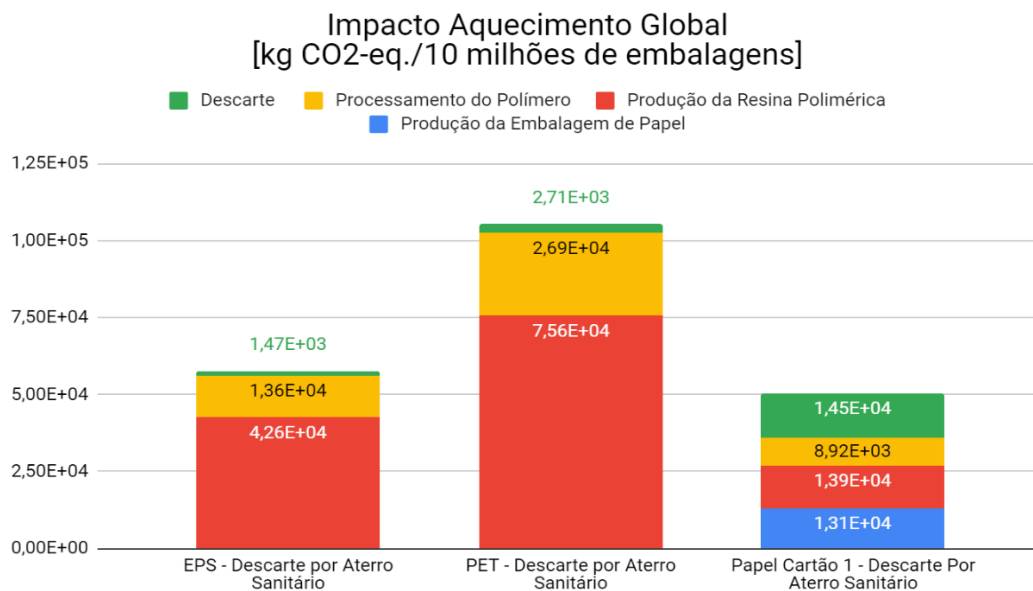


Gráfico 1: Impacto de Aquecimento Global em kg CO₂-Eq para diferentes embalagens descartadas em aterro sanitário

Quanto à destruição da camada de ozônio, a embalagem de PS teve o melhor desempenho ambiental com contribuição de aproximadamente 24% do impacto do APET, enquanto o papel cartão apresentou um impacto de aproximadamente 35% também referente ao APET (Gráfico 2). O alto impacto apresentado pela etapa de produção da resina polimérica é devido a emissões de CO₂ e halogênios, principalmente de boro. Este fluxo elementar contido no fluxo relativo à polimerização contribui com 98% das emissões com impacto medido em kg equivalentes de clorofluorcarbonetos (CFC).

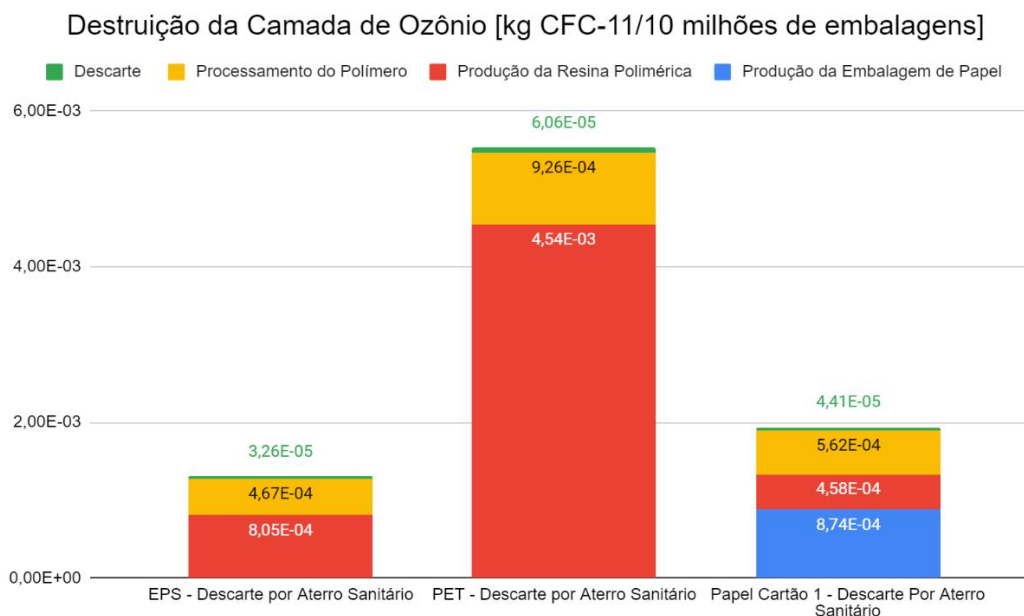


Gráfico 2: Impacto de Destruição da Camada de Ozônio em kg CFC-11-Eq para diferentes embalagens descartadas em aterro sanitário

Em ambos os indicadores, nota-se uma contribuição muito significativa da etapa relativa à produção da resina de PET. A contribuição relativa somente a esta etapa, segundo os cálculos e modelagem, foi superior a todo o ciclo de vida das embalagens de PS e papel cartão. Outro detalhe interessante é que, para destruição da camada de ozônio, a etapa de descarte não foi significativa frente ao total; ao passo que, para aquecimento global, a etapa de descarte do papel cartão em aterro sanitário contribui com até 5 vezes mais que as embalagens plásticas para o mesmo tipo de descarte. Comparando com a literatura - mais especificamente com *Maga et al.* (2019), cujo escopo e sistemas eram os mais semelhantes comparados aos sistemas estudados no presente trabalho - o impacto superior do APET comparado ao EPS, e o impacto relativo da etapa de produção da resina de APET com relação ao total e com relação a outras etapas do ciclo de vida também foram averiguados de maneira similar e através de uma outra simulação e método de cálculo. O maior impacto relativo da produção da resina de PET frente ao processamento também foi observado no trabalho de *Moretti et al* (2021) ao estudar a produção de copos descartáveis.

Com relação a impactos ambientais como eutrofização de ambientes aquáticos - água doce e marítima - a embalagem de PS mostrou-se menos danosa em ambos os índices. A eutrofização se refere ao superávit de minerais e nutrientes em ecossistemas que, em casos extremos, causa aumento no crescimento de algas, consumo excessivo de oxigênio e outros impactos ao ecossistema. É importante dizer que, ao utilizar provedores que analisam valores

médios, há uma perda para a análise de eutrofização, pois este impacto pode ser diferente para diferentes biomas.

No caso de eutrofização de ambientes de água doce (kg P-eq) observou-se uma contribuição mínima da etapa de descarte para todas as embalagens, e estimou-se que o impacto do APET foi cerca de 3,5x o impacto do PS e 2,5x o impacto da embalagem de papel cartão (Gráfico 3). Como observado abaixo, a eutrofização de ambientes de água doce, para todas as embalagens estudadas, é pouco influenciada pelo descarte, com etapas de produção e processamento sendo os principais responsáveis pelo impacto total.

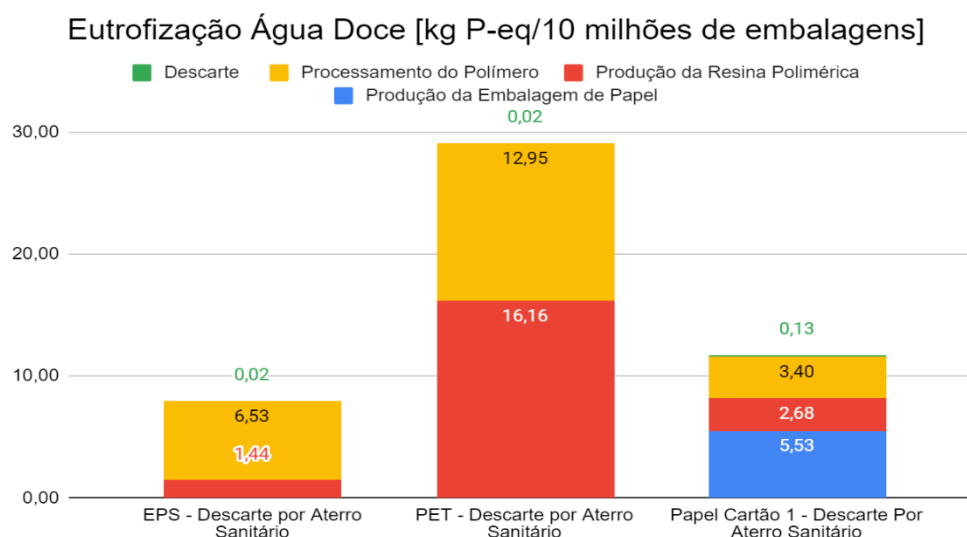


Gráfico 3: Impacto de Eutrofização de Água Doce em kg P-Eq para diferentes embalagens descartadas em aterro sanitário

Para eutrofização de águas marítimas (kg N-eq), notou-se uma contribuição mais significativa da etapa de descarte em aterro para todas as embalagens. Neste caso, embora a etapa de produção da resina de PET ainda seja a maior contribuidora para o impacto, este está mais homoganeamente distribuído ao longo de cada etapa do ciclo de vida (Gráfico 4). Diferente do caso anterior da eutrofização de água doce, há uma contribuição relativa importante da etapa de descarte no impacto total, principalmente no caso do papel cartão.

