

UTILIZAÇÃO DE FILAMENTO RECICLADO DE GARRAFAS PET EM IMPRESSÃO 3D: UMA APLICAÇÃO DO DESIGN SCIENCE RESEARCH

André Somenzi (andre.somenzi@gmail.com)

Leane Maria Filipetto (leane.filipetto@bento.ifrs.edu.br)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Bento Gonçalves

RESUMO

Nesse estudo, aborda-se a aplicação da tecnologia de impressão 3D, com foco no método *Fused Deposition Modeling* (FDM) utilizando material termoplástico aquecido para criar protótipos previamente modelados em *Computer Aided Design* (CAD). O estudo concentra-se na utilização de filamentos reciclados de Polietileno Tereftalato (PET) para a impressão 3D, com base na Logística Reversa. O objetivo geral é analisar as dimensões da qualidade conformidade e confiabilidade na utilização de plástico PET reciclado, empregados na fabricação de filamentos para impressoras 3D. Para isso, utilizando-se de padrões associados à confiabilidade, verificação de conformidades e não conformidades no material gerado pelo estudo e avaliação da qualidade nas dimensões da qualidade de conformidade e confiabilidade para utilização de filamento reciclado para impressora 3D. A revisão da literatura aborda conceitos de Logística Reversa, reciclagem de resíduos sólidos em PET, conceitos e utilização de impressoras 3D e seus filamentos, a qualidade e estudos sobre reciclagem de PET. Como metodologia, foram utilizadas técnicas do *Design Science Research* (DSR), para prescrever soluções de problemas, consolidando o conhecimento na área de estudo, propondo generalizar seus resultados, identificando classes de problemas, projetando e concebendo um artefato em formato de instanciação que realiza a conversão de garrafas PET em filamento para impressoras 3D. Utilizando-se de medições e avaliações na visão da qualidade para o material reciclado, como resultado, o filamento apresentou algumas características visuais distintas de materiais disponíveis no mercado, mas se mostra viável e eficaz. Por fim, o estudo contribui para a compreensão técnica da reciclagem de garrafas PET em filamentos para impressoras 3D.

Palavras chaves: Logística Reversa. Reciclagem. Qualidade.

1 Introdução

A impressão 3D, também chamada de Manufatura Aditiva, utiliza tecnologia de extrusão de materiais, normalmente plásticos, que se baseia em um modelo previamente gerado em algum sistema CAD, processado por um *software* fatiador e realizado em uma impressora 3D, sem necessidade de processos adicionais (SILVA et al., 2020). Um dos métodos mais

comuns da impressão 3D é o chamado *Fused Deposition Modeling* (FDM), onde, sendo um processo de prototipagem rápida, ocorre o aquecimento de material termoplástico ao ponto de torná-lo maleável o suficiente para ser extrusado em um bico aquecido para gerar um protótipo.

Esse estudo será baseado nessa tecnologia de extrusão, buscando analisar os prós e contras na utilização de filamentos reciclados, em que a matéria-prima utilizada é gerada por reciclagem de garrafas fabricadas em *Polietileno Tereftalato* (PET). A metodologia utilizada é o *Design Science Research* (DSR), pois, pelos meios possíveis, pode-se realizar experimentos locais, baseando-se em estudos já publicados, agregando valor e relevância ao assunto, também permitindo, no fim, comunicar os resultados obtidos e utilizá-los em estudos posteriores.

Foi optado pela reciclagem, campo da Logística Reversa, pois assim, ao gerar seu próprio filamento para impressão 3D, não há dependência de prazos de entrega e valores de fornecimento, aumentando a competitividade para profissionais na área, além disso, corrobora no reaproveitamento do material gerado pelo consumo de produtos que utilizam embalagens plásticas.

Com base no exposto, esse estudo foi desenvolvido para agregar mais relevância na área para utilização de plástico reciclado como matéria-prima para impressão 3D. Para tanto, pergunta-se: O que é necessário avaliar para que o filamento seja considerado apto para uso profissional? Ou seja, quais características a matéria-prima deve apresentar para ser apta para uso? Para isso, foram analisadas, primeiramente, as características de materiais comercializados e, posteriormente, foi gerado o material para estudo, comparando com as qualidades da matéria-prima comercializada no mercado. Nesse ponto, também foi analisado o meio de transformação das garrafas PET, para que seja realizado de forma eficaz, sem a necessidade de operações terceirizadas em sua fabricação.

O objetivo geral do estudo é analisar a conformidade e confiabilidade na utilização de plásticos PET reciclados, utilizados na fabricação de filamentos para impressoras 3D. Em completo, os objetivos específicos são: (i) indicar padrões de defeitos associados à confiabilidade na transformação do PET em filamento; (ii) propor indicador de confiabilidade no uso do PET em filamento; (iii) verificar conformidades e não conformidades em relação ao material usual e o experimento; (iv) avaliar a qualidade nas dimensões da qualidade de conformidade e confiabilidade para utilização como filamento para impressora 3D.

Em relação à Logística Reversa, o estudo envolve a conscientização da importância da reciclagem de materiais, visto a quantidade de materiais disponíveis, devido à alta utilização de polímeros plásticos em PET, que gera alto índice de poluição mundial, principalmente pelo seu descarte incorreto. Em estudos realizados, conforme Leite (2003), a reciclagem do PET é

dificultada devido à relação peso/dimensão impactando nos custos de coleta, transporte e descarte final desse material.

2. Referencial Teórico

2.1 Logística Reversa

Segundo Shibao, Moori e Santos (2010), a Logística Reversa é o campo da Logística que trata do fluxo reverso dos materiais, ou produtos, considerando tanto as atividades de coleta, desmontagem e processamento dos mesmos, no intuito de certificar uma recuperação/descarte sustentável. Esse conceito, é muito relevante para empresas, indústrias e varejistas, que precisam de alguma forma, encaminhar adequadamente seus resíduos sólidos recicláveis (LACERDA, 2002). Com isso, Liva, Pontelo e Oliveira (2019), complementam que a Logística Reversa também tem a importância em realizar o gerenciamento do fluxo reverso do material, agregando valor nas naturezas econômicas, ecológicas, legais, logísticas, corporativas e demais áreas gerenciais.

