



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CTG - CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LEONARDO FERREIRA DE FREITAS

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMBALAGENS TERMOFORMADAS DE
POLIPROPILENO E OS IMPACTOS GERADOS NO REPROCESSAMENTO**

RECIFE/PE

2023

LEONARDO FERREIRA DE FREITAS

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMBALAGENS TERMOFORMADAS DE
POLIPROPILENO E OS IMPACTOS GERADOS NO REPROCESSAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Orientador (a): Felipe Pedro da Costa Gomes

RECIFE/PE

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Freitas, Leonardo Ferreira de.

Avaliação do ciclo de vida de embalagens termoformadas de polipropileno e os impactos gerados no reprocessamento / Leonardo Ferreira de Freitas. - Recife, 2023.

51p

Orientador(a): Felipe Pedro da Costa Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2023.

1. Análise de Ciclo de Vida. 2. ACV. 3. Polipropileno. 4. Termoformagem. 5. Extrusão. 6. Reaproveitamento. I. Gomes, Felipe Pedro da Costa. (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

LEONARDO FERREIRA DE FREITAS

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMBALAGENS TERMOFORMADAS DE POLIPROPILENO E OS IMPACTOS GERADOS NO REPROCESSAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Aprovado em: 27/09/2023

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
FELIPE PEDRO DA COSTA GOMES
Data: 30/10/2023 13:12:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco



Documento assinado digitalmente
ANA PAULA LIMA PACHECO
Data: 31/10/2023 17:32:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Ana Paula Lima Pacheco (Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dra. Michelle Félix de Andrade (Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus que permitiu que eu tivesse determinação e saúde para cada obstáculo enfrentado durante o processo, me fazendo alcançar meus objetivos durante os estudos, mesmo quando eu acreditava que não era possível.

Aos meus pais e meu irmão, que sempre foram parte do processo de tudo que fiz na minha vida, me dando possibilidade de dar meus primeiros passos no mundo acadêmico e me incentivando a sempre querer e buscar mais. Por todos os ensinamentos e conselhos fornecidos.

À minha noiva, Shirlany, que esteve comigo em todo o processo, me guiando e incentivando, comemorando comigo cada vitória e cada passo dado, se tornando uma guia, sempre me fazendo ir além, para entregar sempre mais.

Aos meus grandes amigos Lucas Almeida, Danilo Zelaquett e Marcos Gomes, que sempre estiveram comigo, desde a infância, sendo pessoas que sempre acreditaram 100% no meu sucesso.

A Levi Mota, Kethellen Katharyne, Julia da Hora e Saulo Santos, que foram meus companheiros de faculdade, tornando cada período mais leve e divertido.

Ao meu gerente, Clóvis Pereira, que confiou em mim em todo o período, me dando oportunidades, conselhos e abertura para alcançar meus objetivos, se tornando uma inspiração pelo conhecimento e objetividade.

Aos meus colegas de trabalho, Luan Gabriel, Raphael Andrade, Ana Carolina, Matheus Matias, Ana Clara, Gessi Lima, Renato Gamba, Arthur Macedo, Victória Magno, Erick Silva e Jailton Falcão que tornaram a caminhada mais leve e me conduziram durante o processo, me fornecendo conselhos e conhecimento, me fazendo entender que eu não conseguiria e nem precisava fazer tudo sozinho.

E por fim, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes por ter aceitado me orientar e por toda paciência e atenção.

RESUMO

O mercado de plásticos vem crescendo a cada ano, em contrapartida o ciclo de vida de embalagens plásticas atualmente é bastante curto, dando abertura ao aumento da demanda de novas embalagens no mercado, como é o caso das embalagens termoformadas. Para a produção de termoformados, é necessário que a indústria tenha a resina advinda de uma petroquímica. Esta resina passa pelo processo de extrusão, aquecendo o material e deixando-o maleável para produção de bobinas e por fim chega ao setor de termoformagem. O reaproveitamento deste material é um dos pontos cruciais para reduzir os impactos advindos dessa alta demanda de plástico, sendo uma alternativa simples, viável e econômica para as indústrias de transformação plástica. Este estudo analisou o ciclo de vida de uma produção de embalagens termoformadas através do software openLCA, onde é possível, utilizando uma base de dados aberta, simular as emissões e impactos ao longo da cadeia produtiva.

Palavras-chave: Análise de Ciclo de Vida; ACV; Polipropileno; Termoformagem; Extrusão; Reaproveitamento

ABSTRACT

The plastics market has been growing every year; however, the lifespan of plastic packaging is currently quite short, leading to an increase in the demand for new packaging in the market, such as thermoformed packaging. To produce thermoformed packaging, the industry requires resin obtained from a petrochemical company. This resin goes through the extrusion process, heating the material and making it malleable for the production of coils and finally reaches the thermoforming sector. The reuse of this material is one of the crucial points to reduce the impacts arising from this high demand for plastic, being a simple, viable and economical alternative for the plastic transformation industries. This study analyzed the life cycle of thermoformed packaging production using openLCA software, where it is possible, using an open database, to simulate emissions and impacts throughout the production chain.

Keywords: Life Cycle Assessment; LCA; Polypropylene; Thermoforming; Extrusion; Reuse

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Bases do desenvolvimento sustentável	12
FIGURA 2 - Estrutura do polipropileno.....	15
FIGURA 3 - Extrusora monorosca para extrusão de chapas planas.....	17
FIGURA 4 - Composição interna da rosca de uma extrusora.....	18
FIGURA 5 - Esquema interno de uma bomba de engrenagem.....	19
FIGURA 6 - Moinho de facas.....	21
FIGURA 7 - Modelo circular de economia.....	22
FIGURA 8 - Máquina termoformadora ILLIG RDK 80.....	23
FIGURA 9 - Esquema de atuação de molde.....	23
FIGURA 10 - Etapas da análise de ciclo de vida.....	26
FIGURA 11 - Tela inicial do software openLCA.....	29
FIGURA 12 - Fluxo do processo utilizado para análise de ciclo de vida.....	30
FIGURA 13 - Especificação de entradas e saídas da matéria prima.....	31
FIGURA 14 - Entradas e saídas do processo de extrusão.....	32
FIGURA 15 - Sistema elaborado no openLCA.....	32
FIGURA 16 - Produção de CO2 equivalente no processo produtivo, de PP, para cada formulação.....	34
FIGURA 17 - Consumo energético por processo na produção de embalagens, de PP, termoformadas por formulação	35
FIGURA 18 - Consumo energético por recurso.....	36
FIGURA 19 - Consumo de água por cada processo.....	37
FIGURA 20 - Percentual máximo de aparas por formulação para equivalência de emissões.....	39
FIGURA 21 - Consumo energético por recurso considerando aparas no processo produtivo.....	40
FIGURA 22 - Consumo de água por processo considerando aparas no processo produtivo.....	41

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Categorização dos parâmetros do ACV.....	27
--	----

LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise de Ciclo de Vida
°C	Graus Celsius
CO ₂	Dióxido de Carbono
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ISO	International Organization for Standardization
kg	Quilograma
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
PCR	Resina Pós Consumo
PP	Polipropileno
ton	Toneladas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	12
2.2 DEMANDA POR EMBALAGENS PLÁSTICAS	14
2.3 POLIPROPILENO.....	15
2.4 EXTRUSÃO PLANA	16
2.5 REPROCESSAMENTO	20
2.6 TERMOFORMAGEM.....	22
2.7 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.....	24
2.7.1 Fases do ACV.....	25
3.1 SOFTWARE	28
3.1.1 Base de dados.....	29
3.2 DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA	30
3.2.1 Definição do objetivo da ACV	30
3.2.2 Definição de escopo e fronteiras	30
3.3 ANÁLISE DOS CENÁRIOS	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
5. CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS.....	43

1. INTRODUÇÃO

Os plásticos, em sua usabilidade, têm trazido diversos benefícios para a sociedade em diversos setores, como alimentício e o setor de saúde, sendo cada vez mais visado devido à sua aplicabilidade e baixo custo. A produção do plástico se expandiu após a revolução industrial, onde, por exemplo, a necessidade de transportar alimentos com segurança gerou a demanda e o surgimento de novas máquinas forneceu meios para tal expansão (COSTA, ROCHA-SANTOS e DUARTE, 2020).

Entretanto, pelos mesmos motivos de serem benéficos, os plásticos têm trazido diversos impactos negativos, sua alta aplicabilidade e baixo custo, tornaram o plástico acessível de forma a gerar uma demanda excessiva pelo material trazendo impactos ambientais negativos, principalmente pelos materiais com ciclo de vida curto, onde são descartados pela população logo após seu uso, como as sacolas plásticas (COSTA, ROCHA-SANTOS e DUARTE, 2020).

Um dos impactos causados pelo aumento da produção dos plásticos é o aumento da emissão de gases de efeito estufa, onde cerca de 4% da produção mundial está relacionada à produção e conversão do material plástico. Outro fator, que afeta diretamente os seres vivos, é a disposição inadequada dos rejeitos, afetando principalmente o ambiente marinho, onde diversos animais o têm consumido em forma de micro plásticos, que já foram encontrados até mesmo no sangue humano (OECD, 2023; EUROPA, 2022).

Os impactos negativos do plástico ainda são recentes, porém vem crescendo de forma desmedida devido à alta demanda. Em 1950, a produção anual de plástico representou cerca de 1,5 milhão de toneladas, já em 2021 essa produção subiu para 309,7 milhões de toneladas, com tendência de aumento para os próximos anos, podendo chegar a 1.100 milhões de toneladas até 2050 (GENEVA ENVIRONMENT NETWORK, 2019).

Desta forma, alternativas têm sido desenvolvidas de forma a reduzir os impactos ambientais negativos, que envolve não somente a produção industrial, mas também a disposição destes materiais pela população, através da reutilização e da reciclagem. Estas atividades não só reduzem os impactos negativos como também

geram avanço na economia circular, que é parte do desenvolvimento sustentável (COSTA, ROCHA-SANTOS e DUARTE, 2020).

Uma gestão eficiente dos resíduos é uma das formas para alcançar processos mais sustentáveis, onde não se faz necessário eliminá-los completamente, mas saber utilizá-los ao favor da população (OLIVEIRA E OLIVEIRA FILHO, 2018).

Os 3R's é um dos conceitos que ajuda na gestão dos resíduos, onde trata basicamente de três fatores: Reduzir, Reutilizar e Reciclar. A redução se trata de uma conscientização a respeito da necessidade de algo tendo em vista suas consequências, como energia, excesso de embalagens descartáveis, podendo trocar a compra de um alimento em embalagem plástica por uma compra a granel em embalagem própria, por exemplo. A reutilização se trata de outra função para um produto sem precisar mudar seu formato, como utilizar embalagens usadas para acondicionar outros alimentos na geladeira. E a reciclagem se trata de fazer a transformação do produto em um outro para que tenha uma utilização semelhante ou não. (OLIVEIRA E OLIVEIRA FILHO, 2018).

Objetivo Geral

O presente trabalho busca analisar o processamento do polipropileno na fabricação de embalagens através de uma avaliação do ciclo de vida, utilizando o reprocessamento do material como alternativa para redução dos impactos ambientais.

Objetivos Específicos

- Identificar as principais fontes geradoras de impactos ambientais ao longo da cadeia produtiva das embalagens
- Estimar a redução dos impactos ambientais com o reprocessamento
- Avaliar como as possíveis perdas durante o reprocessamento gerados pela variação do material podem afetar os impactos ambientais gerados na transformação do plástico

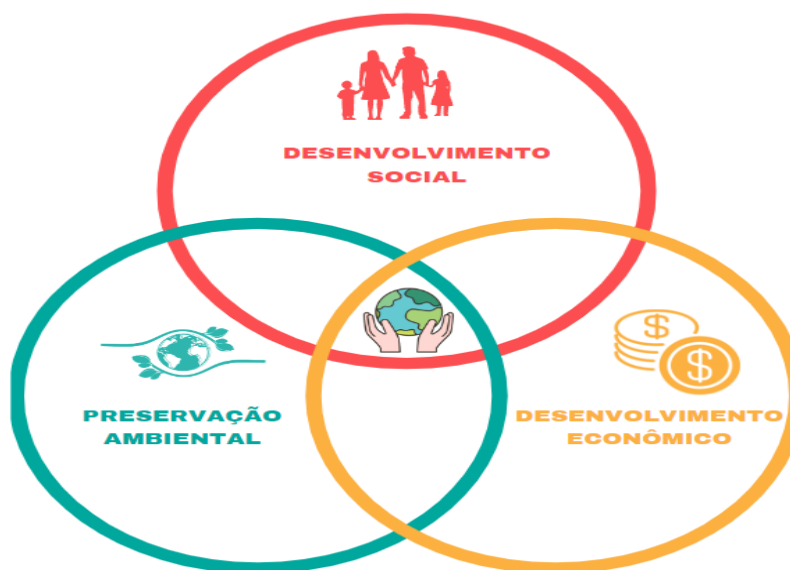
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Os ativos ambientais são de grande importância, fornecendo suporte e condições básicas insubstituíveis para os seres vivos, como por exemplo o ar, a água, as condições climáticas de cada local, a estabilidade e previsão do tempo, entre outros diversos fatores. Estes ativos podem ser renováveis, como a água e podem ser não renováveis, como o petróleo, desta forma a manutenção do ecossistema se torna de grande importância para garantia dos recursos (SUGAHARA e RODRIGUES, 2019).

