



Aquisição de um brinquedo importado ou sua produção local por manufatura aditiva? Comparando aspectos ambientais e custos

Anderson Estevam Lopes

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

e-mail: andersonle21@gmail.com

Lucas Augusto Ribeiro Souza Sena

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

e-mail: s.augustto@gmail.com

Eduardo Romeiro Filho

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

e-mail: romeiro@dep.ufmg.br

Resumo

O conceito de produção global e cadeias de fornecimento distribuídas entrou em xeque a partir da pandemia de COVID-19. Junto a isso, a disponibilidade de novos meios de produção como a manufatura aditiva e os custos ambientais do transporte internacional levam a discussões interessantes sobre novos modelos de produção local. Este estudo foi conduzido com o propósito de avaliar os custos associados à produção de um brinquedo por meio da manufatura aditiva, visando a comparação com os custos correlatos à aquisição e importação de um produto referência similar originário da China. A análise contempla não apenas os custos financeiros, mas também os aspectos logísticos, embalagem e outros componentes relevantes no contexto do transporte e proporciona uma perspectiva abrangente dos custos envolvidos, apresentando os aspectos positivos e negativos da produção local através da manufatura aditiva em contraste com a importação, abarcando todo o processo de aquisição e transporte. Por fim, é realizada uma comparação do inventário ambiental entre os dois produtos.

Palavras-chave: manufatura aditiva; cadeia logística; inventário ambiental; custos de produção; análise de ciclo de vida.

Abstract

The concept of global production and distributed supply chains came into question following the COVID-19 pandemic. Along with this, the availability of new production processes such as additive manufacturing and the environmental impacts of transnational transport lead to interesting discussions about new local production models. This study was conducted with the purpose of evaluating the costs associated with the production of a toy through additive manufacturing, aiming to compare them with the costs related to the acquisition and importation of a similar product originating from China. The analysis encompasses not only financial costs but also logistical aspects, packaging, and other relevant components in the context of transportation. It provides a comprehensive perspective on the involved costs, presenting the positive and negative aspects of local production through additive manufacturing in contrast to importation, covering the entire process of acquisition and transportation. Finally, a comparison of the environmental inventory between the two products is carried out.

Keywords: additive manufacturing; supply chain; environmental inventory; production costs; life cycle analysis.

1. Introdução.

A Manufatura Aditiva (MA) advém, em sua concepção e utilização, de técnicas já consolidadas de produção, que datam do final do século XX, a partir dos novos processos de prototipagem rápida (JÚNIOR e LOOS, 2018, VOLPATO, 2021). Explicada de forma bastante simples, a MA compõe-se de um conjunto de técnicas que remetem ao preparo de uma massa folhada, que é constituída de numerosas camadas de massas finas unidas com manteiga formando o alimento a ser preparado. Atualmente a MA é aplicada em casos como a construção de casas, por meio da sobreposição de filamentos de blocos e outros processos que tenham como base o “empilhamento” de material para composição de objeto final. Beaman (1997) relaciona o processo também à topografia e fotoescultura, por trazerem de forma mais palpável o conceito de construção por camadas, enquanto Volpato (2017) ressalta materiais e processos. Com a evolução no processo produtivo e novas tecnologias, as técnicas de MA se moldaram ao contexto e continuam sendo exploradas em suas diferentes formas.

Apesar de trabalhada em formas muito diversas, a concepção do que conhecemos hoje como manufatura aditiva ou impressão 3D, tem sua origem por volta de 1981, com Hideo Kodama, famoso designer automobilístico japonês. Kodama procurava uma forma de prototipar de forma ágil seus objetos de trabalho, e as técnicas de MA atendiam às suas necessidades. Beaman (1997) ressalta que as tecnologias de MA são capazes de produzir de forma muito mais rápida em comparação a moldagem via injeção ou técnicas tradicionais baseadas na subtração de materiais. A técnica utilizada até então baseava-se em curar uma resina fotossensível, camada por camada, a fim de “desenhar” o objeto desejado, dispensando a necessidade de criação de moldes, intervenções demoradas e dispendiosas para testar um protótipo.

A partir da primeira década deste século houve um crescente refino das técnicas, permitindo à impressão 3D ganhar um escopo acadêmico e comercial, enquanto avançava rapidamente com a agregação de novas possibilidades e materiais, sendo possível criar objetos tridimensionais complexos a partir de materiais variados, como plástico, metal, cerâmica e até mesmo tecidos biológicos. Seu potencial para a criação de objetos personalizados e exclusivos, aliado à flexibilidade de design e precisão, tem sido cada vez mais adotada em diversos setores, conforme destacado por Volpato (2017), que aponta o crescente uso dessa tecnologia nas indústrias aeroespacial, joalherias, automobilística, artes, bioengenharia, em especial odontologia e medicina, entre outras, além da possibilidade iminente de expansão para novos setores.

Ao mesmo passo em que falamos de evolução na tecnologia 3D e evolução nos meios de produção, há concomitante um avanço nos processos de distribuição e produção logísticos ao redor do mundo, impactando não somente a produção, como consumo de energia, recursos, maquinário e mão de obra, como também questões socioculturais e ambientais (KAI et al, 2016). Esta nova abordagem da logística traz efeitos positivos, como a facilidade de acesso a produtos antes restritos, velocidade de produção e manutenção de itens. Concomitante a essa ideia, Bowersox (2002) explora mais nichos da globalização, evidenciando o aumento da receita, redução de custos diretos, avanço da tecnologia, redução da carga tributária da empresa e redução da incerteza de acesso ao mercado.

Apesar dos benefícios citados, as cadeias globais e a logística se mostram emaranhadas e dependentes. Chowdhury et al. (2020) cita como evidência dessa fragilidade a recente epidemia global de COVID 19, relacionando os impactos diretos, como o fechamento das fábricas chinesas durante a crise, que gerou escassez de produtos dessa origem, bem como a necessidade de revisão de sistemas de entrega e distribuição (Bandeira e Soliman, 2023). Também, podemos citar a necessidade de uma logística bem sincronizada e de problemas ambientais e/ou acidentes, como o acontecido com o cargueiro “Ever Given”, em março de 2021, ocasião em que o navio bloqueou o Canal de Suez e provocou um grande tráfego, resultando em um atraso de cerca de 400 navios e um prejuízo estimado em torno de US\$3 bilhões (Popov et al. 2021, Schiffing e Kanellos, 2012). De uma forma “macro”, esses pontos se desdobram apresentando consequências em seus segmentos posteriores.

A impressão 3D pode ter um impacto significativo na cadeia logística. Rodrigues et al. (2017), correlaciona características da MA com a redução do número de etapas em um processo de fabricação, possibilidade de explorar geometrias impossíveis de serem trabalhadas na manufatura convencional e a possível economia de material, essas características citadas podem também reduzir os custos e o tempo de transporte de materiais e produtos acabados, além de permitir a produção sob demanda e a personalização de peças de reposição. Essa tecnologia tem o potencial de revolucionar a forma como

pensamos sobre produção, estoque e distribuição de bens, e está se tornando cada vez mais acessível para empresas e consumidores individuais.

Berman (2012) ressalta que a tecnologia de MA possibilita produzir peças com design e estruturas que seriam de difícil ou impossível fabricação via manufatura tradicional, também, entre os pontos fortes, a facilidade de compartilhamento do projeto, redução de desperdício de material. Holmstrom et al. (2010) salienta que um grande benefício dessa tecnologia é a possibilidade de adicionar alta customização ou alteração de lote sem demandar grandes mudanças ou períodos no layout da fabricação facilitando o desenvolvimento de uma cadeia de logística simplificada. (Morrow et al., 2007; Le Bourhis, et al., 2013) salientam os benefícios da economia no consumo de matéria-prima e energia, além da fabricação próxima ao consumidor (Kreiger, Pearce, 2013; Wittbrodt, et al., 2015) e a redução da necessidade de ferramentas.

No entanto, a MA também apresenta desafios únicos e desvantagens, como a necessidade de materiais específicos para cada tipo de impressora 3D, a complexidade do processo de impressão e a falta de padrões de qualidade e segurança em algumas áreas. Gorni (2013) ressalta ainda que entre as dificuldades e pontos relevantes a considerar são as baixas velocidades de construção, falta de especificações técnicas, falta de dados sobre as propriedades dos materiais, mau acabamento superficial e porosidade. Relacionado a porosidade, Volpato (2017), ressalta que as propriedades dos materiais construídos via deposição de materiais e/ou solidificação de camadas, possuem propriedades diferentes das vistas na manufatura tradicional, sendo que um dos pontos de atenção dessa tecnologia é a necessidade do projetista conhecer todas as limitações técnicas do maquinário utilizado, sendo esse conhecimento de suma relevância para definir a eficiência do projeto. À medida que a tecnologia continua a se desenvolver, é importante considerar não apenas os benefícios, mas também as implicações da MA na cadeia logística.

Neste contexto, este artigo tem como objetivo explorar o impacto da MA na cadeia logística, discutindo as implicações majoritariamente ambientais dessa tecnologia. Espera-se, portanto, que esta pesquisa contribua para o debate sobre o papel da MA na indústria e sua importância para a competitividade das empresas no mercado atual. Este trabalho consiste na análise da embalagem e componentes de um produto importado da China e da modelagem e impressão 3D deste mesmo produto no Brasil. Busca-se a avaliação das vantagens ou desvantagens da produção local de tais produtos em comparação com o sistema atualmente utilizado, investigando o impacto da inserção da MA na cadeia logística, buscando avaliar as questões que tangem os custos, o transporte e aspectos ambientais da produção. Para tal empreitada, foram estabelecidas as seguintes etapas:

1. Realizar um levantamento sobre os principais processos de impressão 3D disponíveis no mercado brasileiro e suas características;
2. Adquirir um produto referência a ser analisado (neste caso, um brinquedo produzido na China) e avaliar as condições de transporte e embalagem;
3. Digitalizar o produto adquirido e produzi-lo no Brasil, por meio de impressão 3D;
4. Avaliar e comparar os custos ambientais e financeiros dos dois produtos (o adquirido na China e o produzido no Brasil), bem como suas características funcionais;
5. Discutir aspectos ligados ao resultado do objetivo 4 e avaliar os aspectos positivos e negativos de cada produto, bem como de seu processo de produção e sistema logístico associado.

2. Revisão de literatura.

O processo de MA consiste na deposição de material, podendo ser de diversas origens, como polímeros, biomateriais, metais entre outros. Através da deposição camada por camada e requer necessariamente que um modelo 3D seja criado previamente. Volpato (2017) Detalha seu passo primeiro a concepção, criação e modelação de objeto desejado, geralmente utilizando softwares como CAD (Computer Aided Design), a etapa de modelamento, contempla o objetivo final, e todas as partes físicas desejadas para o objeto. O modelo 3D, obtido através da etapa anterior, é convertido para formato de leitura da máquina como exemplo a STL - STereoLithography, que consiste basicamente em padrão adequado de malha de triângulos. É necessário definir então os suportes que darão apoio para que a deposição de material na construção da peça não contraponha os limites da física, causando desmoronamentos ou outros problemas durante sua confecção. Após preparo do item e impressão do mesmo, há a etapa de pós-produção, que inicialmente consiste em retirar os suportes colocados no

modelo 3D, e opcionalmente há diversos tipos de tratamento, que variam de acordo com o material escolhido para impressão (Volpato, 2017).

No que tange às cadeias de suprimento, Verboeket e Krikke (2019), fazem uma importante revisão do impacto da manufatura, buscando respostas para perguntas-chave para nosso estudo, como: “quais segmentos das cadeias de suprimento a MA prosperam?”, “como a MA afeta escolhas de design em cadeias de suprimento e quais gargalos impedem a MA de ser utilizada em seu potencial máximo?”, “como a MA pode influenciar os resultados de performance de cadeias de suprimento?”, “como relações de causa e efeito entre a MA e design em cadeias de suprimento podem ser modelados em uma estrutura conceitual?”, entre outras. A seguir serão brevemente tratados os principais tópicos expostos pelos autores:

Prototipagem Rápida - Devido à possibilidade de prototipagem rápida, a MA é utilizada principalmente para partes e montagens da indústria manufatureira, porém nos últimos anos há um crescimento para a produção de produtos finais usando o método, já que ele permite produzir formas complexas, leves e customizáveis.

