

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E
TECNOLOGIA AMBIENTAL**

JULIA FERNANDA RADTKE

RECICLAGEM DE PLÁSTICO PÓS-CONSUMO EM
CONTEXTO COM A ECONOMIA CIRCULAR DE UM
HOSPITAL VETERINÁRIO

Julia Fernanda Radtke

RECICLAGEM DE PLÁSTICO PÓS-CONSUMO EM CONTEXTO COM A
ECONOMIA CIRCULAR DE UM HOSPITAL VETERINÁRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado ou Doutorado, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para o título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Orientador (a): Prof.^(a) Dr (a). Diego Prado de Vargas

Co-orientador (a): Prof.^(a) Dr (a). Adriane de Assis Lawisch Rodriguez

Santa Cruz do Sul

2024

Dedico à minha família e em especial minha avó Marfa (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Universidade de Santa Cruz do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental por todas as oportunidades vivenciadas durante a realização do mestrado. Da mesma forma, agradecer a CAPES por tornar esse projeto possível.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Diego Prado de Vargas por abraçar este projeto desde o início e se disponibilizar a trabalhar fora de sua área de conforto, além dos auxílios prestados ao longo do andamento do projeto.

Agradecimento especial também à minha coorientadora, Prof.^a Dra. Adriane de Assis Lawisch Rodriguez por ser meu braço de apoio no desenvolvimento de todo o trabalho e por me ajudar a sempre persistir.

Aos colaboradores de cada etapa do projeto, sou imensamente grata pela disponibilidade do tempo de vocês para que cada processo fosse alcançado da melhor forma. De modo que agradeço ao Prof. Dr. Ênio Leandro Machado pelo apoio e esclarecimentos prestados. Ao Prof. Dr. Matheus Zimmerman e a Prof. Dra. Sabrina Arcaro, muito obrigada pela parceria desenvolvida e por possibilitar o desenvolvimento de parte do processo experimental junto a Universidade do Extremo Sul Catarinense. Do mesmo modo, agradeço a graduanda Pâmela Rodriguez de Oliveira por todo o suporte no desenvolvimento experimental junto as impressoras 3D.

Agradecimento especial também a Prof. Dra. Ana Lúcia Becker Rohlfes, pelas experiências compartilhadas durante a docência orientada. Agradeço aos colegas do PPGTA- mestrado e doutorado, que estão sempre juntos deste o início da caminhada e que colaboraram para o meu desenvolvimento pessoal.

Agradecimento final é para aquelas pessoas que sempre acreditaram no meu potencial e nunca me deixaram desistir durante esta caminhada, minha família. A minha noiva Francine Brixner, que está todos os dias ao meu lado me apoiando, aos meus pais, Marisque Kohl Radtke e Ernani Radtke que nunca mediram esforços pela minha educação, ao meu irmão Carlos Radtke e a minha tia Loiva Kohl que é uma grande inspiração. Muito obrigada, serei sempre grata.

RESUMO

À medida que a população e as atividades industriais aumentam, a demanda por recursos naturais cresce, resultando na maior geração de resíduos e por consequência o esgotamento dos recursos. O ciclo de extração, produção, consumo e descarte é insustentável, fazendo-se necessário a adoção de práticas sustentáveis, que levem a gestão de resíduos mais eficiente. A implementação de tecnologias mais limpas que reduzam, reutilizem, reparem e/ou reciclem resíduos oferecem soluções de baixo impacto ambiental e propiciam a implementação de uma economia circular dentro da gestão de resíduos. Neste sentido, esta pesquisa busca utilizar a manufatura aditiva como uma tecnologia sustentável para a reciclagem de embalagens de bolsa de soro fisiológico, a fim de avaliar os impactos associados a economia circular de um hospital veterinário, no qual filamentos fundidos foram produzidos a partir dos resíduos de PEAD e impressos tridimensionalmente para a produção de novas peças. Os resultados indicam que novos ciclos com diferentes funcionalidades podem ser atribuídos ao material, sendo que o número máximo de cinco ciclos indicada para reciclagem de PEAD é capaz de fornecer ganhos ambientais para depleção fóssil, ao se evitar a extração, o transporte e o descarte de maiores volumes de plástico. Reduzindo ainda em até 58% a emissão de gases de efeito estufa, quando comparados ao modo convencional de consumo e descarte e impactando direta e positivamente no uso desta tecnologia para a reciclagem local de plásticos e na gestão sustentável de qualquer organização.

Palavras-chave: Economia circular, Gestão Sustentável de Resíduos; Manufatura aditiva; Avaliação de Ciclo de Vida; Reciclagem plástica;

ABSTRACT

RECYCLING OF POST-CONSUMER PLASTIC IN CONTEXT WITH THE CIRCULAR ECONOMY OF A VETERINARY HOSPITAL

As the population and industrial activities increase, the demand for natural resources increases, resulting in greater waste generation and, consequently, resource depletion. The cycle of extraction, production, consumption, and disposal is unsustainable, making it necessary to adopt sustainable practices that lead to more efficient waste management. The implementation of cleaner technologies that reduce, reuse, repair, and/or recycle waste offer low-impact environmental solutions and enable the implementation of a circular economy within waste management. In this sense, this research seeks to use additive manufacturing as a sustainable technology for the recycling of saline solution bag packaging, in order to evaluate the impacts associated with the circular economy of a veterinary hospital, in which fused filaments were produced from HDPE waste and triadically printed to produce new parts. The results indicate that new cycles with different functionalities can be attributed to the material, and the maximum number of five cycles indicated for recycling HDPE is capable of providing environmental gains for fossil depletion, by avoiding the extraction, transportation and disposal of larger volumes of plastic. It also reduces greenhouse gas emissions by up to 58%, when compared to the conventional mode of consumption and disposal, and directly and positively impacts the use of this technology for local recycling of plastics and the sustainable management of any organization.

Keywords: Circular economy; Sustainable waste management; Additive manufacturing; Life cycle assessment; Plastic recycling;

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Estrutura da ACV e aplicações diretas. 26
- Figura 2. Método de decisão para o tipo de procedimento de alocação em reciclagem. 28
- Figura 3. Fluxograma geral da metodologia adotada..... 34
- Figura 4. Embalagens de soro fisiológico selecionadas de diferentes tamanhos. 35
- Figura 5. Pontos de coleta dos resíduos de embalagens de soro fisiológico. 36
- Figura 6. Dimensões do corpo de prova impresso para ensaios mecânicos. 39
- Figura 7. Keyword co-occurrence network analysis using the VOSviewer software, for the term Circular Economy.**Erro! Indicador não definido.**
- Figura 8. Keyword co-occurrence network analysis using the VOSviewer software, for the keywords Circular Economy, Case Study, Plastic Waste and Sustainability.**Erro! Indicador não definido.**
- Figura 9. Screening of systematic analysis applied to the articles found.**Erro! Indicador não definido.**
- Figura 10. Analysis of works by period, 2017-2023....**Erro! Indicador não definido.**
- Figura 11. Embalagem de soro fisiológico.**Erro! Indicador não definido.**
- Figura 12. Resíduo de embalagens de soro fisiológico após processamento.**Erro! Indicador não definido.**
- Figura 13. Espectro FTIR do resíduo da embalagem de soro fisiológico e do PEAD comercial.
.....**Erro! Indicador não definido.**
- Figura 14. Falha de tração do filamento antes da extrusão.**Erro! Indicador não definido.**
- Figura 15. Resolução de problemas durante impressão de peça.**Erro! Indicador não definido.**
- Figura 16. Cubo denso impresso 3D por filamento de PEAD reciclado.**Erro! Indicador não definido.**

Figura 17. Delimitação das fronteiras do estudo e cenários de comparação.**Erro! Indicador não definido.**

Figura 18. Normalização das categorias de impactos ambientais associadas aos cenários de estudo.....**Erro! Indicador não definido.**

Figura 19. Desempenho ambiental para os cenários de consumo convencional (C1 e C2).

.....**Erro! Indicador não definido.**

Figura 20. Desempenho ambiental para os cenários de reciclagem, C2 e C3.**Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Métodos de alocação para ACV de reciclagem. 29
- Tabela 2. Consumo anual de soro fisiológico e ringer lactato pelo HV..... 37
- Tabela 3. Titles of selected articles. Description: Identification of studies selected for analysis.**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 4. Parâmetros de impressão utilizados para referência. ..**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 5. Condições de testes para ajuste de impressão.....**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 6. Inventário de ciclo de vida dos cenários avaliados.....**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 7. Consumo de energia envolvido na reciclagem do resíduo. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 8. Caracterização dos impactos e ganhos ambientais para cada cenário. **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Limpeza Pública
ABS	Acrilonitrila-butadieno-estireno
ACV	Análise de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEENE	<i>Cumulative Energy Extraction of the Natural Environment</i>
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
EC	Economia Circular
EL	Economia Linear
EPS	Poliestireno Expandido
FFF	Fabricação de Filamentos Fundidos
FTIR	Análise de Espectroscopia por Infravermelho
HV	Hospital Veterinário
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LCA	<i>Life Cycle Analysis</i>
MA	Manufatura Aditiva
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MFI	Índice de Fluidadez Melt
NMVOC	Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OH	Hidroxilas
ONU	Organizações das Nações Unidas
ONUDI	Organização da Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
ORL	<i>Open Recycling Loops</i>
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade

PEBD	Polietilenos de Baixa
PET	Polietileno Tereftalato
PLA	Ácido Polilático
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUMA	Programa de Nações Unidas para o Meio Ambiente
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
RCF	Reciclagem em Ciclo Fechado
SDG	<i>Sustainable Development Goals</i>
UN	<i>United Nations</i>
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo Geral.....	12
2.2	Objetivos específicos.....	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
3.1	Produção Sustentável: conceitos e ferramentas.....	13
3.2	Gestão de resíduos sólidos.....	14
3.3	Resíduos Plásticos Pós-consumo.....	15
3.4	Processamento dos plásticos pós-consumo.....	16
3.5	Manufatura aditiva.....	17
3.6	Plásticos no contexto da manufatura aditiva.....	19
3.7	Polietilenos via FFF.....	20
3.8	Economia Circular.....	23
3.9	Análise de ciclo de vida.....	24
3.9.1	Metodologia da ACV.....	25
3.9.2	ACV para reciclagem em ciclo aberto.....	27
3.10	ACV como ferramenta de avaliação da EC.....	32
4	METODOLOGIA.....	33
4.1	Seleção e separação dos resíduos.....	35
4.2	Caracterização do resíduo.....	37
4.3	Reciclagem mecânica.....	38
4.3.1	Preparo do Filamento.....	38
4.3.2	Impressão 3D – Corpo de prova.....	39
4.3.3	Design Computacional.....	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40

5.1	CAPÍTULO 1 – Aplicação da economia circular na pesquisa e sua relação com a reciclagem de resíduos de embalagens plásticas: uma revisão sistemática	Erro! Indicador não definido.
5.2	CAPÍTULO 2 – Novo ciclo de vida aos resíduos de embalagens plásticas de soro fisiológico através da reciclagem por manufatura aditiva	Erro! Indicador não definido.
5.3	CAPÍTULO 3 – Avaliação da economia circular na reciclagem de embalagens de bolsa de soro fisiológico de um Hospital Veterinário	Erro! Indicador não definido.
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	Erro! Indicador não definido.
7	TRABALHOS FUTUROS	Erro! Indicador não definido.
8	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da pesquisa acontecerá em três frentes principais, ou seja, em três capítulos, onde cada capítulo será redigido em formato de artigo científico, a fim de tornar mais claro as etapas e a busca pelo alcance dos objetivos específicos. A primeira etapa busca entender como estão acontecendo as interações entre os conceitos de economia circular e a gestão de resíduos plásticos, mas principalmente como vem sendo aplicado na prática e se isto realmente acontece. No segundo capítulo será abordado o método de reciclagem, a produção de filamentos e a impressão da peça em 3D, no À medida que a população mundial aumenta e as atividades industriais e urbanas se expandem, há uma pressão maior sobre os recursos naturais, como água, minerais e energia, para atender às necessidades de produção e consumo. A demanda crescente por recursos naturais está intrinsecamente ligada à geração de resíduos sólidos e ao seu esgotamento, onde a gestão dos mesmos ganha grande visibilidade visto os grandes impactos que resultam dentro das organizações, de modo econômico, social e ambiental (Santos, 2021).

Essa demanda intensa por recursos naturais resulta em um ciclo de extração, produção, consumo e descarte de materiais, o que é insustentável, visto que, hoje, seria necessário 1,71 planeta Terra para suprir a demanda dos recursos naturais da população. O uso excessivo de recursos leva à sua diminuição e eventual esgotamento, exacerbando os impactos ambientais, como a degradação de ecossistemas, a perda de biodiversidade e a poluição do ar, água e solo (GFN, 2024).

Além disso, a gestão inadequada dos resíduos sólidos contribui para o agravamento desse problema, uma vez que muitos materiais descartados podem ser valiosos se recuperados e reciclados adequadamente. Quando os resíduos são simplesmente depositados em aterros sanitários ou descartados de maneira inadequada, recursos valiosos são perdidos e o meio ambiente sofre com a contaminação e a degradação (Segura, *et al*, 2020).