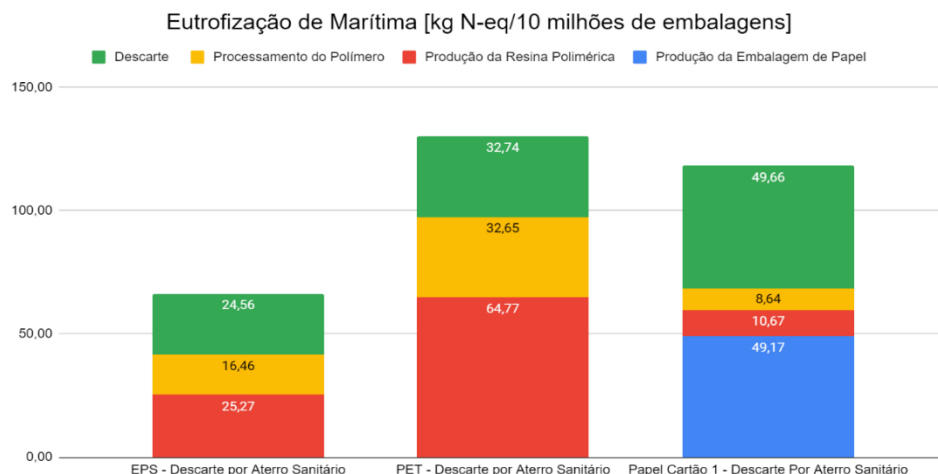


Gráfico 4: Impacto de Eutrofização Marítima em kg N-Eq para diferentes embalagens descartadas em aterro sanitário

Quanto à acidificação terrestre – indicador que visa quantificar o aumento antrópico do conteúdo ácido no solo, o que pode causar desequilíbrio na homeostase de sistemas biológicos afetando ciclos bioquímicos de algas e bactérias, por exemplo – o PS e papel cartão tiveram um desempenho análogo (sendo o PS ligeiramente mais danoso que o papel cartão), ambos com aproximadamente metade do impacto do APET (Gráfico 5). Novamente, a produção da resina poliméricas foi a etapa mais impactante, com mínimo impacto relativo da etapa de descarte. Para ambas as embalagens à base de termoplásticos, as principais emissões que contribuem para o impacto final são de dióxido de sulfúrico e óxidos de nitrogênio.

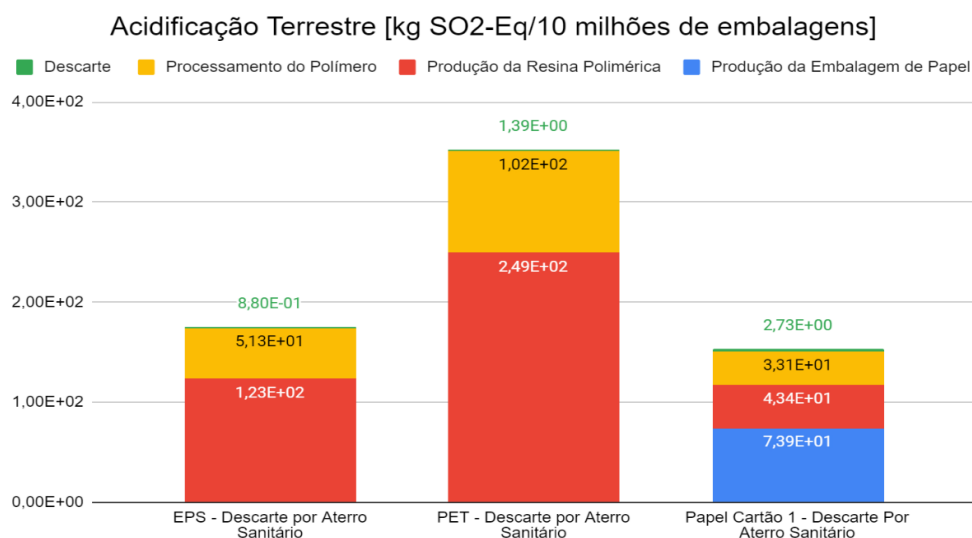


Gráfico 5: Impacto de Acidificação Terrestre em kg SO₂-Eq para diferentes embalagens descartadas em aterro sanitário

No caso da ecotoxicidade terrestre, o papel cartão mostrou-se a alternativa mais ambientalmente correta, comparado ao PS e o APET, ambos com impactos totais muito semelhantes quanto ao ciclo de vida completo. É interessante notar, porém, que a contribuição relativa de cada uma das etapas do PS e do APET são muito distintas, com contribuição da etapa de descarte de aproximadamente 60% e 1,4% respectivamente, como observado no Gráfico 6. Para ambas, esse impacto dá-se majoritariamente pelas emissões à base de Bromo; entretanto, esta é consideravelmente superior para a embalagem de PS. Já a embalagem de papel cartão teve a maior parte da sua contribuição total devido à produção da embalagem em si, com contribuições relativamente muito menores para todas as outras etapas consideradas no ciclo de vida.

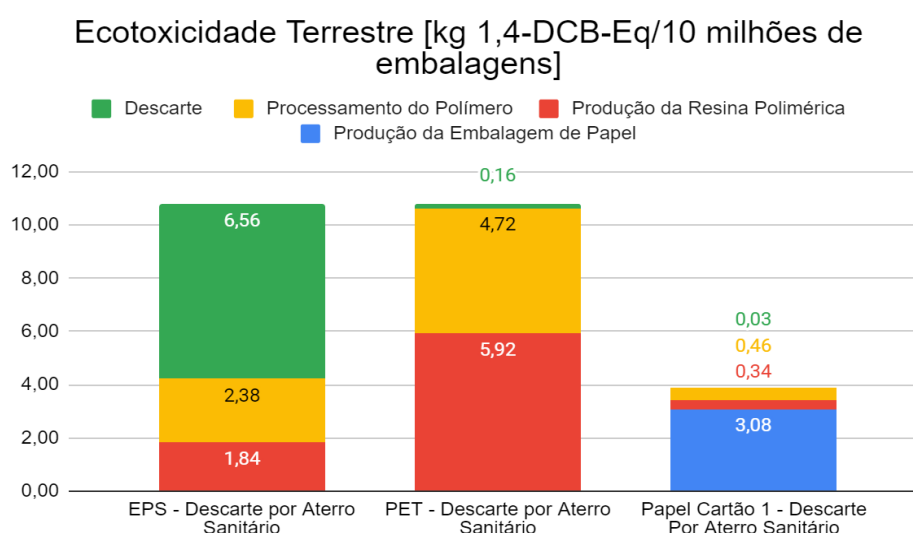


Gráfico 6: Impacto de Ecotoxicidade Terrestre em kg 1,4-DCB-Eq para diferentes embalagens descartadas em aterro sanitário

Por fim, tanto para ecotoxicidade marítima (Gráfico 7) como para ecotoxicidade de água doce (Gráfico 8), os resultados foram similares: o papel cartão apresentou o menor impacto, marginalmente inferior ao PS, e consideravelmente inferior ao APET (cerca de 16%). Para ambos os testes, o impacto de todas as etapas para o papel cartão contribuíram de forma homogênea, para o PS o maior contribuidor foi a etapa de descarte, e para o APET tanto as etapas de produção da resina como de descarte foram danosas para o valor final total.

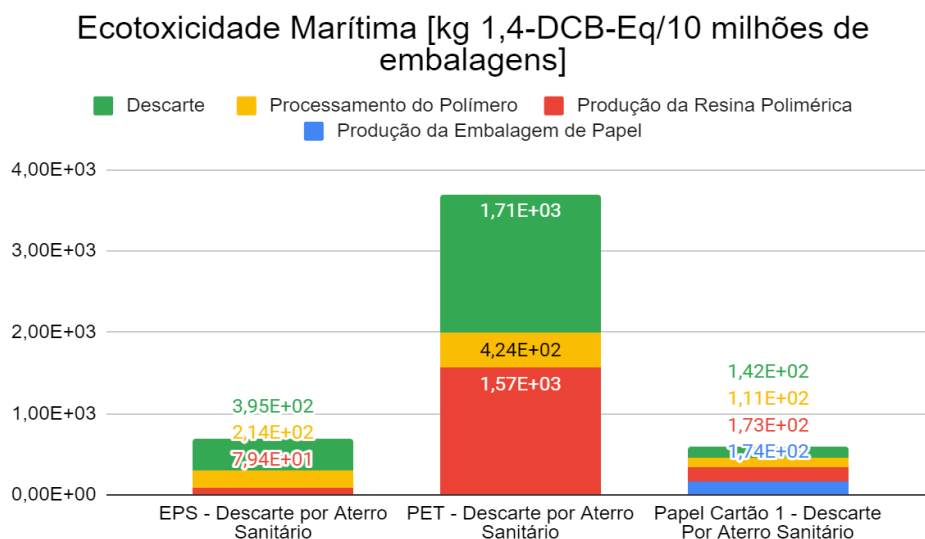


Gráfico 7: Impacto de Ecotoxicidade Marítima em kg 1,4-DCB-Eq para diferentes embalagens descartadas em aterro sanitário