Cadeia de suprimentos - A mudança nas cadeias de suprimento ocasionadas pela MA pode principalmente afetar a duração das etapas que as constituem, já que a entrega da matéria-prima pode acontecer antes do design do produto e a produção pode ser feita no ambiente do consumidor final, impactando assim diretamente no estoque da cadeia.

Vantagens - Uma das vantagens notáveis da MA é sua contribuição para a redução dos esforços relacionados ao descarte de produtos após o uso. A natureza do processo de MA permite uma desmontagem mais simplificada dos produtos, facilitando a separação dos diferentes componentes. Essa característica desempenha um papel crucial na promoção do uso de materiais reciclados na produção, uma vez que a separação eficiente dos materiais é fundamental para o processo de reciclagem.

Gargalos - Um dos gargalos da MA é a menor quantidade de matérias primas disponíveis para a impressão em comparação à produção “comum” (VERBOEKET E KRIKKE, 2019).

A MA oferece ganhos significativos em termos de economia de recursos e materiais durante a sua construção. Esse aspecto é de grande relevância, pois tem impactos diretos no custo final do produto e na quantidade e volume necessários para produzir uma peça com características similares. De acordo com Bione et al. (2021), a adoção da MA pode resultar em uma redução substancial no consumo de matéria-prima e energia, proporcionando benefícios tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Essa abordagem inovadora na produção, com ênfase na eficiência e na sustentabilidade, destaca a MA como uma alternativa promissora para a cadeia de produção logística. Ao possibilitar o uso de materiais reciclados, reduzir a quantidade de recursos necessários e minimizar o desperdício, a MA se mostra como uma solução alinhada aos princípios da economia circular e com potencial para transformar os processos tradicionais de fabricação.

Outra vantagem é a disponibilização e compartilhamento do material digital utilizado para a impressão do produto. Com isso o próprio consumidor final pode participar ativamente na concepção do produto. Esse compartilhamento, nomeado de “Open Source 3-D Printing” por Pearce et al. (2010), permitiria a produção de itens inclusive em regiões mais remotas, em que ficaria muito caro a produção em larga escala ou a importação, por exemplo.

Ademais, a sustentabilidade também é afetada pela impressão 3D, já que ela permite a extensão do ciclo de vida dos produtos, que podem inclusive ser feitos de materiais biodegradáveis (e não de plástico, como a maioria dos produtos hoje). E por utilizar material somente quando necessário, há uma redução de energia, emissões, desperdício, poluição; ocasionando em uma menor pegada de carbono. (Verboeket e Krikke 2019).

Ainda com relação a aspectos ambientais, Yalun et al. (2017) comparam processos de manufatura aditiva em impressoras pessoais em termos de custo, sustentabilidade, rugosidade superficial e percepção humana, sem considerar outras etapas do ciclo de vida, como transporte e destinação final. Khan et al (2021) realizam uma análise do ciclo de vida em processos de construção por impressão 3D, avaliando a “pegada ecológica” do processo e apontando lacunas de estudo e oportunidades para redução dos impactos ambientais gerados, o que é proposto também por Liu et al (2016), que apresentam uma revisão crítica sobre o impacto ambiental qualitativo e quantitativo da impressão 3D.

Gleber et al (2014) trazem uma perspectiva bastante promissora para a impressão 3D, em termos econômicos e ambientais. Segundo os autores, este processo reduz custos de insumos e produtos em mercados com cadeias de produção de baixo volume, personalizadas e de alto valor, como fabricação

de componentes aeroespaciais e médicos. “Isto reduz a utilização de energia, a procura de recursos e as emissões de CO2 relacionadas ao longo de todo o ciclo de vida do produto, induz mudanças nas estruturas laborais e gera mudanças no sentido de cadeias de abastecimento mais digitais e localizadas” (Gleber et al, op.cit).

3. Metodologia.

De acordo com Frazão et al. (2003) e Silva (2023), o ciclo de vida de um produto é uma sequência de fases que vai desde a extração da matéria prima até o descarte dos materiais para o qual não se tem mais uso. A análise de tal ciclo do ponto de vista socioambiental pode ser feito por meio de diversas ferramentas. Algumas delas se destacam para o escopo deste experimento: avaliação do ciclo de vida (ACV), a matriz MET (Materiais, Energia e Toxicidade) e as listas de verificação para design do ciclo de vida.

Para este estudo foram utilizados princípios da Avaliação do Ciclo de Vida, definidos a partir dos requisitos das normas ABNT 14040 (2009) e ABNT 14044 (2014), que descrevem os princípios e estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que deve ser composta por quatro fases: a) definição do objetivo e do escopo; b) análise do inventário; c) avaliação de impacto; d) interpretação dos resultados, que são apresentadas na figura 1. Na definição do objetivo e escopo são definidos a razão e justificativa para o estudo, sua abrangência e limites, a unidade funcional (no caso deste estudo, a unidade considerada será o brinquedo a ser impresso), a metodologia e os procedimentos necessários para uma adequada avaliação. A segunda fase é a análise de inventário, quando são quantificadas as variáveis envolvidas (como matéria-prima, energia, transporte, emissões para o ar, efluentes, resíduos sólidos etc.) no ciclo de vida do produto. A fase seguinte é a avaliação de impacto, processo qualitativo/quantitativo de compreensão e avaliação dos impactos ambientais, feita a partir da análise do inventário. Por fim, a interpretação, para a consolidação dos resultados das fases anteriores a partir dos objetivos e escopo inicialmente definidos.

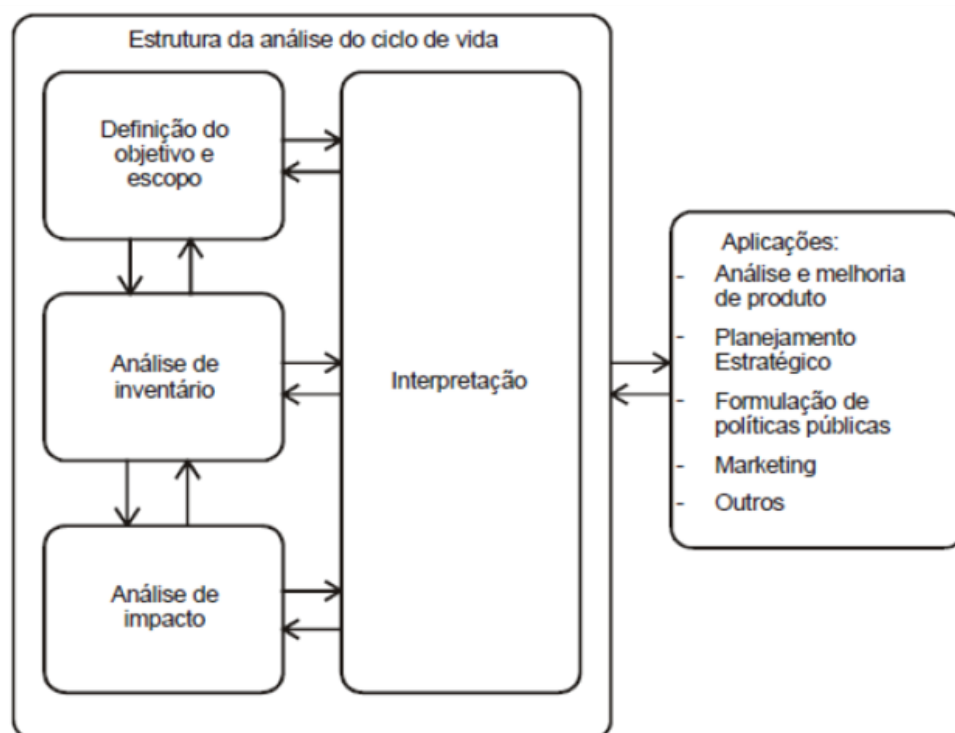


Figura 1 – Estrutura de uma ACV.
Fonte: ABNT 14040.

A avaliação do ciclo de vida é uma ferramenta quantitativa normalizada pelas ISO 14000. Ela consiste na avaliação das entradas (inputs) e saídas (outputs) do ciclo de vida de um produto, determinando seus potenciais impactos ambientais. Uma das maneiras de se implementar a ACV –

avaliação do ciclo de vida é por meio do OpenLCA. Para tanto foi utilizado o OpenLCA, software aberto lançado em 2006 que permite a construção de toda a cadeia de entradas e saídas por trás de um único produto, incluindo seus fornecedores reais, resíduos atmosféricos e transporte, entre outros, e a análise de seus impactos através de diversas análises socioambientais disponibilizadas pelos desenvolvedores. Sua precisão permite realizar a ACV – avaliação do ciclo de vida de maneira satisfatória para este estudo.

Já a Matriz MET (Materiais, Energia, Toxicidade), também baseada em uma análise de entradas e saídas, permite visualizar de uma maneira gráfica os impactos ambientais durante todas as fases do ciclo de vida do produto. A matriz permite ver rapidamente os principais problemas do processo, podendo facilitar a estipulação das prioridades para mudança.

As listas de verificação para design do ciclo de vida compõem uma ferramenta qualitativa visando contribuir para o design do ciclo de vida de um produto. A partir da classificação de diversos critérios em cada fase do ciclo de vida (Pré-fabricação, fabricação, produção, distribuição e descarte), a ferramenta auxilia na determinação dos pontos fracos de todo o processo, que são os pontos para melhoria e correção.

Como etapa final, tem-se a realização de análises dos resultados obtidos a partir do experimento e da análise do ciclo de vida dos produtos, incluindo a comparação entre ambos quando possível, com o intuito de avaliar e compreender os impactos ambientais e logísticos envolvidos em cada processo.

Mendes (2016) ressalta que a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) terceira fase da ACV “tem como finalidade avaliar a significância ambiental dos resultados do inventário por meio de modelos e fatores de caracterização contidos nos métodos de AICV” (p.160). O autor levanta 13 métodos de AICV, originalmente voltados para a Europa, mas aplicados em diversos países (como o Brasil). Os métodos de AICV utilizam modelos para caracterização para as diversas categorias de impacto.

Entretanto, tendo em vista a complexidade de aplicação destes modelos e a singularidade da situação brasileira (bem diversa da europeia), optou-se pela elaboração do inventário do produto referência e sua comparação com o inventário do produto impresso, nas fases de produção e transporte (esta fase no caso do produto importado). Trata-se, portanto, da análise comparativa dos inventários de dois produtos, obtidos a partir de práticas de produção distintas, incluindo aspectos ligados aos custos de transporte (quando aplicáveis). Segundo a ABNT 14040 (2009) em seus itens A.1.1 e A.1.2.: “a técnica da ACV poderia, mediante justificativa adequada, ser aplicada em estudos que não são de ACV ou ICV. Exemplos são: estudos de berço-a-portão, estudos de portão-a-portão, e partes específicas do ciclo de vida (por exemplo, gerenciamento de resíduos, produção de componentes de um produto).” Sendo assim, este estudo se configura como “portão-a-portão” e, a fim de executar o experimento proposto, foram adotados os procedimentos descritos a seguir, em suas distintas etapas:

A primeira etapa consistiu na seleção do objeto foco do estudo: Inicialmente, procedeu-se à seleção de um objeto que apresentasse uma relativa facilidade de modelagem, além de ser um item comumente impresso utilizando-se impressoras 3D e com origem de importação chinesa. Essa escolha foi feita levando-se em consideração os critérios estabelecidos no escopo do trabalho. Após a definição do objeto, efetuou-se a compra do mesmo, rastreando e acompanhando o processo de entrega até o Brasil. Após o recebimento do item, realizou-se a validação da sua qualidade e integridade, seguida pela mensuração das suas dimensões e peso. Esta avaliação tem como objetivo adquirir todas as informações possíveis sobre o produto original para o prosseguimento das outras etapas do experimento.