O desenvolvimento sustentável é baseado em três pilares, que devem coexistir, que são: Preservação Ambiental, desenvolvimento social e desenvolvimento econômico. A figura 1 evidencia as bases do desenvolvimento sustentável.

Figura 1 - Bases do desenvolvimento sustentável



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, SOARES e D'AVILA, 2018.

O desenvolvimento social está atrelado à responsabilidade e ao comprometimento de práticas sociais com ética, visando tomar decisões que sejam positivas às gerações atuais e futuras. A preservação ambiental é direcionada às ações que estão relacionadas direta ou indiretamente com o meio ambiente, seja através de cuidados ambientais diretos ou mesmo pela redução do consumo, um dos atos bioéticos dos 3R's. Já o desenvolvimento econômico está relacionado à utilização consciente dos recursos naturais, energia elétrica, de forma a reduzir o consumo,

diminuir custos, não afetando a vida das pessoas e sem perder produtividade (OLIVEIRA, SOARES e D'AVILA, 2018).

A busca da sustentabilidade tem sido um dos grandes desafios do século, tentando alinhar o grande avanço da ciência com a manutenção dos processos mais agressivos para o meio ambiente. O crescimento da indústria é um dos fatores mais importantes quando se fala em efeito estufa (COMERLATTO, 2004).

O Brasil, no decênio logo após a segunda guerra mundial obteve um crescimento de 122% na produção industrial. Nesse mesmo período, foi criada a Petrobrás, empresa brasileira de petróleo e gás, combustíveis fósseis mais utilizados e fontes de emissões de gases de efeito estufa (COMERLATTO, 2004; AZEVEDO, 2023).

Embora seja uma grande fonte de emissão de gases que impactam o meio ambiente, a Petrobrás vem reduzindo suas emissões. Entre 2015 e 2022 foi registrada uma diminuição de 39% das emissões absolutas operacionais de gases de efeito estufa, buscando um desenvolvimento sustentável (PETROBRÁS, 2023).

O desenvolvimento sustentável tem sido uma pauta cada vez mais comum no cotidiano de pessoas e empresas, sendo de grande interesse econômico, ambiental e social, seja para a população, companhias ou mesmo o governo. A união dos interesses forma o desenvolvimento sustentável e a contribuição de cada grupo é crucial para sua manutenção (MOTTA, 2013).

Com a revolução industrial, um crescimento desenfreado foi iniciado, gerando novas relações de comércio entre países. Os altos níveis de desenvolvimento e expansão dos meios de produção tiveram como consequência o aumento da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Com a ECO-92, a ideia de desenvolvimento sustentável foi tomada por alguns países, garantindo proteção do meio ambiente e práticas sustentáveis (SILVA e RODRIGUES, 2015; IGNACIO, 2023).

A indústria do plástico, por exemplo, obteve um alto crescimento desde o surgimento do plástico. Esse crescimento foi dado pela capacidade de processamento do material, pelo baixo custo e pelas suas propriedades mecânicas, podendo ser utilizados em embalagens, painéis de carros, computadores, smartphones, eletrodomésticos etc. (ABIPLAST, 2018).

2.2 DEMANDA POR EMBALAGENS PLÁSTICAS

Uma expansão no mercado de alimentos embalados tem sido observada nos últimos anos, com o objetivo de levar uma maior segurança alimentar, tempo de prateleira e reduzindo desperdícios. A previsão é que o mercado de alimentos embalados atinja 23,78 trilhões de reais até 2027, com crescimento de 6,5% ao ano (REVISTARURAL, 2020).

No Brasil, o plástico representa uma das principais movimentações de exportação de embalagens no geral, onde no primeiro semestre de 2019 correspondeu a 31,6% da exportação, apenas atrás de embalagens metálicas. O plástico possui diversas características que o põe entre os principais materiais para produção de embalagens por serem facilmente moldáveis, com fácil impressão, como offset e rotogravura, por exemplo (KAN e MILER, 2022).

Por ser barato e amplamente utilizado em diversas aplicações, o PP tem fornecido ao mercado soluções plásticas no ramo de embalagens, por exemplo, sendo altamente promissor principalmente pelas suas propriedades físicas, estabilidade térmica e baixo custo. Esses fatores conduzem holofotes na resina de PP, que apresentam aumento de demanda ano a ano, onde entre 2015-2021 tiveram crescimento 3,17% ao ano (ALSABRI, TAHIR e AL-GHAMDI, 2022; SILVA, 2022).

Este crescimento pode gerar diversas soluções inteligentes para o mercado, mas diversos impactos ambientais são gerados neste processo, pois o ciclo de vida atual do plástico é curto onde a taxa de reciclagem do polipropileno no mundo atualmente é baixa, com menos de 2% do material pós consumo sendo reciclado, e à medida que a demanda por mais embalagens aumenta, é necessário novas abordagens no mercado para contornar a situação (ALSABRI, TAHIR e AL-GHAMDI, 2022).

A análise de ciclo de vida é uma ferramenta que pode auxiliar no entendimento dos impactos, tendo como base o estudo de todas as etapas de vida de um material, esta análise contribui para a expansão de alternativas e conhecimento da redução dos impactos através deste cenário (MILER e KAN, 2022).

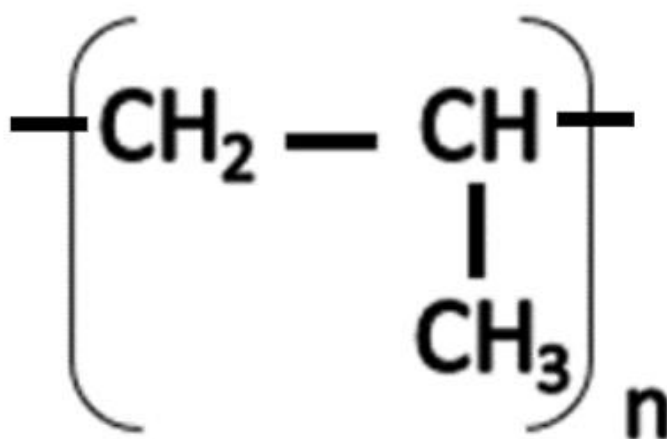
Em 2023 houve o início das negociações para o tratado dos plásticos, que ocorreu em Paris, onde foi discutida a limitação da produção de plásticos, visando responsabilidade com o meio ambiente e com a saúde humana, e favorecendo a reciclagem como meio efetivo para manter o plástico no mercado (VOLCOVICI, 2023).

Entender a gravidade do uso excessivo do plástico é o primeiro passo para a conscientização, tornando isto um papel de todos. Dados do “Panorama dos Resíduos Plásticos” estimam que em 2022 o Brasil gerou 64 kg de plástico por habitante, sendo de 52kg o consumo médio de plástico por habitante no Brasil, segundo a CNN Brasil, (BOCCHINI, 2023; MALLMANN, 2022).

2.3 POLIPROPILENO

O polipropileno é um termoplástico cristalino, composto por propenos, que possui um peso molecular elevado e que possui diversas propriedades mecânicas que são favoráveis para sua vasta utilização (HARADA, 2021). A figura 2 representa a molécula do polipropileno.

Figura 2 - Estrutura do polipropileno



Fonte: Adaptado de RODA, 2023

Uma das características que favorecem o crescimento da utilização do polipropileno é o seu baixo custo, sua boa processabilidade e sua alta resistência ao impacto, aliado também à boas resistências química e mecânica. Devido a estes

fatores, a demanda pela resina tem aumentado ano a ano para produção de embalagens, peças automotivas e componentes elétricos, por exemplo. Sua processabilidade permite ser aplicado aos processos de: Extrusão, Injeção, Termoformagem, Moldagem por sopro e Rotomoldagem (GILES JR, WAGNER JR e MOUNT III, 2005).

De acordo com Moretti, Junginger e Shen (2020), o polipropileno corresponde a quase 20% do total de plásticos consumidos na Europa, sendo um dos mais utilizados e com previsão de demanda de 88 milhões de toneladas até 2026. Esta alta demanda por plásticos e o crescente estudo sobre as mudanças climáticas, a análise de ciclo de vida se tornou ferramenta importante para desenvolvimento de estudos.

Plásticos de base biológica, por exemplo, se tornaram atrativos em relação aos plásticos petroquímicos, onde através de blendas, ou mesmo 100% biológico, é possível reduzir a demanda pelo plástico convencional. Em seu estudo, Moretti, Junginger e Shen (2020), analisaram o polipropileno produzido a partir do óleo de cozinha, avaliando seus impactos em comparação com o PP convencional. No estudo, o pp produzido a partir do óleo demonstrou uma redução de impacto 62% em mudanças climáticas e 86% do uso de combustíveis fósseis em relação à resina petroquímica.

Entretanto, o polipropileno produzido por combustíveis fósseis é o método de produção mais comum, tendo em vista a facilidade tecnológica para produção em massa, desta forma, fazer o aproveitamento para redução de demanda por novas resinas ainda é uma das formas mais eficazes. Em seu estudo de ACV, Saleem e colaboradores (2023) avaliaram o impacto da produção de pellets de reproprocessamento, produzidos a partir da extrusão de resíduos plásticos. A avaliação demonstrou uma redução de emissões de carbono de 22,6% e de 11-44% de outros impactos ambientais em relação à produção de novas resinas, demonstrando benefícios do uso de reaproveitamento.

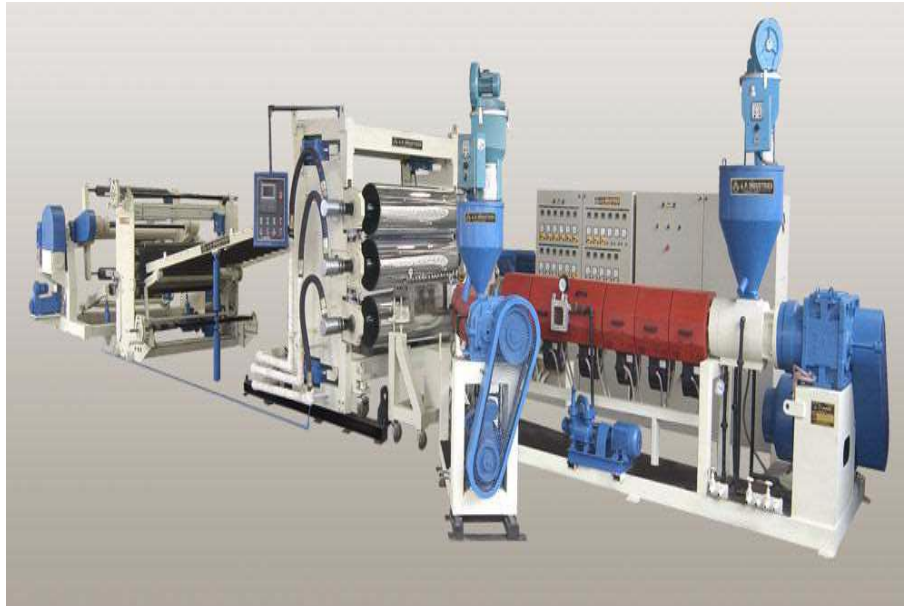
2.4 EXTRUSÃO PLANA

No processo de extrusão de termoplásticos é muito comum o conceito de reutilização. A extrusão consiste em um processo de produção contínua onde temos

a presença de uma rosca sem fim, envolta em um cilindro, ou canhão, a qual plastifica o polímero e faz com que seja forçado contra uma matriz (HARADA, 2021).

A figura 3 representa o modelo de uma extrusora monorosca para extrusão de chapas planas.

Figura 3 - Extrusora monorosca para extrusão de chapas planas



Fonte: BRASKEM, 2022.