Portanto, a relação entre a demanda por recursos naturais e a geração de resíduos sólidos destaca a necessidade urgente de adotar práticas mais sustentáveis de produção, consumo e gestão de resíduos. Isso inclui a redução do desperdício, a promoção da reciclagem e da economia circular e o desenvolvimento de tecnologias e políticas que minimizem o impacto ambiental e promovam a conservação dos recursos naturais para as gerações futuras (Kizi e Egamberdiev, 2023).

No Brasil, a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) não atingiu todos os seus objetivos, com o aumento contínuo da quantidade de resíduos gerados e o descarte inadequado comprometendo ainda mais o meio ambiente e a saúde pública. A baixa taxa de reciclagem, especialmente para plásticos, evidencia a necessidade urgente de revisão e melhoria das práticas de gestão de resíduos (ABRELPE, 2023).

Os plásticos estão inseridos dentro desta gestão como um material gerado em grande volume, visto que apenas 23% destes são destinados a reciclagem após o consumo, o que indica que muitos resíduos plásticos que poderiam ter um grande valor, estão sendo apenas descartado. Ressaltando a necessidade de explorar todo o potencial de reutilização que estes possuem, de modo que possa atingir taxas maiores ao englobar todos os setores da industrial e fechar uma lacuna que hoje é, em sua maior parte, explorada para pela construção civil e indústria de alimento (ABIPLAST, 2021).

Para que ações mais efetivas sejam tomadas é preciso pensar em redes sustentáveis, que promovam a sustentabilidade em várias áreas da vida humana. É o que prevê a Organização das Nações Unidas (ONU) ao lançar a agenda 2030 e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), onde, pensando neste contexto, um dos objetivos-chave da agenda é a construção de cidades mais sustentáveis, como destacado no ODS nº 11. Isso envolve a promoção de práticas urbanas que reduzam o consumo de recursos naturais, melhorem a eficiência energética, proporcionem acesso equitativo a serviços básicos e promovam a resiliência às mudanças climáticas. Além disso, o ODS nº 12 incentiva o consumo e a produção de forma sustentável, reconhecendo a necessidade de mudar os padrões de produção e consumo para reduzir o desperdício, minimizar os impactos ambientais e promover uma economia mais circular, através de tecnologias e ferramentas que alinhem estes aspectos (UNITED NATIONS, 2023).

Isso pode incluir o uso de tecnologias verdes ou emergentes para reduzir a pegada de carbono, o desenvolvimento de infraestrutura urbana inteligente e sustentável, a implementação de práticas de gestão de resíduos eficazes e a promoção de modelos de negócios sustentáveis e inclusivos. Neste sentido, o termo Economia Circular (EC), vem ganhando destaque pois chama atenção para o ciclo de vida dos produtos, de modo a aumentar a eficiência na utilização de recursos, onde o pensamento antes linear de “extrair, fazer e descartar” passa para um pensamento circular de “reduzir, reutilizar, reparar e reciclar” (Turner, *et al*, 2019). Trazendo uma nova geração de valor ao resíduo, mostrando que a reciclagem e remanufatura pode criar

novas oportunidades de negócios, gerando além de tudo, benefícios econômicos para as organizações.

Quando falamos em tecnologias verdes ou emergentes, a Manufatura Aditiva (MA), também conhecida como Impressão Tridimensional (3D), estamos nos referindo a uma tecnologia reconhecida por ter um grande potencial no desenvolvimento de design de produtos sustentável. Propiciando, principalmente no caso dos plásticos, a recuperação de resíduos e reutilização dos mesmos para a fabricação de novos produtos, além de reparo em peças. O que implica na possibilidade a produção e reciclagem localizada dentro das organizações, de modo a produzir peças e produtos sob demanda, próximo ao local de uso, reduz a necessidade de transporte de longa distância e contribui para a diminuição das emissões de carbono associadas ao transporte (Sauerwein, *et al*, 2019). O que coloca a MA como uma tecnologia promissora para auxiliar no consumo e produção de bens sustentáveis e promover a economia EC.

Entretanto, para que essa tecnologia se torne efetivamente uma ferramenta de produção mais sustentável e para o fechamento do ciclo do material, é crucial focar em pesquisas relacionadas à recuperação, preparação e, sobretudo, à aplicação desses produtos. Embora a viabilidade técnica da produção já seja amplamente conhecida, há poucos estudos que abordam sua utilização prática no cotidiano e ao longo dos diferentes ciclos pós-consumo (Sanchez, *et al*, 2020).

Neste sentido, é necessário entender como o uso destas tecnologias impactam positivamente ou negativamente dentro do processo ou produto em questão, no âmbito de consumo de recursos, impactos ambientais, sociais e econômicos, de modo a identificar oportunidades de melhorias, suportar decisões estratégicas, fornece uma comunicação transparente e o cumprimento de regulamentações. A EC se concentra nestas estratégias que promovam a circularidade, mas não é capaz, de sozinha, de medir estes impactos associados. Para isso, a análise de ciclo de vida (ACV) em conjunto com e EC fornece essa ferramenta específica, sendo complementares ao promover um indicador de desempenho e circularidade (Motta e Issberner, 2018). O ACV já é uma ferramenta consolidada e bem explanada a anos, usada para analisar o ciclo de vida de um produto, desde a extração das matérias-primas até a reciclagem e destinação final. No entanto, para avaliar a reciclagem em ciclos aberto, onde um produto é reciclado para uma função diferente do que o primeiro produto havia sido produzido, alguns aspectos de multifuncionalidade devem ser considerados (ABNT, 2009, p 46). Situação menos explorada no âmbito do uso do ACV quando falamos na reciclagem de plásticos por

tecnologias verdes, especialmente a MA e produção de filamentos, e no seu impacto na EC de uma organização, mas com resultados positivos que evidenciam uma lacuna ainda existente com grande potencial para avanços nas pesquisas (Teles, 2023).

Em linhas gerais, o presente estudo busca integrar os conceitos da economia circular dentro da reciclagem local de resíduos plásticos, através da produção de filamentos de plásticos pós-consumo e produção de peças via MA, a fim de avaliar e comparar cenários de consumo por meio da ACV e como a circularidade do resíduo afeta a EC de um hospital veterinário (HV). De modo que, um resíduo que antes gerava impactos ambientais e econômicos ao ser descartado, tenha um novo ciclo de vida e uma nova utilização, agregando valor ao material e viabilizando a produção mais sustentável.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Propiciar um novo ciclo de vida aos resíduos plásticos através da reciclagem mecânica e avaliar os impactos na economia circular na gestão de resíduos sólidos do Hospital Veterinário da Universidade de Santa Cruz do Sul.

2.2 Objetivos específicos

- a) Compreender o estado da arte de como acontecem as aplicações no cotidiano da reciclagem de resíduos plásticos e seu impacto na economia circular de organizações.
- b) Identificar, caracterizar e separar os resíduos plásticos que serão utilizados reciclados;
- c) Produzir filamentos por extrusão a partir dos resíduos e imprimir peças por manufatura aditiva, de modo que as necessidades e demandas do Hospital Veterinário de Santa Cruz do Sul sejam supridas;
- e) Comparar cenários de reciclagem do resíduo plástico através da análise de ciclo de vida do produto;
- f) Avaliar o impacto na economia circular do Hospital Veterinário ao propiciar uma nova utilidade ao resíduo plástico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Produção Sustentável: conceitos e ferramentas

O termo desenvolvimento sustentável foi conceituado pela primeira vez no relatório final Brundtland, em 1987, conhecido como “Nosso Futuro em Comum”, realizado pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, criado pela Organizações das Nações Unidas (ONU) (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2020). Onde intitula: “Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, garantindo a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro.”

Nos anos 90, a implementação da sustentabilidade nas organizações era vista como um fracasso econômico futuro, onde a perspectiva expansionista sobrepunha as ideias ecológicas (Zanoni e Oliveira 2023). No entanto, essa ideia foi mudando ao longo do tempo, após pesquisas evidenciarem a necessidade da produção sustentável, onde o desenvolvimento humano por si só se mostrava insustentável (WWF, 2023).

De forma a introduzir as questões ecológicas na indústria a Organização da Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNUDI) junto com o Programa de Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) deram início ao termo Produção Eficiente e Mais Limpa de Recursos e elaboraram estratégias de implementação sustentável (UNIDO, 2023). Desde então, organizações buscam alternativas e produtos mais sustentáveis que mudem e melhorem a forma de produzir, sem que haja a escassez dos recursos naturais.

Deste modo, cada vez mais torna-se necessário o uso de ferramentas que ajudem a entender os indicadores de sustentabilidade de cada cenário dos processos e como pode-se agir de modo a reduzir os impactos e produzir de modo mais sustentável. O termo Desperdício Zero abordado por Zaman, como um novo paradigma da sustentabilidade para a geração de resíduos na produção, evidencia a gestão de resíduos e a EC como ferramentas de tornar a extração, produção e consumo cada vez mais livre do desperdício de resíduos (Zaman, 2022).

3.2 Gestão de resíduos sólidos

O termo Gestão de Resíduos Sólidos começou a ser difundido em meados dos anos de 1970, no momento em que o aumento da geração de resíduos na sociedade começou a gerar preocupações, visto a crescente urbanização, industrialização e a necessidade de minimizar os impactos causados ao ambiente e a saúde. O termo teria como objetivo promover a sustentabilidade das organizações como um todo, através do uso mais eficiente dos recursos, bem como da minimização dos impactos e a melhoria da qualidade da vida das pessoas (Tchobanoglous, *et al*, 1993).

O conceito continuou em constante atualização ao longo dos tempos, acompanhando a evolução das grandes cidades, o aumento populacional e da produção de resíduos e como consequência, a redução das áreas disponíveis para aterrar e descartar estes resíduos (Maalouf e Agamuthu, 2023). Atualmente, gerir de modo adequado a geração de resíduos em um caminho de sustentabilidade é um desafio para as grandes empresas e centros urbanos, devido aos efeitos nocivos ao ambiente e a saúde pública na qual estão relacionadas. Para isso, ações vêm sendo tomadas em todo o mundo, principalmente ações governamentais, onde cada país busca modos alternativos de descarte que supram suas necessidades e atendam as propostas para redução dos impactos (BRASIL, 2010; Simões, *et al*, 2019).

Os aterros sanitários ainda são os destinos mais comuns dados aos resíduos sólidos, no entanto, essa tecnologia antes impulsionada como forma de tratamento, já não supre mais a ideia de sustentabilidade que o mundo está exigindo (Segura, 2020). No Brasil, como mostra a Associação Brasileira de Limpeza Pública (ABRELPE, 2022), os objetivos definidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/10, estão longe de serem alcançadas, pois apesar da implementação de tecnologias, o aumento exponencial da quantidade de resíduos gerados extrapola a capacidade de absorção da demanda. Esta realidade acaba virando motivo de preocupação, pois se os tratamentos indicados já se mostram impactantes, o descarte incorreto dos resíduos prejudica ainda mais, necessitando que os investimentos públicos se voltem para o tratamento da saúde e a mitigação da contaminação causada, ao mesmo tempo que indica a má gestão dos resíduos por parte da organização, como aponta Meireles (2023).

De acordo com a ABRELPE (2022) de todo o lixo produzido no Brasil, apenas 4% dele é reciclado, sendo que os materiais plásticos representam uma fatia de 23,2% desse total em

2022. Levando em conta ainda que, a produção de plásticos pós-consumo teve um aumento de 14,7% no país e que a taxa de reciclagem deste teve um aumento de apenas 0,3% em 2021, podemos concluir que o incremento de resíduos plásticos gerados no Brasil, é um fator importante e impactante a se focar dentro da gestão de resíduos sólidos (ABIPLAST, 2023).

O uso de tecnologias inadequadas e não sustentáveis para a destinação dos resíduos trazem efeitos indesejáveis ao âmbito social e ambiental, considerando todo ciclo de vida destes, onde o manuseio, a logística, o processamento, o tratamento e a decomposição do material, são contabilizados (ISWA, 2021; Maalouf, 2023). De acordo com vários estudos, por meio da Análise de Ciclo de Vida (ACV), que avaliaram os impactos causados na gestão de resíduos sólidos hoje em prática, apontam que as emissões de poluentes ao ar, água e o consumo de energias não renováveis, bem como o aumento da geração de resíduos e a grande quantidade destinada aos aterros, são os principais fatores impactantes na maioria das gestões de resíduos sólidos aplicadas (Dan, 2023; Da Silveira Trentin, *et al*, 2018; Khandelwal, *et al*, 2019; Sauve e Van Acker, 2020).

Apesar dos avanços observados, a relutância de muitos países em adotar práticas tecnológicas devido ao seu alto custo é grande, por isso a necessidade de avançar em direção a caminhos mais sustentáveis e acessíveis, com incentivo dos países em desenvolvimento para com os demais países emergentes, de forma a melhorar a estratégia para se alcançar os índices propostos pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (Jan, *et al*, 2023; Maalouf, 2023).