Tendo as medidas do produto original, foi possível começar o processo da MA. De acordo com Gibson et al. (2009), as etapas desta técnica de impressão, de forma geral, se dão da seguinte maneira:

1. CAD: consiste na etapa de modelagem da geometria externa do que vai ser impresso. Podem ser utilizados softwares de CAD profissional ou então ferramentas de engenharia reversa que permite escanear a estrutura desejada;
2. Conversão para STL - STereoLithography: Etapa onde o arquivo obtido na etapa anterior é convertido para STL - STereoLithography, que é o formato de arquivo com o qual a maioria das impressoras 3D aceitam e operam;
3. Transferência do arquivo para a máquina e manipulação do arquivo: O arquivo é enviado para a impressora, onde pode-se manipulá-lo para que tenha o tamanho, posição e orientação corretas;
4. Configuração da máquina: A impressora deve ser configurada de acordo com as especificações de impressão desejadas, além de ser calibrada;

5. Produção: É a impressão em si, que pode ser feita majoritariamente pela máquina sem supervisão. Somente um monitoramento superficial pode ser feito para garantir que nenhum erro ocorreu durante a impressão;

6. Remoção: Após o término da impressão, as partes impressas são removidas da máquina;

7. Pós-processamento: Algumas peças podem necessitar de trabalho extra de limpeza, como remoção de suportes, lixamento, entre outros. Desta forma dando o acabamento necessário para a peça;

8. Aplicação: a peça está pronta para ser utilizada, embora algumas impressões ainda necessitem de finalização com pintura, por exemplo, para dar a aparência necessária para o item.

Este processo é um processo genérico, que se aplica a praticamente todo tipo de impressão 3D. Tendo isto em mente, e a fim de descrever o processo de produção de forma mais aprofundada e adaptada para o cenário do experimento em si, elaborou-se o fluxograma (figura 2), com uma representação visual do passo a passo da produção:

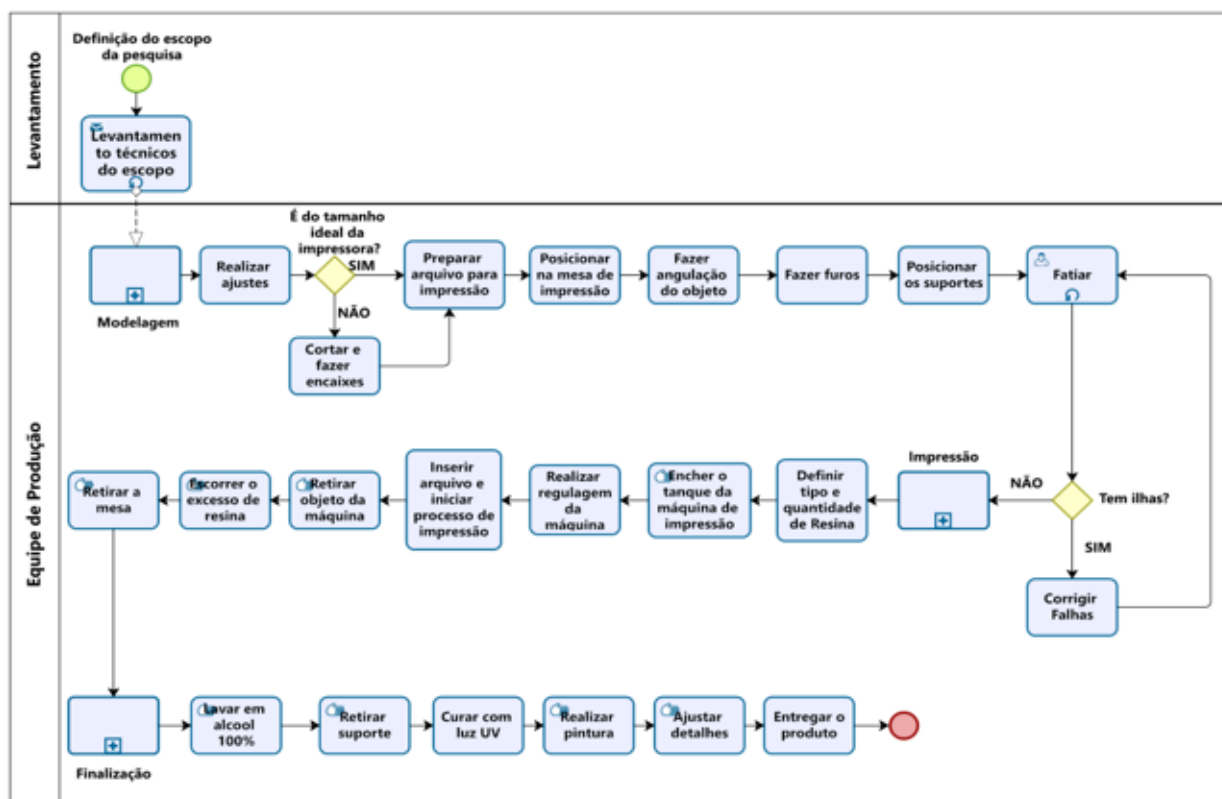


Figura 2 – Fluxograma completo do processo de impressão.

O processo engloba desde a modelagem até a finalização do produto, e pode ser subdividido em três subprocessos: Modelagem, Impressão e Finalização. Na primeira etapa, é considerado do processo inicial à modelagem e fatiamento da peça (etapa “Fatiar” na figura 1). O segundo bloco contempla a correção de possíveis falhas e ilhas até a retirada do objeto da mesa de impressão (etapa “Retirar a mesa”). A parte final do fluxo trata os subprocessos de finalização até a etapa “Entregar o produto”. O subprocesso de modelagem envolve uma série de etapas essenciais para obter resultados precisos e de qualidade. Tais aspectos estão detalhados nos tópicos a seguir.

- **Modelagem:** A etapa inicial do processo consiste na criação de um modelo digital tridimensional da peça a ser impressa, utilizando-se software de modelagem 3D, como Zbrush e Blender, reconhecidos na indústria. Durante o processo de modelagem, são definidas as dimensões, formas e detalhes da peça, levando em consideração as restrições impostas pela impressora 3D selecionada.

- **Ajustes:** Após a conclusão da modelagem, é comum que sejam necessários ajustes para otimizar o modelo para a impressão. Esses ajustes podem envolver a verificação da espessura das paredes da peça, a suavização das superfícies, a remoção de detalhes muito pequenos ou delicados que

possam ser de difícil impressão, entre outros ajustes, visando assegurar a viabilidade do modelo para a próxima etapa.

- **Cortes e encaixes:** Caso a peça a ser impressa seja maior do que o volume de impressão da impressora 3D, torna-se necessário dividir o modelo em partes menores, que possam ser impressas separadamente. Para tanto, são identificados pontos de corte apropriados no modelo, e são criados encaixes ou interfaces para assegurar a correta junção das partes após a impressão.

- **Preparação do arquivo para impressão:** Após a conclusão do modelo, este precisa ser preparado para a impressão. Nessa etapa, ocorre a conversão do modelo para um formato de arquivo adequado (como STL - STereoLithography ou OBJ), compreensível pela impressora 3D. Ademais, podem ser realizadas verificações adicionais, tais como análise de sobreposições de camadas ou detecção de erros de geometria que possam afetar o processo de impressão.

- **Posicionamento na mesa de impressão e angulação do objeto:** Durante a preparação do arquivo para impressão, é necessário posicionar virtualmente o objeto na mesa de impressão. Isso envolve a decisão da melhor posição e orientação para a impressão, considerando-se fatores como estabilidade, adequado suporte e minimização de áreas propensas a problemas de impressão. A angulação do objeto também pode ser ajustada para evitar a aplicação excessiva de pressão em partes específicas durante o processo.

- **Realização de furos para evitar acumulação de resina:** É comum efetuar furos ou aberturas estratégicas no modelo, permitindo a saída da resina não endurecida de áreas internas ou fechadas durante o processo de impressão. Essa prática visa evitar o acúmulo excessivo de resina, contribuindo para uma impressão mais precisa e proporcionando maior durabilidade à peça, uma vez que a presença de resina líquida em seu interior pode ocasionar rachaduras com o tempo.

- **Posicionamento dos suportes:** Dependendo da geometria da peça, torna-se necessário adicionar suportes que auxiliam na sustentação de partes salientes durante a impressão. Esses suportes são estruturas temporárias que são impressas junto ao modelo principal, sendo removidas posteriormente. Eles auxiliam na prevenção de problemas como a deformação da peça ou sua instabilidade durante a impressão.

- **“Fatiamento”:** Nessa etapa, o software fatiador divide o modelo em finas camadas horizontais, gerando um arquivo contendo instruções específicas para a impressora 3D. Cada camada é representada por um conjunto de linhas ou curvas, que serão seguidas pela impressora para depositar o material e construir a peça em camadas sucessivas.

- **Correção de falhas e ilhas:** Antes de iniciar a impressão, é importante revisar o arquivo fatiado a fim de identificar possíveis falhas ou ilhas. Falhas correspondem a áreas que podem estar ausentes ou corrompidas no arquivo fatiado, e que podem resultar em problemas durante o processo de impressão. Já as ilhas são partes isoladas do modelo, não conectadas à estrutura principal. Tais falhas e ilhas devem ser corrigidas a fim de garantir uma impressão bem-sucedida.

O subprocesso de impressão na MA, mais especificamente na impressão 3D com resina, compreende uma série de etapas que abrangem desde a preparação da máquina até a limpeza subsequente.

- **Definição do tipo e quantidade de resina a ser utilizada:** A escolha do tipo de resina é crucial, uma vez que diferentes tipos possuem propriedades específicas, tais como resistência, transparência e flexibilidade. É essencial selecionar a resina adequada que melhor atenda às necessidades da peça a ser impressa. Além disso, é necessário calcular a quantidade de resina necessária levando em consideração o tamanho da peça e a capacidade do tanque da máquina.

- **Enchimento do tanque da máquina de impressão com a resina escolhida:** O tanque desempenha um papel importante no processo, sendo uma área especializada onde a resina é armazenada durante a impressão. É fundamental seguir as instruções do fabricante quanto à quantidade adequada de resina a ser adicionada, evitando tanto o excesso quanto a falta de resina, pois isso pode comprometer a qualidade do resultado final.

- **Regulagem da máquina:** Antes de iniciar a impressão propriamente dita, é necessário realizar a regulagem da impressora. Essa etapa envolve a verificação e o ajuste dos parâmetros de impressão, como a velocidade de projeção da resina, a intensidade da luz UV - luz ultravioleta, a altura de camada e outros ajustes específicos do modelo de impressora utilizado. Essas configurações têm impacto direto na qualidade e nos detalhes da peça final, tornando essa etapa essencial para o sucesso

do processo.

- Inserção do arquivo 3D preparado no software de controle da impressora e iniciar a impressão: Esse arquivo contém todas as informações necessárias sobre a geometria da peça, suportes, camadas e outros detalhes relevantes. Após o carregamento do arquivo, é possível iniciar o processo de impressão. Durante a impressão com resina, a máquina utiliza uma fonte de luz UV - luz ultravioleta para solidificar a resina camada por camada, seguindo o modelo digital pré-estabelecido.

- Retirada do objeto da máquina: Após a conclusão do processo de impressão, o objeto impresso encontra-se imerso na resina endurecida dentro do tanque da máquina. Nesse estágio, é necessário remover cuidadosamente o objeto.

- Eliminação da resina em excesso: É comum que haja resina em excesso aderida à peça após a impressão. Para solucionar essa questão, é importante permitir que a resina escorra e se elimine o excesso. Para isso, a peça pode ser colocada em uma plataforma ou em uma superfície adequada que facilite o escoamento da resina excedente.

- Remoção da mesa: Além disso, em algumas impressoras de resina, a peça é impressa em uma mesa ou plataforma fixada à máquina. Após a remoção do objeto impresso e a eliminação do excesso de resina, é necessário proceder à retirada da mesa da impressora. Essa etapa é crucial para liberar espaço e preparar a máquina para a próxima impressão. Dessa forma, garante-se que a mesa esteja limpa e pronta para ser utilizada novamente.

Como último subprocesso da MA, tem-se as etapas de acabamento e finalização do produto.