A Logística Reversa é um dos principais processos dentro da cadeia de reciclagem, que viabiliza economicamente e mantém a constância em toda a cadeia, seja ela para o processo de reutilização, reciclagem ou valorização energética. No caso dos pneus, a maior dificuldade é a realização da coleta e do transporte, pois em muitos casos, esses pneus estão localizados em regiões de difícil acesso, o que torna o processo inviável do ponto de vista econômico pelo custo logístico. (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2013)

Ainda dentro da área da Logística Reversa, há o conceito do Ciclo de Vida do Produto, que indica que a utilização do produto não termina na entrega ao consumidor final, em que se pode tratar o correto tratamento desses produtos, não somente como descarte correto em caso de obsolescência, mas também no tratamento, caso sejam danificados, reprocessados, se possível, e reconicionados após atingirem certo nível de utilização (DEVIANTE, 2023)

Mueller (2005) cita que o planejamento na Logística Reversa, para empresas, é feito principalmente por conta do aumento da confiança do cliente, mostrando que a empresa se preocupa no pós-venda ou na administração de devoluções de mercadorias. No entanto, a autora também defende outros motivos que levam as empresas a utilizar os meios da Logística Reversa, dentre eles: (i) Legislação Ambiental, leis e regulamentações no retorno de seus produtos para o devido tratamento; (ii) benefícios econômicos do uso de produtos que retornam à fábrica para reutilização, não se fazendo necessário o descarte; (iii) aumento da conscientização ambiental de clientes; (iv) razões competitivas ou diferencial por serviço; (v)

limpeza de um canal de distribuição; (vi) proteção de Margem de Lucro (evitar desperdícios); (vii) recaptura de valor e recuperação de materiais.

Além dos motivos já citados, Rodrigues, Rodrigues, Leal e Pizzolato (2002) também sugerem o ciclo de vida curto dos produtos, causado pela obsolescência gerada da evolução da tecnologia, diminuindo cada vez mais a vida útil dos produtos, deixando por conta do planejamento do fluxo reverso das mercadorias a redução do impacto ambiental gerado pela sua produção.

2.2 Qualidade e as Dimensões da Qualidade

Segundo Garvin (1987), todos os produtos e serviços podem ser segmentados em alguma especificação. O autor apresentou as dimensões da qualidade: (i) desempenho, (ii) características, (iii) confiabilidade, (iv) conformidade, (v) durabilidade, (vi) atendimento, (vii) estética e (viii) qualidade percebida. Cada dimensão desempenha um papel crucial na gestão da qualidade e na satisfação do cliente. A qualidade percebida desempenha um papel significativo na percepção do cliente e o entendimento dessas dimensões ajuda as empresas a melhorar a qualidade e manter uma vantagem competitiva no mercado. (GARVIN, 1987)

A qualidade em sua dimensão conformidade, para Garvin (1987), relaciona-se ao grau em que o projeto e características operacionais do produto ou serviço atendem a padrões pré-estabelecidos. A avaliação da conformidade é a demonstração de que os requisitos especificados relacionados a um produto/processo/serviço foram atendidos, sendo fundamental para garantir a qualidade, reduzir riscos e manter a credibilidade da marca. A conformidade desempenha um papel significativo na satisfação do cliente e é particularmente importante em mercados globais e competitivos (GARVIN, 1987). A dimensão da conformidade, segundo Richter (2007), é considerada um conceito tradicional da qualidade e se confunde diretamente com a qualidade propriamente dita (RICHTER, 2007).

Mantendo consonância com a perspectiva de David A. Garvin (1987) sobre a qualidade, a dimensão da confiabilidade emerge como um elemento crucial na avaliação e gestão da qualidade de produtos e serviços. Garvin (1987) destaca que a confiabilidade diz respeito à capacidade de um produto ou serviço operar de forma consistente e livre de falhas ao longo do tempo. Isso desempenha um papel fundamental na satisfação do cliente, uma vez que a experiência de um cliente com um produto ou serviço confiável tende a ser mais positiva e gratificante. Além disso, a confiabilidade também está intrinsecamente ligada à redução de custos operacionais e à minimização de interrupções indesejadas, fatores essenciais para o

sucesso e a competitividade das organizações no mercado atual. Portanto, a dimensão da confiabilidade, conforme delineada por Garvin, desempenha um papel central na busca pela excelência em qualidade. De acordo com Juran (1988), a definição clássica de confiabilidade se refere à probabilidade de um produto desempenhar uma função específica sem apresentar falhas durante um período de tempo determinado e sob condições específicas. Essa definição é amplamente aceita e compartilhada por diversos autores, como Juran (1974, 1988), Garvin (1987), IEEE (1990), Stone-Romero et al. (1997), Wu et al. (2006) e ASQ (2006). Embora existam variações sutis nas definições propostas por esses autores, todas convergem para o mesmo conceito central de confiabilidade na qualidade de produtos e serviços.

2.3 Reciclagem do PET

No Brasil, o Polietileno Tereftalato (PET) foi utilizado pela indústria de embalagens (início dos anos 1970), após, somente em 1988, foi utilizado para a indústria têxtil e apenas em 1993, passou a ter grande participação no mercado de embalagens, quando substituiu as garrafas de vidro de refrigerantes (ALMEIDA *et al*, 2013). Em sua fabricação, é utilizado um polímero plástico derivado do petróleo, descoberto nos anos 1940, na Inglaterra, pela empresa *Calico Printer's Association*, sendo utilizado, até 1980, somente na indústria têxtil (FORMIGONI; CAMPUS, 2005 *apud* BELLIS, 2012).