3.3 Resíduos Plásticos Pós-consumo

“Precisamos mudar a forma como desenhamos, usamos e reutilizamos os plásticos. Não podemos usar a reciclagem como solução ou apenas reduzir a quantidade de plástico para sair da crise da poluição por plásticos. Se não agirmos agora, em 2050 pode haver mais plásticos do que peixes nos oceanos” (FOUNDATION, 2023).

Essas são as palavras da Foundation Ellen Macarthur usadas para falar da necessidade de eliminação da poluição por plásticos no meio ambiente. A isso estão atrelados diversos relatórios que fornecem dados estatísticos da situação atual do mundo no âmbito da geração de resíduos plásticos.

O The World Bank lançou uma pesquisa que mostra os desperdícios mundiais, onde enfatiza que pelo menos 33% dos resíduos sólidos são mal administrados, sendo os plásticos

representados por mais de 12%, considerando ainda que mais de 40% destes resíduos são destinados a aterros sanitário e lixões a céu aberto (Kaza, *et al*, 2018).

Apesar dos dados preocupantes, especialistas brasileiros estão otimistas quanto aos dados gerados no Brasil, onde observa-se um crescimento de 14,3% da produção de plásticos reciclado e reutilizado pós-consumo em 2021, indicando ainda que os índices continuarão na crescente (ABIPLAST, 2023). Cabe ressaltar ainda que 41% destes plásticos ainda estão associados ao ciclo de vida longo do material, acima de cinco anos, considerando que a construção civil ainda é a maior utilizadora, e 40% associado a um ciclo de vida curto, até 1 ano, destinado principalmente a indústria de alimento (ABIPLAST, 2022). Mostrando uma lacuna onde há um grande potencial a ser explorado por outros segmentos da indústria e nos centros urbanos, de modo a aumentar as taxas de reutilização dos plásticos pós-consumo, pensando no desenvolvimento sustentável.

Em busca de tecnologias e processos sustentáveis que possam vir a suprir as necessidades de desenvolvimento, é importante considerar todas as etapas, buscando eliminação dos itens plásticos desnecessários e maléficos e inovação assegurando que os plásticos sejam reutilizáveis, recicláveis e compostáveis, de modo que possamos garantir o uso cíclico deles e mantemos eles fora do meio ambiente (NPE, 2023). Mas, como salienta Cook em seus estudos, a atenção posta em cima da necessidade de práticas de economia circular, focando na destinação correta do resíduo plástico, resultou em outro desafio, juntar este foco com a segurança e saúde pública dos condutores dessas tecnologias, visto alguns riscos à saúde humana associados ao se reprocessar alguns tipos de plásticos (Cook, 2020; Cook, 2023).

Por isso a importância do uso de todas as ferramentas de avaliação possível, para que todos os impactos e cenários possam ser avaliados, de modo a selecionar aquele que atende todas as necessidades e reduzir e/ou eliminar os fatores impactantes do modelo a ser substituir.

3.4 Processamento dos plásticos pós-consumo

Segundo a ABRELPE (2022), a destinação adequada de embalagens plásticas no Brasil está evoluindo, sendo representada, em média, por 90% para a reciclagem e 8% para a incineração. No entanto, como salientado, para o desenvolvimento mais sustentável necessitamos de novas tecnologias e modos de reprocessamentos, visto que os já existentes não estão sendo capazes que suprir essa demanda. Revisões realizadas mostram a lacuna existente para o tratamento dos resíduos plásticos que resultem na redução dos impactos, aumentem o

ciclo de vida dos mesmo e que por consequência gerem produtos sustentáveis (Dai, *et al*, 2022; Davidson, *et al*, 2021; Kalali, *et al*, 2023; Rafey, *et al*, 2023).

A reciclagem mecânica de plásticos representa no Brasil 23,4%, tendo o polietileno tereftalato (PET) uma parcela de 54,4% do total reciclado, seguido pelo poliestireno expandido (EPS) com 34,5%, o polietileno de alta densidade (PEAD) com 29% e o polipropileno (PP) 20,3%, sendo que o policloreto de vinila (PVC), o poliestireno (PS) e outros plásticos participam com menos de 10% cada (ABIPLAST, 2022). Isto é reflexo direto do consumo e produção da matéria virgem destes tipos de plásticos pelas indústrias. Números que ajudam a destinar o foco de pesquisas, de modo a otimizar os processos de reciclagem e viabilizar métodos mais limpos que reduzam os impactos ambientais, sendo estes os resultados apresentados por Uzosike ao revisar o uso do PET, Polietilenos (PEs) e PP na reciclagem mecânica (Uzosike, *et al*, 2023). O ACV ainda foi utilizado como ferramenta para indicar que a reciclagem mecânica do PET e do PEAD oferecem benefícios ao meio ambiente quando comparados aos seus respectivos materiais virgens, principalmente com a redução do uso de energia não renovável e emissão de gases de efeito estufa (Bataneh, 2020).

Dentro da gestão de resíduos para os plásticos, algumas tecnologias de reciclagem convencionais são bem difundidas, como a pirolise, a gaseificação e a degradação oxidativa, no entanto são métodos destrutivos em relação ao material polimérico, dificultando e muitas vezes impossibilitando que seja dado um novo ciclo ao produto (Rafey, *et al*, 2023). Entre os métodos mais convencionais, a remanufatura por conformação mecânica é sem dúvida o que melhor vem atendendo a necessidade de propiciar uma nova utilização do plástico dentro da gestão de uma organização, de modo que haja a redução de consumo de material virgem (Ferdous *et al*, 2021; Rajmoahn, *et al*, 2019; Vanapalli *et al.*, 2019). No sentido de aumentar o valor econômico e reduzir o desperdício dos resíduos passíveis de reutilização, a Manufatura Aditiva (MA) traz uma nova visão à reciclagem mecânica (Bottene e Rozatti, 2022).

3.5 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva (MA) é um método de processamento, onde a conformação do produto se dá pela sobreposição de camadas sucessiva do material liquefeito, com o auxílio de modelos geométricos desenvolvidos por sistema de desenho assistido por computador, de modo que a variação das camadas e adição delas, ao longo do desenvolvimento do planejamento bidimensional (2D), vão formando estruturas tridimensionais (3D) (Prado, *et al*, 2019; Zander,

2019). Tornando possível a criação de estruturas bem mais complexas e com desperdício quase nulo quando comparada a fabricação subtrativa convencional, onde a moldagem do produto ocorre pela remoção de material, seja ela por laser, usinagem ou outra técnica (Ponis, *et al*, 2021; Zander, 2019).

A tecnologia da MA começou a se desenvolver em 1988, a partir de protótipos visuais, sem que houvesse exigências quanto as propriedades dos materiais, como resistência, e quanto a precisão do processamento. Perspectivas de desenvolvimento foram sendo criadas em cima da tecnologia, necessitando o aprimoramento dela e estudos mais detalhados. Atualmente, a MA pode ser empregada em mais de 30 técnicas, que variam de acordo com o produto desejado (Volpato e Carvalho, 2018), sendo ela uma tecnologia disruptiva que se enquadra perfeitamente na era da indústria 4.0, trazendo consigo a capacidade de produção personalizada sob demanda, prototipagem rápida, facilidade de interações com sistemas, otimização de fluxos, aliando ainda a redução de custos, estoques e resíduos. Contribuindo com a sociedade através de uma tecnologia e design sustentável, bem como, modelos de negócios circulares que possibilitem o uso da cadeia de suprimentos de materiais locais, de forma a proporcionar a reciclagem *in-situ* e o prolongamento da vida útil dos produtos (Sanchez, *et al*, 2020; Santander, *et al*, 2020; Sauerwein, *et al*, 2019). Isso propicia ainda que alguns materiais poliméricos normalmente não recicláveis, pelas técnicas convencionais, possam ser recuperados, como o caso da acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e ácido polilático (PLA) (Zander, 2019).

Diversos são os segmentos da indústria que podem usufruir dessa tecnologia hoje, no entanto poucas são essas que já as usam, visto que a MA dentro da rede da EC é nova e pouco explorada em larga escala, mostrando que o avanço dos estudos a cerca disto são necessários, promissores e tendem a contribuir para romper essas barreiras da integração do desenvolvimentos cada vez mais sustentável, substituindo processos tradicionais centralizados que não se mostram mais eficientes (Peeters, *et al*, 2019; Sanchez, *et al*, 2020). Estudos, quanto a implementação dessa tecnologia nos modelos de negócios, já preveem o desenvolvimento súbito e a crescente necessidade de regulamentações (Savolainen e Collan, 2020).

A avaliação da reciclagem de plásticos por MA e todo o seu ciclo de vida englobado, enfatizam a possibilidade da reciclagem direta dos resíduos plásticos, de modo que alto valor seja agregado a eles (Roca, *et al*, 2019). São evidenciados progressos principalmente ao modo de comprovar a viabilidade técnica, econômica e o impactos ambientais associados (Pinho, *et al*, 2020; Santander, *et al*, 2020). No entanto, observa-se a escassez de pesquisas que visem as

etapas de preparação e recuperação destes resíduos plásticos para reciclagem (Caceres Mendoza, *et al*, 2023; Sanchez, *et al*, 2020), da mesma forma que o uso da tecnologia como reciclagem distribuída e fabricação circular, que além de se mostrar a melhor opção ambientalmente, comparada à matéria virgem, se mostra lucrativa quando o uso de plástico de origem local (Byard, *et al*, 2019).

3.6 Plásticos no contexto da manufatura aditiva

Os plásticos, polímeros, são de longe o material mais utilizado na MA, porém eles podem ter diferentes características físicas e químicas, o que influencia no modo de construção e processamento via MA. Os materiais termofixos, elastômeros, termoplásticos, polímeros funcionais, compósitos, mistura de polímeros, hidrogéis e biopolímeros são exemplos utilizados, sendo que a escolha da técnica de MA é realizada de acordo com o material em questão (González-Henríquez, *et al*, 2019; Sanchez, *et al*, 2020).

A maior parte dos tipos de plásticos que encontramos nos resíduos são termoplásticos (ABIPLAST, 2022), sendo estes processados na MA por extrusão, onde ocorre a fabricação de filamentos fundidos (FFF), sendo os filamentos a matéria-prima que alimenta as impressoras 3D (Zander, 2019).

A extrusão consiste num processo mecânico de aquecimento do material ao longo de sua passagem por uma seção transversal, com o auxílio de uma rosca que empurra o material até um cabeçote de diâmetro adequado de modo que propicie a construção de um fio contínuo (De Albuquerque Silva e Ferreira, 2023). O controle ao longo do processo é essencial para que as propriedades do material não sejam afetadas. Em sequência o material extrusado é cuidadosamente resfriado, solidificado e bobinado em carretel para armazenagem, sendo que o controle de todas as etapas são fundamentais para que não ocorram falhas e inconsistências durante a impressão do produto (Zander, 2019).

No geral, os plásticos mais comumente usados na FFF são o PLA e o ABS, além de algumas poliamidas e policarbonatos, por possuírem propriedades reológicas, mecânicas e morfológicas mais fáceis e difundidas para o controle do processamento. Visto que o avanço do uso de outros polímeros na MA está associado ao conhecimento do comportamento destes, visto a adesão interfacial entre as camadas e o entrelaçamento do polímero para que não haja formação de poros no produto impresso (González-henríquez, *et al*, 2019; Kumar S. *et al*, 2021; Sanchez, *et al*, 2020).

Polímeros como o PS, PET e polietilenos de baixa (PEBD) ou alta densidade (PEAD) são poucos usados, sendo a comercialização deles praticamente zero, visto os poucos estudos quanto aos problemas encontrados de empenamento, baixa adesão a base da impressora e absorção de água (Chong, *et al*, 2017; Hart, *et al*, 2018; Zander, 2019).

A necessidade da sustentabilidade e a melhoria na gestão de resíduos fez com que ocorressem avanços nos estudos baseados nestes polímeros para aplicação na FFF, sendo que não somente propiciaram a viabilidade técnica destes polímeros virgens, mas também o uso deles pós-consumo (Sanchez, *et al*, 2020). Tanto o PP, PET, PS (Exconde, *et al*, 2019; Zander, 2019), ABS, PLA (Pinho, *et al*, 2020; Singh, *et al*, 2019), PEBD e PEAD (Freeman, *et al*, 2021; Mejia, *et al*, 2020) já possuem metodologias que possibilitam a reciclagem destes materiais e produção de peças pela impressão 3D.

Dentre estes, os PEs ganham destaque na MA pois, como abordado anteriormente, são responsáveis por suprir uma enorme cadeia produtiva, sendo um dos plásticos mais consumidos no mundo e da mesma forma, um dos polímeros mais descartados no mundo por não ter uma tecnologia que supra essa demanda (ABIPLAST, 2022; ABRELPE 2021). Além disso, os PEs possuem propriedades de alto interesse industrial, com diferentes métodos de processamento e aplicação, assim como custo reduzido e baixo consumo de energia e recursos comparado as matérias-primas substituintes (Schirmeister, *et al*, 2021).