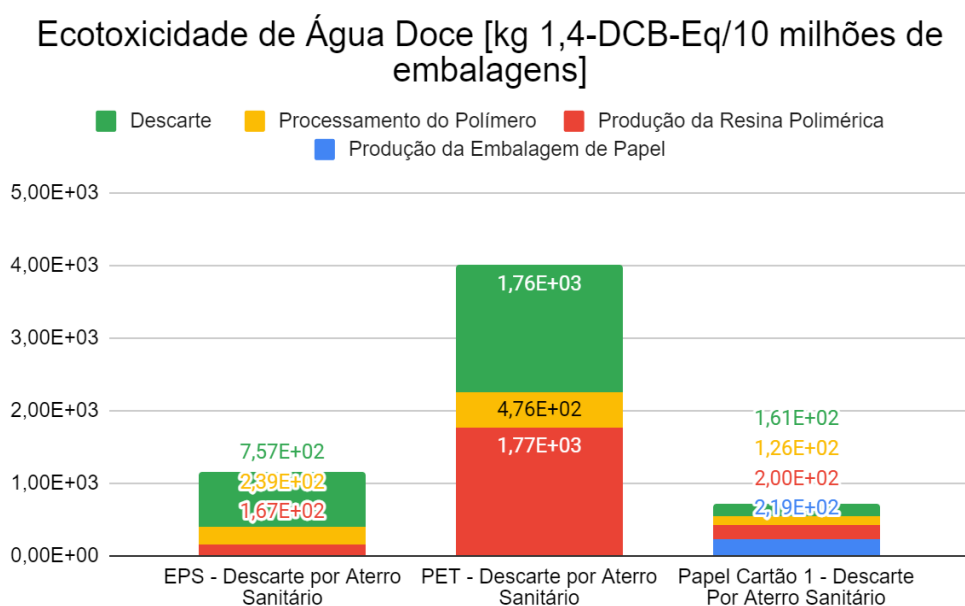


Gráfico 8: Impacto de Ecotoxicidade de Água Doce em kg 1,4-DCB-Eq para diferentes embalagens descartadas em aterro sanitário

6.1.2 Esgotamento de recursos

A embalagem cujo ciclo de vida apresentou o menor consumo de água foi a embalagem de EPS, com seu uso principalmente ocorrendo na etapa de processamento do polímero. Já a embalagem de papel cartão mostrou um consumo importante na etapa de produção do papel – o que é convergente com o esperado – entretanto o consumo de água na indústria de papel possui diversos usos e, portanto, alta rentabilidade e incentivo de reutilizá-la ao máximo. A

embalagem de APET mostrou alto consumo devido às etapas de produção da resina e processamento (Gráfico 9).

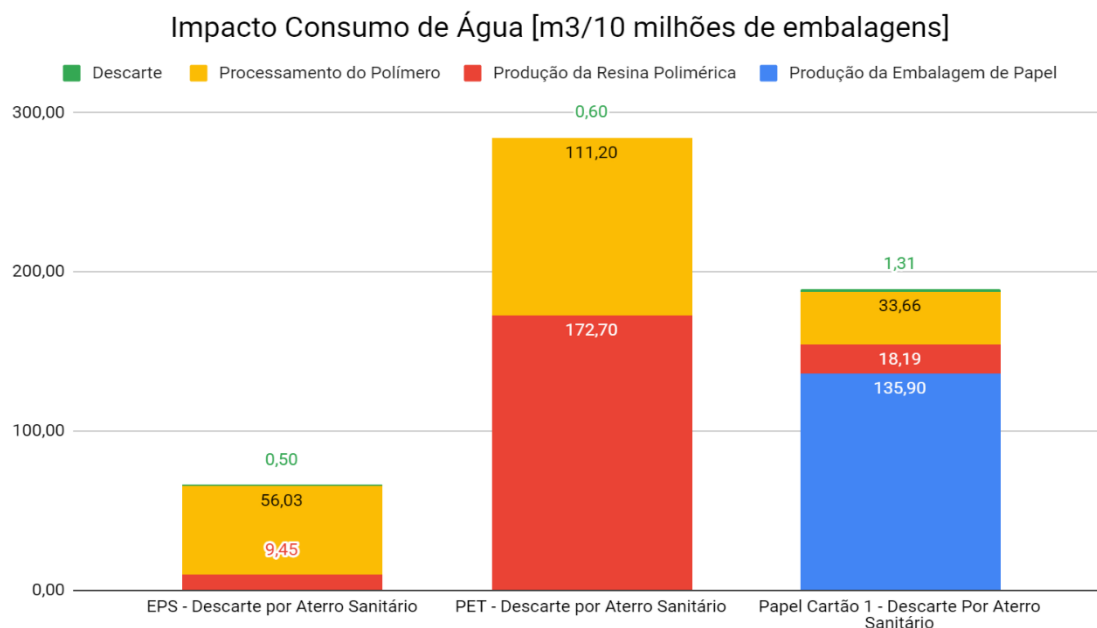


Gráfico 9: Impacto de Consumo de Água em m³ para diferentes embalagens descartadas em aterro sanitário

Estudos como o realizado por *Tandon et al.* (2014) analisando o consumo de água no ciclo de vida de garrafas PET também concluíram que a etapa com maior impacto era a de produção da resina de PET (61% dos 17 litros consumidos para a produção de uma garrafa de 1 litro foram atribuídos a etapa de produção da resina, convergente com os 60% encontrados no caso do estudo das embalagens). Vale ressaltar que este estudo, como o presente texto, não incluíram o transporte dentro do ciclo de vida. Além disso, *Franklin Associates* (2011) também analisaram os ciclos de vida para utensílios descartáveis para alimentação e afirmaram o uso consideravelmente inferior na produção de poliestireno comparado a materiais como o papel cartão, e que este uso estava primariamente concentrado nas etapas de termoformagem para resfriamento e eletricidade envolvidos com termoformagem. Ambas as observações são convergentes com os resultados obtidos nas modelagens aqui propostas.

No caso do consumo de terra, que contabiliza o uso de terras agrícola e urbanas, o fato que a produção da embalagem de papel cartão perpassa a etapa do plantio e colheita de biomassa de árvores torna este índice inevitavelmente unilateral quando comparamos embalagens à base de papel e plásticas (Gráfico 10). No caso, a embalagem de papel, devido à etapa de produção do corpo da embalagem, utiliza aproximadamente duas ordens de magnitude a mais que para as embalagens plásticas. A diferença entre o consumo de área para o EPS e

para o PET também é averiguada no artigo de *Maga et al.* (2019), porém não foram propostas hipóteses para esta diferença.

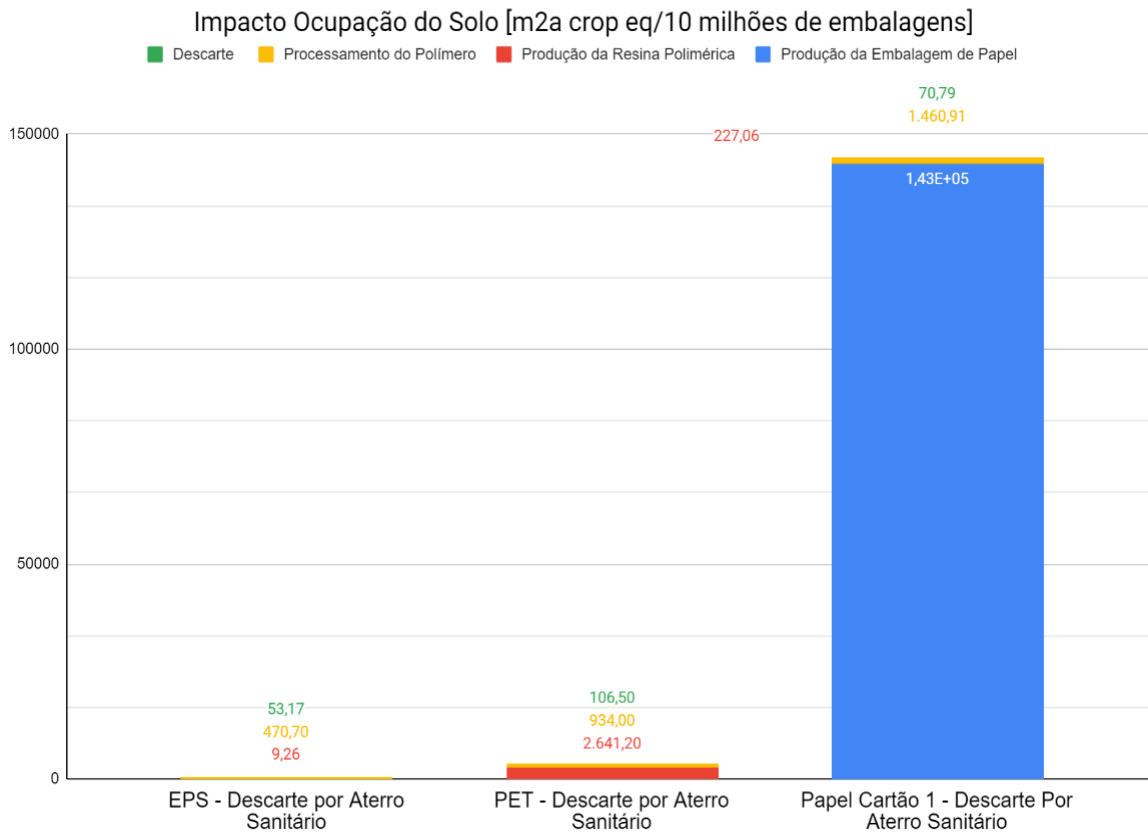


Gráfico 10: Impacto Uso do Solo em m²a-crop-Eq para diferentes embalagens descartadas em aterro sanitário

Com relação ao esgotamento de recursos fósseis (medidos em kg oil-eq), a embalagem de papel cartão apresentou um melhor desempenho (36% em relação à embalagem de PET), enquanto a embalagem de PS um desempenho intermediário (58%) (Gráfico 11). Em todos os casos, a produção da resina polimérica foi o principal fator, mesmo no caso da embalagem de papel onde a massa do corpo principal da embalagem era superior à massa da tampa de polipropileno. Quando comparados, a produção da resina de PET sozinha foi responsável por um impacto maior que o impacto total de todos os outros sistemas. Este alto valor relativo da produção da resina de PET com relação ao impacto total do ciclo de vida para o índice de esgotamento de recursos fósseis também está presente no trabalho de *Moretti et al.* (2021).