Por ser um material que possui diversas características positivas, como leveza, boa resistência mecânica e capacidade de moldagem em baixas temperaturas, ganhou espaço no mercado. Porém, devido a sua baixa degradabilidade natural, causa impacto ambiental em caso desse material não ser devidamente tratado pós-consumo. Essa característica se agrava nas indústrias de embalagens, pois, por se tratarem de produtos de descarte rápido, gera uma demanda maior de descarte (MANCINI; BEZERRA; ZANIN, 1998).

Segundo Almeida (2012) e outros autores, por ser um polímero plástico, o PET é resistente a impacto, resistência mecânica, química e um excelente recipiente para gases e odores, está bem inserido no mercado, utilizado em garrafas de refrigerantes, sucos, águas, óleos comestíveis, cosméticos, produtos de limpeza, remédios, entre outros. Por ser um polímero, a sua composição é 100% reciclável, desse modo, não gera perda em processos de reciclagem e não libera nenhum resíduo nocivo. No entanto, com o alto consumo, após os anos 1990, gerou problema ambiental, pois a resistência do material à decomposição, sem o devido tratamento, é estipulada em 750 anos. Portanto, é um material que, sem a devida atenção no descarte, pode causar danos sérios ao meio ambiente (ALMEIDA *et al*, 2013).

Contudo, o PET ocupa grande parcela dentre os resíduos gerados pela população, por um grande espaço de tempo (PETRY *et al* 2012). Essa característica também dificulta a decomposição de outros resíduos, em que, caso estejam armazenados em embalagens PET, impermeabiliza como embalagem, retardando o processo natural (ALMEIDA, 2010). É importante frisar que, mesmo que o PET ocupe uma grande parcela de resíduos com potencial de poluição ao meio ambiente, as empresas já têm ciência da quantidade de produtos que ele pode gerar, tanto por meio de reciclagem quanto por reutilização. Assim, a reciclagem e reutilização do material gera benefícios econômicos e sociais, por meio da geração de empregos, por exemplo (PETRY *et al*, 2012).

Por fim, dados nacionais publicados pelo IDEC (Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor), em 2006, indicam que, nacionalmente, eram produzidas 149 mil toneladas de resíduos sólidos por dia, mas apenas 9% desse montante eram reciclados. Em 2022, o mesmo estudo indica que, por dia, em média, são produzidas 76 toneladas, mas somente 4% dos resíduos sólidos são reciclados.

2.4 Impressoras 3D

A tecnologia da impressão 3D foi concebida no início da década de 1980 e somente em 2009, foram registradas diversas patentes, resultando nos equipamentos que estão no mercado (CUNICO, 2018). Teve início o movimento dessa tecnologia por meio de *Crowdfunding* e *startups* para explorar esse mercado, surgindo, a partir de 2009, várias empresas com o propósito de transformar impressoras 3D em máquinas pessoais (BESKO; BILYK; GRITTEN, 2017).

As impressoras 3D, também conhecidas como máquinas de prototipagem rápida, ainda se mantêm passando por transformações, uma vez que existe uma variedade de métodos de impressão. Atualmente, já existem equipamentos que trabalham por base de extrusão de plástico derretido, depositando o material em camadas, até formar um objeto, esse modelo é chamado de impressão por *Fused Deposition Modeling* (FDM). Há, também, outros equipamentos que trabalham por base de cura de resina, utilizando um *laser*, endurecendo o material até terminar a sua forma, sendo chamados de *Selective Laser Sintering* (SLS) (BLÜCHER, 2021). Nesse caso, é possível trabalhar com outros materiais, como concreto, vidro e até metal (PORTO, 2016).

Para seu funcionamento, as impressoras de FDM utilizam motores de passo, que realizam a movimentação de seus respectivos eixos, sendo, comprimento, profundidade e

altura, tratados pelos *softwares* como “x”, “y” e “z”. Esses motores de passo devem estar devidamente calibrados e configurados para garantir o pleno funcionamento do equipamento ANDRADE, SOUZA; DORNELAS; HOPPE, 2019). Toda impressora 3D, até o momento, necessita primeiramente de um modelo previamente gerado em um *software* “fatiador”, que analisa a forma do objeto e define como será gerado no equipamento. Esse *software* analisa e calcula uma previsão de utilização de material, uma previsão de tempo que a impressora 3D irá precisar para que o projeto seja concluído e a quantidade de matéria-prima que será necessária na impressão (PORTO, 2016). De acordo com o modelo que será gerado, também é necessário verificar qual a melhor impressora 3D para a operação que será tomada, pois há diferença entre os equipamentos, diferenciando entre nível técnico de operação, montagem e manutenção do equipamento, qualidade da peça, velocidade de impressão, conexões, interfaces de operação, compatibilidades, complementos e custo de aquisição (SILVA et. al. 2020).

2.4.2 Filamentos

A impressão (FDM), ao receber seu arquivo devidamente tratado, utiliza materiais termoplásticos para que sejam aquecidos em seu conjunto extrusor, assim, formando a peça. Mas, para isso, também é importante definir o tipo de filamento termoplástico que será utilizado. Esse material, dependendo da sua composição, possui características específicas, como temperatura de extrusão e velocidade de operação. (BESKO; BILIK; SIEBEN, 2017).

Os principais filamentos utilizados na impressão 3D FDM, são PLA, ABS, PETG e Nylon, como plásticos pouco flexíveis e filamentos flexíveis, como TPE, TPN e TPC e PC. Cada qual possui características de temperatura de fusão, resistência para torção, tração, pressão, capacidade de absorção de umidade (BESKO et al 2017).

O plástico mais comum para utilização em impressoras 3D FDM, é o PLA, por ser um plástico que exige uma temperatura menor para fundição, ser biodegradável e possuir fontes renováveis para sua fabricação, como a cana de açúcar e amido de milho, o que se torna uma boa opção para a prática (BESKO et al, 2017). O segundo mais utilizado é o ABS, que possui propriedades mecânicas superiores ao PLA, assim, suportando mais impacto e temperaturas mais elevadas. A desvantagem desse material é da geração de fumaça tóxica no seu aquecimento, assim, exigindo ventilação adequada e também por ser um derivado do petróleo, não é biodegradável (BESKO et al, 2017).