3.7 Polietilenos via FFF

Os PEs podem apresentar variações quanto a sua estrutura química, refletindo em suas características físicas, mas de modo geral possuem parte amorfas e cristalinas em sua estrutura, variando basicamente quanto a sua organização em ramificações. O PEBD possui cadeias poliméricas estendidas, com grande número de ramificações, refletindo em um material com cristalinidade e densidade mais baixa, maior flexibilidade, transparência e processamento mais fácil por permitir um range maior de temperaturas mais baixas de trabalho. Já os PE com densidades mais altas, tendem a ter menos ramificações ao longo de sua cadeia polimérica, o que causa o aumento da sua densidade e as forças de ligação, bem como uma alta cristalinidade, resultando em um polímero mais resistente. Sendo estes ainda passíveis de blendas, levando em conta a versatilidade do material formado, de modo a atender as demandas do mercado (Gary, *et al*, 2021; Silva, 2020).

O uso dos PE na FFF é recente, visto que algumas das propriedades do polímero limitavam seu uso na impressão 3D, devido ao fato de não se ter o conhecimento de todos os parâmetros de controle do processamento que se necessitava (Chong,*et al*, 2017). O PEAD em específico, apresenta o problema de empenamento no momento de resfriamento do polímero, isso devido as suas fases amorfas e cristalinas, fazendo com que o resfriamento não seja uniforme ao longo do filamento extrusado, o que gera a falta de padrão no seu diâmetro. Sendo que o empenamento prejudica principalmente na adesão da peça à base de impressão e a difusão entre as camadas impressas, onde a sua baixa energia de superfície faz com que a peça impressa escorregue e se mova na base devido a força exercida na impressão. Causando a descontinuidade da impressão 3D (Chong,*et al*, 2017; Gudadhe, *et al*, 2019; Mejia, *et al*, 2020; Schirmeister, *et al*, 2019).

Usando o PEAD comercial, Schirmeister, *et al*, (2019), conseguiu superar o problema da adesão a base da impressora ao testar e selecionar o melhor material para revestir a placa, de modo que permitiu a boa adesão do PEAD durante toda a impressão da peça, permitindo ainda, a fácil remoção após o final do processo, evitando a danificação do mesmo. A partir do mesmo estudo, foi possível otimizar os parâmetros de processamento da FFF, sendo que o empenamento foi resolvido com o controle da taxa de extrusão, variando o percentual de enchimento no momento da impressão, obtendo redução da cristalinidade apenas com o ajuste da temperatura de extrusão. Otimizações que foram utilizadas como metodologia em outros estudos, obtendo resultados positivos quando a impressão de peças 3D utilizando PEAD na FFF (Freeman, *et al*, 2021; Kumar, R., *et al*, 2021; Schirmeister, *et al*, 2021).

Já o problema da adesão da peça à base pode ser resolvido utilizando uma chapa de PEAD aquecida, fornecendo aderência necessária. De modo ainda a tentar resolver o problema relacionado ao empenamento e a alta cristalinidade no processo de resfriamento, pesquisadores usaram materiais de mudança de fase na composição com o PEAD, devido sua capacidade de absorver calor durante a mudança de fase e propiciar um resfriamento constante (Freeman, *et al*, 2021).

Alguns compostos podem atuar da mesma forma que os materiais de mudança de fase, no intuito de diminuir o empenamento e melhorar a fusão do polímero. Gudadhe, *et al*, (2019), conseguiu minimizar esses feitos ao utilizar um agente nucleante, o dibenzilideno sorbitol, e Mejia, *et al*, (2020) que usou enxerto de anidrido maleico como agente de ligação para melhorar a adesão do polímero.

A mistura de PEAD e PEBD para a produção de filamento se mostra uma alternativa viável, principalmente pelo fato de que a blenda propicia características específicas, como a melhora da rigidez, aumento da tração e do impacto, sendo que os PE de maior densidade atuam como auto reforço e os de menores densidade ajudam a reduzir a cristalinidade (Gudadhe, *et al* 2019; Schirmeister, *et al*, 2021).

São vários os pesquisadores que vem estudando o uso dos PEs na FFF para aplicações distintas, com uso de outros materiais em conjunto, buscando características específicas (Meija, *et al*, 2020; Ponis, *et al*, 2021; Sanchez, *et al*, 2020). Pó de papelão como resíduos foram incorporados ao PEAD, aumentando a linearidade do filamento em 20%, sendo que o objetivo era a prototipagem na arquitetura e design (Gregor-Svetec, *et al*, 2020). Resultado este que pode servir como base de estudo do uso de embalagens plásticas com adesivo de papel diretamente na reciclagem, sem que haja necessidade da remoção.

Resíduos de cenosfera de cinzas volantes (Doddamani, 2020), carbeto de silício e óxido de zinco (Singh, *et al*, 2019; Singh, *et al*, 2020), óxido de zircônio (Singh, *et al*, 2021), nanoargilas (Beesetty, *et al*, 2020) e micro balões de vidro (Bharath, *et al*, 2021) também foram viabilizados em conjunto com os polímeros de PEAD com o objetivo de adicionar um reforço a matriz de modo que ocorresse a redução da cristalinidade do filamento e o aumento do índice de fluidez. Porém o que se observa nestes estudos é a falta de implementação destes produtos de FFF, onde não há impressão de peças com o intuito de aplicabilidade, apenas corpo de provas para testes (Ponis, *et al*, 2021).

Cabe ressaltar que, muitas das pesquisas ainda utilizam o PE virgem como matriz ao invés do polímero reciclado, o que pode se tornar um erro caso o intuito seja utilizar o material reciclado ao final, pois após sua refusão algumas propriedades do material podem ser modificadas, mesmo que leve, qualquer alteração pode impactar no resultado final do produto. No caso do PEAD, com o auxílio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível observar que após a primeira fusão (produção do filamento) e a segunda fusão, o material continuou o mesmo, concluindo que este é passível de vários ciclos de utilização (Freeman, *et al*, 2021). A fim de entender o ciclo de uso do PEAD reciclado via FFF e a variação das propriedades do material, Vidakis, *et al*, (2021) testou a partir de peças impressas vários ciclos de reciclagem e conseguiu obter resultados satisfatórios até o 5º ciclo de uso, observando leve degradação após o 6º ciclo. Sendo que houve aumento de 22% em todas as propriedades mecânicas entre o 2º e o 5º ciclo, da mesma forma que Tipu, *et al* (2023).

Considerando os avanços nos estudos, observa-se grandes possibilidades de reuso do PEAD na impressão 3D como tecnologia de reciclagem distribuída, visto suas vantagens frente as demais técnicas de reciclagem centralizada convencional. Ainda, há que se considerar o fato de não necessitar de transporte de logística reversa e coleta do material pós-consumo, há redução média de 80% no uso de energias não renováveis e 25% a 75% na emissão de gases de efeito estufa (Bataineh, 2020; Chong, *et al*, 2017). Evidenciando a importância dos avanços da sua implementação na cadeia de suprimento circular de qualquer organização.

3.8 Economia Circular

Economia Circular (EC) é um conceito que ganhou ascensão na mídia só nos últimos anos, mas que começou a ser integrada a estudos nos anos de 1989 por David Pearce e Kerry Turner ao contextualizar a valoração ambiental e analisar os benefícios das políticas ambientais, colocando a EC como uma alternativa à economia linear (EL) tradicional, onde os recursos são usados de modo ineficientes com grande geração de resíduos (Pearce e Turner, 1989). Para que essa transição ocorra de modo eficiente e mais inteligente, foram estruturadas estratégias de ações, as chamadas R10, que buscam recuperar, reciclar, reaproveitar, remanufaturar, reformar, restaurar, reutilizar, reduzir, repensar e recusar, a partir de três abordagens distintas, buscando aplicar o material de forma útil, prolongar a vida útil dos produtos e peças e fabricar e usar os mesmos do modo mais inteligente. Estratégias essas que são usadas hoje como um novo conceito para a EC (Morsetto, 2020; Nandy, *et al*, 2022).

A implementação da EC como ferramenta para a gestão de resíduos sólidos dentro das organizações hoje, mostra que é possível atingir as ODS estipuladas pela ONU (Sharma, *et al*, 2021), porém o desafio se mostra grande para as organizações ao pensar “De que forma podemos reduzir o desperdício, maximizar a utilização e ter uma melhor gestão de materiais considerando todo o ciclo de vida do nosso produto?” (Maalouf e Agamuthu, 2023).

O estudo realizado por Streit baseado na EC de embalagens em geral, identifica a existência de uma grande lacuna na literatura do uso da EC dentro da gestão de resíduos sólidos e a institucionalização dos termos. Evidenciando ainda que este tema contribui diretamente na produção sustentável e que a implementação de políticas age direto no fechamento do ciclo produtivo e na valorização dos produtos, até mesmo após a sua vida útil (Streit, 2022).

No Brasil, a implementação da economia circular ainda está em estágio inicial, apontando que apenas 3% das empresas brasileiras têm uma estratégia bem definida para a economia

circular, porém este número é crescente, considerando o potencial existente e que 69% das empresas se dizem familiarizadas com o conceito e 64% se mostram dispostas na adoção destas práticas nos próximos anos. Dados estes levantado e divulgados pela Fundação Ellen MacArthur em 2020 (FOUNDATION, 2023).

O grande obstáculo ainda evidenciado nem está diretamente ligado as tecnologias existentes e sim a cultura local de não reciclar. Partindo da falta de informação e conscientização sobre a importância da reciclagem, a precária estrutura disponibilizada para a coleta e separação dos resíduos e até mesmo ao acesso a coleta seletiva por parte da comunidade. Além da falta de incentivos financeiros para os consumidores e de uma política pública que facilite a adoção da prática e implementação da economia circular por parte das empresas (Luzia, *et al*, 2023).

3.9 Análise de ciclo de vida

A (ACV) é uma dessas ferramentas de grande potencial que foram desenvolvidas nos últimos tempos para tomada de decisão. A partir dela é possível avaliar os impactos ambientais, sociais e econômicos atrelados a um produto, serviço ou processo, comparando vários cenários, onde valores de cargas podem ser medidos e mensurados, de modo que todo o conjunto e etapas da cadeia de produtividade seja avaliado (ABNT, 2009; CICLOG, 2023; Nyakudya, *et al*, 2022).

Baseado em alguns pilares como “pensamento em ciclo de vida”, “conceito de função e possibilidade de comparação”, “Método Científico (NBR ISSO 14040)” e “abrangência que evita pontos cegos com fluxos de materiais e energia”, a ACV permite mensurar aspectos de sustentabilidade e integrar a sustentabilidade ao processo de decisão, através de indicadores específicos e estratégicos (ABNT, 2009).

A normatização do ACV torna ela uma ferramenta de uso imprescindível quando falamos em gestão de resíduos dentro de uma organização, de modo que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estipula a NBR ISO 14040 e 14044 quanto a estrutura e requisitos e as NBR ISO/TR 14047, 14049 e 14071 como exemplos de processamento e orientação. De acordo com a norma (ABNT, p 46, 2009), ciclo de vida de refere ao “conjunto de estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final”.

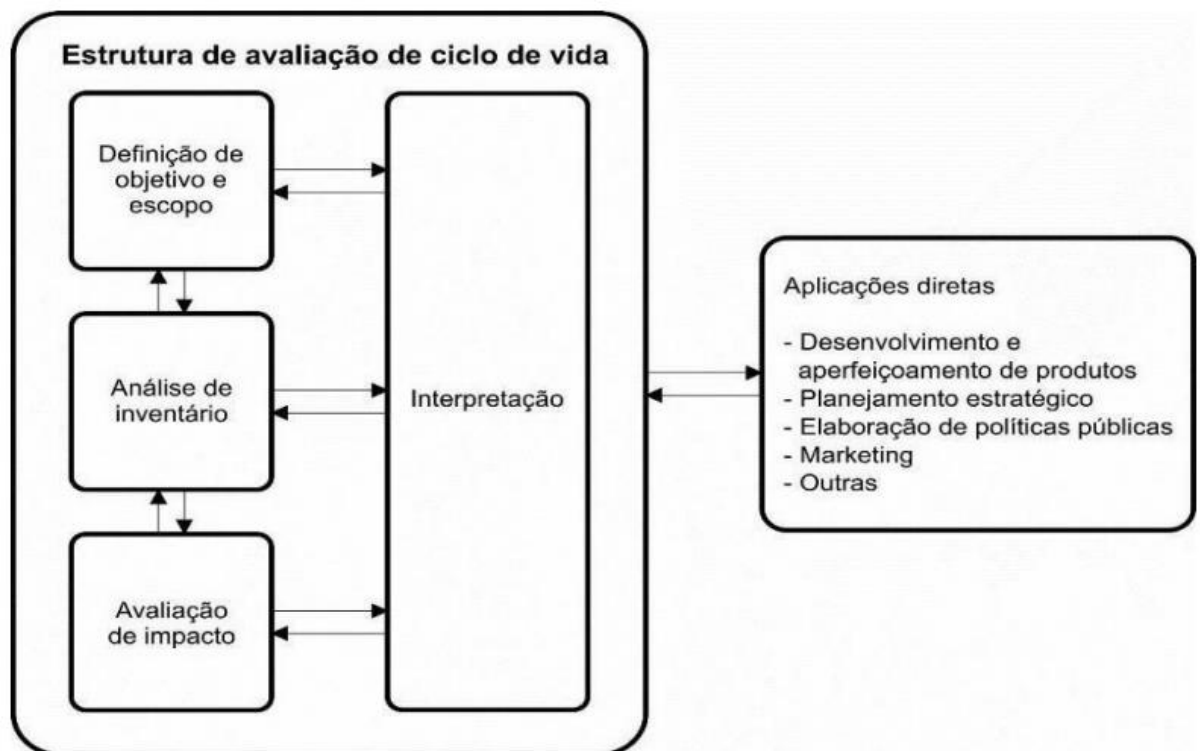
Até então a expressão “do berço ao túmulo” caracterizava os estudos utilizando o ACV, onde o cenário é analisado a partir das suas matérias-primas extraída da natureza até sua deposição final. No entanto, alguns autores já vêm adotando a expressão “do berço ao berço”, aliando com a economia circular, considerando assim a continuidade do produto através da reutilização e reciclagem (INMETRO, 2023).