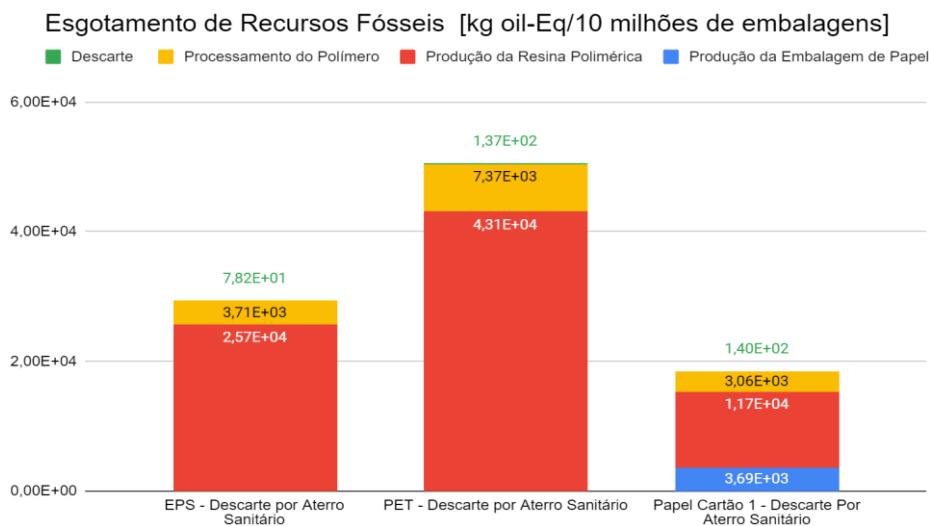


Gráfico 11: Impacto Esgotamento de Recursos Fósseis em kg oil-eq para diferentes embalagens descartadas em aterro sanitário

6.1.3 Saúde Humana

A categoria escolhida para o estudo da saúde humana foi a toxicidade em humanos. Ou seja, a medida analisa as emissões inculcidas no processo e as traduz para o impacto médio em kg de 1,4-diclorobenzeno (kg 1,4-DCB-eq).

O APET mostrou-se o mais danoso, sendo cerca de quatro vezes mais danoso que ambos PS e papel cartão. Para todos os sistemas, este indicador obteve contribuição significativa na etapa de descarte das embalagens. Porém, em termos absolutos, o impacto da embalagem de PET foi muito maior, configurando-se a embalagem mais tóxica para seres humanos em todas as etapas do ciclo de vida, como visto no Gráfico 12.

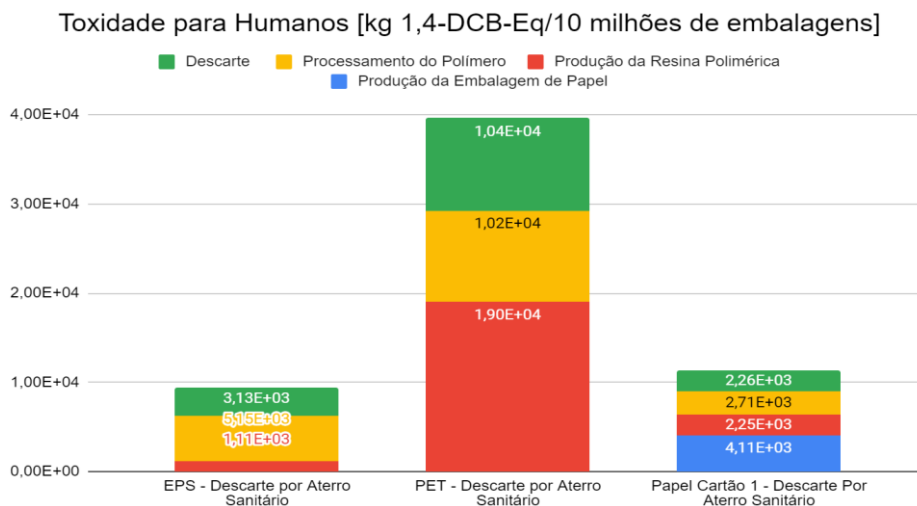
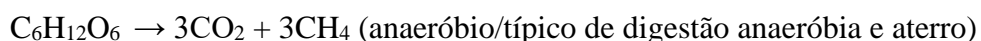
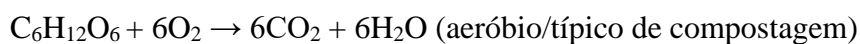


Gráfico 12: Impacto de Toxicidade Humana em kg 1,4-DCB-eq para diferentes embalagens descartadas em aterro sanitário

6.2 Diferentes cenários de fim de vida para as embalagens de Papel Cartão

Considerando a degradação da celulose como uma forma simplificada de interpretar o que ocorre em diferentes cenários de fim de vida para a embalagem de papel cartão, tem-se:



É importante notar, porém, que para além desta simulação, são ignorados outros processos bioquímicos - que dependem do tipo de micro-organismos, taxa de hidrólise das moléculas, pH, temperatura - como hidrólises sequenciais, acidogenesis, acetogenesis etc. Em situações reais, também há diversos outros materiais que compõem o material sendo aterrado, submetido à compostagem ou anaerobiamente digerido, o que pode alterar os mecanismos envolvidos.

Os indicadores calculados e expostos a seguir apresentam o resultado dos fluxos internos obtidos para a base de dados e provedores selecionados e buscam estimar o impacto global de cada forma de descarte (Ver apêndice C). Os gráficos mostram o impacto absoluto do descarte para a unidade selecionada à direita, e o valor relativo ao total (discutido na seção anterior) à esquerda.

6.2.1 Danos ao meio ambiente

Quanto ao aquecimento global, a não captação de gases de efeito estufa como o CH₄ e o CO₂ causam uma diferença expressivamente perceptível nos impactos estimados. Em aterro, a etapa de descarte contribui com 29% das emissões totais, enquanto para digestão anaeróbia - graças à captação e possíveis ganhos com produção de energia a partir do biogás - e compostagem industrial - devido à transformação da matéria e produção exclusivamente de CO₂ - diminuem drasticamente este impacto para 4,3% e 2,2% do impacto total, respectivamente (Gráfico 13). O impacto por digestão anaeróbica, por produzir primariamente CH₄, é mais danoso que o CO₂ como um gás de efeito estufa. Como visto no gráfico abaixo, os resultados foram convergentes com o teoricamente esperado.

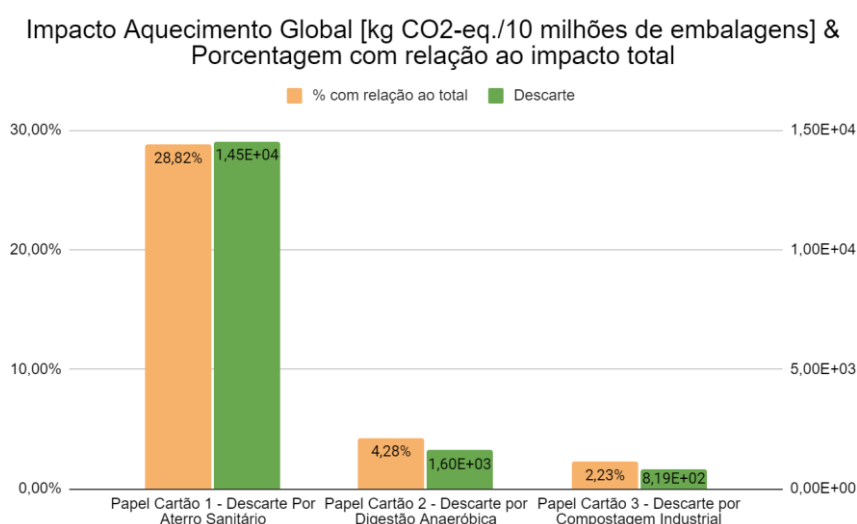


Gráfico 13: Impacto de Aquecimento Global em kg CO₂-eq e percentual com relação ao total para três cenários de descarte da embalagem de papel cartão

Quanto às emissões que contribuem para a destruição da camada de ozônio, em todos os cenários de fim de vida há uma contribuição de aproximadamente 2% para o impacto total, sem grandes alterações em função do descarte (Gráfico 14). A variabilidade pode advir tanto de aproximações do cálculo, como de fluxos secundários particulares a cada cenário de fim de vida. Em outras palavras, quanto à destruição da camada de ozônio, as diferentes rotas de descarte não afetam de forma significativa o impacto total.

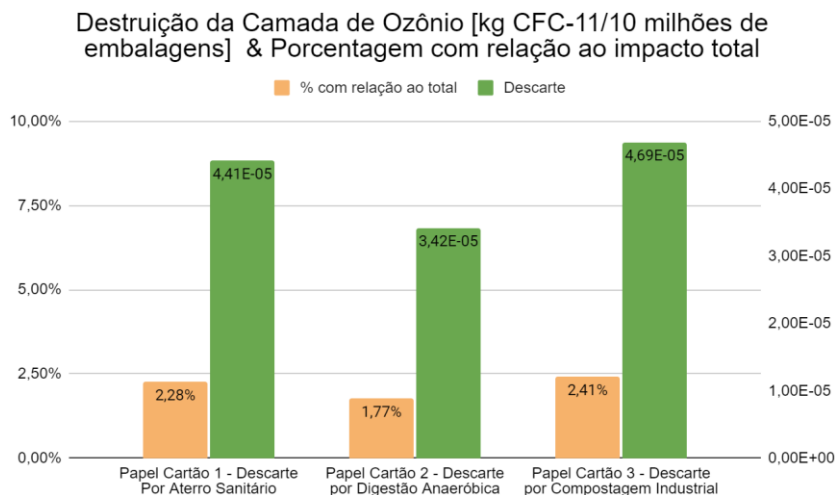


Gráfico 14: Impacto de Destruição da Camada de Ozônio em kg CFC-11-eq e percentual com relação ao total para três cenários de descarte da embalagem de papel cartão

Para eutrofização de água doce - em emissões de kg P-eq - não há grandes variações segundo o fim de vida, mantendo valores baixos mesmo considerando 10 milhões de embalagens, fluando em torno de 1% do total. Ao observar o Gráfico 15, é interessante notar como o impacto foi baixo tanto em termos de impacto absoluto como em termos de contribuição relativa ao total.