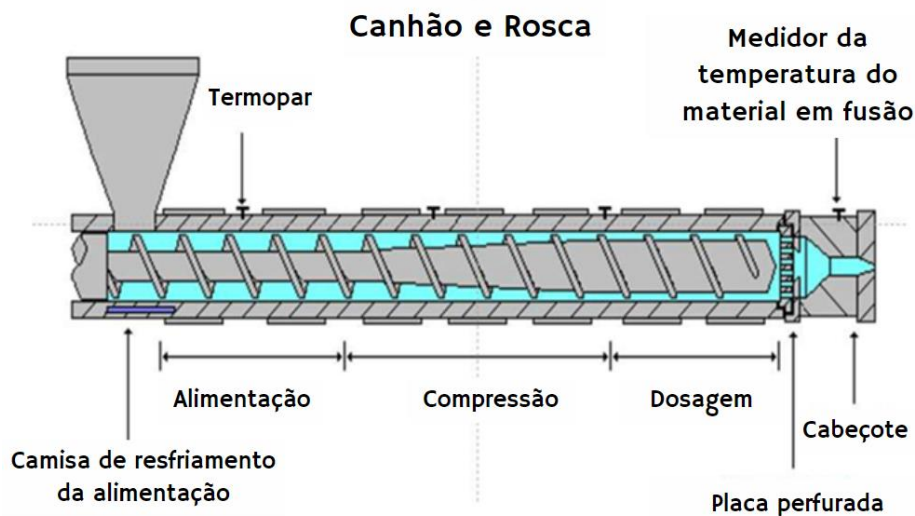
O canhão possui dosadores gravimétricos que realizam a sucção do material e transportam até o funil de alimentação, onde a resina desce por gravidade até a primeira zona do canhão (MAIS POLÍMEROS, 2023).

É possível dividir o canhão da extrusora em três diferentes zonas:

- Alimentação: onde temos a entrada das resinas pelo alimentador
- Plastificação: onde o material é fundido e parcialmente homogeneizado
- Dosagem: onde é feita a homogeneização e a manutenção da vazão do material

A figura 4 representa cada zona dentro da rosca de uma extrusora.

Figura 4 – Composição interna da rosca de uma extrusora



Fonte: HARADA, 2021

Cada zona contribui de uma forma específica, garantindo que o extrudado saia conforme na saída da matriz (MAIS POLÍMEROS, 2023).

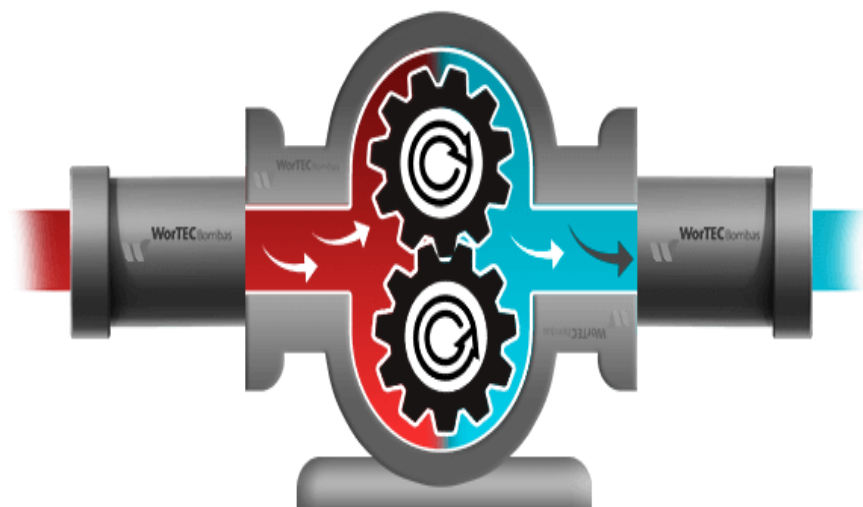
Antes da chegada na matriz, o material passa por uma bomba de engrenagem, onde mantém o fluxo constante de material. A bomba de engrenagem tem uma ação primordial dentro do processo, evitando os pulsos que podem ser advindos do canhão e aumentando a pressão na saída do material (GILES JR, WAGNER JR e MOUNT III, 2005).

As bombas de engrenagem são bastante utilizadas principalmente quando os fluidos apresentam alta viscosidade, sendo necessário manter a pressão do material constante. A resina de polipropileno, por exemplo, é fundida dentro do canhão e possui alta viscosidade (WORTECBOMBAS, 2022).

A pressão constante do material é necessária para que não se tenha falhas no material extrudado advindos da variação do processo devido a falhas ocasionadas por pulsos de plástico, variando a vazão de material que é encaminhado para a matriz (GILES JR, WAGNER JR e MOUNT III, 2005).

A figura 5 representa o esquema bomba de engrenagem.

Figura 5 - Esquema interno de uma bomba de engrenagem



Fonte: WORTECBOMBAS, 2022

Na figura 5 é possível notar o sentido de rotação das engrenagens, trabalham contra o sentido do fluxo de material. Neste processo, parte do material que passa pelas engrenagens retorna, lubrificando-as e evitando desgaste, não utilizando óleo no processo (WORTECBOMBAS, 2022)..

A matriz pode ter diversos formatos, e o produto assumirá o formato da matriz em sua saída. A matriz plana, por exemplo, tem um formato linear, dessa forma o extrudado assumirá o formato de uma chapa, que é acondicionado em forma de bobinas (INNOVA, 2019).

Após a matriz, a chapa passa por um sistema de resfriamento, onde se tem calandras dispostas próximas à matriz. Normalmente é utilizado um conjunto de três cilindros, onde pode-se ter uma saída *upstack* ou *downstack*. Na saída *upstack* o extrudado atravessa os rolos superior e central e faz a saída do sistema de resfriamento pelo rolo inferior, obtendo pouco contato com a calandra superior. Na saída *downstack* acontece o contrário, o extrudado sai da matriz atravessando os rolos inferior e central e faz a saída do sistema de resfriamento pelo rolo superior (INNOVA, 2019).

O sistema de resfriamento se apresenta como uma das etapas mais importantes do processo, necessitando um bom controle para que assim se tenha propriedades conforme o que foi solicitado. O resfriamento pode atuar no brilho do material, onde um rolo excessivamente frio fará um resfriamento brusco e a chapa se

tornará opaca. Outros fatores como transparência e orientação também são afetados pela temperatura (BRASKEM, 2022; GILES JR, WAGNER JR e MOUNT III, 2005).

A orientação também é influenciada pela velocidade dos rolos puxadores, etapa subsequente do resfriamento. Os rolos puxadores fazem o estiramento da chapa, guiando-a até a etapa de embobinamento, onde a chapa circunda um tubo assumindo o formato de uma bobina (HARADA, 2021).

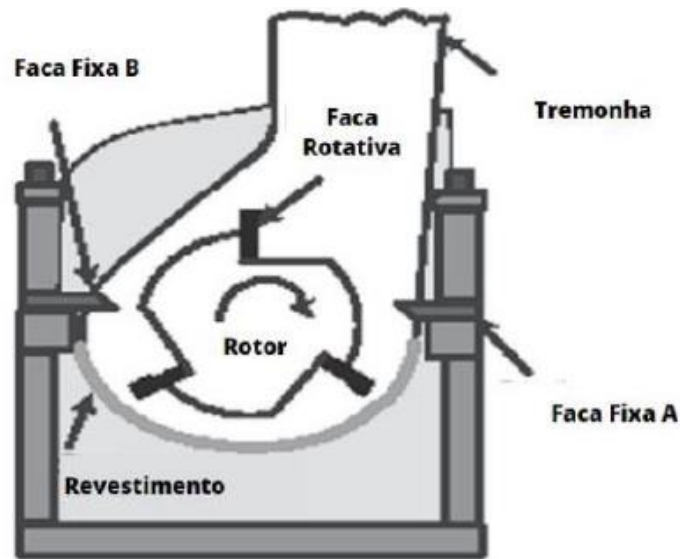
2.5 REPROCESSAMENTO

Uma vez iniciado o processo de extrusão, pode-se obter produtos conformes ou não conformes. O material conforme é aquele que atingiu o resultado esperado obtendo todas as características necessárias para o processo subsequente. Já os não conformes são os materiais que não atingiram as características necessárias, e não serão utilizados no processo seguinte, sendo levado para um moinho, para que assim consiga atingir um estado a qual possa ser reprocessado. O material gerado no moinho, o moído, possui características próximas à resina virgem, desta forma, é possível fazer sua reutilização no processo, tornando-o mais barato e mais sustentável, uma vez que é feita uma redução na necessidade de mais resina virgem. (MOISES E ZANINI, 2018).

Além do material não conforme, o refile também é um material que pode ser reprocessado. No processo de extrusão com matriz plana, as laterais apresentam variações de forma que a largura de uma chapa não se mantém uniforme, desta forma, antes de chegar no embobinador, que fará o acondicionamento da chapa, as laterais são cortadas em pequenas fitas de cada lado, a qual é chamado de refile. Este refile deve ter o tamanho ideal para o processo de moagem, desta forma, ele não deve ser estreito demais, para que se tenha mais controle do corte após a formação da chapa, e nem pode ser largo demais para que não comprometa o funcionamento do moinho de facas, pois um refile largo pode levar à um excesso de força do motor para moagem do material ou mesmo levar ao entupimento do moinho (HARADA, 2021).

A figura 6 representa o esquema de um moinho de facas

Figura 6 – Esquema Moinho de facas



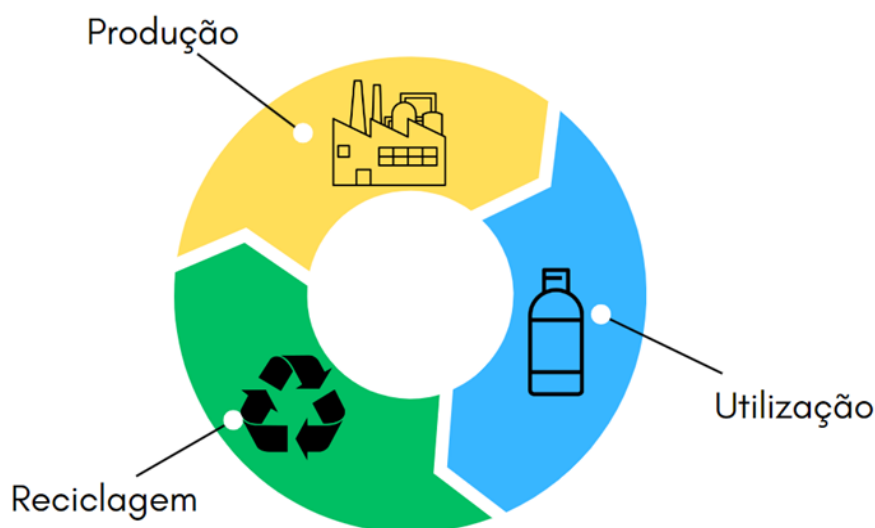
Fonte: Adaptado de GILES JR, WAGNER JR e MOUNT III, 2005

No entanto, o reprocessamento do polímero pode gerar uma degradação oxidativa, com perda de algumas propriedades mecânicas, como resistência ao impacto por exemplo. Outro fator é o amarelamento do material, que pode ser amplificado pelo reprocessamento (MARTINS *et al.*, 2019).

O reprocessamento e a reciclagem entram no conceito de economia circular que chega para minimizar estes impactos, sendo uma alternativa à usual ideia da economia linear, onde a matéria prima é extraída para seguir o fluxo produtivo até a obtenção do produto final e após seu consumo temos um encerramento da cadeia. Já na economia circular, tem-se a ideia de reaproveitamento, não havendo um encerramento dessa cadeia, mas criando um ciclo onde compõe a reciclagem, como a reciclagem mecânica e a reciclagem química. A reciclagem mecânica consiste na moagem do material, sendo basicamente uma transformação física, mudando o formato com que a matéria vai se encontrar, sofrendo degradações termomecânicas durante o processo. Já a reciclagem química está relacionada a despolimerização do material, gerando monômeros, sendo uma boa via para economia circular pois reduz a degradação do material (PAYNE, MCKEOWN e JONES, 2019).

A figura 7 representa o modelo circular de economia -

Figura 7 - Modelo circular de economia



Fonte: Adaptado de PAYNE, MCKEOWN e JONES, 2019

A concepção da economia circular mantém a matéria prima sempre em circulação, sem que haja necessidade de produção de matéria prima virgem, compactuando com o tratado dos plásticos, preservando o meio ambiente e fornecendo destino ao material que seria descartado em natureza no conceito de economia linear (PAYNE, MCKEOWN e JONES, 2019).