Estudos mostram a partir do ACV, que os resíduos plásticos são a categoria de resíduos mais impactantes dentro da gestão de resíduos sólidos do país, impactando principalmente nas mudanças climáticas e no aquecimento global (Elijah, *et al*, 2023), bem como a destinação da grande quantidade de resíduos sólidos para os aterros, aumentou os impactos ambientais associados (Júnior, *et al*, 2021). Da mesma forma que se pode comparar a eficiência entre duas ou mais tecnologias a fim de delinear um melhor caminho para a destinação de um resíduo, como evidencia Landia *et al*, (2022), ao definir que a tecnologia de MA se mostra menos impactante aos recursos naturais, de modo que, em estudos futuros, a otimização do mesmo pode ser fonte de minimização de impactos ambientais, sendo uma ferramenta importante de auxílio do desenvolvimento sustentável (Dalmora, *et al*, 2023).

3.9.1 Metodologia da ACV

O método de realização do estudo da ACV é padronizado pela ABNT (ABNT, 2009), sendo organizada em etapas interligadas, o que permite que ocorram readequações no processo ao longo da execução do mesmo. As etapas que estruturam a ACV são dispostas da seguinte forma (Figura 1).

Figura 1. Estrutura da ACV e aplicações diretas.



Fonte: (ABNT, 2009).

Definição de Objetivo e Escopo: Nesta etapa inicial, os objetivos específicos da análise de ciclo de vida são estabelecidos, determinando o propósito e o foco da avaliação. Os objetivos podem variar desde a identificação de oportunidades de melhoria ambiental até a comparação de diferentes produtos ou processos. O escopo do estudo é definido para delinear os limites do sistema que será analisado. Isso inclui a determinação dos estágios do ciclo de vida a serem considerados, os impactos ambientais relevantes a serem avaliados e quais critérios serão utilizados para a interpretação dos resultados. Imprescindível é a definição prévia de conceitos como: função do produto, unidade funcional, fluxo de referência, fronteiras do sistema de produto, processo elementar, sistema de produto, tratamento de situações de multifuncionalidade, critério de exclusão de dados, requisitos de qualidade de dados, categoria e método de avaliação de impacto e interpretação e análise crítica.

Inventário do ciclo de vida (ICV): Durante esta fase, são identificados e quantificados todos os inputs (entradas) e outputs (saídas) associados ao produto, processo ou serviço ao longo de seu ciclo de vida completo. Isso envolve a coleta de dados sobre matérias-primas,

energia, água, emissões atmosféricas, resíduos sólidos, entre outros. Sendo que técnicas como levantamentos de dados primários, análises de balanço de massa e modelagem são frequentemente empregadas para estimar os fluxos de materiais e energia ao longo do ciclo de vida.

Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV): Nesta etapa, os dados do inventário são traduzidos em impactos ambientais potenciais em diversas categorias, tais como mudanças climáticas, depleção de recursos naturais, toxicidade, eutrofização, pegada de carbono, entre outros. Para isso são utilizados métodos e modelos específicos para caracterizar e quantificar esses impactos, geralmente baseados em indicadores de impacto, fatores de caracterização e fatores de equivalência.

Interpretação dos resultados: Os resultados da ACV são interpretados de acordo com os objetivos estabelecidos no início do estudo. Isso envolve a identificação de áreas críticas de impacto, a comparação de diferentes alternativas e cenários, e a avaliação das oportunidades de melhoria. Ela também pode incluir a identificação de pontos fortes e fracos de um produto ou processo em relação aos seus impactos ambientais.

Análise de sensibilidade e incerteza: Etapa esta que é opcional e visa avaliar a robustez dos resultados da ACV em face de variações nos dados de entrada, nos métodos utilizados ou em outras fontes de incerteza. A análise de sensibilidade pode incluir a identificação de parâmetros críticos que mais influenciam os resultados da ACV, enquanto a análise de incerteza busca quantificar a confiabilidade das conclusões do estudo.

Interpretação e conclusão: Por fim, os resultados são interpretados de forma apropriada para a tomada de decisões. Isso pode envolver a formulação de recomendações para a redução dos impactos ambientais, a identificação de oportunidades de inovação ou a comunicação dos resultados para partes interessadas.

É importante ressaltar novamente que, a ACV é um processo iterativo, e os resultados e conclusões podem influenciar revisões subsequentes do estudo ou orientar ações futuras.

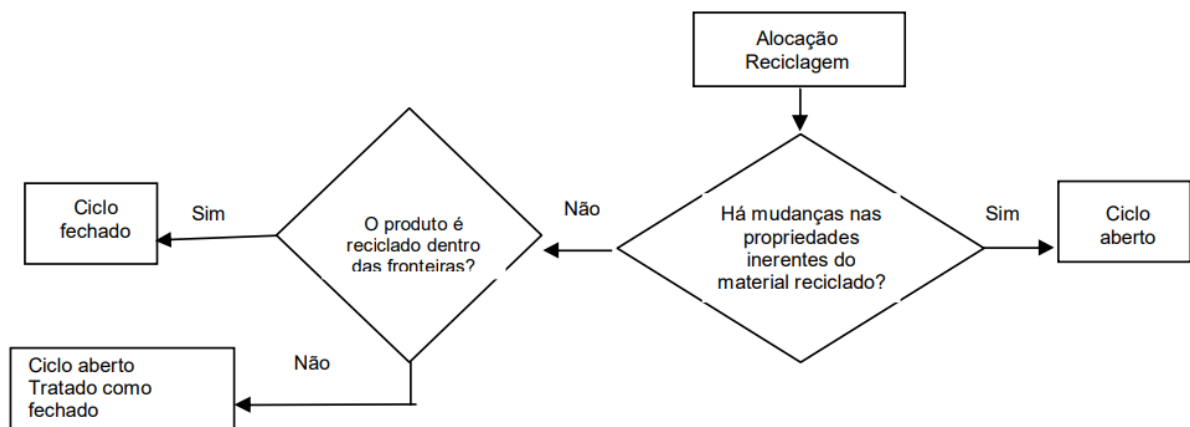
3.9.2 ACV para reciclagem em ciclo aberto

Quando falamos em reciclagem, é importante salientarmos a diferença entre a reciclagem em ciclo aberto (*open recycling loops*) (ORL) e a reciclagem em ciclo fechado (RCF), pois

possuem algumas diferenças significativas quando se trata da avaliação final do produto e do seu ciclo.

A RCF ocorre quando o produto ou material é reciclado de modo que o mesmo volte ao ciclo original, reintegrando o processo produtivo, onde o produto final tende a ser o mesmo, onde uma garrafa plástica usada volte a ser reciclada e transformada em outra garrafa plástica. Resultando em um produto transformado, de qualidade igual ou superior através de adição de material virgem, sem que haja perdas significativas de qualidade. Já a ORL é uma forma de reutilização de material, um processo no qual materiais recicláveis são transformados em produtos diferentes dos originais, sem passar por um processo de purificação ou transformação química significativa (Dubey, *et al*, 2020; Pereira, *et al*, 2023; Souza, *et al*, 2018). Na figura 2 é possível visualizar o modo de seleção para o tipo de procedimento de alocação em reciclagem.

Figura 2. Método de decisão para o tipo de procedimento de alocação em reciclagem.



Fonte: ABNT ISO TR 14049, 2000.

A norma ABNT NBR ISO 14044 se refere ao reaproveitamento na forma de reuso e reciclagem de modo que admite que os mesmos impliquem no consumo e emissões associados as etapas de extração de recursos naturais, processamento e disposição final, sendo compartilhadas pelos produtos que compõe a ORL. Sendo consideradas durante a etapa de quantificação das cargas ambientais, onde o coproduto pode ser adicionado ou subtraído do sistema. Método denominado de cargas evitadas ou método de substituição (ABNT, 2009).

O método de alocação utilizado em estudo para ACV de reciclagem não possui um padrão de aplicação e pode ser variado (Tabela 1). O importante neste caso é entender e considerar os diferentes aspectos associados, como:

Impacto Ambiental da Reciclagem: Embora a ORL possa reduzir a demanda por matérias-primas virgens e minimizar a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários, ela também tem seus próprios impactos ambientais. Isso inclui o consumo de energia e água durante o processo de reciclagem, bem como a emissão de poluentes atmosféricos.

Qualidade do Produto Reciclado: A qualidade dos produtos ORL geralmente é inferior à dos produtos originais. Isso pode resultar em uma vida útil mais curta para esses produtos e, conseqüentemente, em uma demanda maior por novos produtos, o que pode aumentar os impactos ambientais associados à fabricação.

Eficiência de Reciclagem: Em alguns casos, a ORL pode resultar em uma eficiência menor do que a RCF. Isso ocorre porque o processo de ORL pode causar perdas significativas de material e energia, especialmente quando comparado com processos de reciclagem mais avançados.

Custos Econômicos: Além dos impactos ambientais, também é importante considerar os custos econômicos associados à reciclagem em ciclo aberto. Isso inclui os custos de coleta, transporte e processamento dos materiais recicláveis, bem como os custos de fabricação dos produtos reciclados.

Tabela 1. Métodos de alocação para ACV de reciclagem.

Método de Alocação	Características	Pontos Fortes	Limitações
Desagregação do sistema em subprocesso	Na divisão de processos, um processo multifuncional é desagregado em mais de um processo unifuncional (subprocessos)	Indicado pela norma ISO 14044:2006	Mesmo que independentes, um subprocesso pode afetar os impactos ambientais do outro subprocesso
Expansão do sistema	Ocorre quando as fronteiras do estudo são expandidas para incluir um subprocesso, obtendo somente o produto de interesse. inclui cofunções na unidade funcional.	É indicado pela norma ISO 14044:2006; Viável para ciclo aberto de reciclagem	Difícil aplicação, pois resulta em sistemas grandes e demandam muitos requisitos de dados do sistema

Método de Substituição	O método de substituição é também chamado de método de carga evitada e substitui a carga ambiental, no qual são calculados os impactos dos materiais, que serão produzidos para compensar a perda do material que será reciclado	Utiliza o material reciclado como matéria-prima; substitui os impactos da produção de matéria-prima virgem; Podem ser aplicados a sistemas fechado e aberto de reciclagem	Fornece créditos para o primeiro uso, o que resulta em um aumento da carga ambiental associada ao segundo ciclo de uso
Método de carga evitada (avoided burden)	O método de carga evitada é semelhante ao método de substituição uma vez que substitui a carga ambiental do material virgem que seria produzido	Considera os benefícios da não extração de matérias-primas virgens. Viável para sistema aberto de reciclagem	limitações não semelhantes ao método de substituição
Alocação por massa	A carga ambiental de todo o ciclo de vida do material é dividida entre os diferentes produtos na proporção da massa de cada produto	Indicado pela norma ISO 14040:2006	Método complexo pela dificuldade de se contabilizar os impactos de todos os sistemas ao longo do ciclo de vida
Método de corte (cut-off)	Cada produto deve receber apenas a carga ambiental causada diretamente por ele, permitindo que os ciclos seguintes não imputem os encargos ambientais dos	Simplicidade de aplicação; estimula a reciclagem de resíduos; Não é necessário conhecer os dados	Não reconhece relação intrínseca entre a fase de produção e reciclagem; A dúvida gerada a

produtos anteriores. Também regressos do partir desse método denominado como método de sistema de produto é: Seria coerente conteúdo reciclado e estudado; Evita excluir os impactos reciclagem em fim de vida dupla contagem de da primeira vida? fluxos e impactos

Número de ciclos de reciclagem (number-of-recycling-loops) Os impactos da produção de material virgem e tratamentos de resíduos são igualmente compartilhados por todos os ciclos de reprocessamento

Permite a inclusão de fator de alocação para o material reciclado que entra e que sai no sistema de produto; O método é apropriado para quantificar a reciclagem de plástico.