Outro material bem relevante é o PET, que sendo o plástico mais conhecido mundialmente, devido a sua alta utilização nas indústrias de engarrafados, possui algumas características como, fácil moldagem, flexibilidade e resistência mecânica altas. Na impressão

3D, é utilizada uma variação chamada PETG (PET modificado com glicol), que mantém as características de resistência, no entanto, é mais pegajoso durante o aquecimento no processo de impressão (BESKO et al, 2017).

3 Metodologia

Os métodos do *Design Science Research* (DSR) estudam fenômenos que, por muitas vezes, são gerados por interferência de fatores causados pelo homem. Desse modo, possui base em um conhecimento científico gerado por ciência do artificial, podendo realizar testes em laboratório se baseando em amostras e análise de dados (DRESCH; ALMEIDA; PROENÇA; ANTUNES, 2014). Por ser um campo científico, necessita ter relevância, assim, precisa seguir uma lógica na tomada de decisões, ou seja, para que se tenha relevância científica, tanto os métodos de pesquisa, quanto as técnicas de coleta e análise de dados precisam constar conhecimento científico (DRESCH, 2018).

Para Silva, Sartori, Hirata e Berkenbrock (2016), os métodos do DSR seguem uma linha de evolução da *Design Science*, que vem da Engenharia de Produção, mostrando o sentido e a forma das operações. Nesse caso, também é importante definir uma classe de problema e os artefatos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa (SILVA; SARTORI; HIRATA; BERKENBROCK, 2016).

Na utilização dos métodos da DSR, utilizam-se classes de problema, os quais possibilitam que o resultado do estudo não seja somente aplicado em um caso específico. Desse modo, o conhecimento adquirido pode ser utilizado para criar soluções para outros estudos, ou seja, é “generalizável”. O mesmo ocorre com os artefatos gerados no estudo e, desse modo, o conhecimento concebido no estudo pode ser aplicado para outras soluções (LACERDA et al., 2013). Na literatura, não existe uma definição oficial de classes de problemas, mas pode ser descrito como uma coleção de problemas teóricos ou práticos constituídos por artefatos relacionados, que contêm métodos úteis para projetar as mais diversas soluções em uma organização (LACERDA; DRESCH; PROENÇA; ANTUNES, 2013).

A metodologia do *DRS*, segundo Dresch et al (2015), consiste em prescrever soluções de problemas, consolidando o conhecimento na área de estudo, propondo generalizar seus resultados, assim, avançando a ciência, alcançando maior impacto nos ramos acadêmico e empresarial, utilizando-se de artefatos para alcançar esses resultados. Nesse sentido, artefatos podem ser definidos, muitas vezes, como o método, ferramenta, simulação, entre outras formas de gerar a solução satisfatória para o problema e podem ser segmentados em tipos, podendo ou

não trabalhar em mais de um desses tipos, sendo eles, (i) constructos, (ii) modelos, (iii) métodos e (iv) instanciações (DRESH; LACERDA; PROENÇA; ANTUNES, 2013).

Nesse estudo, utiliza-se uma instanciação, que se refere ao processo de criar artefatos específicos que representam a aplicação prática de teorias e conceitos desenvolvidos durante a pesquisa. Assim, em outras palavras, instanciar significa transformar ideias abstratas em algo tangível e utilizável, como um sistema de informação, um modelo conceitual, um protótipo ou qualquer outro artefato que possa resolver um problema real ou atender à necessidade específica. Dresch et al. (2015), enfatiza que essa instanciação é fundamental para a validação e a aplicabilidade das teorias desenvolvidas na pesquisa, pois os artefatos resultantes representam a maneira pela qual a teoria é posta em prática e testada no mundo real. Portanto, a instanciação de artefatos é um passo crucial no processo de DSR, pois permite a tradução do conhecimento acadêmico em soluções práticas e inovadoras. Desse modo, no modelo de etapas, a aplicação do estudo com base em Dresch et al (2015), ocorre de acordo com os seguintes tópicos: (i) Identificação do problema ; (ii) Conscientização do problema; (iii) Revisão da Literatura; (iv) Identificação dos artefatos e configuração das classes de problemas; (v) Proposição do artefato para resolução do problema específico; (vi) Projeto do artefato selecionado; (vii) Desenvolvimento do artefato; (viii) Avaliação do artefato, resultado e comparação de materiais; (ix) Conclusões; (x) Comunicação de resultados.

Visto o objetivo proposto, baseando-se nas dimensões da qualidade de conformidade e confiabilidade de Garvin (1987) para atender aos objetivos específicos, no Quadro 1, constam os procedimentos executados. Os foram gerados pelo autor, buscando padrões que sejam aceitáveis para gerar um produto com métricas padrão, utilizado no estudo.

Quadro 01 – Etapas da metodologia para o estudo

Objetivos Específicos	Procedimentos
Indicar padrões de defeitos associados a confiabilidade na transformação do PET em filamento	Medição de largura do filete gerado para transformação de garrafa em filamento, utilizando um paquímetro digital;
Propor indicador de confiabilidade no uso do PET em filamento	Manter a temperatura de extrusão ideal, evitando assim falhas nas camadas de impressão, empenamentos e descolamento da mesa de impressão.
Verificar conformidades e não conformidades em relação ao material usual e o experimento	Medição do diâmetro do filamento gerado, comparando com o material disponibilizado no mercado, utilizando um paquímetro digital.
Avaliar a qualidade nas dimensões da qualidade de conformidade e confiabilidade	Realizar impressões de teste com ambos os materiais e verificar diferenças de

para utilização como filamento para impressora 3D	comportamento, medida e facilidade de utilização, utilizando uma impressora 3D, da marca Creality, modelo Ender-3, adaptada para temperaturas elevadas.
---	---

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Para estipular um padrão inicial de qualidade e comparar com o material gerado, segundo Ferreira (2020), alguns dos pontos que podem ser considerados para avaliação, seriam: (i) facilidade de utilização do material gerado no processo, em impressoras 3D; (ii) a qualidade visual; (iii) adesão de camadas na impressão (isotropia); e (iv) Warp, esse termo é utilizado para um comportamento comum em filamentos que passam por temperaturas elevadas na impressão, em que ocorre um descolamento das primeiras camadas da impressão, gerando uma falha na concepção do projeto final.