Entretanto é necessário entender os impactos da reutilização do plástico na natureza. Segundo Xiang e colaboradores, no reprocessamento do plástico ocorre a emissão de compostos orgânicos voláteis que se envolvem em reações fotoquímicas, produzindo gases como ozônio ao nível do solo, que tem alto poder oxidativo. Além disso, os compostos orgânicos voláteis podem induzir doenças respiratórias, afetando diretamente a população (XIANG *et al.*, 2022; HOMENS *et al.*, 2021).

2.6 TERMOFORMAGEM

A termoformagem é um processo que procede a extrusão, onde as bobinas de chapas extrudadas são matéria prima para produção das termoformadoras. No processo de termoformagem, o material é aquecido novamente para que atinja certa maleabilidade, o chamado ponto de amolecimento, para que assim, o molde possa

fazer sua atuação com alta pressão e injeção de ar comprimido para que o material obtenha o formato do molde, um formato de peça acabada (NASCIMENTO, 2017).

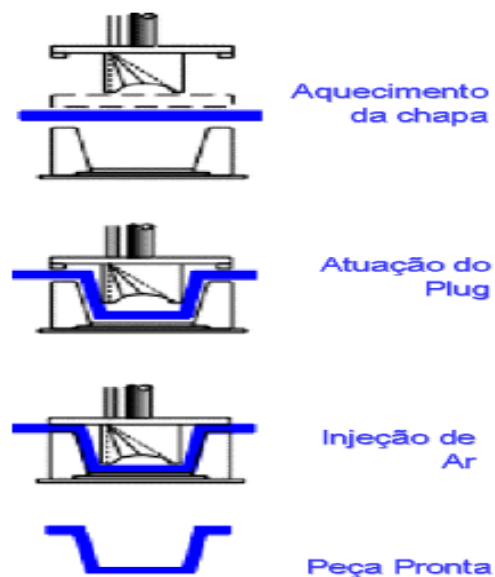
As figuras 8 e 9 representam, respectivamente, uma máquina termoformadora ILLIG RDK 80 e o esquema de atuação do molde na termoformagem.

Figura 8 - Máquina termoformadora ILLIG RDK 80



Fonte: DIRECTINDUSTRY, 2023

Figura 9 - Esquema de atuação de molde



Fonte: NASCIMENTO, 2017

O processo de termoformagem é um dos mais utilizados no Brasil para produção de embalagens alimentícias, e controlar a alta demanda pela utilização do plástico é essencial para que se tenha um bom desenvolvimento sustentável. A termoformagem gera resíduos que são inerentes ao processo, as chamadas grelhas, que são geradas durante a ação mecânica do molde, onde as peças formadas são destacadas da chapa aquecida, deixando resíduo de chapas que não foram aproveitados pelo espaço do molde (MATIAS, 2022).

Em torno de 50 - 65% da chapa é aproveitada no processo de termoformagem, restando assim, 35 - 50% de resíduos para o processo. Esse resíduo normalmente é levado à um moinho, seja acoplado na própria termoformadora, como para um moinho externo, para que seja feito um reaproveitamento do material, retornando para o processo de extrusão, como forma de moído ou regranulado (MATIAS, 2022; NASCIMENTO, 2017).

2.7 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

Para reconhecimento dos impactos ambientais, a análise de ciclo de vida (ACV) surgiu como uma ferramenta de auxílio para levantamento de dados, sendo capaz de realizar um estudo da cadeia produtiva e seus efeitos ambientais, desde a coleta dos recursos naturais até o fim da cadeia produtiva com o produto acabado, gerando indicadores de sustentabilidade ou mesmo um planejamento estratégico ambiental para uma empresa. Este planejamento estratégico ambiental pode gerar alternativas, a partir da análise do ciclo de vida, para que um processo de alto impacto ambiental possa ser menos maléfico ao meio ambiente. As embalagens plásticas, por exemplo, são um dos componentes que mais impactam o meio ambiente, devido ao seu tempo de decomposição e baixo tempo de ciclo, normalmente sendo descartado logo após sua utilização. (ACV BRASIL, 2023).

Além do plástico, em sua cadeia produtiva, gerar diversos gases nocivos à atmosfera, o descarte inadequado de resíduos se apresenta como um fator agravante para sua utilização e encontrar meios para reduzir esses impactos vem se tornando cada vez mais importante. Uma estratégia adotada, é a reciclagem, que pode ser entendida como uma transformação de materiais em fim de ciclo ou de descarte para se tornar outro produto, e isso resulta em economia de energia, preservação de recursos naturais e manutenção do meio ambiente (PERON, 2019).

Segundo a Valgroup (2023) podemos definir a reciclagem em quatro tipos:

- Reciclagem primária: Onde é realizada a reciclagem do material dentro da própria indústria geradora do resíduo para reaplicação em novos produtos para mesma aplicação. Por exemplo, os resíduos gerados durante *setups*, que vão para o moinho e retornam ao processo posteriormente.
- Reciclagem secundária: Onde é realizada a reciclagem mecânica do material advindo de descartes externos, seja do consumidor ou de outra indústria, para serem inseridos novamente em processo após lavagem e moagem.
- Reciclagem terciária: Onde é realizada a reciclagem química do resíduo, sendo realizada uma transformação química para formação de um novo material a partir dos monômeros gerados.
- Reciclagem quaternária: Onde é feita a recuperação energética do resíduo, transformando-as em produtos de alto valor energético.

Outra estratégia que pode ser adotada para um processo mais sustentável é a reutilização, onde, diferentemente da reciclagem, o material não irá passar por um processo de transformação, desta forma, irá ser utilizado na forma em que ele se encontra no estado atual do processo.

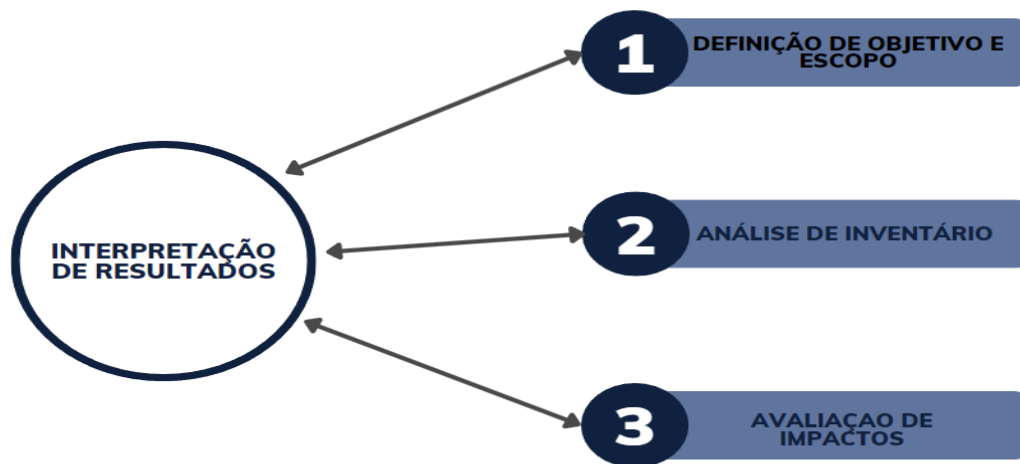
2.7.1 Fases do ACV

A análise de ciclo de vida segue a norma NBR ISO 14040, onde é definida todas as etapas necessárias para o desenvolvimento de uma análise, para que seja transparente e padronizado.

Os padrões de ACV basicamente constituem de quatro etapas, desta forma, uma análise comparativa com outros estudos pode ser realizada, seja para um processo específico ou para um comparativo “do berço ao túmulo”, onde toda a cadeia de processo produtivo será avaliada, entretanto não leva em conta questões sociais ou mesmo econômicas, fornecendo apenas uma visão ambiental dos processos e seus impactos (ABNT, 2009).

A figura 10 representa as etapas que constituem a análise de ciclo de vida.

Figura 10 - Etapas da análise de ciclo de vida



Fonte: Adaptado de ABNT (2009)

2.7.1.1 Definição de objetivo e escopo

Segundo ABNT (2009), o escopo de uma análise de ciclo de vida depende do que está sendo estudado e da finalidade do estudo, entendendo as motivações que geraram o tema e o público-alvo a qual o estudo está sendo direcionado. Definir bem o escopo do estudo é essencial para que o estudo seja eficaz o suficiente para atender ao máximo a ideia inicialmente proposta, sem que haja furos no processo.

O escopo inclui: unidade funcional, fronteira do sistema, limitações, tipo de análise crítica, funções do sistema, categorias de impacto selecionadas. Cada um desses itens é adicionado para levar credibilidade à análise. A unidade funcional é basicamente a quantificação dos requisitos necessários para o produto ou processo, definindo o que está sendo estudado e relacionado as entradas e saídas. Já a fronteira do sistema define os processos elementares do processo, como: entradas e saídas, reprocessamento, descarte dos produtos e matérias primas que serão utilizadas. A análise de ciclo de vida também engloba limitações, como base de dados, modificações do processo por não falta de processos elementares dentro do processo, esses fatores também devem ser considerados dentro do estudo. (ABNT, 2009).

A tabela 1 categoriza os parâmetros que compõem o escopo e suas definições para ACV

Tabela 1 - Categorização dos parâmetros do ACV

Item do escopo	Descrição
Unidade Funcional	Quantificação dos requisitos necessários para o produto ou processo, definindo o que está sendo estudado e relacionado as entradas e saídas (ABNT, 2009)
Fronteira do Sistema	Definição dos processos elementares do sistema de estudo (ABNT, 2009).
Fluxo de Referência	É a medida das saídas do sistema de processos elementares do estudo (ABNT, 2009).
Categorias de Impacto	Parâmetro que representa os impactos ambientais relevantes para a análise (ABNT, 2009).
Análise Crítica	É o parâmetro que tem como objetivo avaliar a consistência e eficácia da ACV e o respeito às normas sobre a avaliação (ABNT, 2009).

Fonte: Autor, 2023

2.7.1.2 Análise do Inventário

A análise de inventário (ICV) pode ser definida como sendo a quantificação das entradas de matéria prima do sistema e das saídas (resíduos, emissões). Uma análise de inventário pode ser feita baseada na geração de eletricidade de um determinado local, por exemplo, quantificando as entradas e saídas deste processo, como uso de combustível fóssil, transporte do material necessário e todos os processos que participam da geração (TAN, WIJAYA e KHOO, 2010).

A análise de inventário é um processo iterativo, ou seja, é realizado através de testes, onde podemos aproximar cada vez mais da análise correta, sendo necessário rever o escopo caso seja necessário (ABNT, 2009).

2.7.1.3 Avaliação de Impactos

A avaliação de impactos é a terceira etapa da análise de ciclo de vida, onde se faz a correlação entre o sistema e os impactos ambientais que estão sendo gerados.

Basicamente nesta etapa se faz a quantificação do impacto de um processo, como esgotamento fóssil, mudança climática e eutrofização da água. Diversos impactos podem ser inseridos dentro da análise, sendo necessário selecionar as que são mais relevantes e que fazem sentido para o sistema (WANG *et al.*, 2023).

Moretti, Junginger e Shen (2020) interpretaram através de análise ponderada dos impactos, que as principais categorias eram as alterações climáticas, o uso de recursos fósseis e o uso de água, com 28%, 23% e 11% respectivamente. Sendo assim, para avaliação dos impactos em sistemas com resinas de polipropileno, essas categorias serão utilizadas, por demonstrar alto impacto.

2.7.1.4 Interpretação dos resultados

A interpretação dos resultados, segundo a norma em vigor, engloba a consolidação das informações obtidas nas etapas anteriores visando uma tomada de decisão coerente com o que foi proposto previamente. Esta etapa consiste em analisar os resultados, tomando conclusões de acordo com as limitações citadas (ABNT, 2009).

3. METODOLOGIA

Devido aos diversos impactos ambientais gerados pela produção e demanda de plástico novo no mercado, a análise de ciclo de vida contribui para o entendimento de tais impactos de todo o processo de transformação plástica, da extração à última geração, através de simulações que podem ser realizadas com softwares que realizam a análise de ciclo de vida utilizando bases de dados adequadas para a análise a ser realizada, para que se aproximem cada vez mais com resultados reais, considerando também as limitações do processo,

3.1 SOFTWARE

O software utilizado para o desenvolvimento do estudo foi o openLCA 2.0, sendo um programa gratuito criado pela GreenDelta para análise de ciclo de vida (ACV).

A figura 11 representa a tela inicial do software utilizado para análise.