Requer dados de qualidade do material reciclado que entra e do material reciclado que sai no sistema de produto.

Método ciclo fechado (closed loop) Associa que cada ciclo de vida de um produto, é igualmente responsável pelos impactos ambientais associados ao consumo de matérias-primas e tratamento de resíduos. Deve ser aplicado "se o material reciclado mantiver as mesmas propriedades do material virgem"

O material reciclado repõe a matéria-prima sem afetar a reciclagem de outro material

Uma vez que contabilização de encargos ambientais é acumulada a cada ciclo de reciclagem, o que pode inviabilizar a reciclagem

Método 50/50 Aloca a carga ambiental do consumo de recursos e impactos da destinação do material pós-consumo com a contabilização apenas do primeiro e último ciclo do

É válido também para reciclagem em ciclo aberto desde que o material não sofra perdas de

A dificuldade deste método é devido à exigência de dados externos ao sistema de produto em análise, que pode

	produto, com iguais responsabilidades dos impactos	qualidade relevantes.	dificultar a sua aplicação.
Alocação econômica	O resíduo recebe valor econômica, ao ser considerado como matéria-prima e deixa de ter custo para tratamento de resíduos	A carga ambiental é dividida entre o produto virgem e os produtos reciclados com base no valor econômico das duas funções	Dependente da flutuação dos valores de mercado
Perda de qualidade (loss of quality)	Relaciona a perda de qualidade técnica do material e o preço que é praticado do material reciclado	Adequado para reciclagem em ciclo aberto.	Dependente da flutuação de preço de mercado

Fonte: Adaptada de Pereira, *et al*, 2023.

3.10 ACV como ferramenta de avaliação da EC

De modo global, observa-se a tendência e o interesse em uma transição dos modos de negócio, onde a adoção e implementação de estratégias de economia circular são evidenciadas e consigo trazer a necessidade de aplicação de métodos de avaliação que ajudem a prevenir potenciais impactos, sejam ambientais, sociais ou econômicos.

Mudanças no modo de negócio podem desencadear consequências importantes nos fluxos envolventes, o que faz com que técnicas harmônicas de avaliação sejam requisitadas. Abordando separadamente os conceitos da EC e do ACV, é clara a significativa relação entre eles e seus objetivos. Sendo que a visão holística que ambos os conceitos trazem sobre o sistema é o primeiro ponto para essa transição, pois ambas consideram os impactos associados a toda fase do ciclo de vida de um produto e não apenas do processo (Peña, *et al*, 2021).

Em busca de métodos que promovam a sustentabilidade, a redução do consumo de recursos naturais, a minimização de resíduos e dos impactos ambientais, além da otimização do uso de materiais ao longo do tempo, a EC se concentra mais nas estratégias de negócios e nos modelos econômicos que promovam a circularidade dos materiais e a ACV fornece uma ferramenta específica para avaliar os impactos ambientais ao longo da vida do produto e

identificar as oportunidades de melhorias. Abordando de forma complementar na promoção de um indicador de circularidade (Motta e Issberner, 2018).

No entanto, avaliar o desempenho ambiental de uma organização requer considerar aspectos além da circularidade, por isso a aplicação de outros indicadores fornecidos por um estudo de ACV é crucial para a avaliação da sustentabilidade. Propiciando a comparação entre cenários e produtos, de modo que o embasamento para tomada de decisão seja mais preciso, a partir de métrica de sustentabilidade e monitorização de desempenho fornecidas pelo ACV. Atualmente, esses dados ambientais são essenciais para que as organizações possam comunicar de forma credível tanto internamente quanto externamente (Pontes e Angelo, 2019).

4 METODOLOGIA

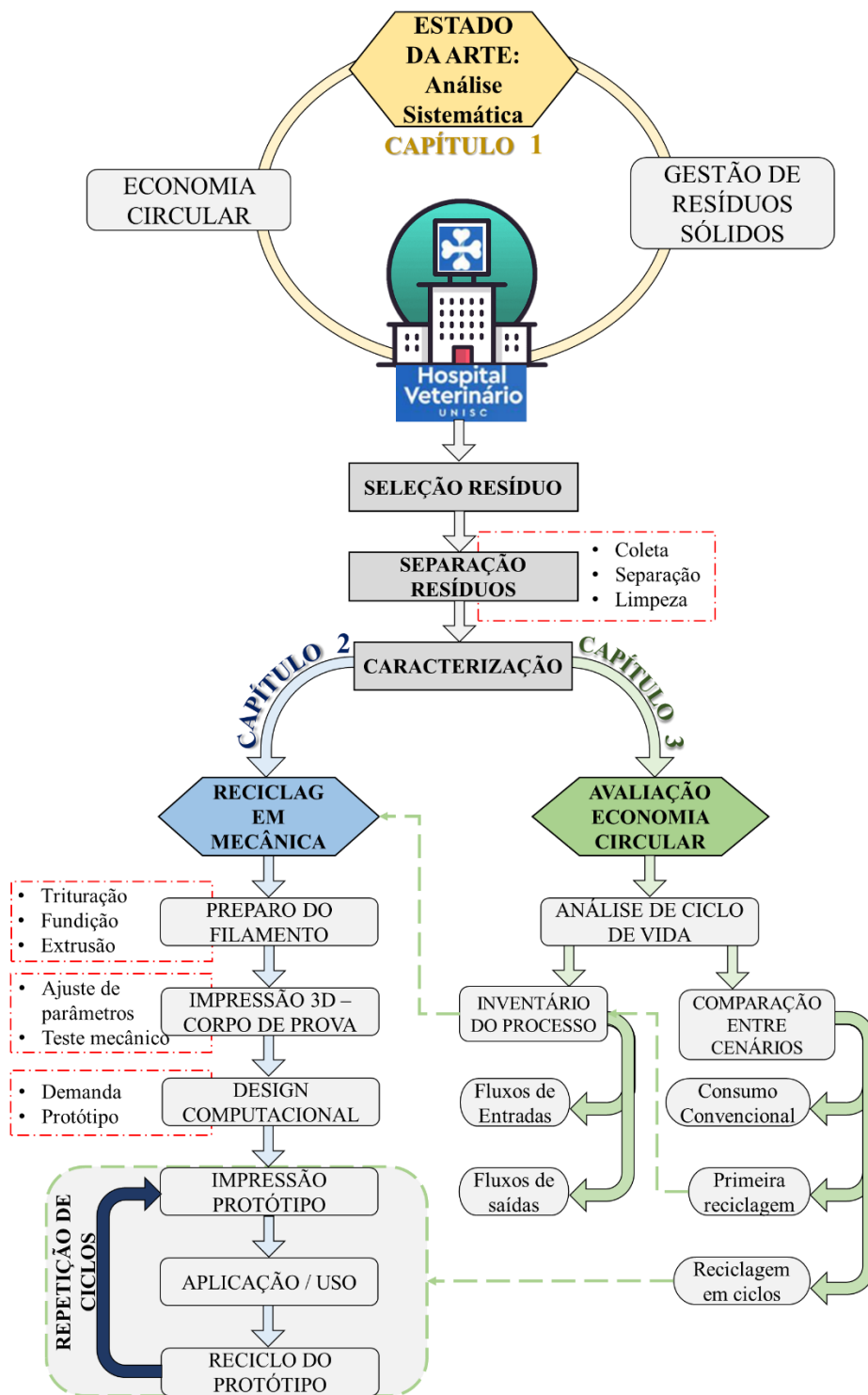
O desenvolvimento do trabalho foi realizado junto ao Hospital Veterinário da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), localizado em linha Pinheral, na cidade de Santa Cruz do Sul, estado do Rio grande do Sul, Brasil. O HV funciona tanto para atender os cursos de medicina veterinária da UNISC, quanto a atendimento clínicos e cirurgicos a comunidade para animais de pequenos, médio e de grande porte, sendo estes animais domésticos ou silvestres. Neste contexto, o consumo de produtos com alto giro e baixo tempo de uso é elevado, desde embalagens de medicamentos até itens como talas e próteses. O que acarreta em diversos tipos de resíduos sendo gerados todos os dias.

Neste sentido, a metodologia adotada tem o intuito de possibilitar que os objetivos específicos propostos possam ser atingidos de modo adequado e claros, como descritos na Figura 3, onde é possível observar o delineamento principal de cada etapa. Considerando ainda que capa capítulo terá sua metodologia detalhada, afim de solucionar os objetivos específicos.

A primeira etapa procura através de uma análise bibliométrica entender como os estudos vem aplicando a economia circular em contexto com a gestão de resíduos sólidos, principalmente quando se refere a resíduos sólidos, objetivando assimilar o uso dessa ferramenta atualmente no contexto deste estudo.

As demais etapas partem da seleção do resíduo plástico. Para isso, foram identificados os principais resíduos plásticos gerados dentro do HV e seu respectivos volumes, de modo que houvesse uma demanda de descarte mensal e que o mesmo tivesse características apropriadas para reciclagem mecânica pós-consumo.

Figura 3. Fluxograma geral da metodologia adotada.



Fonte: Autor, 2024.

Junto ao segundo capítulo, será tratado em específico o método de processamento do resíduo até produto final após a reciclagem, considerando todos ajustes e parâmetros dos

processos e equipamentos. No terceiro capítulo do estudo, será evidenciada a avaliação dos impactos associados ao processo, de modo a comparar com o cenário convencional e analisar o ciclo do produto.

A repetição em ciclos da reciclagem dos protótipos impressos é proposta apenas considerando a avaliação da economia circular envolvida na viabilidade do processamento, sendo analisada juntamente no terceiro capítulo. A sua produção propriamente dita ficará como sugestão para trabalhos futuros, visto o tempo necessário para todos os testes. Neste caso, o estudo em questão se baseia em estudos anteriores que comprovam a possibilidade da reciclagem em ciclos dos resíduos de PEAD em até cinco ciclos sem que haja perdas significativas nas características dos polímeros impressos (Vidakis, *et al*, 2021; Tipu, *et al*, 2023).

4.1 Seleção e separação dos resíduos

Em linhas gerais, os resíduos da embalagem de bolsas de soro fisiológico foram selecionados para o andamento da pesquisa, visto que as mesmas possuem um grande consumo no HV e pelo fato da embalagem do soro fisiológico ser um material estéril, sendo que as mesmas não necessitam de lavagem após sua coleta e separação, Figura 4.

Figura 4. Embalagens de soro fisiológico selecionadas de diferentes tamanhos.



Legenda: Frasco A: 1000 mL; frasco B: 500 mL; frasco C: 100 mL; frasco D: 250 mL. **Fonte:** Autor, 2024.

A coleta das embalagens foram realizadas a cada 15 dias inicialmente, de modo a compreender melhor o fluxo de geração desse resíduo, por meio de pontos de coletas em diferentes locais dentro do HV, assim como um ponto de recolhimento de armazenamento transitório dos mesmos (Figura 5).

Desta forma foram identificados frascos de diferentes tamanho e diferentes conteúdos, solução fisiológica e ringer com lactato, conforme Tabela 2. A solução fisiológica é composta apenas por cloreto de sódio a 0,9%, indicada para restabelecimento de fluídos e eletrólitos, enquanto o ringer com lactato serve para reidratação e restabelecimento do equilíbrio hidroeletrólítico, possuindo na sua composição cloreto de sódio, cloreto de potássio, cloreto de cálcio e lactato de sódio. De forma que ambas as solução e frascos são componentes estéreis.

Figura 5. Pontos de coleta dos resíduos de embalagens de soro fisiológico.



Legenda. imagem A: indica o modo de armazenagem transitória dos resíduos coletados; imagem B: ponto de coleta em pontos estratégicos dentro do HV. **Fonte:** Autor, 2024.

Tabela 2. Consumo anual de soro fisiológico e ringer lactato pelo HV.

Média anual de consumo					
Frascos (ml)					
	100 ml	250 ml	500 ml	1000 ml	TOTAL (unidade)
Solução fisiológica	420	303	77	201	1001
Solução de ringer lactato	-	684	386	324	1394
					2395

Quanto a separação das embalagens de soro fisiológico, consiste em retirar inicialmente o rótulo de papel manualmente e a biqueira de borracha com o auxílio de uma tesoura, de modo que apenas o plástico puro siga para as próximas etapas e o restante separado seja descartado de modo convencional. O objetivo de fazer a separação destas partes do resíduo tem o intuito de eliminar qualquer impureza que possa atrapalhar na caracterização do material que será processado, para que possa ser realizadas comparações futuras. A partir disto, a separação do resíduo não será mais necessária, sendo que a adição de carga de papel junto ao PE para produção de filamentos e impressão de peças 3D já se mostrou viável, de acordo com Gregor-Svetec, *et al*, 2020, bem como a borracha das biqueiras poderia ser usada como agente nucleante do polímeros, haja visto as dificuldades existentes quanto a cristalinidade dos mesmos ao resfriarem após a extrusão. De modo que, a não separação das partes da embalagem de soro fisiológico, podem até trazer benefícios no processamento (Gudadhe, *et al*, 2019; Martin, 2017).