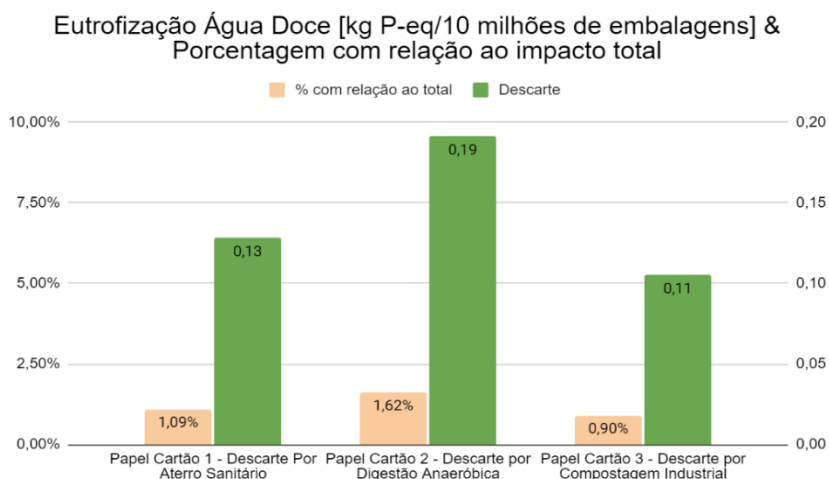


Gráfico 15: Impacto de Eutrofização de Água Doce em kg P-eq e percentual com relação ao total para três cenários de descarte da embalagem de papel cartão

Todavia, para eutrofização marítima, a escolha de um fim de vida diferente do aterro possui consequências importantes para o impacto total: no descarte por aterro sanitário, 42% das emissões totais são devido à etapa de descarte, ao passo que este valor cai para 0,7% e 2,2%

no caso de digestão anaeróbia e compostagem, respectivamente (Gráfico 16). Em outras palavras, a emissão relativa à etapa de descarte é cerca de 100 vezes menor para a digestão e 30 vezes menor para compostagem. Esta diminuição ocasiona uma atenuação importante no impacto total para essa categoria. Assim, como observado no gráfico a seguir, a escolha de rotas alternativas ao aterro sanitário possui um impacto relativo importante na eutrofização de ambientes marítimos.

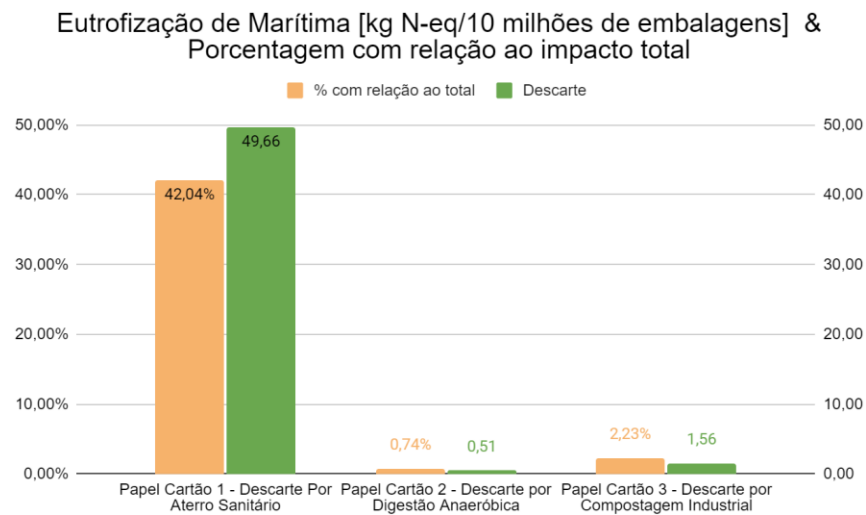


Gráfico 16: Impacto de Eutrofização Marítima em kg N-eq e percentual com relação ao total para três cenários de descarte da embalagem de papel cartão

Por fim, quanto à acidificação terrestre, a compostagem industrial teve o pior índice, contribuindo aproximadamente 10 vezes mais que as alternativas de descarte, contribuindo em 15,5% da produção de SO₂-eq frente aos aproximadamente 1,7% produzidos por aterro e digestão anaeróbia (Gráfico 17). Este resultado é convergente com o fato que a emissão de CO₂, produto primário da decomposição por compostagem da celulose, está mais relacionada à acidificação de ecossistemas que o CH₄, produto primário da digestão anaeróbica e do descarte em aterro sanitário de produtos à base de celulose.

Acidificação Terrestre - Descartes [kg SO₂-Eq/10 milhões de embalagens] & Porcentagem com relação ao impacto total

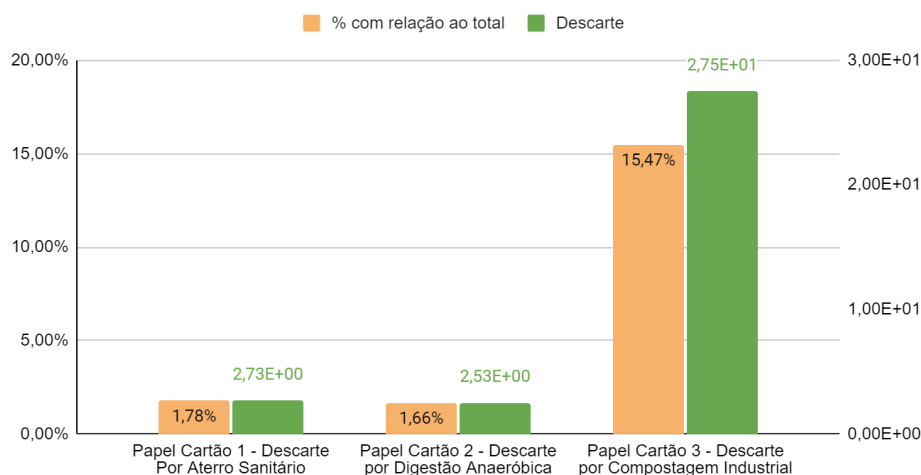


Gráfico 17: Impacto de Acidificação Terrestre em kg SO₂-eq e percentual com relação ao total para três cenários de descarte da embalagem de papel cartão

Para ecotoxicidade terrestre (Gráfico 18), a etapa de descarte do papel cartão não promove impactos significativos, não apresentando variação entre cada estratégia de descarte, nem contribuição significativa para o impacto total (este primariamente causado pela produção do papel).

Ecotoxicidade Terrestre [kg 1,4-DCB-Eq/10 milhões de embalagens] & Porcentagem com relação ao impacto total

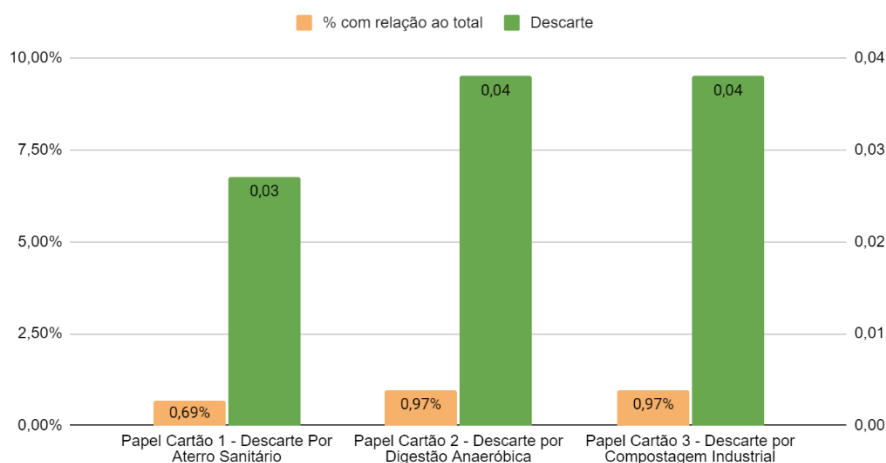


Gráfico 18: Impacto de Ecotoxicidade Terrestre em kg 1,4-DCB-eq e percentual com relação ao total para três cenários de descarte da embalagem de papel cartão

Finalmente, para ecotoxicidade de ambientes aquáticos - marítimo (Gráfico 19) e de água doce (Gráfico 20) - alternativas ao descarte por aterro apresentam melhorias significativas e quantitativamente semelhantes. Para ambos os casos, o aterro contribui com 24% da

ecotoxicidade total. E, com digestão e compostagem, este valor é 15 a 20 vezes inferior, contribuindo com aproximadamente 1,5% do total para ambas ecotoxicidades e ambos os cenários de descarte.