Figura 11- Tela inicial do software openLCA



Fonte: Autor, 2023

O openLCA traz uma abordagem vasta para análise de ciclo de vida, com diversas bases de dados, podendo ser aplicado para desenvolvimentos, meios educacionais, com facilidade na criação de modelos de análise (OPENLCA, 2023).

3.1.1 Base de dados

A partir da base de dados é possível inserir todas as condições necessárias para análise de ciclo de vida, como solicita a norma, envolvendo fluxos elementares, perdas e limitações.

Para o desenvolvimento deste estudo, foi utilizada a base de dados *Environmental Footprints*, criada pela comissão europeia, fornecida gratuitamente, possuindo alta variedade de fluxos em sua base. Esta base de dados foi criada como uma maneira de mensurar impactos ambientais, visando reduzir impactos de bens, serviços e organizações considerando a atividade e cadeia produtiva do processo estudado (EPLCA, 2023).

Este banco de dados foi projetado para apoiar o uso das regras da categoria de pegadas ambientais do produto, contendo dados de inventário de ciclo de vida e métodos de avaliação da pegada ambiental (EPLCA, 2023).

3.2 DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

3.2.1 Definição do objetivo da ACV

O objetivo do estudo da análise de ciclo de vida é realizar um comparativo dos impactos ambientais gerados pela utilização de resinas virgens de polipropileno e pelo reaproveitamento do material na formulação para transformação plástica.

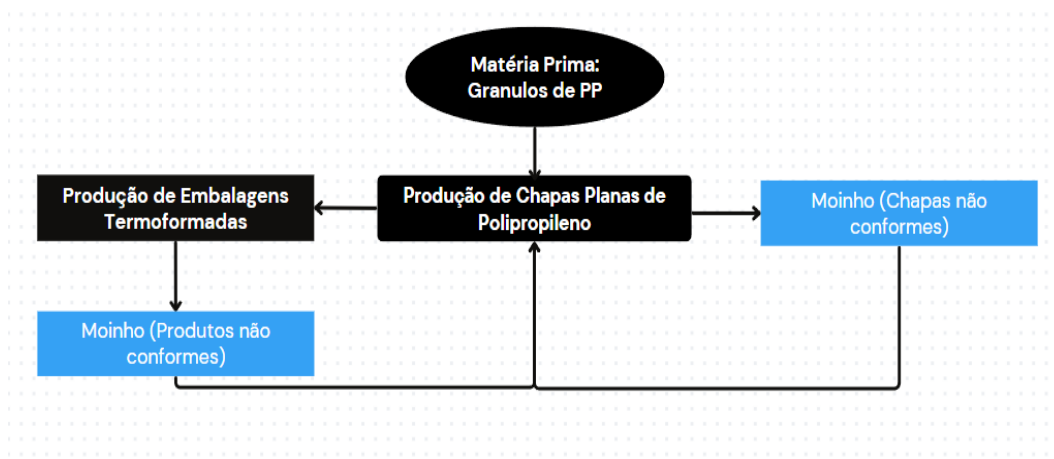
3.2.2 Definição de escopo e fronteiras

O estudo será realizado considerando toda a cadeia produtiva do processo de transformação plástica da resina de PP, a qual envolve:

- Extração da matéria prima
- Primeira Geração: Onde a nafta é enviada para as petroquímicas para a geração do propeno
- Segunda Geração: Onde o propeno é transformado em resinas plásticas
- Terceira Geração: Onde os pellets são enviados até as indústrias de transformação plástica.

O escopo engloba o fluxo desde a coleta da matéria prima até a transformação final. Cada etapa do fluxo será avaliada, considerando os impactos ambientais. A figura 12 demonstra o fluxo do processo aplicado, variando a quantidade de material de acordo com o cenário de aplicação.

Figura 12 - Fluxo do processo utilizado para análise de ciclo de vida



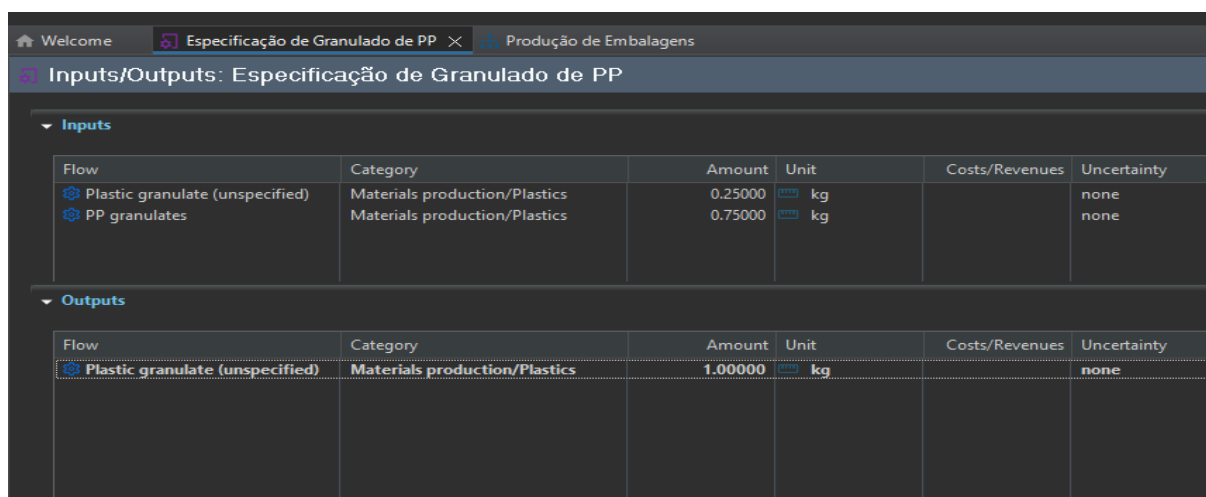
Fonte: Autor, 2023

3.3 ANÁLISE DOS CENÁRIOS

Para realização do estudo, foram definidos cinco cenários para avaliação, de forma a estudar suas características para o que foi proposto. Para a entrada dos dados foram criados novos blocos dentro do *software*, para fornecer a possibilidade de especificar a quantidade de material reciclado de material virgem de acordo com o cenário, blocos que pudessem fazer conexão de saída com a entrada do bloco seguinte.

A figura 13 representa a especificação do PP, onde pode ser inserida a quantidade de material reciclado e de virgem para a extrusão.

Figura 13 - Especificação de entradas e saídas da matéria prima



Inputs/Outputs: Especificação de Granulado de PP					
Inputs					
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty
Plastic granulate (unspecified)	Materials production/Plastics	0.25000	kg		none
PP granulates	Materials production/Plastics	0.75000	kg		none
Outputs					
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty
Plastic granulate (unspecified)	Materials production/Plastics	1.00000	kg		none

Fonte: Autor, 2023

Nos *inputs*, é possível observar as duas entradas de material, onde “*Plastic granulate (unspecified)*” representa o material advindo da reciclagem e “*PP granulates*” representa o polipropileno virgem. Neste bloco é possível fazer inserções das entradas de acordo com o cenário adequado, podendo variar durante as simulações do software.

Para relacionar termoformagem e extrusão, foi necessário criar um outro bloco, para que a saída da extrusão fosse equivalente à entrada da termoformagem, uma vez que a saída da extrusora é representada por “*Plastic Film*” e a entrada do bloco de termoformagem é representada por “*Plastic granulates*”.

A figura 14 representa o bloco criado para relacionar o material da extrusão para termoformagem.

Figura 14 - Entradas e saídas do processo de extrusão

Welcome Especificação de Granulado de PP Produção de Embalagens Extrusão para termoformagem					
Inputs/Outputs: Extrusão para termoformagem					
▼ Inputs					
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty
Plastic film (unspecified)	Systems/Unspecific parts	1.00000	kg		none
▼ Outputs					
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty
Plastic granulate (unspecified)	Materials production/Plastics	1.00000	kg		none

Fonte: Autor, 2023

A saída “*Plastic granulate (unspecified)*” é a entrada da termoformagem, sendo assim, foi necessário criar este bloco, sendo possível completar o fluxo com a adição do bloco de termoformagem predisposto pelo software. No openLCA foi desenvolvido o fluxograma adequado para o processo produtivo baseado no processo produtivo de embalagens plásticas oriundas de termoformagem.

A figura 15 representa o fluxograma elaborado no OpenLCA.

Figura 15 - Sistema elaborado no openLCA



Fonte: Autor, 2023

O fluxo é calculado a partir do valor inicial (*input*) do material reciclado e de material virgem no bloco “Especificação de Granulado de PP”, citado anteriormente. Neste bloco serão inseridas as quantidades necessárias para simular o cenário. Após isto, é calculado o bloco de extrusão, com saída que é convertida através do bloco “Extrusão para Termoformagem”. Por fim, o último bloco, o de termoformagem disponível na base de dados, onde o processo se encerra, sendo utilizado um aproveitamento de 65% da chapa extrudada, conforme citado por NASCIMENTO (2017).

Para realização das simulações com os cenários elaborados, foi utilizado um valor de produção de 768,41 ton, correspondente ao valor médio de uma produção de uma indústria de grande porte do ramo de embalagens termoformadas.

Os cenários criados são referentes à produção de chapas planas de PP com diferentes formulações:

- Cenário 1: 100% de Resina virgem
- Cenário 2: 75% de Resina virgem e 25% de moído
- Cenário 3: 50% de Resina virgem e 50% de moído
- Cenário 4: 25% de Resina virgem e 75% de moído
- Cenário 5: 100% moído

Para a segunda etapa de avaliação, serão considerados possíveis perdas de qualidade no processo devido à utilização de material reprocessado, uma vez que está sujeito a diversos tipos de alterações, como degradações e contaminações (MARTINS, 2019).

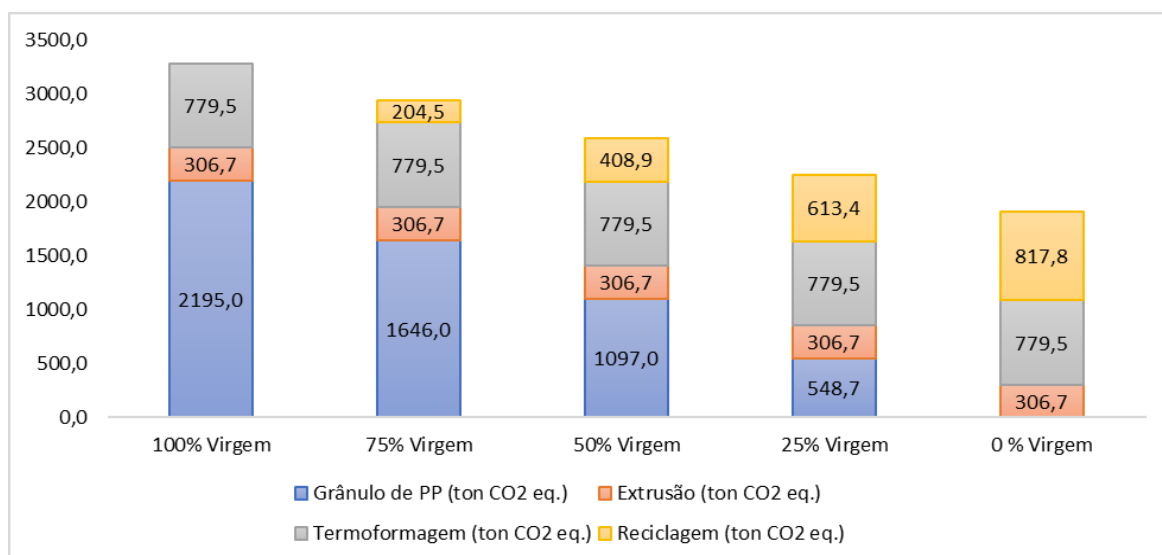
Para adição de aparas, serão considerados cenários comparativos, considerando emissões equivalentes de CO₂, avaliando o quanto é necessário produzir de material não conforme para atingir os valores considerados. No caso, foram considerados valores de 0%, 13%, 27%, 40% e 54% para os cenários 1, 2, 3, 4 e 5 respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS GERADOS NA SUBSTITUIÇÃO DA MATRIZ DE POLIPROPILENO POR MATERIAL RECICLADO

A figura 16 mostra os principais processos que impactam o meio ambiente através da emissão de CO₂ para produção de embalagens termoformadas de polipropileno 100% virgem. Os dados utilizados são referentes a produção de 768,411 ton de embalagens termoformadas.