4.2 Caracterização do resíduo

A caracterização do resíduo plástico trata-se de entender as propriedades físicas do material, a fim de indentificar suas propriedades físicas e químicas do mesmo, de modo a confirmar o tipo de polímero que se está trabalhando. Neste sentido, para poder compreender o seu comportamento frente a reciclagem, serão realizados testes como:

- Análise de espectroscopia por infravermelho (FTIR): para identificar os grupos funcionais e sua composição química;
- Teste mecânicos: ensaio de tração, compressão, flexão e impacto, além do índice de fluidez Melt (MFI).

Ao fim, os resultados permitirão compreender alguns fatores importantes de trabalho durante o processo de reciclagem, como por exemplo a temperatura, visto que cada polímero possui ponto de fusão específico, sendo que em temperaturas mais altas o polímero pode sofrer degradação, o que impossibilitaria a continuidade do processamento. A partir desta etapa, o trabalho seguirá duas linhas distintas de metodologia a serem detalhadas.

4.3 Reciclagem mecânica

A primeira linha dará forma ao segundo capítulo da pesquisa e tratará da reciclagem mecânica, onde os resíduos de embalagem de bolsa de soro fisiológico serão processado para o preparo do filamento e posterior produção de peças 3D.

4.3.1 Preparo do Filamento

O preparo consiste em triturar o material para promover a quebra do mesmo em tamanhos homogêneos, de modo a facilitar a fundição posterior. A trituração ocorre através de moinhos de facas, que através da escolha do *mesh* da peneira, é possível padronizar os tamanhos do grânulos. A fundição é o segundo passo para o preparo do filamento, sendo que este consiste em aquecer o material triturado seco até a temperatura de fusão do polímero. O polímero então derretido é pressionado através de um bico em forma de parafuso para formar um filamento contínuo. Na sequência, o filamento recém formado passa por um sistema de resfriamento para solidificar o polímero fundido por meio de um banho de água fria, para que em seguida possa ser bobinado. O bobinamento permite que este fio formado seja enrolado em bobinas ou carretéis, o que facilita o armazenamento e transporte, além de o enrolamento sem dobras ou torções, o que poderia interromper o processo seguinte de impressão.

Os parâmetros de temperatura, velocidade e diâmetro de extrusão utilizados foram baseados em estudos anteriores conduzidos por Gudadhe, *et al*, 2019, que otimizaram o procedimento com o mesmo polímero do estudo em questão. O processamento de modo geral dos filamentos foi realizados em parceria com o grupo de pesquisa em biomateriais nanoestruturados da Universidade do Extremo Sul de Catarinense (UNESC). Adicionar os parâmetros de processamento.

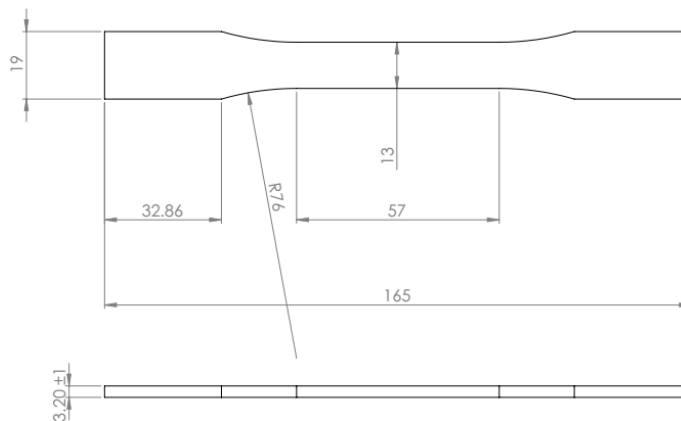
4.3.2 Impressão 3D – Corpo de prova

Com o filamento produzido, a etapa da impressão de peças 3D pode ser realizada. Os testes iniciais seguem os parâmetros base do mesmo estudo já otimizado de Gudadhe, *et al*, 2019, de modo que ajustes são necessários, em vista de que, as impressoras disponíveis para uso no estudo são diferentes das usadas por Gudadhe e os filamentos gerados também podem possuir diferenças. Por isso testes exploratórios para colocar a impressão em condições básicas são essenciais, onde parâmetros como temperatura do bico da impressora e da mesa de impressão, material de aderência aplicado à mesa de impressão, tração de extrusão, velocidade de impressão, altura da camada de deposição e preenchimento precisam ser ajustados.

Com os ajustes realizados, há a necessidade de avaliar as características das peças impressas, de modo a identificar a qualidade e as propriedades mecânicas da mesma. Os resultados dos ensaios mecânicos ajudarão futuramente a definir a aplicação das peças a serem produzidas.

Sendo assim, a impressão de corpos de prova são necessários, conforme a ASTM D638-14 para que ensaio de tração e impacto possam ser realizados, Figura 6.

Figura 6. Dimensões do corpo de prova impresso para ensaios mecânicos.



Fonte: ASTM, 2015.

4.3.3 Design Computacional

O processo de design computacional começa por entender as características físicas e químicas do material em questão, para então poder elencar usos específicos passíveis de

impressão e que de alguma forma possa atender a demanda de uso. Neste sentido, a demanda de peças foi identificada juntamente com os coordenadores do HV, onde alguns pontos foram questionados até chegar a produtos em potenciais, levando em consideração que os produtos impressos a partir dos resíduos serão responsáveis por substituir produtos já consumidos pelo HV, mas que até então são adquiridos comercialmente, ou que não são adquiridos justamente pelo seu alto valor financeiro. Primeiramente, peças consumidas em maiores demandas, de modo que possam suprir a geração de resíduos, peças em formas e dimensões customizadas, o custo de aquisição dos produtos a serem substituídos e ainda a possibilidade de obtenção de código aberto da peça em questão. Deste modo, alguns nichos de produção foram listados:

- Talas ortopédicas;
- Órteses e próteses;
- Peças de anatomia para a área do ensino;
- Potes comedouros e bebedouros;

O acesso de peças em código aberto, facilita a etapa de prototipagem, isto porque, protótipos em código aberto já possuem todo o projeto de desenho técnico, o que torna mais acessível a pessoas que não são especialistas na área. No entanto é possível projetar qualquer protótipo de acordo com as necessidades, considerando sempre as limitações de dimensão de impressão das impressoras usadas.

Apesar da listagem de potenciais protótipos, apenas um item será selecionado a fim de dar continuidade a pesquisa, visto que de acordo com a peça, tempo de uso da mesma pode variar, assim com o desgaste dela, o que implica na avaliação de impacto do ciclo do produto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos após o desenvolvimento da metodologia serão explanados e discutidos em forma de capítulos, sendo que cada capítulo será redigido em formato de artigo científico. Os artigos separadamente responderão os objetivos específicos da dissertação, de modo que o conjunto será responsável pela conclusão do estudo em questão.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). *As indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil. Perfil 2021*. Disponível em: <<https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2022/10/Perfil-2021-PT-vs2.pdf>>. Acesso em: 06 de maio de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). *As indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil. Perfil 2022*. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2023/04/Preview2022_web.pdf>. Acesso em: 06 de maio de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). *Produção de plásticos reciclados pós-consumo cresce 14,3% no Brasil. 2023* Disponível em: <<https://www.abiplast.org.br/noticias/producao-de-plasticos-reciclados-pos-consumo-cresce-143-no-brasil/>>. Acesso em: 13 de maio de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo, 2022*. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 13 de maio de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14040: *Gestão ambiental e avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14044: *avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009, 46 p.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT ISO/TR 14047: *avaliação do ciclo de vida: exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto. Rio de Janeiro: ABNT, 2016, 91 p.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT ISO/TR 14049: *avaliação do ciclo de vida: exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário. Rio de Janeiro: ABNT, 2014, 53 p.*

ASTM International . Norma ASTM D638-14 “**Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**”. 2015.

BATAINEH, Khaled M. Life-cycle assessment of recycling postconsumer high-density polyethylene and polyethylene terephthalate. **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, p. 1-15, 2020.

BEESETTY, Pavan et al. Mechanical behavior of additively manufactured nanoclay/HDPE nanocomposites. **Composite Structures**, v. 247, p. 112442, 2020.

BHARATH, H. S. et al. Flexural response of 3D printed sandwich composite. **Composite Structures**, v. 263, p. 113732, 2021.

BOTTENE, Alex Camilli; ROZATTI, Giovanni Augustho. Uso de manufatura aditiva para agregação de valor e prolongamento do ciclo de vida de embalagens poliméricas da indústria de bens de consumo. 2022.

BRASIL, 2010. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 3, 3 out. 2010

BYARD, Dennis J. et al. Green fab lab applications of large-area waste polymer-based additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 27, p. 515-525, 2019.

CACERES MENDOZA, Cristian et al. Life cycle assessment of filament production in distributed plastic recycling via additive manufacturing. **Cleaner Waste Systems**, v. 5, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100100>.

CHONG, Siewhui et al. Physical characterization and pre-assessment of recycled high-density polyethylene as 3D printing material. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 25, p. 136-145, 2017.

EXCONDE, Mark Keanu James E. et al. Materials selection of 3D printing filament and utilization of recycled polyethylene terephthalate (PET) in a redesigned breadboard. **Procedia CIRP**, v. 84, p. 28-32, 2019.

CICLOG Grupo de Pesquisa em Avaliação de Ciclo e Vida da UFSC. **Avaliação do Ciclo de Vida: Histórico**. Disponível em: <<https://ciclodevida.ufsc.br/avaliacao-do-ciclo-de-vida/>>. Acesso em: 13 de abril de 2023.

COOK, Ed; DERKS, Michiel; VELIS, Costas A. Plastic waste reprocessing for circular economy: A systematic scoping review of risks to occupational and public health from legacy

substances and extrusion. **Science of the Total Environment**, v. 859, p. 160385, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160385>

COOK, Ed; VELIS, Costas A.; DERKS, Michiel. Plastic waste reprocessing for circular economy: A systematic review of risks to occupational and public health from legacy substances and extrusion. 2020. <https://doi.org/10.31224/osf.io/yxb5u>

DAI, Leilei et al. Tecnologia de pirólise para reciclagem de resíduos plásticos: uma revisão do estado da arte. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 93, p. 101021, 2022.

DALMORA, Gabriela; LUZZI, Karine; HEMKEMEIER, Marcelo. A contribuição da análise do ciclo de vida (acv) para a minimização dos impactos ambientais de processos produtivos: uma abordagem teórica. **Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218**, v. 4, n. 2, p. e422714-e422714, 2023.

DAN, Zeng e cols. Análise ambiental, econômica e energética da incineração de resíduos sólidos urbanos em ambiente anóxico no planalto do Tibete. **Pesquisa Ambiental**, v. 216, p. 114681, 2023.

DA SILVA TRENTIN, Adan William et al. Life cycle impact assessment of the municipal solid waste management system: a case study in a municipality in southern Brazil. **R. Latino-amer. em Aval. do Ciclo de Vida**, Brasília, v. 2, n. 1, p. 91-121, jan./jun. 2018

DAVIDSON, Matthew G.; FURLONG, Rebecca A.; MCMANUS, Marcelle C. Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste—A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, p. 126163, 2021

DE ALBUQUERQUE SILVA, Alessandro; FERREIRA, Alex Franco. Extrusora de plástico e inversor de frequência. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 2, p. 806-817, 2023.

DODDAMANI, Mrityunjay. Dynamic mechanical analysis of 3D printed eco-friendly lightweight composite. **Composites Communications**, v. 19, p. 177-181, 2020.

DUBEY, R., GUNASEKARAN, A., CHILDE, S. J., BLOME, C., PAPADOPOULOS, T., & Luo, Z. (2020). Sustainable supply chain management: Framework and further research directions. **Journal of Cleaner Production**, 252, 119754.

ELIJAH, Etido U. et al. Avaliações do Ciclo de Vida dos Sistemas de Gestão de Resíduos Sólidos na África: Uma revisão sistemática. **Journal of Advances in Environmental Health Research**, 2023.

FERDOUS, Wahid et al. Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction—A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 173, p. 105745, 2021.

FOUNDATION, ELLEN MACARTHUR. **Designing out plastic pollution**. Disponível em: <<https://ellenmacarthurfoundation.org/pt/temas/plastico/visao-geral>>. Acesso em: 14 de abril de 2023.

FREEMAN, Thomas B. et al. Fused filament fabrication of novel phase-change material functional composites. **Additive Manufacturing**, v. 39, p. 101839, 2021.

GARY, Bruno C. et al. Estudo térmico do PEAD e PEBD através de análise térmica Differential Scanning Calorimeter (DSC). 2021.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. Advancing the Science of Sustainability. Disponível em: <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/>. Acesso em: 22 de abril. 2024.

GONZÁLEZ-HENRÍQUEZ, Carmen M.; SARABIA-VALLEJOS, Mauricio A.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, Juan. Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. **Progress in Polymer Science**, v. 94, p. 57-116, 2019.

GREGOR-SVETEC, Diana et al. Characteristics of HDPE/cardboard dust 3D printable composite filaments. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 276, p. 116379, 2020.