- Lavagem em álcool 100%: Após retirar a peça da impressora, é comum que ela esteja coberta de resíduos de resina não endurecida. Para remover esses resíduos e garantir uma superfície limpa, é necessário lavar a peça em um recipiente com álcool isopropílico ou outro solvente adequado. O álcool ajuda a dissolver e remover a resina não polimerizada, deixando a peça pronta para os próximos passos.

- Retirada de suportes: Durante o processo de impressão, suportes são adicionados para sustentar partes salientes ou áreas que podem ser difíceis de serem impressas sem apoio. Esses suportes são estruturas temporárias que precisam ser removidas para obter uma peça finalizada. Isso pode ser feito com o auxílio de alicates, estiletes ou outras ferramentas apropriadas, tendo o cuidado de não danificar a peça durante o processo.

- Curagem com luz UV: Após a remoção dos suportes, é necessário curar a peça com luz UV. A resina utilizada na impressão 3D comumente é fotossensível, o que significa que ela endurece quando exposta à luz UV - luz ultravioleta. A cura com luz UV adicional ajuda a garantir que a resina esteja completamente polimerizada e endurecida. Existem câmaras de cura especializadas disponíveis, ou pode ser utilizada uma outra fonte de luz UV - luz ultravioleta adequada, seguindo as orientações do fabricante da resina.

- Pintura: Para adicionar cor ou acabamento estético à peça, é necessário realizar a pintura. Isso pode ser feito utilizando tintas específicas para impressão 3D ou tintas acrílicas comuns. Antes da pintura, deve-se certificar de limpar completamente a superfície da peça para garantir uma aderência adequada da tinta. É possível aplicar várias camadas de tinta, permitindo a secagem entre cada camada, para obter o resultado desejado. Além disso, técnicas adicionais, como aerografia ou aplicação de verniz, podem ser utilizadas para aprimorar o acabamento da pintura.

- Acabamento: Para um acabamento mais refinado, é possível realizar outros processos, como lixamento e polimento. O lixamento pode ser feito com lixas de diferentes granulometrias para suavizar a superfície, remover imperfeições ou marcas deixadas pelos suportes. O polimento também pode ser realizado utilizando substâncias polidoras específicas para resina ou até mesmo polidores de metais. Esses processos ajudam a obter uma superfície mais uniforme e brilhante.

4. Experimento.

Inicialmente, tem-se a etapa de seleção do produto que será tema da pesquisa. Para tal, levou-se em consideração os seguintes fatores:

- **Funcionalidade:** O objeto escolhido deve ser adequado para ser impresso em 3D sem comprometer sua funcionalidade ou utilidade.
- **Preço:** O produto final impresso em 3D deve estar dentro de uma faixa de preço semelhante aos produtos similares disponíveis no mercado, garantindo um valor justo e atrativo para potenciais clientes.
- **Dimensões:** É recomendável escolher um objeto que não seja muito grande (no caos deste experimento, mais do que 20 cm de altura), pois isso pode aumentar os custos de produção em termos de consumo de material e energia.
- **Material:** Considerando o uso de uma impressora 3D baseada em resina, o objeto original escolhido não deve depender de um material específico que não seja compatível com a impressão em 3D.
- **Atratividade:** É importante escolher um objeto que seja interessante e atraente para potenciais clientes, incentivando-os a adquirir sua própria cópia por meio da impressão 3D.
- **Disponibilidade da modelagem 3D:** Verificar se o objeto escolhido já possui um arquivo de modelo 3D disponível, seja por meio de softwares especializados ou em plataformas online de compartilhamento de arquivos para impressão 3D. Isso simplificará o processo de reprodução através da impressão 3D.

Tendo tais fatores em mente, foi escolhido o produto abaixo: Uma estatueta não oficial do “monstro” Squirtle, da franquia Pokémon (figura 3). O objeto de estudo foi adquirido no site chinês Ali Express por R\$111,96 no dia 1º de junho de 2022.



Figura 3 – Todos os componentes do produto. Fonte: Anunciante.

A funcionalidade da estatueta é o entretenimento, segundo a descrição do anúncio, seu material é de plástico, portanto a impressão dela com resina não afetaria sua função. Seu preço estava na faixa em que produtos similares são normalmente vendidos. Suas proporções são adequadas para o experimento. O fator de atratividade se dá pela popularidade do personagem e da franquia que ele faz parte. O Pokémon representado pela estatueta é o Squirtle, um dos mais populares “monstros” da franquia (figuras 4 e 5). A popularidade deste personagem é atribuída, em parte, ao fato dele ser uma das opções de Pokémon inicial dos jogadores do primeiro jogo da franquia, Pokémon Red, Green e Blue (1996). A entrega do produto foi realizada em 18 de junho de 2022, totalizando um período de 18 dias corridos entre a realização do pedido e a entrega efetiva do produto.

Conforme informado por um artigo da BBC (2021), a franquia Pokémon é uma das mais bem-sucedidas e conhecidas no mundo dos jogos e do entretenimento em geral. Criada pela empresa japonesa Nintendo em parceria com a desenvolvedora de jogos Game Freak em 1996, a franquia possui diversos

produtos em seu repertório, indo de jogos eletrônicos, a desenhos animados, filmes, mangás, brinquedos, entre outros. Sua história principal gira em torno dos chamados Pokémon, abreviação de Pocket Monsters (em tradução livre, monstros de bolso), criaturas fictícias que possuem habilidades especiais, que são capturadas e utilizadas em batalhas pelos personagens principais. Com o passar dos anos, a franquia Pokémon cresceu em popularidade e tamanho, com mais de 360 milhões de unidades de jogos eletrônicos vendidas em todo o mundo, além de um grande número de fãs que acompanham o desenho animado baseado nos jogos originais.



Figuras 4 e 5 – O Pokémon Squirtle original. Fonte figura 4: Pokémon Co. Disponível em: <<https://www.pokemon.com/br/pokedex/squirtle>>. Acesso em: 01 mar. 2023. Fonte figura 5: Pokémon Co. Frame do vídeo disponível em: <<https://youtu.be/T71dXmb2CIU>>. Acesso em: 17 abr. 2023.

É importante destacar que o Squirtle retratado na estatueta é o mesmo personagem capturado pelo protagonista do anime da franquia. Ele se diferencia pelo par de óculos de sol, que ajuda a demonstrar sua aparência diferenciada dos demais personagens apresentados no desenho animado. Observa-se que a estatueta em questão não reproduz com precisão o visual tradicional do Pokémon Squirtle. O designer responsável pela criação do produto optou por retratar o personagem de maneira antropomórfica, conferindo-lhe um corpo musculoso, assemelhando-se a um fisiculturista, sendo esta uma escolha artística ou criativa do designer, visando conferir um estilo único à estatueta e explorar uma interpretação diferenciada do personagem, destacando certas características do personagem ou mesmo explorando uma estética distinta para atrair um público específico.

A disponibilidade de um modelo pré-existente da estatueta em lojas online foi um fator facilitador na escolha desse design específico para o experimento de impressão. Ao utilizar um modelo já pronto, a etapa de impressão seria simplificada, permitindo uma reprodução mais rápida e direta da estatueta. É importante ressaltar que, devido à natureza da MA, há flexibilidade para explorar diferentes estilos e interpretações dos personagens, de acordo com a criatividade e preferências individuais dos designers. Essa liberdade criativa pode resultar em representações únicas e personalizadas, que podem divergir da representação tradicional dos personagens.

O produto é composto também por peças complementares além da estatueta, formando um conjunto. As peças são uma base para o Pokémon, 2 pesos e 3 halteres de diferentes tamanhos. Esses elementos complementares permitem uma experiência mais completa e interativa com a miniatura, possibilitando a composição de diferentes cenários e situações de acordo com a preferência do comprador. Vale-se notar que junto do conjunto, tem-se uma caixa personalizada para guardar todos os itens. Após o recebimento do produto, iniciou-se a fase de medição dos itens que o compõem, bem como das embalagens utilizadas para o transporte, com o auxílio de uma trena e de uma balança digital, buscando uma avaliação o mais precisa possível do peso e dimensões do conjunto como um todo. Essa etapa de medição é crucial para a compreensão do tamanho e peso dos itens, o que pode influenciar diretamente no processo de logística e transporte. Foram realizadas estimativas do material utilizado no processo de transporte, incluindo o lacre da caixa (tabela 1).

O produto estava embalado em uma sacola plástica preta, fechada com uma cola adesiva e fitas adesivas, provavelmente a fim de protegê-lo durante o transporte. Além disso, também estava presente a etiqueta identificadora da loja e da transportadora. No interior da embalagem, o produto foi envolvido em várias camadas de plástico-bolha. Novamente, foram utilizadas fitas adesivas para garantir que o

plástico-bolha permanecesse bem fixado ao produto. A tabela 1 contém as medidas encontradas:

Tabela 1 – Medidas das embalagens.

Item	Dimensões	Área Total	Peso
Papel da etiqueta	20cmx10cm	200cm ²	Irrelevante (0g)
Embalagem exterior preta	48cmx37cm	3552cm ² = 0,3552m ²	9g
Plástico-bolha	2,77mx0,4m	1,108m ²	75g
Fita adesiva unida ao plástico bolha	77cmx5,5cm	423,5cm ²	2,13g
Fita adesiva que veio com a embalagem	253cmx5,5cm	1391,5cm ²	7g
Fita adesiva unindo os moldes 1	43cmx5cm	215cm ²	1,09g
Fita adesiva unindo os moldes 2	39cmx4cm	156cm ²	0,78g
Molde (plástico envolvendo o Pokémon)	22cmx18,5cmx7,2cm	1980,4cm ²	62g

Os componentes principais do produto são: a estatueta, a base da estatueta, 2 pesos, 2 halteres de comprimentos diferentes com 10 pesos no total: 4 pequenos, 4 médios e 2 grandes. As dimensões mensuradas são descritas na tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões do produto.

Item	Dimensões	Área Total	Peso
	2,5cm altura		
Base da estatueta	7,3cmx7,5cm (base superior e inferior) 5,3cmx5,5cm (base inferior do trapézio)	-	48g
Pesinhos	4cm - comprimento total 1cm (diâmetro de cada esfera) / 2cm (haste) 14cm (da base à cabeça)	-	Irrelevante (0g)
Estatueta	15,2cm (da base ao braço) 15,5cm (distancia de um braço ao outro)	-	277g
Caixa personalizada	20cmx24cmx15cm	2746,63cm ²	Irrelevante (0g)
Halteres - Barra menor	5cm (comprimento)	-	0,8g
Halteres - Barra maior	13,5cm (comprimento)	-	2,2g
Peso 2,5kg	1,8cm diâmetro / 0,3cm espessura	-	4g (total)
Peso 5kg	2,4cm diâmetro / 0,3cm espessura	-	6g (total)
Peso 10kg	2,9cm diâmetro / 0,3cm espessura	-	6g (total)

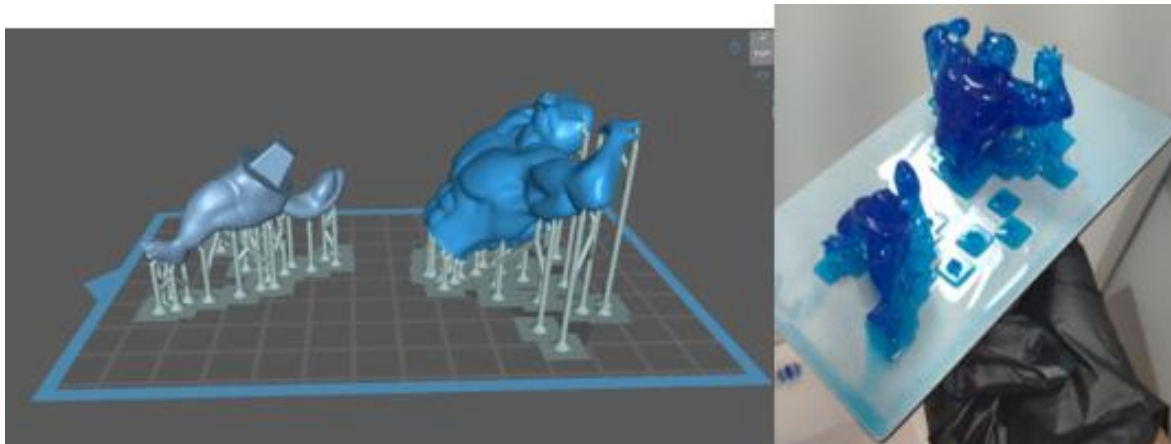
Um dos critérios considerados para a seleção do produto a ser importado foi a disponibilidade do arquivo modelado do produto em um site especializado em modelos para impressão 3D, que funciona como uma plataforma de revenda, na qual os usuários podem cadastrar suas próprias modelagens e, em troca da hospedagem, o site recebe uma porcentagem dos lucros de cada venda. Durante o desenvolvimento do experimento, verificou-se que o arquivo do produto adquirido, que era o foco do estudo, foi removido da loja. Após uma pesquisa aprofundada, constatou-se que o modelo disponível para compra não era de autoria do criador original dos designs, por essa razão, foi retirado da plataforma (Bashir, 2020). Procurou-se então localizar a loja do modelador original, contudo estavam disponíveis

apenas arquivos diferentes do produto já adquirido. Embora representasse o mesmo Pokémon, a configuração do modelo era distinta.