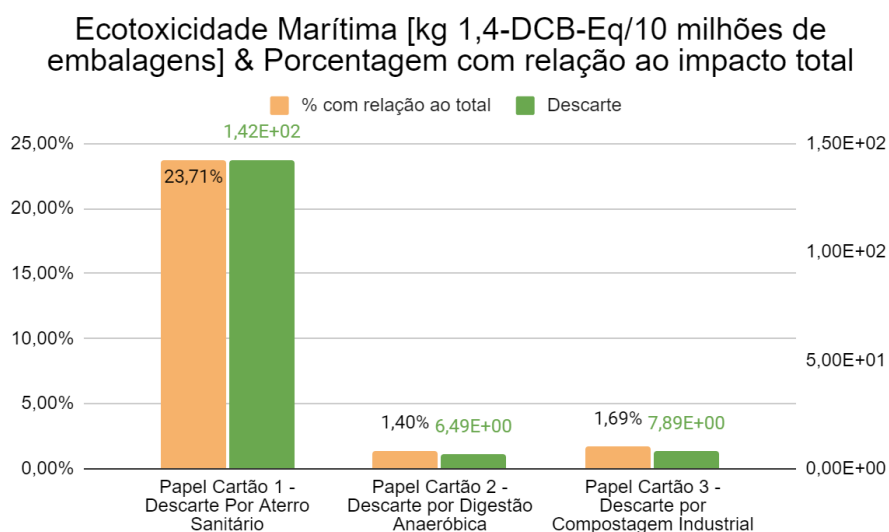


Gráfico 19: Impacto de Ecotoxicidade Marítima em kg 1,4-DCB-eq e percentual com relação ao total para três cenários de descarte da embalagem de papel cartão

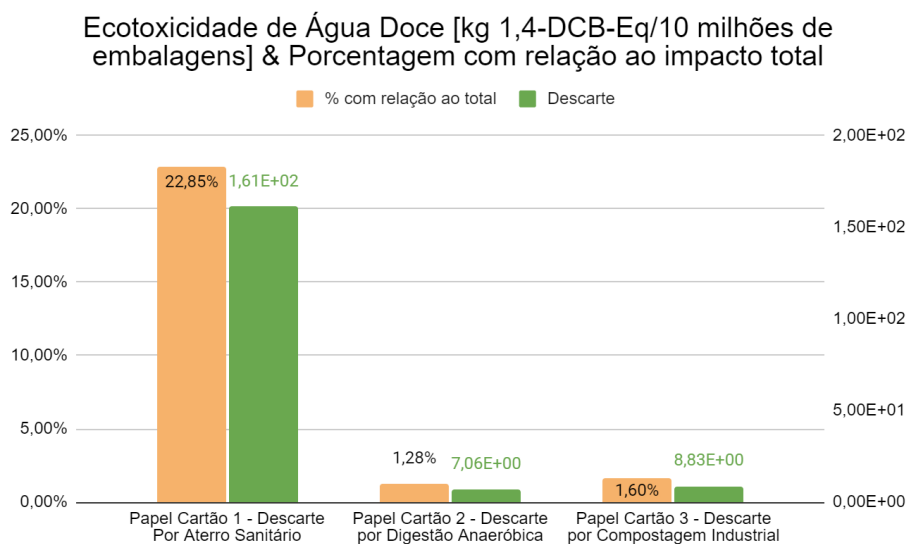


Gráfico 20: Impacto de Ecotoxicidade Marítima em kg 1,4-DCB-eq e percentual com relação ao total para três cenários de descarte da embalagem de papel cartão

6.2.2 Esgotamento de recursos

Como esperado, a digestão anaeróbica implica em um consumo de água superior à compostagem e aterragem, aproximadamente 5 vezes superior. Isto era esperado devido ao fato que a digestão anaeróbica é conduzida em ambientes de alta umidade relativa. Porém, mesmo

neste caso, a etapa do descarte não ultrapassa 4% do consumo de água total, principalmente dado que a produção da embalagem de papel cartão utiliza uma quantidade elevada de água, como é comumente o caso para produtos celulósicos (Gráfico 21).

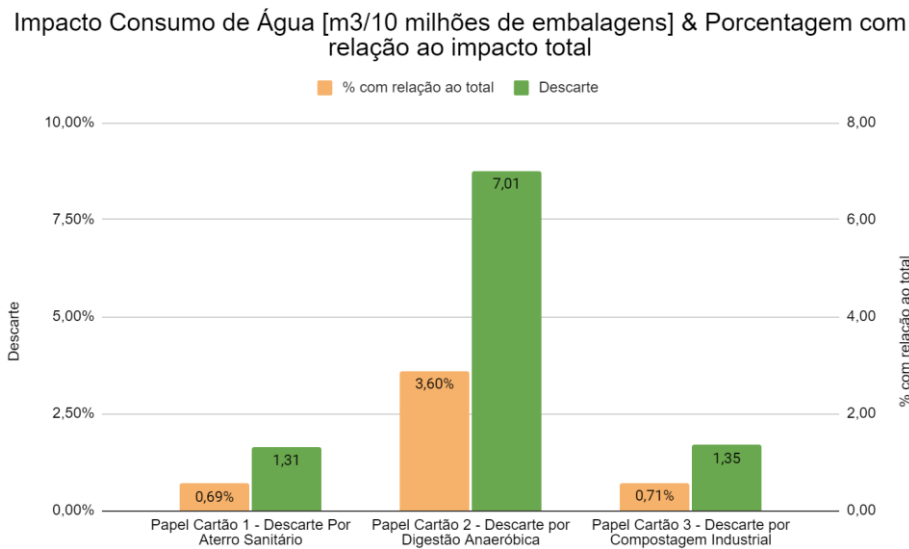


Gráfico 21: Impacto de Consumo de Água em kg m³-eq e percentual com relação ao total para três cenários de descarte da embalagem de papel cartão

O índice de uso da terra é totalmente dominado pela etapa de produção da embalagem de papel cartão, devido à necessidade de uma vasta área física para o plantio de árvores (Gráfico 10). Ou seja, embora a compostagem industrial utilize, em média, uma área superior, o impacto relativo da etapa de descarte não é muito expressivo, estando em torno de 0,03 e 0,1% da ocupação total de terras (Gráfico 22). Uma situação semelhante ocorre quando se analisa o impacto sobre o esgotamento de recursos fósseis (Gráfico 23). Este, por sua vez, é majoritariamente regido pelo consumo de energia e pelas etapas de síntese e transformação dos materiais poliméricos (Gráfico 11). Ou seja, a etapa de descarte não é a mais importante quando se trata de ocupação do solo, nem de esgotamento de recursos fósseis, como explicitado nos gráficos abaixo pelo impacto relativo da etapa de descarte.

Impacto Ocupação do Solo [m²a crop eq/10 milhões de embalagens] & Porcentagem com relação ao impacto total

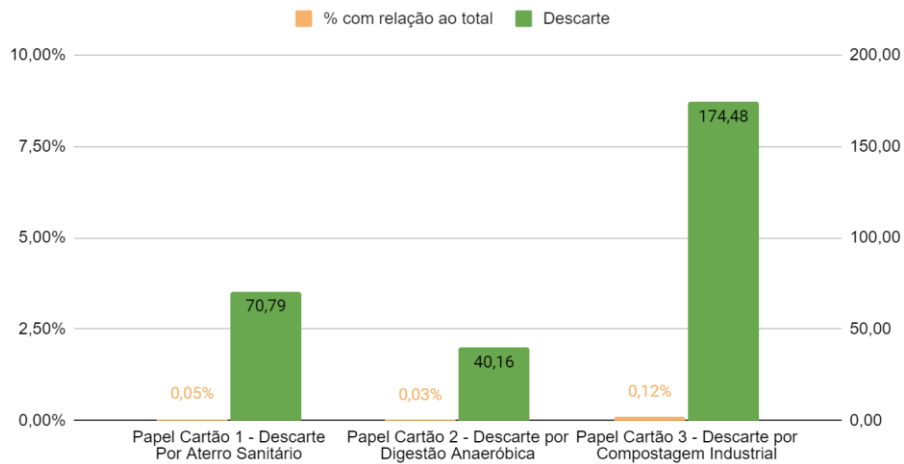


Gráfico 22: Impacto de Ocupação do Solo em m²a-crop-eq e percentual com relação ao total para três cenários de descarte da embalagem de papel cartão

Esgotamento de Recursos Fósseis [kg oil-Eq/10 milhões de embalagens] & Porcentagem com relação ao impacto total

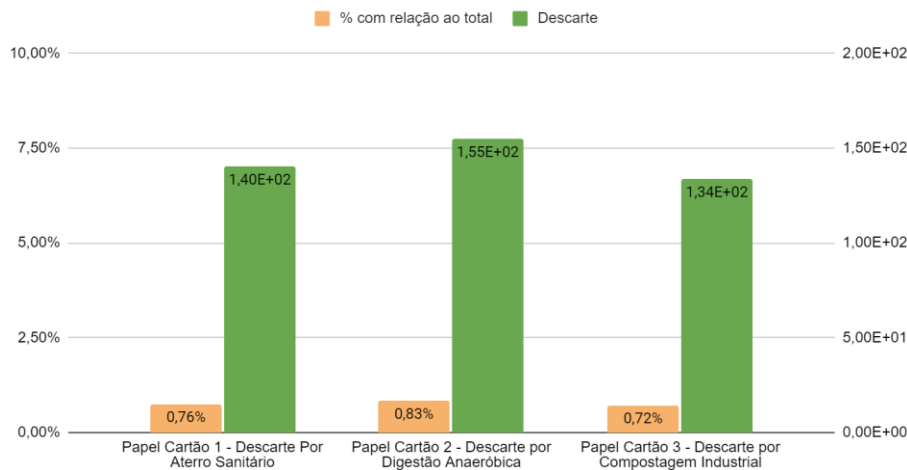


Gráfico 23: Impacto de Esgotamento de Recursos Fósseis em kg oil-eq e percentual com relação ao total para três cenários de descarte da embalagem de papel cartão

6.2.3 Saúde Humana

Devido principalmente à captação e controle mais efetivos oferecidos pelos métodos de digestão e compostagem, ambos apresentam melhorias significativas quanto ao impacto em toxicidade para humanos. No caso do descarte em aterro, este impacto correspondeu a aproximadamente um quinto do total. Alterando o fim de vida, é possível diminuir a toxicidade para humanos em até 10 vezes com digestão anaeróbica e 20 vezes para compostagem (Gráfico 24).