GUDADHE, Aniket et al. Three-dimensional printing with waste high-density polyethylene. **ACS Applied Polymer Materials**, v. 1, n. 11, p. 3157-3164, 2019.

HART, Kevin R.; FRKETIC, Jolie B.; BROWN, John R. Recycling meal-ready-to-eat (MRE) pouches into polymer filament for material extrusion additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 21, p. 536-543, 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Análise de Ciclo de Vida: conceitos e função**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/responsabilidade_social/apresentacoes/3.pdf>. Acesso em: 12 de abril de 2023.

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION (ISWA). **The Future of Waste Management Waste: Trends, Opportunities and Challenges for the Decade (2021-2030)**.

Disponível em: <<https://www.iswa.org/wp-content/uploads/2021/10/ISWA-2021f-Rev2-FK-1.pdf>>. Acesso em: 08 de maio de 2023.

JAN, Kowser Ali; MAIS, Asif Ali; BALAJI, R. The Path to Climate Sustainability: A Review of IPCC 2022: A REVIEW OF IPCC 2022. **Global Sustainability Research**, v. 2, n. 1, pág. 38-45, 2023.

JÚNIOR, Adilson Moacir Becker et al. Avaliação ambiental da gestão de resíduos sólidos urbanos em países em desenvolvimento: um estudo de caso no sul do Brasil. **International Journal of Environment and Waste Management**, v. 28, n. 3, pág. 386-405, 2021.

KALALI, Ehsan Naderi et al. A critical review of the current progress of plastic waste recycling technology in structural materials. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, p. 100763, 2023.

KAZA, S., YAO, L., BHADA, T., P., WOERDEN, F., V. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. **International Bank for Reconstruction and Development**. 2018.

KHANDELWAL, Harshit et al. Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: A worldwide critical review. **Journal of cleaner production**, v. 209, p. 630-654, 2019.

KIZI, Madinakhon Alimova Iskandar; Egamberdiev, N. B. The problem of optimizing the waste management system. **Science and innovation**, v. 2, n. D4, p. 188-190, 2023.

KUMAR, Rakesh et al. Impacts of plastic pollution on ecosystem services, sustainable development goals, and need to focus on circular economy and policy interventions. **Sustainability**, v. 13, n. 17, p. 9963, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13179963>

KUMAR, Sudhir et al. On investigation of rheological, mechanical and morphological characteristics of waste polymer-based feedstock filament for 3D printing applications. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 34, n. 7, p. 902-928, 2021.

LANDI, Daniele et al. Comparative life cycle assessment of two different manufacturing technologies: laser additive manufacturing and traditional technique. **Procedia CIRP**, v. 105, p. 700-705, 2022.

LUZIA, ANNA et al. O Conceito de Economia Circular: Uma Nova Abordagem para a Sustentabilidade Econômica e Ambiental. **Revista de Estudos Interdisciplinares do Vale do Araguaia-REIVA**, v. 6, n. 04, p. 07-07, 2023.

MAALOUF, Amani; AGAMUTHU, Pariatamby. Waste management evolution in the last five decades in developing countries—A review. **Waste Management & Research**, p. 0734242X231160099, 2023.

MARTINS, Mariane Guerra. Análise comparativa das metodologias de avaliação do ciclo de vida e indicador de circularidade de materiais: estudo aplicado às peças de policarbonato de medidores de energia inteligentes. 2021.

MEIRELES, Jaqueline Fernanda. O Planejamento Urbano na Gestão de Resíduos Sólidos e Mudanças Climáticas. **Revista Pleiade**, v. 17, n. 38, p. 05-12, 2023

MEJIA, Edgar B. et al. Upcycling of HDPE waste using additive manufacturing: Feasibility and challenges. In: **2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)**. IEEE, 2020. p. 1-6.

MORSELETTO, P., Targets for a circular economy. **Resour. Conserv. Recycl.** 153. 2020.

MOTTA, Wladimir H.; ISSBERNER, Liz-Rejane. RUMO À ECONOMIA CIRCULAR: QUAL O PAPEL DA ACV?. In: **Anais do VI Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida**. 2018. p. 92.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **A ONU e o Meio ambiente, 2020**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91223-onu-e-o-meio-ambiente>> . Acesso em: 03 de abril de 2024.

NANDY, Suman; FORTUNATO, Elvira; MARTINS, Rodrigo. Green economy and waste management: An inevitable plan for materials science. **Progress in Natural Science: Materials International**, 2022.

NEW PLASTIC ECONOMY (NPE). **A vision of a circular economy for plastic**. Disponível em: <<https://emf.thirdlight.com/file/24/7lh6MBH70qIqQE7lcFG7laEnq8/A%20Vision%20of%20a%20Circular%20Economy%20for%20Plastic.pdf>>. Acesso em: 14 de abril de 2023.

NYAKUDYA, Petronella; MADYIRA, Daniel M.; MADUSHELE, Nkosinathi. Utilisation of Life Cycle Assessment in Environmental Management. **Proceedings of the 5th European International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**.t Rome, Italy, July 26-28, 2022

PEARCE, David W.; TURNER, R. Kerry. **Economics of natural resources and the environment**. Johns Hopkins University Press, 1989.

PEETERS, Bob; KIRATLI, Nadine; SEMEIJN, Janjaap. A barrier analysis for distributed recycling of 3D printing waste: Taking the maker movement perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, p. 118313, 2019.

PEÑA, Claudia et al. Using life cycle assessment to achieve a circular economy. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, p. 215-220, 2021.

PEREIRA, Lyne Sussuarana; GOMES, Thiago Santiago; PACHECO, Elen Beatriz Acordi Vasques. Métodos de alocação de impactos ambientais para avaliação do ciclo de vida na reciclagem de resíduos plásticos. **Peer Review**, v. 5, n. 19, p. 303-324, 2023.

PINHO, Ana C.; AMARO, Ana M.; PIEDADE, Ana P. 3D printing goes greener: Study of the properties of post-consumer recycled polymers for the manufacturing of engineering components. **Waste Management**, v. 118, p. 426-434, 2020.

PONIS, Stavros et al. A systematic literature review on additive manufacturing in the context of circular economy. **Sustainability**, v. 13, n. 11, p. 6007, 2021.

PONTES, Andre Teixeira; ANGELO, Ana Carolina Maia. Utilização da avaliação do ciclo de vida no contexto da economia circular: uma revisão de literatura. **Sistemas & Gestão**, v. 14, n. 4, p. 424-434, 2019.

PRADO, Adolpho Nilson; DO AMARAL MATTOS, Érica Cristina; DA SILVA RODRIGUES, Fábio. MANUFATURA ADITIVA: conceitos, aplicações e impactos na gestão. **Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)**, v. 3, n. 1, 2019.

RAFEY, Abdul et al. A State-of-the-Art Review on the Technological Advancements for the Sustainable Management of Plastic Waste in Consort with the Generation of Energy and Value-Added Chemicals. **Catalysts**, v. 13, n. 2, p. 420, 2023.

RAJMOHAN, Kunju Vaikarar Soundararajan et al. Plastic pollutants: effective waste management for pollution control and abatement. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 12, p. 72-84, 2019.

ROCA, Jaime Bonnín et al. Technology cost drivers for a potential transition to decentralized manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 28, p. 136-151, 2019.

SANCHEZ, Fabio A. Cruz et al. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, p. 121602, 2020.

SANTANDER, Pavlo et al. Closed loop supply chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: a MILP-based optimization approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 154, p. 104531, 2020.

SANTOS, Walter Ignácio Gonçalves dos. **Economia circular e economia criativa na gestão de resíduos sólidos: interfaces e contribuições na cadeia têxtil**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SAUERWEIN, Marita et al. Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 226, p. 1138-1149, 2019.

SAUVE, Giovanna; VAN ACKER, Karel. The environmental impacts of municipal solid waste landfills in Europe: A life cycle assessment of proper reference cases to support decision making. **Journal of environmental management**, v. 261, p. 110216, 2020.

SAVOLAINEN, Jyrki; COLLAN, Mikael. How additive manufacturing technology changes business models?—review of literature. **Additive manufacturing**, v. 32, p. 101070, 2020.

SEGURA, A.; ROJAS, Luis; PULIDO, Yeffer. Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos sólidos. **Revista espacios**, v. 41, n. 17, p. 1-9, 2020.

SHARMA, Hari Bhakta et al. Circular economy approach in solid waste management system to achieve UN-SDGs: Solutions for post-COVID recovery. **Science of The Total Environment**, v. 800, p. 149605, 2021.

SCHIRMEISTER, Carl G. et al. 3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication. **Additive Manufacturing**, v. 28, p. 152-159, 2019.

SCHIRMEISTER, Carl G. et al. Digitally Tuned Multidirectional All-Polyethylene Composites via Controlled 1D Nanostructure Formation during Extrusion-Based 3D Printing. **ACS Applied Polymer Materials**, v. 3, n. 3, p. 1675-1686, 2021

SILVA, Daniel José da. **Aplicação de espectroscopias vibracionais e métodos quimiométricos avançados no controle de qualidade de blendas poliméricas recicladas de PEBD/PEAD**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SIMÕES, André Luis Gomes *et al.* Panorama geral dos resíduos sólidos urbanos no âmbito mundial. **2º CONRESOL, Foz de Iguazú**, 2019.

SINGH, Narinder; SINGH, Rupinder; AHUJA, I. P. S. Thermomechanical investigations of SiC and Al₂O₃-reinforced HDPE. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 32, n. 10, p. 1347-1360, 2019.

SINGH, Rupinder et al. On secondary recycling of ZrO₂-reinforced HDPE filament prepared from domestic waste for possible 3-D printing of bearings. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 34, n. 9, p. 1254-1272, 2021.

SINGH, Rupinder et al. Wear properties of rapid tooling prepared by reinforcement of SiC/Al₂O₃ in HDPE domestic waste. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 1468-1471, 2020.

SOUZA, L. S. O., CHAVES, G. A. S., SILVA, C. E., SÁ, D. M. F., & ÁVILA, R. M. (2018). Logística reversa e gestão de resíduos: um enfoque no ciclo aberto e no ciclo fechado. **Revista Espacios**, 39(32), 10

STREIT, Jorge Alfredo Cerqueira. The institutionalization of the Circular Economy of packaging in general in Brazil. 2022.

TCHOBANOGLIOUS, George et al. **Integrated solid waste management engineering principles and management issues**. 1993.

TELES, Beatriz Arioli de Sá. Estudo dos desempenhos ambiental, técnico e de circularidade decorrentes da prática de reciclagem de pet em ciclo aberto por meio de manufatura aditiva. 2023. **Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo**.

TIPU, Javed Ahmad Khan et al. Mechanical properties evaluation of recycled high density polyethylene via additive manufacturing. **Journal of Materials and Manufacturing**, v. 2, n. 2, p. 1-9, 2023.

TURNER, Chris et al. Sustainable production in a circular economy: A business model for re-distributed manufacturing. **Sustainability**, v. 11, n. 16, p. 4291, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11164291>

UNITED NATIONS - DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. **The 17 Goals**. Disponível em: < <https://sdgs.un.org/goals>>. Acesso em: 12 de abril de 2023.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION (UNIDO). **Annual Report 2023**. Progress by innovation. Disponível em: <<https://www.unido.org/annual-report-2023>>. Acesso em: 01 de abril de 2024.

UZOSIKE, Canice C.; YEE, Lachlan H.; PADILLA, Ricardo Vasquez. Small-scale mechanical recycling of solid thermoplastic wastes: a review of PET, PEs, and PP. **Energies**, v. 16, n. 3, p. 1406, 2023.

VANAPALLI, Kumar Raja et al. Emissions and environmental burdens associated with plastic solid waste management. In: **Plastics to energy**. William Andrew Publishing, p. 313-342, 2019.

VIDAKIS, Nectarios; PETOUSIS, Markos; MANIADI, Athena. Sustainable additive manufacturing: Mechanical response of high-density polyethylene over multiple recycling processes. **Recycling**, v. 6, n. 1, p. 4, 2021.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. In: MUNHOZ, A. L. J. et al. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1.ed. São Paulo: Blucher, 2018. p. 15-29.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE BRAZIL (WWF). **Desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/educacaoambiental/conceitos/desenvolvimentosustentavel/>>. Acesso em: 12 de abril de 2023.

ZAMAN, Atiq. Zero-waste: A new sustainability paradigm for addressing the global waste problem. In: **The Vision Zero Handbook: Theory, Technology and Management for a Zero Casualty Policy**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 1-24.

ZANDER, Nicole E. Recycled polymer feedstocks for material extrusion additive manufacturing. In: **Polymer-based additive manufacturing: recent developments**. American Chemical Society, 2019. p. 37-51.

ZANONI, Beatriz Lima; OLIVEIRA, Samir Adamoglu de. Reflexões sobre o sentido de sustentabilidade em organizações. **Revista de Administração de Empresas**, v. 63, p. e2022-0028, 2023.



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO E
DOUTORADO
**TECNOLOGIA
AMBIENTAL**



Av. Independência, 2293 - Universitário
Santa Cruz do Sul - RS
CEP 96815-900

(51) 3717-7300
www.unisc.br