Diante dessa situação, optou-se pela modelagem do objeto e dos componentes extras do zero, incluídos no pacote. Para isso, foi necessário recorrer à contratação de serviços de terceiros especializados em modelagem 3D. O valor acordado para o serviço foi de R\$120,00, incluindo a possibilidade de ajustes no modelo conforme necessidade. Essa decisão contribui significativamente para o estudo, pois aborda a questão da replicabilidade do experimento em outros produtos. Nem sempre será possível encontrar um modelo pré-existente do produto desejado disponível para compra, sendo necessário realizar a modelagem desde o início, o que amplia a compreensão do processo em termos de viabilidade e adaptação a diferentes objetos. Após a finalização do arquivo digital, com o intuito de otimizar a alocação na cama de impressão, o modelo foi dividido em várias partes, levando em consideração as restrições físicas da impressora e as possibilidades de distribuição. Assim, as seguintes estruturas foram segmentadas: pernas, torso, braço direito, braço esquerdo, base (dividida em 4 partes), halteres (10) e barras (2).

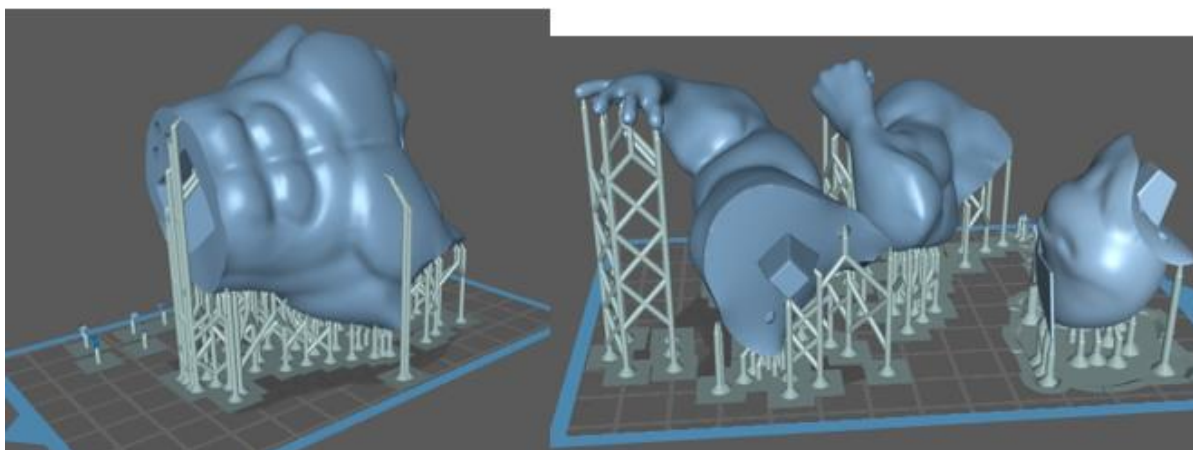
Para assegurar que a impressão fosse precisa e livre de erros, foram aplicados diversos procedimentos na preparação da peça. O primeiro deles consistiu em tornar o objeto oco, seja de forma total ou parcial, o que é denominado de "infill". Esse preenchimento interno com resina visa otimizar o consumo de matéria-prima e reduzir o volume utilizado. Optou-se por utilizar a quantidade de "infill" mais comumente empregada no mercado de miniaturas, que corresponde a 20%, a fim de fortalecer a estrutura interna da peça. (O'connell, 2023). Em seguida, foram adicionados suportes que garantem a aderência da peça à base durante o processo de impressão. Também foram adicionados buracos estrategicamente posicionados para evitar a formação de vácuo entre a peça e a mesa de impressão, prevenindo possíveis rupturas ou falhas.

O material escolhido para impressão foi a "Resina Quanton Spark Blue 1Kg" da Quanton 3D, empresa especializada em artigos para impressão 3D. A máquina utilizada foi a "Elegoo Mars 2 Pro", por estar entre os modelos mais populares e recomendados para impressão "caseira". Por último, o software escolhido para fatiamento das peças foi o "Chitubox" de fabricante homônimo, por ser o recomendado pelo fabricante, sendo também um dos softwares mais populares para impressão utilizando resina. A primeira impressão de teste foi realizada com uma proporção de 132% em relação ao tamanho original do arquivo modelado (figuras 6 e 7). Essa proporção foi escolhida para avaliar a viabilidade e a precisão do processo de impressão. Cabe ressaltar que essa estrutura impressa (Torso) apresentou dimensões de 6,3cm por 3,8cm, medidas que possibilitaram comparação com o torso original e posteriormente ajuste para 286% a fim de adequar as dimensões à proporção desejada.



Figuras 6 e 7 – Disposição das peças da impressão inicial e resultado da impressão teste.

Após a verificação e validação da peça de teste, foi realizada uma comparação entre as dimensões desta peça, a dimensão do objeto adquirido e o objetivo de padronizar o tamanho. Na equalização da proporção entre os arquivos, ajustou-se o arquivo para 560%, alcançando assim as proporções do arquivo original. Seguindo os mesmos passos de preparação do arquivo de teste, as partes foram organizadas em conjuntos distintos: Perna, Torso, Braço direito, Braço esquerdo, Cabeça Halteres (10), Bases 01 e 02, Bases 03 e 04. A subdivisão das partes possibilitou um reajuste diferenciado de cada uma delas na cama de impressão, visando explorar e utilizar uma posição considerada "ideal" para o ajuste preciso de cada peça. A definição de uma posição ideal para a alocação das peças, estabelecida em um valor de 45°, está diretamente relacionada com a análise criteriosa da pressão e tensão que serão exercidas sobre a peça durante o processo de impressão (figuras 8, 9 e 10).



Figuras 8 e 9 – Disposição do torso, braços, e cabeça com suportes na mesa de impressão.

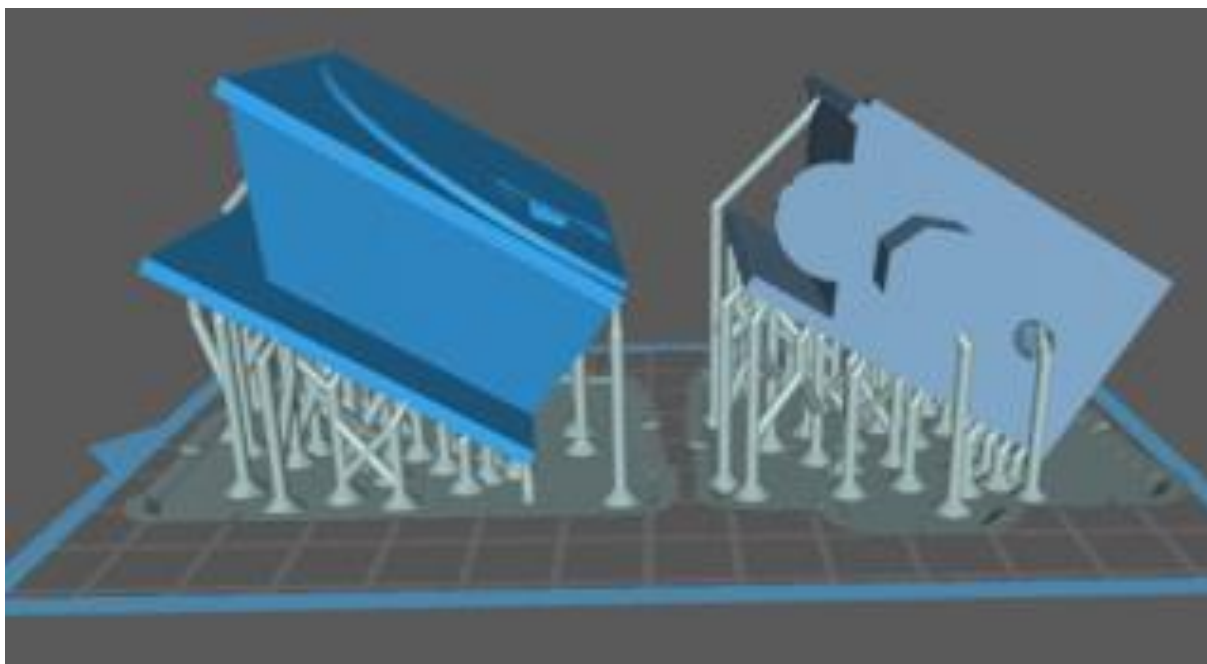


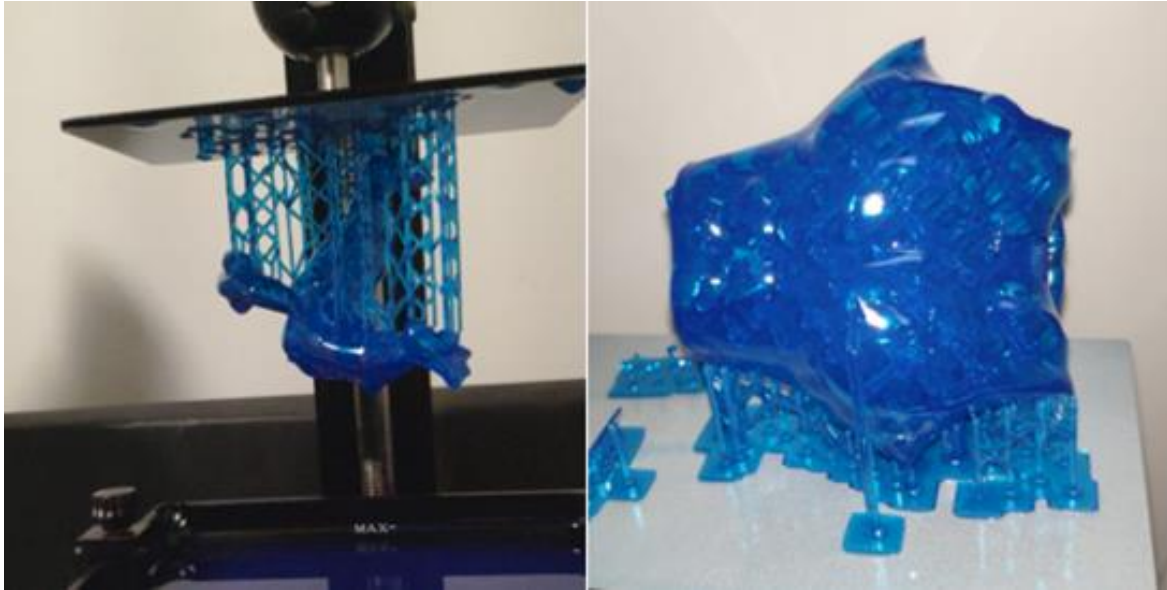
Figura 10 – Disposição de peças da base com suportes na mesa de impressão.

De acordo com a sequência predefinida durante a etapa anterior, a tabela 3 a seguir apresenta os dados relativos ao tempo previsto, a quantidade de material prevista pelo software e as quantidades e tempos reais de impressão. Através dessa minuciosa mensuração, foi possível estabelecer uma relação detalhada e comparativa entre os dados previstos pelo software, como o tempo de impressão, o volume de impressão e o peso do material, em contraste com os dados reais obtidos de tempo, volume e peso de impressão.