Portanto, o artefato utilizado tem a função de garantir que o material gerado esteja apto para a avaliação desses pontos. Segundo o modelo de DSR da autora Aline Dresch et al (2015), desenvolveram-se os seguintes passos: (i) identificação do problema; (ii) conscientização do problema; (iii) revisão da literatura; (iv) identificação dos artefatos e configuração das classes de problemas; (v) proposição do artefato para resolução do problema específico; (vi) projeto do artefato selecionado; (vii) desenvolvimento do artefato; (viii) avaliação do artefato, resultado e comparação de materiais; (ix) conclusões e (x) comunicação dos resultados.

4 Resultados

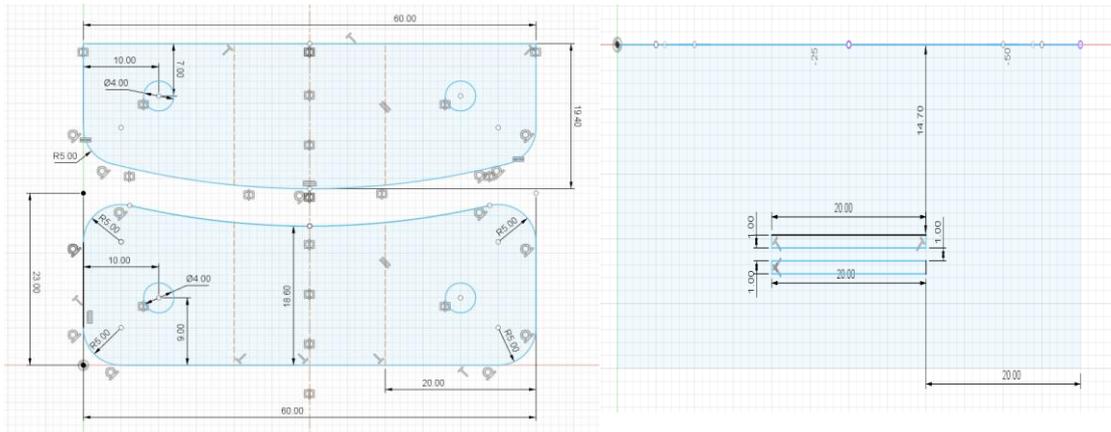
Com a crescente utilização de embalagens em PET no mundo, surge a necessidade de analisar o ciclo reverso desse material, no intuito de reciclá-lo ou reutilizá-lo, assim, reduzindo seu impacto no meio ambiente. Para conhecer suas possibilidades, é importante analisar as políticas de pós-consumo desse material, gerando novamente valor como matéria-prima no ciclo de vida de um novo produto (FARIA, 2018).

Contudo, esse estudo propõe explorar os passos fundamentais da metodologia *Design Science Research*. Os passos delineados nesta metodologia abrangem um ciclo abrangente, abordando desde a identificação inicial do problema até a comunicação dos resultados alcançados. Esta abordagem estruturada visa não apenas proporcionar uma solução prática para o problema específico, mas também contribuir para o avanço do conhecimento na área, estabelecendo uma base sólida para futuras investigações e inovações. Para esse estudo, foram desenvolvidos os seguintes passos:

- 1 Identificação do problema: Buscar alternativas para converter embalagens PET, descartadas e devidamente processadas, na criação de filamento para impressoras 3D.

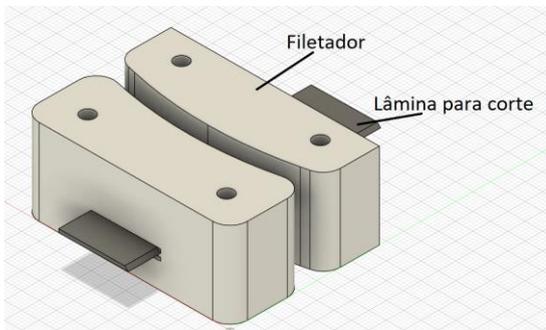
- 2 Conscientização do problema: Para melhor compreender o comportamento do material gerado após o processamento das garrafas PET, utilizando dos conceitos das dimensões da qualidade de Garvin, conformidade e confiabilidade, o estudo propõe analisar o comportamento desse material, comparando-o com um material disponível no mercado.
- 3 Revisão da Literatura: Utilizando como base do estudo uma análise das dimensões da qualidade, confiabilidade e conformidade, como objeto de estudo filamentos reciclados de garrafas PET, foram utilizados os tópicos citados pelo referencial teórico deste artigo. Desse modo, a revisão da literatura, se baseia em estudos relacionados à qualidade, tecnologia e reciclagem de PET.
- 4 Identificação dos artefatos e configuração das classes de problemas: Foram verificados dois tipos de artefatos que auxiliam na reciclagem de garrafas PET, convertendo em filamentos para impressoras 3D. O primeiro, estudado por Ferreira (2020), converte pellets de plástico em filamento, para isso, o autor utilizou um equipamento de moagem e extrusão por fuso, onde, aquecendo esses pellets a ponto de fusão, se consegue extrudar o material aquecido por um bico, gerando matéria-prima para utilização em impressoras do tipo FDM. O segundo possível artefato, se inicia como um filetador de garrafas PET, que gera um rolo em formato de filete proveniente da garrafa PET, que pode ser posteriormente extrusado em um bico aquecido, gerando um fio de mesma espessura que os filamentos utilizados por impressoras 3D.
- 5 Proposição do artefato para resolução do problema específico: Comparando as alternativas para reciclar as garrafas PET, no intuito de gerar um material apto para comparação com um material disponível no mercado, assim, viabilizando a resolução do problema específico, foi decidido pela segunda opção. Apesar da primeira alternativa viabilizar a reciclagem de grandes quantidades de PET, tanto a sua aquisição, quanto a sua construção, exigem investimentos elevados. A primeira opção, utilizando o método do filetador e extrusão por bico aquecido vem ganhando notoriedade em fóruns da área de impressão 3D, devido ao seu baixo custo e a possibilidade de fabricação utilizando peças das próprias impressoras 3D, e em alguns casos, até mesmo, a própria impressora. Apesar de ser um método que não realiza reciclagem em grande escala, gera material o suficiente para análise, assim, avalia-se apto para os demais passos do estudo.
- 6 Projeto do artefato selecionado: Para produzir o artefato, foi gerado um projeto em CAD formado por duas partes que se complementam, unidos por uma lâmina vertical afiada, formando o filetador de garrafas PET. Para realizar o filetamento, a garrafa PET deve ser posicionada no centro dessas peças e tracionada contra a lâmina, gerando um filete único que possa ser extrusado posteriormente, gerando um filamento reciclado. Sendo assim, a Figura 1 apresenta as vistas técnicas superior e lateral do filetador e a Figura 2, por sua vez, mostra uma vista em perspectiva do mesmo equipamento.