Figura 16 - Produção de CO₂ equivalente no processo produtivo, de PP, para cada formulação



Fonte: Autor, 2023

É notável que considerado o fluxo de processamento de embalagens de polipropileno por termoformagem, o maior impacto ao meio ambiente é gerado pela produção da resina de PP nas indústrias petroquímicas, sendo responsável por 67% das emissões de CO₂ equivalente.

A termoformagem correspondeu a 24% da emissão, se mostrando um valor impactante dentro do processo, correspondendo a quase 36% da emissão em relação à produção da resina e em torno de 2,6 vezes mais que da produção de chapas por extrusão. A emissão gerada pelo processo de termoformagem pode ser elevada devido ao ciclo nas máquinas termoformadoras, onde o tempo de ciclo pode variar por diversos fatores como aplicação de calor necessário na chapa para facilitar a

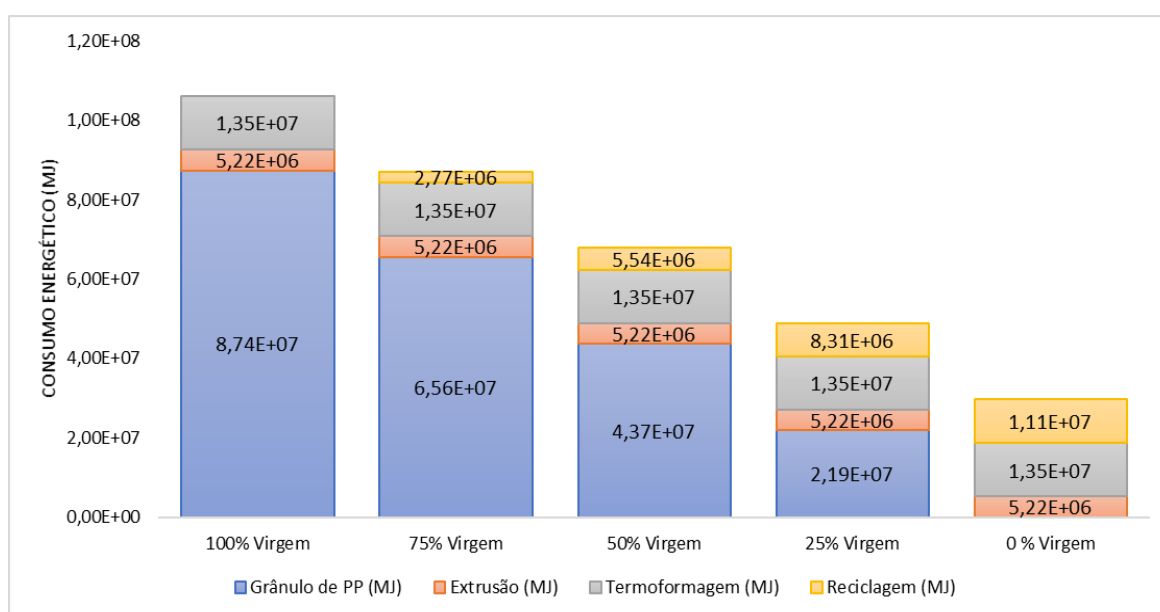
moldagem, aplicação do vácuo, resfriamento do produto no molde e desmoldagem. Um ciclo baixo utilizado na termoformadora leva à uma baixa produção de material e mais tempo para produzir a quantidade solicitada (PANG *et al.*, 2014).

Observando os cenários para cada percentual de resina virgem, nota-se um decréscimo na emissão de CO₂ à medida que a utilização de material virgem é reduzida, com reduções de emissão, em relação à embalagem 100% virgem, de 10%, 21%, 31% e 42% para as composições de 75% virgem, 50% virgem, 25% virgem e 0% virgem (100% reciclado) respectivamente. 67% da emissão está relacionada à produção da resina, à medida que a necessidade da resina diminui, o impacto ambiental também reduz drasticamente, uma vez que reduz a necessidade de resina virgem, até se tornar zero no caso do uso de 100% de material reciclado para produção das embalagens.

Para a termoformagem e extrusão os valores se mostraram inalterados pois a quantidade produzida pelos dois setores se manteve igual

O consumo energético está associado ao consumo de diversos componentes, as quais são utilizados direta ou indiretamente na produção ou no transporte do material. A Figura 17 representa o consumo energético de cada processo na produção de embalagens termoformadas por formulação.

Figura 17 - Consumo energético por processo na produção de embalagens, de PP, termoformadas por formulação .

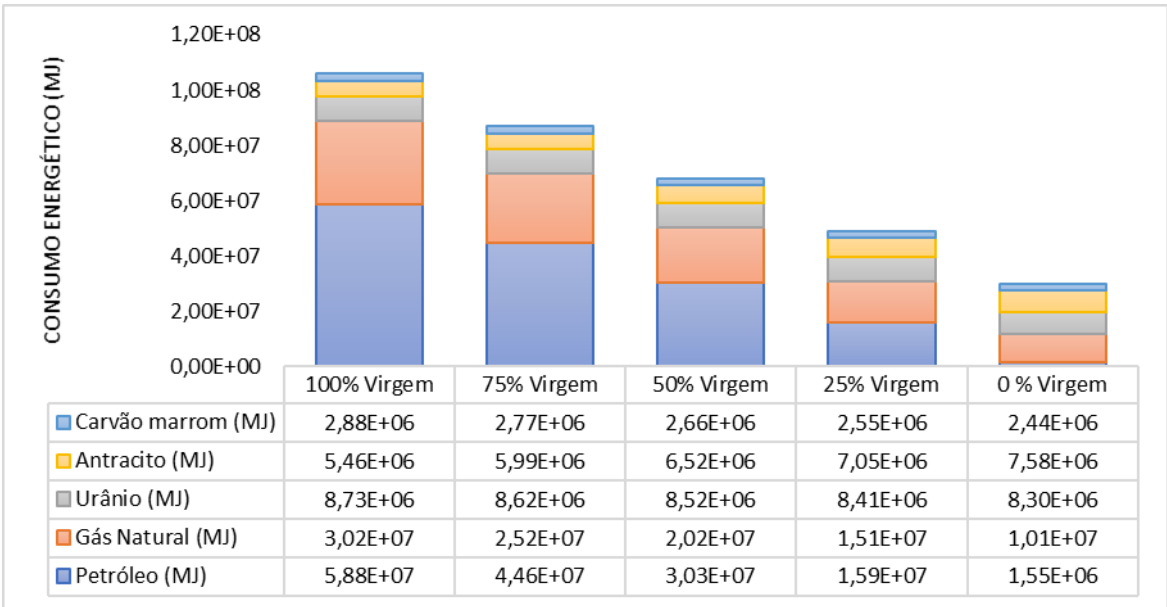


Fonte: Autor, 2023

Considerando o consumo energético, as reduções de demanda para a produção das embalagens se mostram ainda mais satisfatórias, reduzindo em até 72% em relação ao material virgem quando utilizamos o material 100% reciclado (0% virgem). A redução do consumo de energia tem como base a melhoria da eficiência energética, na forma em como a energia é utilizada, sendo assim levando maior competitividade para a indústria e reduzindo emissões de gases de efeito estufa. A redução se faz ainda mais interessante a longo prazo devido à incertezas sobre as reservas de energia fóssil (BILGEN, 2014).

A figura 18 discrimina o consumo energético por formulação.

Figura 18 - Consumo energético por recurso

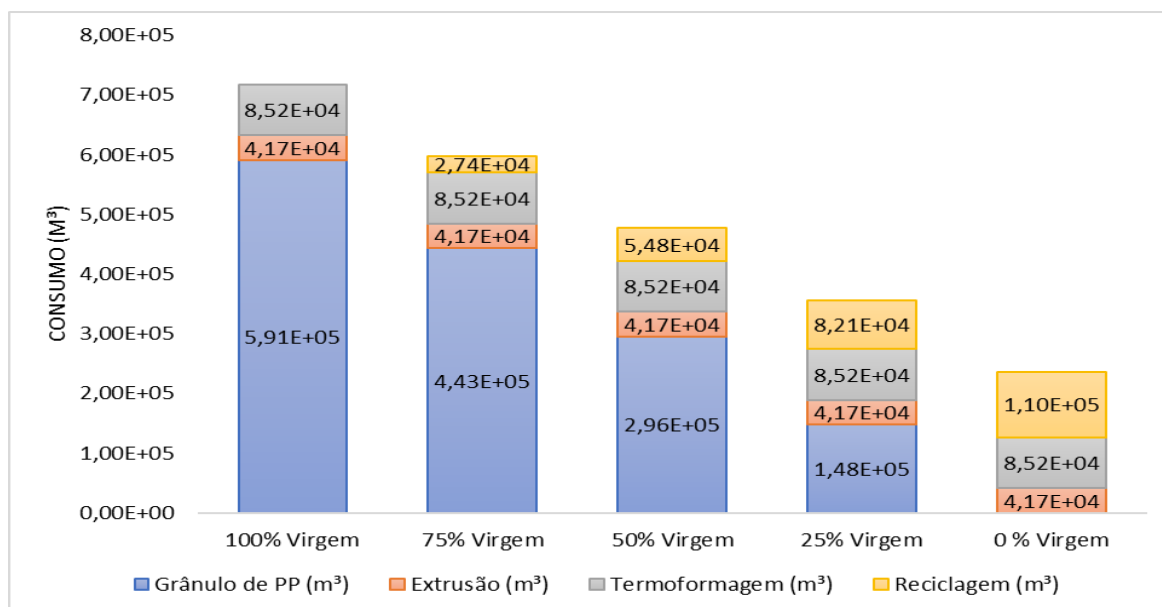


Fonte: Autor, 2023

O petróleo é a maior fonte de energia, uma vez que o plástico é derivado do petróleo, o consumo é alto para geração das resinas. O petróleo é utilizado para produção de diversos materiais como os combustíveis e, a partir da nafta, que não apresentam características para produção de combustíveis, são produzidos os plásticos, desta forma, na consideração do consumo de petróleo na análise do ciclo de vida, se considera toda a cadeia de utilização do petróleo, da sua extração e transformação, mas também do consumo de combustível para transporte da matéria prima até a indústria transformadora (MOTA, 2006).

Outro componente que é relevante em processos produtivos, é a água, seja como insumo ou por utilidades. A figura 19 representa o consumo de água por cada processo

Figura 19 - Consumo de água por cada processo



Fonte: Autor, 2023

Na produção de grânulos de polipropileno, a água é bastante utilizada devido à necessidade de resfriamento, com trocadores de calor, utilização de água em torres de resfriamento e também pela necessidade de lavagem do óleo bruto, que é realizado nas plataformas produtoras para remoção de sais. Já os processos de extrusão e termoformagem, apenas utilizam água de resfriamento para refrigerar o material após moldagem no formato desejado, para que o formato se mantenha após abertura do molde (PRADO *et al.*, 2014).

A preocupação com a disponibilidade de água é uma pauta que está sempre em alta, e está fortemente ligado ao alto consumo de energia, onde por exemplo, são bastante utilizadas em sistemas de resfriamento para geração de energia pelas termoelétricas, impactando o abastecimento das regiões onde estão instaladas (FEELEY III *et al.*, 2008).

A redução através da reciclagem do material pode se mostrar benéfico nestes cenários, uma vez que a redução da demanda de água foi maior que 50%, entretanto é necessário entender as perdas presentes no processo.

4.2 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA RECICLAGEM NO REPROCESSAMENTO DO POLIPROPILENO

No processo produtivo, sempre se tem perdas, seja por eficiência de máquina, alteração de matéria prima, falta de habilidade do operador e diversos outros fatores que contribuem para que um processo não seja 100% eficiente. O uso de material reprocessado durante o processo também é um dos fatores que podem influenciar no processo, devido à sua diferente especificação da matéria prima virgem, alteração de perfil de temperatura, variação do índice de fluidez etc. Outro fator que gera diferença para os materiais é o comportamento mecânico, que é alterado pelo reprocessamento, podendo levar mais fragilidade ao material, gerando quebras. O reprocessamento também têm maior propensão a contaminações advindas do manuseio do material, gerando não conformidades que não estão ligadas diretamente ao efeito do reprocessamento, mas ao manuseio incorreto dos resíduos (FRANKLAND, 2015; MARTINS, 2019).

Em seu estudo de degradação do polipropileno pelo reprocessamento, Costa, Ramos e Oliveira (2007) demonstraram a diferença das propriedades mecânicas quando submetido a reprocessamentos em diferentes temperaturas. Na elongação na ruptura, que é a diferença entre o comprimento final e inicial até o rompimento do filme, é possível notar uma diminuição pelo reprocessamento, onde na condição de 240°C, no 5º reprocessamento apresentou um valor de 795,8% e no 19º apresentou um valor de 527,1%, demonstrando maior tendência para ruptura, ou seja, menor ductilidade. Já a 270°C esses valores são ainda mais impactantes, sendo 739,1% no 5º reprocessamento e 28,4% no 19º reprocessamento, alterando completamente a ductilidade do material.