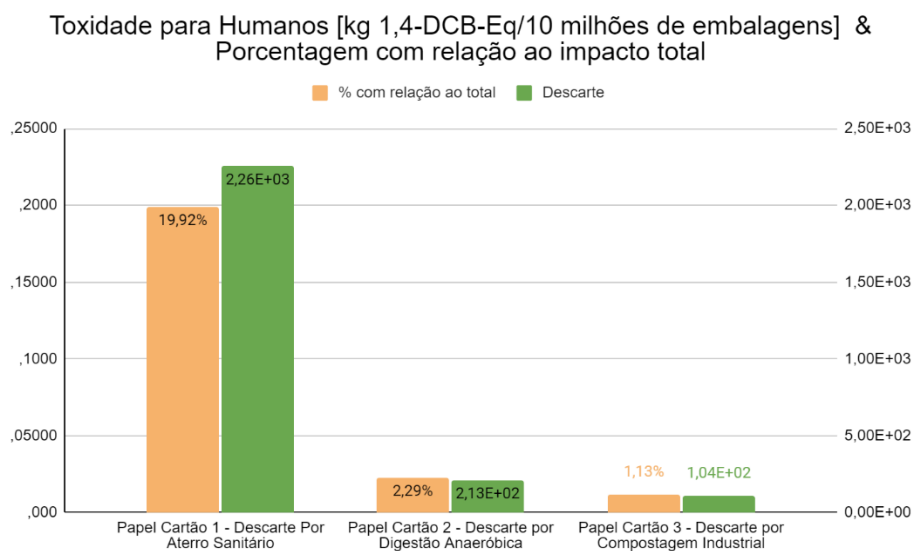


Gráfico 24: Impacto de Toxicidade Humana em kg 1,4-DCB-eq e percentual com relação ao total para três cenários de descarte da embalagem de papel cartão

7. CONCLUSÕES

Uma vez discutidos um a um, uma forma de visualizar comparativamente o impacto de todos os tipos de embalagem e cenários de descarte estudados é analisando o impacto relativo entre eles. Isto é, para cada índice, em 100% está a embalagem com o maior impacto, e o valor dos outros é o percentual com relação à esta. Este formato de analisar os resultados, comparando tanto os diferentes materiais, como os diferentes cenários de fim de vida para a embalagem de papel cartão estão dispostos no Gráfico 25.

A embalagem de PET com fim de vida em aterro sanitário teve o pior desempenho para todos os indicadores estudados, com exceção do índice de uso do solo - que possui uma contribuição desproporcionalmente alta na produção da embalagem de papel cartão devido à necessidade do plantio de árvores -, e ecotoxicidade terrestre - com contribuição semelhantemente danosa à embalagem de poliestireno. Ademais, a embalagem de poliestireno obteve os melhores resultados quanto à destruição da camada de ozônio, eutrofização de água doce, e esgotamento de recursos hídricos. Quanto aos outros impactos, a embalagem de papel cartão obteve os melhores resultados.

Observou-se que, para a embalagem de papel cartão, o impacto relativo ao descarte não foi o mais expressivo para múltiplas categorias; entretanto, para indicadores como aquecimento global, destruição da camada de ozônio, toxicidade para humanos, e ecotoxicidade marítima e

água doce a redução do impacto total foi expressiva. Vale notar também que a compostagem e digestão anaeróbia trazem vantagens importantes quanto à circularidade do material, visto que haverá reinserção da matéria em outros fluxos economicamente relevantes como a geração de fertilizante e produção de energia com o biogás, fatores que não foram quantificados no presente estudo. Finalmente, devido ao alto impacto da produção da resina de PET, futuras análises considerando a reciclagem do PET podem trazer novas observações pertinentes e configuram continuações possíveis para o presente estudo.

O estudo realizado espera poder contribuir com a tomada de decisão de estabelecimentos que utilizem embalagens para *delivery* de alimentos e que queiram orientar as escolhas de acordo com valores de sustentabilidade.

Contribuição Relativa para todos os indicadores analisados e todos os sistemas de embalagem

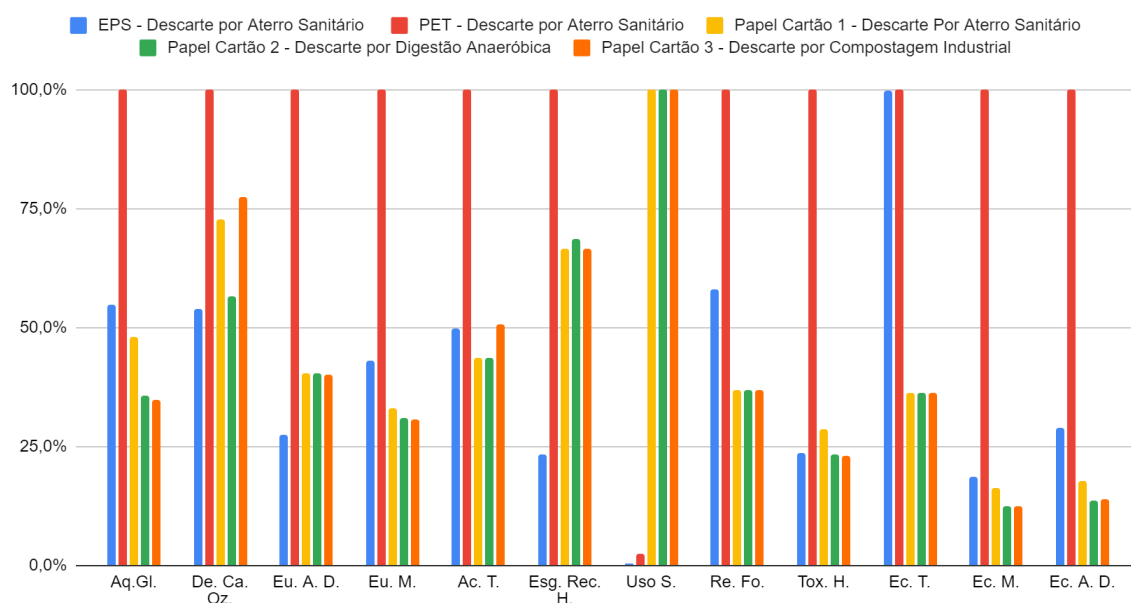


Gráfico 25: contribuição relativa de cada cenário analisado (todas embalagens e todos os cenários de descarte). **Aq. Gl.** - Aquecimento Global; **De. Ca. Oz.** - Destruição da Camada de Ozônio; **Eu. A. D.** - Eutrofização de Água Doce; **Eu. M.** - Eutrofização Marítima; **Ac. T.** - Acidificação Terrestre; **Rec. H.** - Esgotamento de Recursos Hídricos; **Uso S.** - Uso do Solo; **Re. Fo.** - Esgotamento de Recursos Fósseis; **Tox. H.** - Toxicidade para Humanos; **Ec. T.** - Ecotoxicidade Terrestre; **Ec. M.** - Ecotoxicidade Marítima; **Ec. A. D.** - Ecotoxicidade de Água Doce

REFERÊNCIAS

ABRE Associação Brasileira de Embalagem. **Estudo ABRE Macroeconômico de Embalagem e Cadeia de Consumo**. Apresentação março de 2021: retrospecto de 2020 e perspectivas para o ano de 2021. Disponível em: <<https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2020-2/>> (Acesso em: 22/09/2021)

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama 2020** <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>> (Acesso em: 04/11/2021)

ACERO, A. A. P.; RODRÍGUEZ, C.; CIROTH, A. “LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories”. **GreenDelta**, n. February 2014, p. 1–23.

ALTAN, Mihrigul. **Thermoplastic Foams: Processing, Manufacturing, and Characterization, Recent Research in Polymerization**, Nevin Cankaya, IntechOpen
Disponível em: <<https://www.intechopen.com/chapters/57279> > (Acesso em: 29/09/2021)

CANEVAROLO JR, S. V. Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. **2ª edição., São Paulo: Artliber**, 2002, p. 111-113, 121

IPEA Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos**. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>> (Acesso em: 23/09/2021)

STATISTA. **Brazil: number of online food delivery users 2017-2024 by segment**. Disponível em: <<https://www.statista.com/forecasts/1135443/brazil-online-food-delivery-users-by-segment>> (Acesso em: 22/09/2021)

GRUENWALD, G. Thermoforming: A Plastics Processing Guide, **Second Edition, CRC Press**, 1987 p. 123-126

KLEIN, P. Fundamentals of Plastics Thermoforming. **Morgan & Claypool Publishers**, 2009, p. 12-15

Amorphous Polyethylene Terephthalate Market by Application (Bottles, Films/Sheets, Food Packaging), End-use Industry (Food & Beverages, Pharmaceuticals), Region (North America, Europe, Asia Pacific, South America, Middle East & Africa) - **Global Forecast to 2022**
Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/amorphous-polyethylene-terephthalate-market-49340443.html>> (Acesso em: 22/09/2021)

E. M. SELKE, Susan; D. CUTLER, John. (2016) Plastics packaging properties, processing, application and regulations

BROOKE, M.; HICKS A. Expanded Polystyrene Life Cycle Analysis Literature Review: An Analysis for Different Disposal Scenarios, 2018
DOI: [10.1089/sus.2017.0015](https://doi.org/10.1089/sus.2017.0015)

Devesh, T.. (2002). Practical guide to polypropylene. Shawbury, U.K.: **Rapra Technology Ltd.**, 2002

Rosato, D. V, Rosato, D. V, Rosato, M. V.. THERMOFORMING. Plastic Product Material and Process Selection Handbook, 308–332., 2004

OCAMPO, L., CARREON, R., CARVAJAL, J.A., GALAGAR, K.J., GIALOLO, D.M., GULAYAN, M., INDIG, D., NUÑEZ, D.M., TAGISP, W.C., VALLECERA, J.M., VILLEGAS, Z. “Matrix-based life cycle assesment (MLCA) on polystyrene and recycled paper egg tray packaging” **Journal of Production Engineering**, vol. 18, 2015
< https://www.academia.edu/32936211/Matrix-based_life_cycle_assessment_MLCA_on_polystyrene_and_recycled_paper_egg_tray_packaging>

SAMRUK-KAZYNA, “**Global polypropylene market outlook**”, 2017 Disponível em <<https://www.sk.kz/upload/iblock/713/713c4a54b6fdb2183807bba0dc84cbb3.pdf>> Acesso em: 8/10/2021.