Figura 01- Vista Técnica Superior e Lateral do Filetador



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

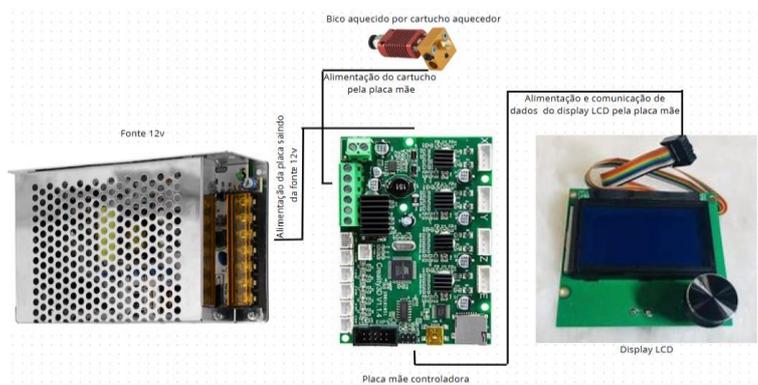
Figura 02- Vista em Perspectiva do Filetador



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para conformar o filete gerado pelo filetador, utilizou-se um esquema de montagem de um conjunto de cartucho aquecedor e bico aquecido com diâmetro compatível com filamentos de impressora 3D. Por sua vez, as peças são ligadas em uma placa mãe de impressora 3D modelo Creality v1.0, a uma fonte 24 volts (v). Para controlar a eletrônica desse modelo, também foram utilizados, um *display* LCD modelo Creality Ender-3, um botão “liga/desliga” e seus devidos cabos para conexões elétricas. Na Figura 03, é apresentado um esquema de peças do equipamento.

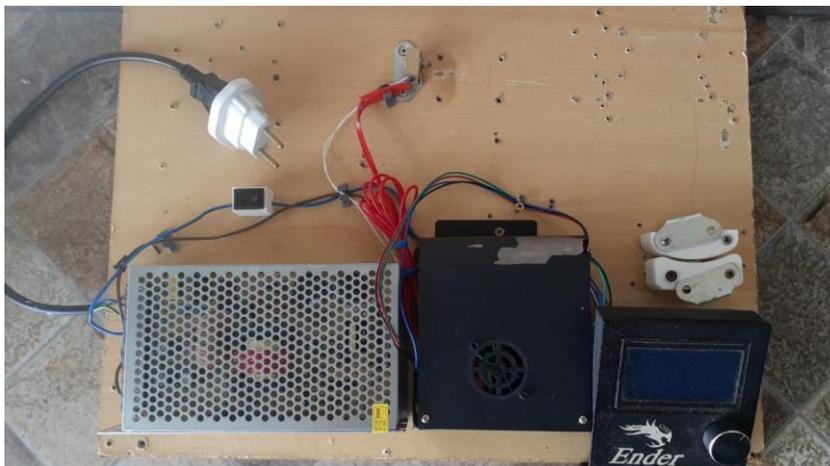
Figura 03 – Esquema de peças da extrusora do filamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

- 7 Desenvolvimento do artefato: O filetador foi gerado em uma impressora 3D com material PLA, seguindo as medidas estipuladas pelo projeto. As peças foram fixadas em uma mesa de madeira, unidas por uma lâmina de estilete para o corte das garrafas. Os demais componentes foram fixados na mesma mesa para que o trabalho de conformar o filete fosse feito no mesmo local. Para finalizar a montagem, foram feitas as ligações elétricas e inserido um cabo de alimentação para que o equipamento seja ligado em uma fonte de energia elétrica. Na Figura 04 apresenta o artefato montado.

Figura 04 – Projeto inicial da extrusora



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

No intuito de garantir a constância da espessura do filamento que foi gerado, foram acrescentados dois equipamentos, sendo um deles, um carretel que recebe o filete, posicionado antes do bico aquecido, e um tracionador, que é responsável por puxar o material pelo bico aquecido. Esses equipamentos garantem que o filamento gerado, passe em velocidade constante na conversão de filete para filamento, garantindo que não ocorram variações de medida, queimas ou rompimento no processamento. A Figura 05 mostra a montagem final do artefato.

Figura 05 – Montagem do artefato final utilizado no estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

- 8 Avaliação do artefato, resultado e comparação de materiais: O filete gerado deve seguir um padrão de medida ao ser extrusado e o diâmetro final do fio gerado deve ser compatível com o padrão de impressoras 3D. Assim, após testes *in loco*, para produzir filamentos recaldados no diâmetro de 1,75 mm, a medida inicial do filete deve ser 10 mm. Ambas as medidas foram realizadas utilizando um paquímetro eletrônico. As Figuras 06 e 07 mostram exemplos de testes realizados para o estudo, utilizando os artefatos selecionados.