Uma vez que se sabe que as perdas fazem parte do processo, é importante avaliar o impacto das perdas no processo, evidenciando os impactos ambientais gerados neste processo.

Quando é avaliado o impacto ambiental gerado pela resina virgem e o material reciclado, a diferença é clara, como é possível observar nas figuras 16 e 17, entretanto tais valores não consideram as possíveis perdas que podem ser geradas no processo pelo uso do material reprocessado.

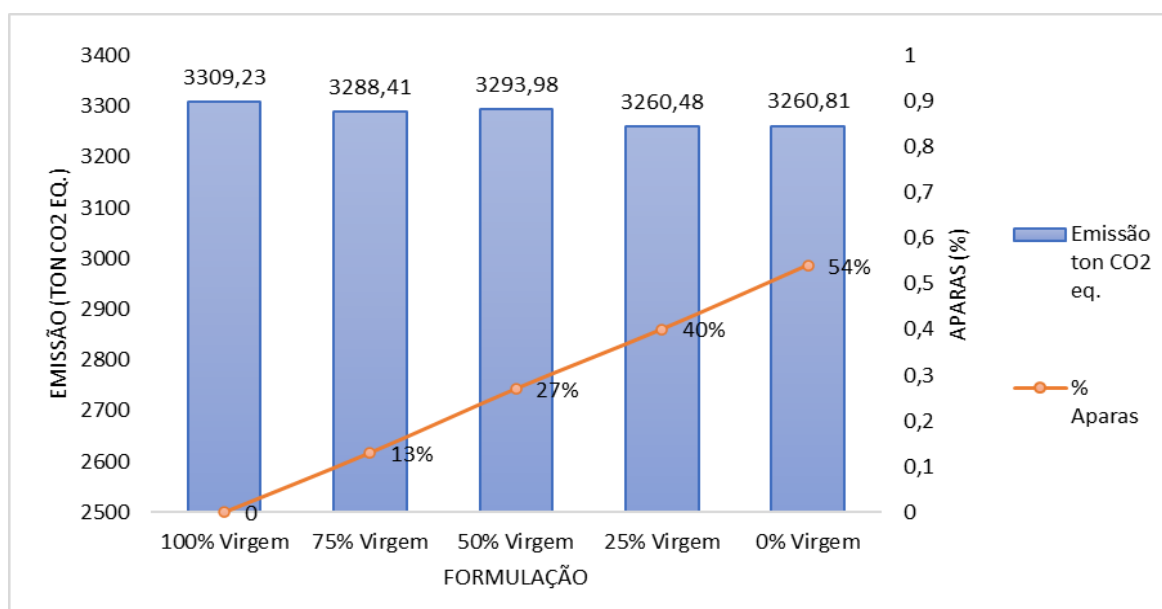
A geração de aparas aumenta a emissão de CO₂ pela demanda da produção, uma vez que há uma meta de produção mensal para a indústria, desta forma se a

indústria gera 20 ton de desperdício ao mês, então necessita produzir 20 ton-a mais do programada para que a meta de produção possa ser alcançada.

Considerando as possíveis perdas, foram levantadas as quantidades máximas de aparas para cada formulação para que a emissão de CO₂ não ultrapasse a formulação da produção com 100% virgem.

A figura 20 representa o percentual máximo de aparas para cada formulação em relação ao material virgem sem refugo, e suas respectivas emissões.

Figura 20 - Percentual máximo de apara por formulação para equivalência de emissões



Fonte: Autor, 2023

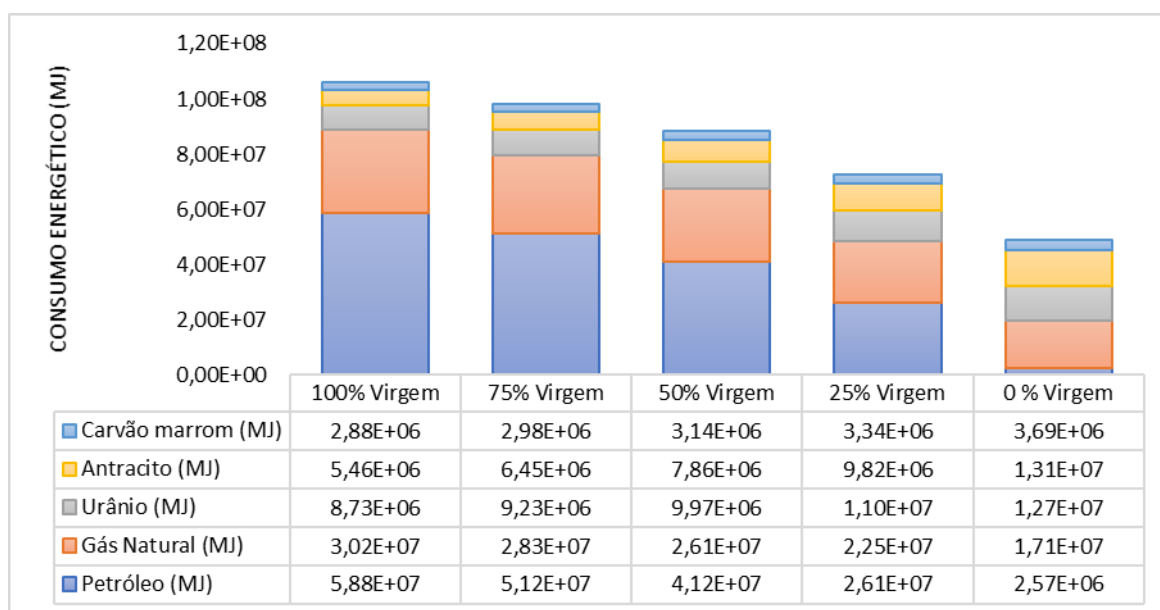
Para a formulação com 75% de matéria prima virgem, as emissões são inferiores à formulação 100% virgem quando são consideradas até 13% de aparas.

Já a formulação de 50% virgem, que é bastante comum em indústrias de embalagens plásticas, um valor de até 27% de aparas ainda emite menos toneladas de CO₂ equivalente em relação ao material virgem. Entretanto, o valor de aparas considerado é um valor bastante alto para uma indústria, pois em um 1200 ton de chapas extrudadas, por exemplo, seria necessário produzir 1682,6 ton de chapas para atender a demanda da fábrica, obtendo uma perda de 482,6 toneladas de aparas, que corresponderia à 40% da produção desejada.

Já o consumo energético, é outro fator que também foi levado em consideração o mesmo percentual de aparas.

A figura 21 mostra o consumo energético das formulações para percentuais de aparas de 13%, 27%, 40% e 54% para formulação 75% virgem, 50% virgem, 25% virgem e 100% reciclado (0% virgem) respectivamente.

Figura 21 - Consumo energético por recurso considerando aparas no processo produtivo



Fonte: Autor, 2023

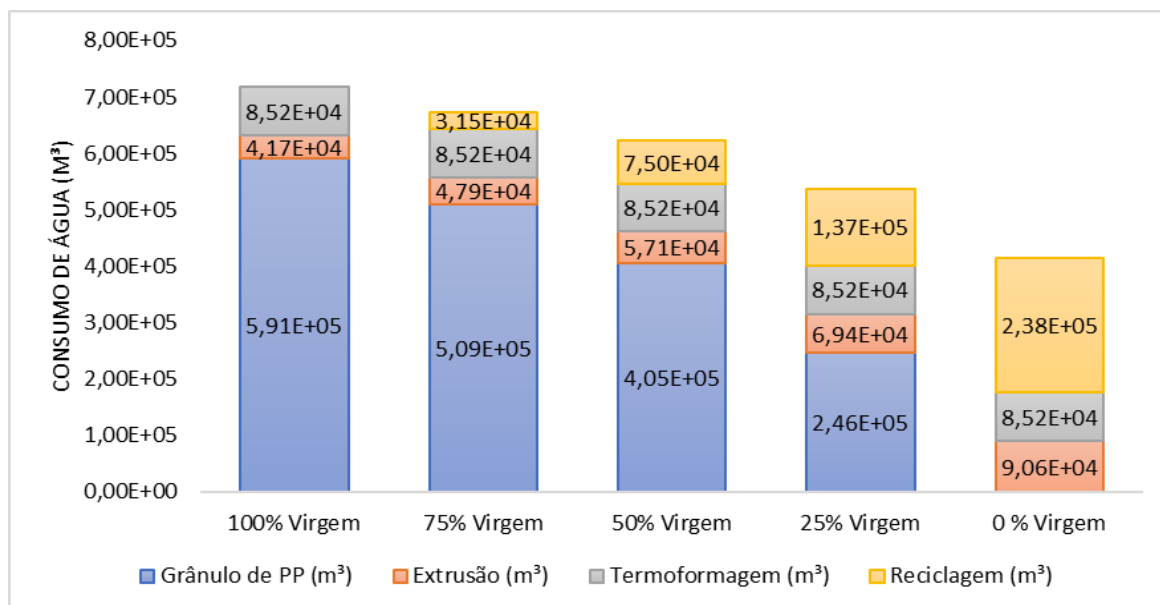
Nota-se que mesmo com as emissões de CO₂ equiparáveis, como mostrado na figura 20, o consumo energético ainda se mostrou mais baixo para a sequência de formulações com material reprocessado, com redução de 16,8% do consumo energético quando considerada a formulação comum de 50% virgem.

No processo produtivo tem-se também a presença do urânio, que se dá devido ao banco de dados que é advindo da União Europeia, onde 13% da matriz energética advém de energia nuclear. O gás natural corresponde a 24% das fontes utilizadas na região. Já no Brasil, a energia nuclear corresponde a apenas 2% da produção total de energia do país, sendo sua maior fonte a hidrelétrica (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2023; ABDALA, 2023).

Para a formulação com 100% de reciclado, tem-se grande redução devido ao consumo energético advindo do petróleo.

A figura 22 representa o consumo de água considerando as aparas citadas

Figura 22 - Consumo de água por processo considerando aparas no processo produtivo



Fonte: Autor, 2023

O consumo de água também é reduzido conforme a formulação utiliza material reciclado no processo devido ao alto consumo de água para produzir a resina virgem. Já os processos posteriores, embora utilizem uma quantidade considerável de água, a produção de PP corresponde a em torno de 80% do consumo na produção de material virgem, sendo assim, a redução é esperada.

Entretanto, os valores de aparas considerados, quando as emissões são equiparadas, são bastante elevados, sendo até impraticáveis para uma indústria nos casos de maior utilização de material reprocessado, visto que a termoformagem perde de 35%-50% do material naturalmente devido à forma de produção, mesmo que, por exemplo, o consumo energético seja menor, o esforço produtivo é alto e oneroso para a indústria. Parâmetros de processo, como temperatura devem ser bem avaliados durante a produção utilizando material reprocessado, ajustando para que o refugo seja cada vez menor, onde uma vez estabilizado, o refugo é reduzido, visto que a extrusão é um processo contínuo, realizando apenas ajustes finos em casos de necessidade (FRANKLAND, 2015).

Um OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), que é a eficiência global do equipamento, de classe mundial, por exemplo, considera indicadores de qualidade como base para benchmark de 99%, ou seja, a cada 100 peças produzidas, apenas 1 é defeituosa. Desta forma, o uso de material de reprocessamento é capaz de reduzir

os impactos ambientais, respeitando as condições de processo do material para que as alterações das propriedades mecânicas não sejam impeditivos para sua reutilização (FAROL BI, 2023).

5. CONCLUSÃO

Através da análise de ciclo de vida foi possível analisar diferentes cenários de produção de uma indústria de embalagens e seus respectivos impactos ambientais, utilizando todo o fluxo produtivo, desde o uso da matéria prima, até o processo final de termoformagem da embalagem.

Os resultados da ACV demonstraram que a produção de grânulos de polipropileno é o principal fator de impacto ambiental, representando quase 70% do impacto ambiental do processo produtivo, desta forma, o cenário onde se utiliza apenas o material virgem se mostrou mais impactante, gerando mais efeitos negativos ao meio ambiente, com mais emissões de gases e maior consumo de recursos fósseis e de água.