Aterro Sanitário: Suas Definições e Conceitos | Meio Ambiente - Cultura Mix.

Disponível em: <<http://meioambiente.culturamix.com/gestao-ambiental/aterro-sanitario-suas-definicoes-e-conceitos>>. Acesso em: 10/08/2021.

ROSATO, D. V, ROSATO, D. V, ROSATO, M. V., “Injection Molding Handbook” (DOI <https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/978-1-4615-4597-2>)

MADIVAL, S. AURAS R., SINGH, S. P., NARAYAN, R. “Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology” **Journal of Cleaner Production**, 2008

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.03.015>

ONGMONGKOLKUL, A., NIELSEN, P. H., NAZHAD, M. M., “Life Cycle Assessment of Paperboard Packaging Produced in Thailand” (2002)

< <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.593.132&rep=rep1&type=pdf>>

GHISLANE HENRIQUES PEREIRA VAN ELK, A. “Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos. Redução de Emissões na disposição final” **Coordenação de Karin Segala – Rio de Janeiro: IBAM**, 2007.

VERNA, V., JAIN, J. K., AAGRAWAL, R. “Life Cycle Assessment of Corrugated Box” **Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operation Management**, (2019)

U.S. Environmental Protection Agency. Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States. Tables and Figures for 2012. Washington, DC, 2014.

Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012_msw_dat_tbls.pdf> Acesso em: 02/09/2021

TAN, R. B. H., KHOO, H. H. “Life cycle assessment of EPS and CPB inserts: design considerations and end of life scenarios” **Chemical and Environmental Engineering Department, National University of Singapore**, 2005

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.09.003>

LYNWOOD, C. “Polystyrene: Synthesis, Characteristics and Applications” **Chemistry Research and Applications**, 2014

Injection Moulding World. Injection Moulding Process. Disponível em:

<<https://injectionmouldingworld.com/3-basic-steps-of-the-injection-molding-process/>>

(Acesso: 8 out. 2021)

Franklin Associates, ERG “Life cycle Inventory of foam polystyrene, paper-based and PLA foodservice products” **The plastic foodservice packaging group**, 2011

Low Energy Plastics Processing, **Reduced energy consumption in plastics engineering european best practice guide low energy plastics processing**, 2006

KIRWAN, M. J. Paper and Paperboard **Edited by Publishing. Consultant in Packaging Technology**, 37(2), 429, 2005

SINGH, J., KRASOWSKI, A. "Life cycle inventory comparison of paper and plastic based packaging system for strawberry distribution" **Packaging Program, Cal Poly State University, CA 204-221**, 2010

GOYAL, P. "LCA of paperboard" **Degree Thesis Material Processing Technology, ARCADA**, 2021
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/500391/LCA%20of%20paperboard.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

KLOCK, U., SULATO DE ANDRADE, A., ANZALDO HERNANDEZ J. Polpa e Papel **Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, 3a edição**, 2013

"The Advantages and Disadvantages of Anaerobic Digestion vs Composting", **The Anaerobic Digestion Community**, 2021 Disponível em: <<https://blog.anaerobic-digestion.com/anaerobic-digestion-vs-composting/>> Acesso em: 07/10/2021

"Aerobic Composting And Anaerobic Digestion", **Biocycle**, 2014 Disponível em: <<https://www.biocycle.net/aerobic-composting-and-anaerobic-digestion/>> Acesso em: 07/10/2021

MAGA, D., HIEBEL, M., ARYAN, V. "A Comparative Life Cycle Assessment of Meat Trays Made of Various Packaging Materials" **Fraunhofer Institute for Environmental, Safety, and Energy Technology**, 2019
DOI: <https://doi.org/10.3390/su11195324>

KOSKELA, S., DAHLBO, H., JUDL, J., KORHONEN, M., NIININEN, M. "Reusable plastic crate or recyclable cardboard box? A comparison of two delivery systems" **Journal of Cleaner Production**, 2014
DOI: [10.1016/j.jclepro.2014.01.045](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.045)

TANDON, A. S., KOLEKAR, N., KUMAR, R. "Water and Energy Footprint Assessment of Bottled Water Industries in India," **Natural Resources**, Vol. 5 No. 2, 2014, pp. 68-72. doi: 10.4236/nr.2014.52007.

FRANKLIN ASSOCIATES, A DIVISION OF ERG Prairie Village, Kansas "Life cycle inventory of foam polystyrene, paper-based and PLA foodservice products" Prepared for THE PLASTIC FOODSERVICE PACKAGING GROUP, February 4, 2011

MORETTI C., HAMELIN L. JAKOBSEN L. G., JUNGINGER M. H.,
STEINGRIMSDOTTIR M. M., HOIBYE L., SHEN L. “Cradle-to-grave life cycle assessment
of single-use cups made from PLA, PP and PET” **Resources, Conservation & Recycling** 2021

Apêndice A

Tabela: Fluxos de entrada e saída para a ACV da embalagem de APET

Processo	Tipo	Fluxo	Categoria	Quantidade (g)	Provedor
Produção da Embalagem	Entrada	extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline	2220: Manufacture of plastics products	25	extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline Cutoff, S - RoW
		polyethylene terephthalate, granulate, amorphous	2013: Manufacture of plastics and synthetic rubber in primary forms	25.0	polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - RoW
	Saída	PET embalagem		25.0	
Descarte em Aterro	Entrada	PET embalagem		25.0	
	Saída	PET embalagem		25.0	
		waste polyethylene	3821: Treatment and disposal of non-hazardous waste	25.0	treatment of waste polyethylene, sanitary landfill waste polyethylene Cutoff, S - CH

Apêndice B

Tabela: Fluxos de entrada e saída para a ACV da embalagem de EPS

Processo	Tipo	Fluxo	Categoria	Quantidade (g)	Provedor
Produção da Embalagem	Entrada	extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline	2220: Manufacture of plastics products	12.6	extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline Cutoff, S - RoW
		polystyrene, expandable	2013: Manufacture of plastics and synthetic rubber in primary forms	12.6	polystyrene production, expandable polystyrene, expandable Cutoff, S - RoW
	Saída	EPS embalagem		12.6	
Descarte em Aterro	Entrada	EPS embalagem		12.6	
	Saída	EPS embalagem		12.6	
		waste polystyrene	3821: Treatment and disposal of non-hazardous waste	12.6	treatment of waste polystyrene, sanitary landfill waste polystyrene Cutoff, S - RoW

Apêndice C

Tabela: Fluxos de entrada e saída para a ACV da embalagem de Papel Cartão

Processo	Tipo	Fluxo	Categoria	Quantidade (g)	Provedor
Produção da Embalagem	Entrada	liquid packaging board	1702: Manufacture of corrugated paper and paperboard and of containers of paper	15.2	liquid packaging board production liquid packaging board Cutoff, S - GLO
		polypropylene, granulate	2013: Manufacture of plastics and synthetic rubber in primary forms	6.3	polystyrene production, expandable polystyrene, expandable Cutoff, S - RoW
		injection moulding	2220: Manufacture of plastic products	6.3	injection moulding injection moulding Cutoff, S - RoW
	Saída	embalagem de papel cartão com tampa de polipropileno injetado		21.5	
Descarte em Compostagem Industrial	Entrada	embalagem de papel cartão com tampa de polipropileno injetado		21.5	
	Saída	embalagem de papel cartão		15.2	

		descartada			
		Tampa de PP descartada		6.3	
		biowaste	2394: Manufacture of cement, lime and plaster	15.2	treatment of biowaste, industrial composting biowaste Cutoff, S - RoW
Descarte em Digestor Anaeróbio	Entrada	embalagem de papel cartão descartada		21.5	
	Saída	Tampa de PP descartada		6.3	
		2394: Manufacture of cement, lime and plaster	2394: Manufacture of cement, lime and plaster	15.2	treatment of biowaste by anaerobic digestion biowaste Cutoff, S - RoW
Descarte em Aterro Sanitário	Entrada	embalagem de papel cartão descartada		21.5	
	Saída	Tampa de PP descartada		6.3	
		Waste Graphical Paper	3821: Treatment and disposal of non-hazardous waste	15.2	treatment of waste graphical paper, sanitary landfill waste graphical paper Cutoff, S - RoW