Figura 06 – Filete cortado pelo artefato final



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 07 – Filamento gerado pelo artefato final



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O material gerado pelo artefato foi utilizado para testes de impressão, assim, garantindo o seu funcionamento para posterior comparação com o material disponibilizado pelo mercado. Para isso, foi utilizada uma impressora da marca Creality, modelo Ender-3, adaptada para temperaturas acima de 260°C. Essas adaptações foram necessárias devido à necessidade de elevar a temperatura do material no bico aquecido, para sua plena extrusão.

Para o teste inicial, foi gerado um arquivo no *software* fatiador, de um cubo nas medidas de 2 centímetros (cm). Após a sua concepção utilizando a impressora 3D, foi realizada uma medição para certificar que o resultado final é fiel ao modelo gerado. Mostrando o resultado, notou-se algumas variações de cor provenientes de resíduos que permaneceram no processo de fabricação do filamento, como a cola e pedaços de rótulo,

interferindo na sua qualidade visual, medida conforme projeto, boa adesão à mesa e média tendência de descolamento de camadas. No entanto, para utilizar esse material, foram necessários ajustes no programa que é utilizado na impressora 3D, isso pois, uma vez que o fio foi gerado de um filete, sendo transformado em um filamento, apresentou um “oco” central causando falta de material nos primeiros testes realizados. Esses ajustes informam que na impressora 3D, o mecanismo que alimenta o bico aquecido, força mais material em sua entrada. Com isso, esse teste valida o material reciclado para comparação com o material disponível pelo mercado. Na Figura 08, utilizando novamente como ferramenta de medição um paquímetro digital, mostrou-se o resultado final do filamento reciclado, indicando coerência nas suas medidas.

Figura 08 – Teste realizado utilizando o filamento reciclado e ajustes no programa



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Após avaliar o resultado do material reciclado como apto à comparação, foram feitas medições no filamento disponível no mercado. Também, foi gerada uma peça utilizando o mesmo material, sendo o mesmo cubo nas medidas de 2 cm, desse modo, estipulando um padrão para comparação entre os materiais. Nas Figuras 09 e 10, se mostra o resultado dessas medições.

Figura 09 – Demonstração e medição realizada no diâmetro do material disponível no mercado



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 10 – Medição da peça gerada utilizando o material disponível no mercado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

- 9 Conclusões: Após análises, conclui-se que é possível realizar a conversão de garrafas PET utilizando o artefato do estudo, mantendo a qualidade no produto final. Também comparando com os materiais já existentes no mercado, não existem diferenças que interferem nos modelos impressos. Os critérios que devem ser considerados, ficam nos equipamentos que são utilizados no processo, como impressoras 3D prontas para altas temperaturas ou impressoras que possibilitem adaptações.
- 10 Comunicação dos resultados: Por fim, com o intuito de gerar mais conhecimento, o presente estudo será apresentado para publicações acadêmicas especializadas, assim, possibilitando a sua utilização em outras áreas, tanto acadêmica quanto industriais.

Tendo desenvolvido esse estudo nas experiências apresentadas, desenvolve-se nas dimensões da Qualidade utilizando-se o comparativo entre o material comercializado e o material confeccionado. A comparação entre os materiais, em termos de conformidade com o projeto, qualidade visual, facilidade de impressão, adesão à mesa de impressão e tendência de descolamento de camadas, revelou algumas diferenças visuais. Embora o material reciclado tenha mostrado média qualidade visual e facilidade de impressão em comparação com o material comercializado, ambos apresentaram medidas conforme o projeto e boa adesão à mesa de impressão, com uma tendência média de descolamento de camadas. Com isso, foi gerado o Quadro Comparativo 2.

Quadro 02 – Avaliação quanto às dimensões de qualidade do filamento

DIMENSÃO CONFIABILIDADE	
Grau de isenção de falhas de um produto:	Durante o intervalo de testes, o filamento gerado no estudo não apresentou falhas significativas, que causasse algum erro na sua utilização. No entanto, caso o processo de filetagem das garrafas PET não resulte em uma medida adequada antes da sua extrusão, o filamento gerado pode não ter uma medida viável para utilização em Impressoras 3D, causando uma falta de abastecimento de material durante a concepção de peças.

DIMENSÃO CONFORMIDADE	
Capacidade de seguir padrões de concepção do material:	Conforme a Figura 07, o material gerado no estudo possui uma medida semelhante de utilização do que materiais disponibilizados no processo, assim, seguindo o padrão necessário para a sua posterior utilização. No entanto, o processo de concepção desse material, com o artefato selecionado, deixa o interior do filamento “oco”. Isso ocorre devido ao fato de conformar um filete em fio, não tendo material o suficiente para preencher seu interior.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

5 Conclusões Finais

Em conclusão, os resultados obtidos neste estudo proporcionam uma análise abrangente da transformação de garrafas PET em filamentos para impressoras 3D, utilizando um artefato selecionado. As avaliações, baseadas nos critérios de qualidade, conformidade e confiabilidade de Garvin (1987), revelaram que o material reciclado apresenta algumas características distintas em comparação com o material comercializado. Embora o filamento reciclado exija ajustes no equipamento devido ao vazio interno, a compensação por meio do aumento do fluxo de extrusão demonstrou eficácia, resultando em um material de qualidade e fácil utilização.

Os indicadores de confiabilidade, como a medida final de 1,75 mm e a necessidade de estar livre de umidade, destacam a compatibilidade do material reciclado com os padrões de impressoras 3D existentes no mercado. No entanto, é crucial considerar a temperatura de conformação, que pode ser configurada diretamente no equipamento, ou antes de gerar o arquivo que será importado na impressora 3D, onde essa temperatura, difere significativamente do material comercializado, podendo impactar a escolha dos equipamentos utilizados.