Tabela 3 – Informações das impressões.

Peça	Tempo Impressão software	Volume impressão (g)	Peso material Software (ML)	Tempo impressão Real	Peso impressão Real	Peso Suporte	Delta Tempo	Delta Peso S/Suporte
1. Pernas	0,14	20,3	18,47	0,18	20	4,25	0,04	1,53
2. Torso	0,13	29,73	32,7	0,15	35	7,31	0,02	2,3
3. Braço direito, Braço esquerdo e Cabeça	0,09	25,01	27,5	0,11	26	5,43	0,02	-1,5
4. Halteres (dez unidades)	0,06	14,78	16,3	0,08	8	7	0,02	-8,3
5. Base 01 e 02	0,08	26,53	29,02	0,09	25,5	12	0,01	-3,52
6. Base 03 e 04	0,08	24,26	26,7	0,08	25,5	12	0,01	-1,2

Uma vez concluída a etapa de impressão, as peças foram colocadas novamente em um ângulo de 45° em relação à mesa de impressão, permanecendo fixadas a ela (figuras 11 e 12). Essa prática estratégica visa facilitar e otimizar o processo de escoamento do excesso de resina presente nas peças, ressaltamos que esse procedimento foi executado em aproximadamente uma hora.



Figuras 11 e 12 – Pernas e torso com suportes na mesa de impressão.

Ao fim do processo de escoamento do excesso de resina, o objeto é submetido a uma etapa de lavagem por imersão em um tanque contendo álcool etílico. Essa medida é adotada com o propósito de remover quaisquer resíduos de resina tanto interna quanto externamente na peça. Após a exposição ao álcool, a peça é deixada para secar naturalmente antes de se avançar para a próxima fase, que consiste no processo de cura da resina.

O processo de cura foi realizado por meio da exposição direta da peça à luz solar, considerando-se um tempo estimado conforme especificado pelo fabricante, variando de 10 a 60 minutos. Contudo, é importante ressaltar que a duração do processo de cura pode ser afetada por diversos fatores, tais como as diferentes incidências de luz ultravioleta (UV) solar, a presença de nuvens e outras implicações meteorológicas. Como alternativa, a cura poderia ter sido realizada por meio da exposição à luz UV - luz ultravioleta artificial, com um tempo de exposição recomendado de 15 minutos, uma vez que se trata de uma exposição controlada. O processo de cura desempenha um papel fundamental na solidificação das partes da peça que ainda apresentam resquícios líquidos, contribuindo para a sua completa e sólida formação.

Após a conclusão do processo de cura das peças, dá-se início à etapa de pintura, a qual envolve a utilização de tinta acrílica PVC, que foi escolhida pela capacidade dessa tinta de aderir de forma satisfatória à superfície da peça, proporcionando um acabamento adequado e evitando utilização de fixadores de tinta e/ou outros procedimentos. Utilizou-se um aerógrafo como ferramenta para a pintura, devido à sua capacidade de distribuir a tinta de maneira uniforme sobre a peça. A aplicação da tinta ocorreu em 4 camadas, levando em consideração que o excesso de tinta poderia comprometer a configuração da peça, ocultando possíveis detalhes do objeto. O tempo de secagem de cada camada foi de 20 a 30 minutos, intervalo considerado entre as aplicações de tinta. Com o intuito de permitir uma comparação visual, optou-se por pintar apenas metade da peça, deixando parte da estrutura impressa exposta (figura 13). Essa abordagem visa auxiliar na demonstração da estrutura interna do produto antes do acabamento.



Figura 13 – Secagem das peças após pintura.

Na fase subsequente à pintura, o objeto foi submetido ao processo de colagem a fim de integrar de forma coesa e harmoniosa as partes componentes (Torso, Cabeça, Perna, Braços e Bases). Essa etapa foi considerada como a fase de conclusão e finalização do objeto, resultando em sua forma final e completa. As figuras 14 e 15 apresentam o resultado final obtido (à direita), em comparação com o produto referência (à esquerda).



Figuras 14 e 15 – Resultado final e comparação entre objetos e componentes principais.

5. Análise e discussão.

Para dar início às análises do produto adquirido e do produto impresso, foram listados todos os componentes de ambos. Como já mencionado, o objeto referência de estudo veio em uma caixa customizada, um molde com um plástico mais resistente. Veio embalado em plástico preto, com uma

etiqueta de papel fixada com fita adesiva em uma de suas faces e embalado em plástico bolha, também preso com fita adesiva. O objeto é constituído de várias partes de plástico injetado, coladas para se ter o produto final, junto dos acessórios (halteres e pesos), também feitos de plástico e pintados.

Já para o objeto impresso no experimento, foi utilizado resina para impressão 3D, álcool para lavagem das peças, tinta acrílica brilhante para a pintura e super cola para juntar as partes. Outro custo a ser levado em consideração foi a utilização de energia elétrica durante a maioria das etapas, incluindo modelagem do objeto, impressão e pintura. Na avaliação por meio do OpenLCA, como não foi possível o acesso a detalhes do processo de produção do produto referência, foi necessário estimar, com base nas informações das bases de dados disponíveis, os impactos do ciclo de vida. Durante a busca dos componentes necessários para ambos os produtos, constatou-se que a base de dados que continha a maior quantidade dos materiais desejados era a "ecoinvent Production of Chemicals Datasets", desenvolvida no contexto do projeto Environmental Footprint (EF) da Comissão Europeia (2017-2020). Conforme o nome sugere, essa base de dados é composta principalmente por informações provenientes de países membros da União Europeia. Tendo isto em mente, as informações da análise por meio do software são uma aproximação, já que o produto original foi feito na China. Para a análise por meio do software, fez-se necessário definir a composição dos componentes de cada objeto para uma análise de seus impactos ambientais de maneira mais precisa. Por não termos acesso a métodos para determinar exatamente a composição da maioria dos materiais, fez-se necessário a estimativa de suas composições de acordo com observações empíricas do produto e com o referencial teórico. Sendo assim, os componentes do produto referência pode ser descritos:

- A embalagem de plástico e o plástico bolha foram feitos de polietileno de baixa densidade (LDPE);
 - O nicho interno que acomoda o produto é composto de polipropileno (PP);
 - A caixa é feita de papel cartão;
 - O produto foi fabricado em plástico ABS (Acrilonitrila butadieno estireno);
 - As partes do item são coladas por meio de cola composta de cianoacrilato;
 - No produto são utilizadas tintas acrílicas;
 - Há utilização de etiqueta (papel adesivo e tinta de impressão) e fita adesiva.
- Já para o item impresso localmente, tem-se:
- Álcool etílico, para lavagem das peças;
 - Resina líquida para impressão 3D (formada por Monômeros Acrilados);
 - Cola (composta de cianoacrilato);
 - Tinta Acrílica Brilhante (resina acrílica).

Para identificar os componentes da resina e da tinta do produto impresso, foi feito uso da tabela FISPQ - Ficha de Informação de Segurança para Produtos Químicos, necessária em produtos químicos vendidos no Brasil. Em suma, os materiais dos componentes do produto referência e do produto impresso são descritos nas tabelas 4 e 5, respectivamente:

Tabela 4 – Materiais do produto referência e suas embalagens.

Componente	Material
Embalagem de plástico	LDPE
Etiqueta	Papel ofício
Fita adesiva	Celofane e cola
Plástico bolha	LDPE
Caixa	Papel cartão
Molde envoltório	PP
Toy Art	ABS
Cola	Cianoacrilato
Tinta (Toy Art)	Resina acrílica
Tinta (etiqueta e caixa)	Tinta para impressão

Tabela 5 – Materiais utilizados no produto impresso.

Componente	Material
Resina	Monômeros Acrilados
Álcool	Etílico
Tinta acrílica brilhante	Resina acrílica
Cola	Cianoacrilato

5.2. Avaliação do ciclo de vida e inventário por meio do OpenLCA.

O material O ciclo de vida do produto impresso pode ser visto na figura 16, com suas entradas e saídas:

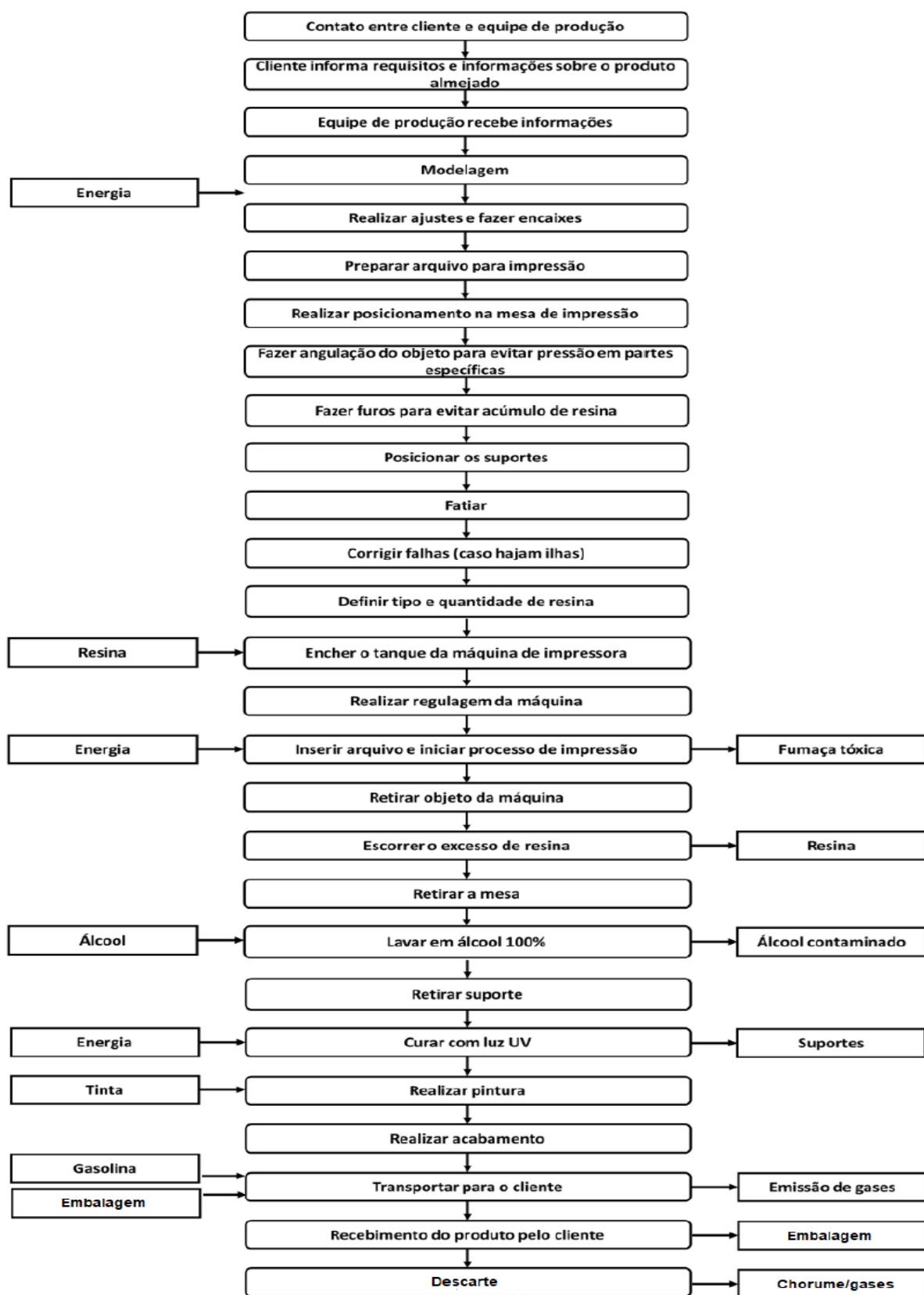


Figura 16 – Ciclo de vida do produto impresso.

Tendo todos os componentes, inputs e outputs em mente, procurou-se fluxos na base de dados os mais próximos possíveis do definido na seção anterior para a construção dos processos dentro do software OpenLCA. Para o produto referência, tem-se no quadro 1:

Quadro 1 – Inputs para a composição do produto referência.