Mesmo considerando o aumento de aparas com o reprocessamento do polipropileno reciclado, observa-se a necessidade de um valor alto de 54% para atingir um efeito e igualar as emissões de CO₂ equivalente, o que sustenta que o cenário inicial ainda se mostrou mais impactante, consumindo mais água e mais recursos fósseis.

Entretanto, é necessário considerar que outros fatores estão envolvidos na escolha da formulação, pois o reprocessamento do material gera uma alteração da tonalidade do material, sendo necessário manter um equilíbrio entre uso de material reprocessado e material virgem, para que haja conformidade do produto com o cliente. As propriedades mecânicas também são fatores relevantes para o mercado de embalagens, onde alguns requisitos devem ser atendidos, para que não se tenha embalagens quebradiças, gerando problemas para o cliente.

Por fim, a análise de ciclo de vida se mostrou uma metodologia de suma importância para determinar e estudar formulações. O modelo poderia ser acrescido de outros dados, como a viabilidade de utilização do PCR para aumento do uso de material reciclado na indústria e também através da discriminação da logística atual, considerando todos os impactos gerados pelo fornecedor. Entretanto a limitação do banco de dados europeu nos fornece uma visão geral dos impactos gerados no

processo de produção e uma vez colocada em pauta o desenvolvimento sustentável de uma empresa, é notável que é possível conciliar uma produção conforme parâmetros e a sustentabilidade através de processamentos, reduzindo a demanda de nova matéria prima, uma vez que as grelhas da termoformagem são inerentes ao processo, podendo ser moídas para retornarem ao fluxo de produção.

REFERÊNCIAS

ABDALA, V. **Especialistas divergem sobre uso da energia nuclear no Brasil**. Agência Brasil, 2023. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-03/especialistas-divergem-sobre-uso-da-energia-nuclear-no-brasil>>. Acesso em 20 de agosto de 2023.

ABIPLAST. **PERFIL 2017**, São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2017>>. Acesso em: 20 de junho de 2023.

ACV BRASIL, **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**. Disponível em: <<https://acvbrasil.com.br/consultorias/avaliacao-do-ciclo-de-vida-acv>>. Acesso em: 2 de Julho de 2023.

ALSABRI, A, TAHIR, F., AL-GHAMDI, S., G., **Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region**, Materials Today: Proceedings, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

AZEVEDO, J. **Combustíveis fósseis: Tipos e Impactos**. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/combustiveis-fosseis>>. Acesso em: 2 de julho de 2023.

BILGEN, S. **Structure and environmental impact of global energy consumption**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 38, n. 890-902, 2014.

BOCCHINI, B. **Brasil gerou 64 quilos de resíduos plásticos por pessoa em 2022.** Agência Brasil, Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-03/brasil-gerou-64-quilos-de-residuos-plasticos-por-pessoa-em-2022>>. Acesso em: 12 de agosto de 2023.

BRASKEM S. A. **Polipropileno – Conceitos gerais e Extrusão de chapas.** São Paulo/SP, 2022.

COMERLATTO, L. M. **O desenvolvimento industrial do Brasil no século XX: Uma análise na perspectiva da economia-mundo.** UFSC, Florianópolis, 2004.

COSTA, H. M., RAMOS, V. D., OLIVEIRA, M. G. **Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis mechanical properties and analysis of variance.** Polymer Testing, vol. 26., p. 676-684, 2007.

COSTA, J. P., ROCHA-SANTOS, T., DUARTE, A. C. **The environmental impacts of plastics and micro-plastics use, waste and pollution: EU and national measures.** Parlamento Europeu, 2020.

DIRECTINDUSTRY. **Termoformadora alimentada por bobina**, 2023. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/illig-maschinenbau-gmbh-co-kg/product-60364-550839.html>>. Acesso em 12 de agosto de 2023.

EUROPA. **Microplásticos no sangue humano: como acontece?**, 2022. Disponível em: <<https://www.europa.com.br/blog/microplasticos-no-sangue>>. Acesso em: 26 de junho de 2023.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Situação atual: A energia está na base das ambições da Europa em matéria de clima.** European Environment Agency, 2023. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/pt/sinais-da-aea/sinais-2022/artigos/situacao-atual-a-energia-esta>>. Acesso em: 20 de agosto de 2023/

EUROPEAN PLATFORM ON LCA (EPLCA). **Environmental Footprint**, 2023. Disponível em: < <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>>. Acesso em 20 de agosto de 2023.

FAROL BI. **OEE: O que é e como calcular esse indicador de desempenho?**, 2023. Disponível em: < <https://farolbi.com.br/oeo/>>. Acesso em 20 de agosto de 2023.

FEELEY III, T. J., SKONE, T. J., STIEGEL JR., G. J., MCNEMAR, A., NEMETH, M., SCHIMMOLLER, B., MURPHY, J. T., MANFREDO, L. **Water: A critical resource in the thermoelectric power industry**, Energy, vol, 33, p. 1-11, 2008.

GENEVA ENVIRONMENT NETWORK. **Plastic Production and Industry | Plastics and the Environment Series**, 2023. Disponível em: <https://www.genevaenvironmentnetwork.org/resources/updates/plastic-production-and-industry/#scroll-nav__4>. Acesso em: 26 de junho de 2023.

GILES JR, H. F., WAGNER JR. J. R., MOUNT III, E. M. **Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook**. William Andrew, 2005.

HARADA, J. **Extrusão de Plásticos: Tecnologia e Processamentos**, 1. ed. São Paulo: Artliber, 2021.

HOMENS, H., YIN, C., SHI, Y., WANG, Y., LIU, J. **Numerical expression of odor intensity of volatile compounds from automotive polypropylene**. Sensors and Actuators A: Physical, vol. 321, 2021.

IGNACIO, J. **ECO-92: o que foi a conferência e quais foram seus principais resultados?**, Disponível em: <<https://www.politize.com.br/eco-92>>. Acesso em: 2 de julho de 2023.

INNOVA. **Manual de Extrusão.** Disponível em: <<https://innova.com.br/wp-content/uploads/2019/06/manual-de-extrusao.pdf>>. Acesso em 2 de julho de 2023.

KAN, M., MILER, S.A. **Environmental impacts of plastic packaging of food products.** Resources, Conservation and Recycling, Volume 180,2022.

MAIS POLÍMEROS. **Entenda como funciona uma extrusora de plástico.** Disponível em: <<https://maispolimeros.com.br/2019/08/12/extrusora-de-plastico>>. Acesso: 2 de julho de 2023.

MALLMANN D. **Produção de plásticos reciclados no Brasil bate recorde em 2021, diz associação.** CNN. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/producao-de-plasticos-reciclados-no-brasil-bate-recorde-em-2021-diz-associacao>>. Acesso em 12 de agosto de 2023.

MARTINS, A. B., MACHADO, M. P., SILVEIRA, A. M., SANTANA, R. M. C. **Efeito de ciclos de reprocessamento na degradação de blendas de polipropileno e amido termoplástico.** 15º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2019.

MATIAS, M. F. **Estudo para reutilização de moído gerado na termoformagem no processo de injeção de baldes plásticos.** Universidade Federal de Pernambuco, 2022.

MOISES, F. V., ZANINI, F. M. B. **Implementação de uma sistemática de análise e soluções de causas de perdas internas em uma empresa de extrusão de alumínio: Um estudo de caso.** Faculdade Capivari, São Paulo, 2018.

MORETTI, C., JUNGINGER, M., SHEN, L. **Environmental life cycle assessment of polypropylene made from used cooking oil.** Resources, Conservation and Recycling, vol. 157, 2020.

MOTA, C., J., A. **Gliceroquímica: A Petroquímica renovável.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Periódico Tchê Química, vol. 3, n.6, 2006.

MOTTA, W. H, **Análise do ciclo de vida e logística reversa**, Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2013.

NASCIMENTO, M. A. **Redução de perdas no processo de termoformagem de uma fábrica de embalagens plásticas: Estudo de caso**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

OECD. **Climate change and plastics pollution**, 2023. Disponível em: <<https://www.oecd.org/environment/plastics/Policy-Highlights-Climate-change-and-plastics-pollution-Synergies-between-two-crucial-environmental-challenges.pdf>>. Acesso em: 26 de junho de 2023.

OLIVEIRA, N. R., OLIVEIRA FILHO, R. A. **Aplicação dos 3R's da sustentabilidade e seus benefícios ambientais e econômicos**. Revista Científica Semana Acadêmica, ed. 134, vol. 01. 2018.

OLIVEIRA, A. L., SOARES, J. P., D'AVILA, P. R. **Sustentabilidade na construção civil: Possibilidades de efetivação por meio do reaproveitamento de água**, Faculdade Doctum de Juiz de Fora, 2018.

OPENLCA, **The idea**. Disponível em: <<https://www.openlca.org/the-idea>>. Acesso em 23 de agosto de 2023.

PANG, M., PUN, M., CHOW, W., ISHAK, Z. A. M. **Carbon footprint calculation for thermoformed starch-filled polypropylene biobased material**. Journal of Cleaner Production, vol. 64, p.602-608, 2014.

PAYNE, J., MCKEOWN, P., JONES, M. D. **A circular economy approach to plastic waste**. Polymer Degradation and Stability, vol. 165, p. 170-181. 2019.

PERON, C. C. **As contribuições da reciclagem para o desenvolvimento sustentável: Estudo de caso na cooperativa dos recicladores de Penápolis/SP (CORPE)**. Universidade de Araraquara, São Paulo, 2019.

PETROBRÁS. **Mudanças Climáticas.** Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/sociedade-e-meio-ambiente/meio-ambiente/mudancas-do-clima/#:~:text=Entre%202015%20e%202022%2C%20reduzimos,ganhos%20de%20efici%C3%Aancia%20nas%20opera%C3%A7%C3%B5es>>. Acesso em: 2 de julho de 2023.

PRADO, E. R. A., LEMOS, F. L., LARA, I., CLARO, E. O., JORGE, L. M. M. **Refino de óleos vegetais utilizando lavagem ácida com recirculação.** Engevista, v. 16, n. 3, p.384-391, 2014.

REVISTARURAL, **Mercado de alimentos embalados atingirá US\$ 4,89 trilhões até 2027.** Revista Rural, 2020. Disponível em: <<https://www.revistarural.com.br/2020/05/06/mercado-de-alimentos-embalados-atingira-us-489-trilhoes-ate-2027/>> Acesso em: 21 de agosto de 2023.

RODA, Daniel. T. **Polipropileno.** Disponível em: <<https://www.tudosobreplasticos.com/materiais/polipropileno.asp>>. Acesso em 10 de Junho de 2023.

SALEEM, J., TAHIR, F., BAIG, M. Z. K., AL-ANSARI, T., MCKAY, G. **Assessing the environmental footprint of recycled plastic pellets: A life-cycle assessment perspective.** Environmental Technology & Innovation, vol. 32, 2023.

SILVA, F. **Polipropileno: mercado nacional e tendências,** 2022. Disponível em: <<https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/5496-Polipropileno:-mercado-nacional-e-tendencias.html>>. Acesso em: 10 de agosto de 2023.

SILVA, R.R, RODRIGUES, F. T. R. L., **Análise do ciclo de vida e da logística reversa como ferramentas de gestão sustentável: O caso das embalagens PET.** Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, Florianópolis, SC, Brasil, v. 7, n. 13, p. 44-58, 2015.

SUGAHARA, C. R., RODRIGUES, E. L. **Desenvolvimento Sustentável: Um discurso em disputa**. Desenvolvimento em questão, vol. 17, n. 49, p. 30-43, 2019.

TAN, R. B. H., WIJAYA, D., KHOO, H. H. **LCI (Life cycle inventory) analysis of fuels and electricity generation in Singapore**. Energy, vol. 35, n. 12, p. 4910-4916, 2010.

VALGROUP. **Reciclagem: Tipos de processos e aplicações**. Disponível em: <<https://www.valgroupco.com/sustentabilidade/reciclagem-tipos-de-processos-e-aplicacoes/>>. Acesso em: 16 de agosto de 2023.

WANG, W., JIANG, Y., TANG, H., PAN, Y., YU, L. **Life cycle assessment and process optimization for polypropylene off-gas membrane separation**. Chemical Physics Letters, vol 821, n.p. 2023.

WORTECBOMBAS. **O que é uma bomba de engrenagem?**. Disponível em: <<https://wortecbombas.com.br/bomba-de-engrenagens>>. Acesso em 23 de agosto de 2023.

XIANG, Q., XANTHOS, M., MITRA, S., PATEL, S.H., GUO, J. **Effects of melt reprocessing on volatile emissions and structural/rheological changes of unstabilized polypropylene**, Polymer Degradation and Stability, Vol. 77, p. 83-102, 2002.