Além disso, a pesquisa abre perspectivas para estudos futuros, sugerindo a replicação do artefato, ou explorando o uso de novos artefatos que possam processar qualquer tipo de PET, produzindo filamento em larga escala. Uma alternativa para esse caso, pode ser avaliada retornando ao passo 5 da metodologia, buscando realizar o artefato que utiliza um fuso como moedor de material, gerando pellets que são derretidos e extrusados em formato de filamento.

Outros estudos que podem ser feitos, envolvem conceitos de economia circular e marketing de produtos reciclados, trazendo novo valor a materiais que foram descartados e análises aprofundadas da efetividade da reciclagem de garrafas PET, assim, constata-se que pode haver a redução de resíduos com a utilização desse material como matéria prima, economia circular, e também menor custo de aquisição de filamentos para impressora 3D. Em suma, este estudo não apenas contribui para a compreensão da viabilidade técnica da reciclagem de garrafas PET em filamentos para impressoras 3D, mas também aponta para direções promissoras para pesquisas futuras.

Referências

- ANDRADE, M.M.; SOUZA, P.A.; DORNELAS, G.N.; HOPPE, J.H.B. Desenvolvimento de uma impressora 3D de baixo custo para a construção de ferramentas e protótipos. 2019. Disponível em : <https://bitlybr.com/exIKQ>. Acesso em: 05/10/2023.
- BESKO, M.; BILIK, C.; GRITTEN, P. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. 2017. Disponível em: <https://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>. Acesso em: 05/10/2023.
- CABRAL, D.; Obsolescência de Produtos. Portal online DEVIANTE. 2023. Disponível em: <https://www.deviante.com.br/noticias/obsolescencia-de-produtos/>. Acesso em: 04/10/2023.
- CUNICO, M. Impressoras 3D: O novo meio produtivo. Concep3d Pesquisas Científicas Ltda.; 1ª edição. 2018.
- DRESCH, A; LACERDA, D.P.; JÚNIOR, J.A.V.A. Design Science Research Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. 1ª edição. Porto Alegre: Bookman. 2015.
- FARIA, R.J.F. Avaliação de ciclo de vida de um produto obtido por impressão 3D a partir de monofilamento com origem em garrafas PET. 2018. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/116450/2/296329.pdf>. Acesso em: 05/10/2023.
- FISHER, R. A. (1922). On the Mathematical Foundations of Theoretical Statistics. Philosophical Transactions of the Royal Society A. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rsta.1922.0009>. Acesso em: 10/10/2023.
- FORMIGONI, A; SANTOS, S.C.; MEDEIROS, B.T. Logística reversa e sustentabilidade para a melhoria da cadeia: Uma abordagem no panorama da reciclagem PET no Brasil. 2014. Disponível em: <https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/rms/article/view/407/pdf>. Acesso em: 05/10/2023.
- GARVIN, D.A. Logística reversa - Competing on the Eight Dimensions of quality. Harvard. 1987. Disponível em: https://slunik.slu.se/kursfiler/FÖ0349/10294.1314/Garvin_8_qual_dim.pdf. Acesso em: 05/10/2023.
- JURAN, J.M; GRYNA, F.M. Juran's Quality Control Handbook. Nova Iorque. 1988.
- KUHN, T. S. (1962). The Structure of Scientific Revolutions. University of Chicago Press. Disponível em: <https://www.lri.fr/~mbl/Stanford/CS477/papers/Kuhn-SSR-2ndEd.pdf>. Acesso em: 10/10/2023.
- LACERDA, L. Logística reversa: uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais. 2009. Disponível em: https://www.paulorodrigues.pro.br/arquivos/Logistica_Reversa_LGC.pdf. Acesso em: 04/10/2023.
- LACERDA, L. Logística Reversa - Uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais. Brasil. 2015.
- LAGARINHOS, C.A.F.; TENÓRIO, J.A.S. Logística reversa dos pneus usados no Brasil. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, EPUSP. 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/qZbJvJkKWw5LnZfcyM8FhGj/>. Acesso em: 04/10/2023.

- LIVA, P.B.G.; PONTELO, V.S.L.; OLIVEIRA, W.S. Logística reversa - I. 2019. Disponível em: https://newlogistica.webnode.com.br/_files/200000049-b55e4b5db5/LOGISTICA%20REVERSA%2001.pdf. Acesso em: 04/10/2023.
- MANCINI, S.D.; BEZERRA, M.N.; ZANIN, M. Reciclagem de PET advindo de garrafas de refrigerante pós-consumo. 1998. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/JcWbZHYgPtLs6QMjKtS7F/?format=pdf>. Acesso em: 05/10/2023.
- MUELLER, C.F.; Logística reversa Meio-ambiente e Produtividade. Grupo de Estudos Logísticos Universidade Federal de Santa Catarina. 2005. Disponível em: www.tecspace.com.br/paginas/aula/faccamp/Rev/Artigo01.pdf . Acesso em: 04/10/2023.
- RESNIK, D. B. (2011). Ethical Guidelines for Scientific Research: An Overview. *Accountability in Research*, 18(3), 95-115.
- RODRIGUES, D.F.; RODRIGUES, G.G.; LEAL, J.E.; PIZZOLATO, N.D. Logística reversa - Conceitos e Componentes do Sistema. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Curitiba - PR. 2002. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2002_TR11_0543.pdf. Acesso em: 04/10/2023.
- SILVA, P.C.; SANTANDREA, R.S.; BRANDÃO, L.C.; XAVIER, M.V.A.; VOLPINI, V.L. Manufatura aditiva: Revisão sistemática da literatura. 2020. Disponível em : https://www.brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/download/19274/15465?__cf_chl_tk=04jYg.EritLM5GjlAyCl.RkKJ7guEH1J.aHaMBfs5Lo-1696546633-0-gaNycGzNDPs. Acesso em: 05/10/2023.
- SHIBAO, F.Y.; MOORI, R.G.; SANTOS, M.R. A logística reversa e a sustentabilidade empresarial. XIII SEMEAD Seminários em Administração. 2010. Disponível em: <https://sistema.semead.com.br/13semead/resultado/trabalhosPDF/521.pdf>. Acesso em: 04/10/2023.