Flow	Category	Amount	Unit
F ₂ Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	Materials production/Plasti...	0.35200	kg
F ₂ Carton box	Systems/Packaging	0.10000	g
F ₂ Label, plastic	Systems/Packaging	2186.00000	cm ²
F ₂ Paper label	Materials production/Paper...	200.00000	cm ²
F ₂ Plastic bag (LDPE)	Systems/Packaging	1.10800	m ²
F ₂ Plastic bag (LDPE)	Systems/Packaging	0.35520	m ²
F ₂ Plastic can, body PP	Systems/Packaging	62.00000	g
F ₂ polyacrylates in water solution	Organic chemicals/nan	1.50000	g
F ₂ Printing ink, offset; production mix, ...	Systems/Prints and chemic...	284.66000	mg
F ₂ Resin glue	Materials production/Other...	0.30000	g
F ₂ Transporte China-Brasil		8720.00000	kgkm

Os inputs no software são:

- Acrylonitrile butadiene atylene (ABS): representa os produtos em si, entre eles a base, halteres e o Toy Art;

- Cartox box: a caixa personalizada;
- Label, plastic: está aqui para representar a fita adesiva;
- Paper label: a etiqueta de envio;
- Plastic bag (LDPE) 1: plástico-bolha;
- Plastic bag (LDPE) 2: embalagem preta de envio;
- Plastic can, body PP: molde plástico;
- Polyacrylates in water solution: representando a tinta que dá cor ao items;
- Printing ink: estimativa da tinta gasta na caixa e na etiqueta de envio;
- Resin glue: cola utilizada para colar as partes do produto.

Ademais, há a adição do transporte do produto da China até o Brasil, totalizando cerca de 17.000 quilômetros. Já os fluxos selecionados para o produto impresso pelos autores são apresentados no quadro 2.

Quadro 2 – Inputs para a composição de um produto impresso.

Flow	Category	Amount	Unit
F ₂ butyl acrylate	Organic chemicals/nan	0.19700	kg
F ₂ Energy, potential (in hydropower re...	Resource/in water	0.98220	kWh
F ₂ Ethanol	Organic chemicals/nan	0.54800	kg
F ₂ polyacrylates in water solution	Organic chemicals/nan	3.00000	g
F ₂ Resin glue	Materials production/Other...	0.50000	g
F ₂ Transporte Grande BH		2.80000	kgkm

Os inputs no software são:

- Butyl acrylate: escolhida para a resina. A composição de resinas são de monômeros acrilatos, e este é um dos comumente utilizados;

- Energy: Considerando que a impressora gasta 0,06 kwh e gastou-se 16h22m em todas as impressões;

- Ethanol: Gasto de álcool para lavagem;
- Polyacrylates in water solution: representando a tinta que foi usada para pintura;
- Resin glue: cola utilizada para colar as partes do produto.

Foi adicionado também um componente de transporte para a região metropolitana onde foi realizado o experimento (cerca de 20km), para contabilizar o deslocamento necessário para adquirir as matérias primas do processo, bem como uma possível entrega a um cliente final.

Com os componentes definidos, fez-se possível a análise ambiental de ambos os produtos por meio do software. A análise escolhida foi a “EF method (adapted)” da base de dados “ecoinvent”. Os indicadores e seus respectivos valores podem ser encontrados na tabela 6.

Tabela 6 – Indicadores de impactos ambientais.

Indicador	Produto referência	Produto impresso	Unidade
Acidificação terrestre e de água doce	9.66115e-5	2.73488e-5	mol H+ eq (mol de íons de hidrogênio)
Efeitos cancerígenos na saúde humana	1.55805e-10	2.34839e-11	CTUh (unidades tóxicas comparativas)
Ecotoxicidade em água doce	1.51715e-4	2.25204e-6	CTUe (unidades tóxicas comparativas)
Eutrofização em água doce	4.86793e-12	0	kg P eq (quilogramas de fósforo)
Eutrofização marinha	5.07465e-5	1.43654e-5	kg N eq (quilogramas de nitrogênio)
Eutrofização terrestre	5.56175e-4	1.57442e-4	mol N eq (mol de Nitrogênio)
Efeitos não cancerígenos na saúde humana	2.29963e-11	3.34694e-11	CTUh (unidades tóxicas comparativas)
Formação fotoquímica de ozônio	8.56714e-5	2.41828e-5	kg NMVOC eq (quilogramas de Compostos Orgânicos Voláteis, Não Metano)
Uso e exploração de recursos minerais e metais	1.94978e-8	1.59207e-7	kg Sb eq (quilogramas de antimônio)
Inorgânicos respiratórios	1.79705e-10	3.92389e-11	Incidência de doenças

5.3. Matriz MET.

Conforme Frazão et al. (2003), a Matriz MET classifica os Materiais, Energia e Toxicidade de um processo levando em conta, quando presentes, as seguintes etapas: Pré-fabricação, Fabricação, Distribuição, Utilização e Fim de vida do produto. Cada etapa propõe a descrição conforme as divisões citadas acima dos tipos de materiais usados no processo, energia e possíveis componentes químicos ou físicos que tenham ou causem impactos em nível de toxicidade (tabela 7).

Tabela 7 – Matriz MET (Materiais, Energia e Toxicidade) relativa ao produto impresso.

	Materiais	Energia	Toxicidade
Pré-fabricação	Software de modelagem	Elétrica	
Fabricação	Resina, tinta/fixador, álcool; cola	Elétrica	Polímeros; compostos orgânicos voláteis.
Distribuição	Etanol/Gasolina; Embalagem	Química	Gases (CO ₂ , NO _x , HC, SO _x , MP)
Utilização	Água	-	-
Fim de vida	Resina	Química	Chorume (aterro); gases (incineração - CO, SO _x , NO _x)

A etapa de pré-fabricação em si consiste no desenvolvimento e modelagem do produto a ser impresso. Ele é feito a partir de um software específico no computador, demandando energia elétrica durante seu uso.

A fabricação consiste na impressão e pintura do produto. O material utilizado na impressão é a resina, que é a matéria-prima utilizada pela impressora. Nesta etapa também se utiliza álcool 100% para a lavagem da peça após impressão. Aqui a impressora utiliza energia elétrica durante todo o processo

de impressão, além de uso na cura da peça após a impressão por meio da luz UV – luz ultravioleta. No processo de pintura tem-se os gastos com as tintas e o material fixador. Não há gasto de energia elétrica nesta etapa, além da aplicação pelo aerógrafo. Por fim, tem-se o uso de cola para unir todas as partes do produto que tiveram que ser cortadas durante a modelagem para que coubessem na mesa de impressão. A toxicidade presente no processo de fabricação é proveniente principalmente dos materiais envolvidos: a resina que é descartada, os materiais de pintura e a cola que não são 100% biodegradáveis. É nesta etapa que tem o maior gasto de energia de todo o processo. Por ser um processo personalizado, a produção ocorre de acordo com a demanda do cliente.

A distribuição é feita com a entrega em mãos para o cliente (neste caso considerado residente na região metropolitana onde foi realizada a impressão), normalmente por automóvel. A toxicidade se faz presente com a emissão de gases ocorridos durante o transporte e o descarte da embalagem eventualmente utilizada (como uma sacola plástica simples).

Um objeto impresso por meio de impressão 3D tem os mais variados usos, desde decoração até ferramentas. No caso específico de uma miniatura, sua utilização se dá como decoração e entretenimento. Em seu uso, não há gasto de energia. Para manutenção, basta um pano molhado com água para remover a poeira acumulada ao longo do tempo. O material é durável; se manuseado com o devido cuidado, irá durar vários anos. Os materiais que compõem objetos impressos em 3D são derivados de plástico, então eles podem ser reciclados no caso da utilização de materiais vindos do PLA - Biopolímero ácido polilático. Porém considerando-se que o mercado de impressão 3D ainda está em crescimento, e o descarte correto para reciclagem de resina é pouco difundido. Existem técnicas para o reaproveitamento do material em outros produtos, além de já existirem resinas e filamentos sustentáveis no Brasil, que podem ser mais facilmente reciclados, mas eles ainda não estão em uso pelo processo de produção de foco do estudo.

Portanto, atualmente, o destino final do produto é somente o descarte. Por não ser biodegradável, ele contribui para a poluição do meio ambiente.

5.4. Listas de verificação.

Frazão et al. (2003) também apresentam as listas de verificação para Design do Ciclo de Vida. Elas compõem uma ferramenta qualitativa de gestão que permite uma avaliação dos critérios socioambientais no processo de desenvolvimento de um produto com atribuição de notas que variam entre A (situação ideal, quando o critério foi considerado na sua globalidade), B (situação a explorar, quando há oportunidades de melhoria) ou C (necessidade urgente de ação, quando o critério nunca foi considerado ou, para ele, não se conhece ainda solução). Foram selecionadas as listas que mais se adequa ao foco deste experimento, sendo que em termos de recursos renováveis e uso de substâncias perigosas o produto recebeu conceito “A”, enquanto em termos de racionalização de consumos obteve “B” e na otimização da reciclagem dos materiais recebeu avaliação “C”, tendo em vista a questão do descarte adequado de materiais (ainda) não recuperáveis

5.5. Discussão dos Resultados.

Todos os indicadores calculados por meio do OpenLCA, com exceção de efeitos não cancerígenos na saúde humana e uso e exploração de recursos minerais e metais, mostraram que o produto referência importado gera um impacto ambiental maior em comparação com o produto impresso localmente. A diferença nos dois indicadores restantes foi baixa, sendo que os efeitos não cancerígenos na saúde humana tiveram uma diferença de $1.04731e-11$ CTUh.

Para o uso e exploração de recursos minerais e metais, o produto impresso se destacou, tendo uma diferença de $1.397092e-7$ kg Sb. Esta diferença de antimônio é causada pelo etanol, já que em sua produção ele pode estar presente em pequenas quantidades como impurezas em alguns materiais utilizados, como catalisadores ou equipamentos de destilação.

Grande parte dos impactos do produto referência se deve às embalagens, em sua maioria, constituídas de algum tipo de polímero plástico. A ausência de embalagem especial no produto impresso, já que não há a necessidade (em princípio) de envio a grandes distâncias, fez com que seu impacto em diversas análises fosse relativamente inferior ao do produto referência, como por exemplo a quantidade de inorgânicos respiratórios. Considerando a maioria os indicadores, os impactos de um produto

referência equivalem ao impacto de cerca de 3 a 4 produtos impressos, como pode ser visto na tabela 8:

Tabela 8 – Equivalência de produtos impressos quanto aos impactos ambientais.

Indicador	Relação entre o produto referência e o produto impresso localmente
Acidificação terrestre e de água doce	3,53
Efeitos cancerígenos na saúde humana	6,63
Ecotoxicidade em água doce	67,37
Eutrofização marinha	3,53
Eutrofização terrestre	3,53
Efeitos não cancerígenos na saúde humana	0,69
Formação fotoquímica de ozônio	3,54
Uso e exploração de recursos minerais e metais	0,12
Inorgânicos respiratórios	4,58

Já investigando por parte das listas de verificação, percebeu-se vários pontos de melhorias que afetariam positivamente os impactos ambientais do produto impresso. Um aspecto a ser melhorado é a otimização da quantidade de suportes durante a preparação da peça no software de fatiamento. Essa otimização visa reduzir o consumo de resina na impressão que não fará parte do produto final. Além disso, a escolha do volume de “infill”, que corresponde à porcentagem de preenchimento interno da peça, também influencia significativamente a quantidade de material utilizado. Neste estudo, foi observado o consumo de 197g de resina, considerando tanto os suportes quanto as peças impressas, conforme apresentado na Imagem 19 “Inputs para a composição de 1 produto impresso”.

A otimização do tempo de impressão da peça é outra área que pode ser aprimorada, visando reduzir o consumo direto de energia elétrica. Como a impressora 3D realiza a solidificação por camadas, o volume impresso por camada não afeta diretamente o tempo de impressão, uma vez que cada camada possui um tempo pré-determinado de exposição à luz UV – luz ultravioleta para solidificar. No entanto, a altura da peça tem um impacto significativo no tempo de impressão. Portanto, a redução do número de camadas resultaria em uma redução direta no tempo total de impressão e, conseqüentemente, no consumo total de energia elétrica. Essa otimização pode ser alcançada por meio do posicionamento e da angulação adequados da peça na mesa de impressão.

Além disso, é importante mencionar que a forma de utilização e a quantidade de álcool utilizada na etapa de pós-produção também têm um impacto considerável. Neste estudo, foi utilizado um total de 548g de álcool, sendo 500g para imersão das peças em um tanque de álcool e 48g para aspersão sobre a superfície das peças. Essa quantidade pode ser otimizada para minimizar o desperdício de álcool, garantindo uma utilização mais eficiente durante o processo de limpeza e secagem das peças. Sendo assim, a otimização da quantidade de suportes, do tempo de impressão e do uso de álcool são aspectos importantes a serem considerados para reduzir o consumo de materiais e recursos durante o processo de MA, contribuindo assim para uma produção ainda mais eficiente e sustentável. Do ponto de vista econômico, tem-se os custos apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Custos de impressão.

Item	Valor
Resina	$R\$184,00/L \times 0,197L = R\$36,25$
Álcool	$R\$7,59/L \times 0,700L = R\$5,31$
Tinta	$R\$0,20/mL \times 3mL = R\$0,60$
Cola	$R\$2,40/g \times 0,5g = R\$1,20$
Energia	$R\$0,84/kWh \times 0,9822kWh = R\$0,83$
Custo total - Produto impresso	$R\$44,19 + \text{modelagem}$
Custo total - Produto referência	$R\$111,96$

Os custos totais mostram uma diferença expressiva. O produto impresso custou somente 40% do preço do produto referência, ainda que não tenham sido considerados custos de frete, impostos e outros. Porém, este valor não inclui o custo da modelagem. Conforme comentado anteriormente, pagou-se R\$120,00 para a modelagem do boneco do zero, pela indisponibilidade inicial do modelo do objeto. Este valor somente já é maior que o preço do objeto de origem chinesa. No total, o gasto do produto impresso foi de R\$164,19, cerca de 146,6% do preço do produto chinês. Isto indica que a impressão de objetos sem modelos prontos pode não ser vantajosa para um cliente.

As alternativas para esta situação são: o fornecimento do molde pela empresa original, seja por um valor inferior ou gratuitamente, o que seria um outro modelo de negócios não implementado no momento deste experimento, ou a compra de um modelo pronto em algum site de modelos 3D. O modelo original do produto analisado não estava mais disponível no início do experimento, porém, posteriormente um novo modelo similar (figura 17) foi colocado à venda no mesmo site, custando aproximadamente R\$30,00 (embora sem a base e outros objetos extras, como os halteres). Considerando somente este valor para a obtenção do modelo, o custo final do produto impresso ficaria por R\$74,19, representando 66% do preço do produto referência.

Figura 17 – Modelo de “Squirtle Swole Mamado Frandemi Version”.



Fonte: Disponível em: <<https://cults3d.com/en/3d-model/various/squirtle-swole-mamado-frandemi-version>>. Acesso em: 14 mai. 2023.

Por fim, uma última análise seria a substituição da resina utilizada por uma biodegradável. Por custar 40% mais caro, o valor final do produto seria R\$58,69, acrescido do valor da modelagem.

Considerando o valor do modelo disponível no site consultado, o valor final ficaria em R\$88,69, o que representa 79% do preço do produto referência. Em suma, tem-se os seguintes valores apresentados na tabela 10:

Tabela 10 – Custos totais em Reais.

	Custo sem modelagem	Custo com modelagem	Custo com modelo pronto
Produto com resina normal	R\$44,19	R\$164,19	R\$74,19
Produto com resina biodegradável	R\$58,69	R\$178,69	R\$88,69
Produto referência		R\$111,96	

Em todos os casos em que a modelagem já estava pronta, o valor final do produto impresso ficou inferior ao do produto referência, destacando mais uma vantagem da aplicação da MA para a obtenção de produtos como o analisado. É importante ressaltar que estes custos, tanto no caso dos produtos impressos como no produto referência, inclusive de impostos, frete e outras taxas. Trata-se fundamentalmente de uma referência, pois não é objetivo deste trabalho se aprofundar em relação à taxação de produtos ou insumos importados. De qualquer forma, observa-se que há uma diferença significativa entre as soluções propostas.

6. Conclusões.

Com base nas análises realizadas nas seções anteriores, torna-se evidente que existem diferenças significativas nos impactos ambientais diretos ao comparar um produto adquirido da China com um produto similar produzido localmente, por meio da tecnologia de impressão 3D. Pode-se considerar que a produção local do produto via impressão 3D mantém as características satisfatórias em relação à sua composição, textura e aparência, porém apresenta significativas vantagens com relação aos impactos ambientais em comparação com a produção e importação de um objeto similar da China. De fato, pode-se afirmar que a produção de um objeto e a importação da China geram impactos ambientais aproximadamente equivalentes à produção de vários objetos similares localmente. Os indicadores obtidos por meio do software OpenLCA mostraram que o impacto ambiental de um único produto chinês equivale aproximadamente ao impacto ambiental de 3 a 4 produtos similares produzidos no contexto desta pesquisa. A diferença na produção também se destaca no quesito econômico, já que em casos onde um modelo do item desejado já existe, o custo total do item impresso é notavelmente inferior ao preço do produto original chinês.

É importante ressaltar a possibilidade de linhas de pesquisa para estudos futuros nesta área. Dentre eles, destacam-se: a avaliação da replicabilidade do processo em uma escala maior de produção; a realização de análises socioambientais mais aprofundadas em relação à diminuição da produção na China e ao aumento da produção local; a investigação da procedência dos recursos utilizados na produção local, como a obtenção de modelos para impressão e os recursos utilizados, como a resina. Essas investigações futuras podem fornecer uma compreensão mais abrangente dos impactos e das oportunidades relacionadas à produção local de objetos por meio da manufatura aditiva, considerando tanto os aspectos socioambientais quanto à viabilidade e a sustentabilidade desse processo.

Por fim, a pesquisa demonstrou uma possibilidade de um modelo de negócio interessante, a ser explorado em pesquisas futuras: a construção de brinquedos pelos próprios usuários (crianças ou nem tanto) a partir de sistemas caseiros de manufatura aditiva, modelos de seus personagens favoritos e, por que não dizer, de brinquedos frutos da própria imaginação.

Agradecimentos.

Os autores agradecem à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Código Financeiro 88887.569081/2020-00), ao Programa de Bolsas de Iniciação Científica do CNPq e

à FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (projeto TEC - APQ-01843-15: "Análise do Ciclo de Vida de Produtos Mineiros") pelo financiamento desta pesquisa. Agradecem também à engenheira Maria Luza Noronha da Silva, pela contribuição no desenvolvimento do modelo e impressão.

Referências.

ABNT NBR ISO 14040:2009 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2009.

ABNT NBR ISO 14044:2014 Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo De Vida – Requisitos e orientações. Associação Brasileira de Normas Técnicas. v.s. corrigida. 2014.

BANDEIRA, Anellise Camargo; SOLIMAN, Marlon. Avaliação da percepção dos consumidores de serviços de entrega e retirada de mercadorias oferecidos por estabelecimentos comerciais de Santa Maria-RS. **Produto & Produção**, v. 24, n. 2, p. 13-45, 2023.

BASHIR, Dale. "M'sian 3D Artist's Creation of Muscular Pokemon Stolen and Sold Online". IGN Southeast Asia. 2020. Disponível em: <https://sea.ign.com/pokemon/164343/news/msian-3d-artists-creation-of-muscular-pokemon-stolen-and-sold-online> . Acesso em: 19 out. 2022.

BBC. "Pokémon at 25: A history - from Pocket Monsters, to TCG and Pokémon GO". BBC's Newsround. Disponível em: <https://www.bbc.co.uk/newsround/56167405> . Acesso em: 01 mar. 2023.

BEAMAN, Joseph J.; BARLOW, Joel W.; BOURELL, David L.; CRAWFORD, Richard H.; MARCUS, Harris L.; McALEA, Kevin P. **Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing**. London: Kluwer Academic Publishers, 1997.

BERMAN, Barry. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business Horizons**, v. 55, n. 2, p. 155-162, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681311001790> . Acesso em: 28 abr. 2023.

BIONE, Bruno Antonio; SILVA, Andreza Pereira da; SILVA, Erick Viana da; PASCHOAL, Arquimedes José de Araújo. "Manufatura aditiva: um estudo da sustentabilidade direcionada aos processos de fabricação industriais". In: **COINTER PDVGT** 2021.

BOWERSOX, Donald J.; CLOSS, David J.; COOPER, M. Bixby. **"Supply Chain Logistics Management"**. Michigan: McDraw-Hill, 2002.

CAVINATO, Joseph L. "Supply chain logistics risks: From the back room to the board room". **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 34, n. 5, p. 383-387. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/09600030410545427> . Acesso em: 17 jun. 2023.

CHOWDHURY, Priyabrata; PAUL, Sanjoy Kumar; KAISAR, Shahriar; MOKTADIR, Md. Abdul. "COVID-19 pandemic related supply chain studies: A systematic review". **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 148, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554521000478> . Acesso em: 20 jun. 2023.

FRAZÃO, Rui; PENEDA, Constança; FERNANDES, Rui. **"Adoptar uma Perspectiva de Ciclo de Vida"**. Caderno do INETI nº10 - 1ª Edição. Lisboa: INETI – CENDES, 2003.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **"Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing"**. Nova York: Springer, 2009.

GEBLER, Malte; UITERKAMP, Anton JM Schoot; VISSER, Cindy. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. **Energy policy**, v. 74, p. 158-167, 2014.

GORNI, Antonio Augusto. “**Prototipagem rápida, a revolução 3D**”. Plástico Industrial, São Paulo, nov. 2013.

HOLMSTROM, Jon; PARTANEN, Jouni; TOUMI, Jukka; WALTER, Manfred. "Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment". **Journal of Manufacturing Technology Management** v. 21, p. 687-697, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/233663433_Rapid_manufacturing_in_the_spare_parts_supply_chain_Alternative_approaches_to_capacity_deployment . Acesso em: 05 mar. 2023.

JÚNIOR, Valdir Silveira; LOOS, Maurício Johnny. APLICAÇÃO DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA NO DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS: UM ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO CEARÁ. **Produto & Produção**, v. 19, n. 3, 2018. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/sc400093k#> . Acesso em: 20 set. 2023.

KAI, Dalton Alexandre et al. Measure Additive Manufacturing for Sustainable Manufacturing. In: **ISPE TE**. 2016. p. 186-195.

KHAN, Shoukat Alim; KOÇ, Muammer; AL-GHAMDI, Sami G. Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: A systematic review for built environmental applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 303, p. 127027, 2021.

KREIGER, Megan; PEARCE, Joshua M. "Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products". **ACS Sustainable Chemistry & Engineering** v. 1, n. 2, p. 1511-1519, 2013. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/sc400093k#> . Acesso em: 20 mai. 2023.

LE BOURHIS, Florent; KERBRAT, Olivier; HASCOET, Jean-Yves; MOGNOL, Pascal. "Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing". **Int J Adv Manuf Technol** v. 69, p. 1927–1939, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-013-5151-2> . Acesso em: 20 abr. 2023.

LI, Yalun et al. Cost, sustainability and surface roughness quality—A comprehensive analysis of products made with personal 3D printers. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 16, p. 1-11, 2017.

LIU, Zhichao et al. Sustainability of 3D printing: A critical review and recommendations. In: **International Manufacturing Science and Engineering Conference**. American Society of Mechanical Engineers, 2016. p. V002T05A004.

MENDES Crespo, Natalia et al. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, 26(1), 160-175, jan. /mar. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/k9QMLVqqYtNxvPXtJSm9JYM/> Acesso em: 20 mar. 2024.

MORROW, W.R.; QI, H.; KIM, I.; MAZUMDDER, J.; SKERLOS, S.J. "Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing". **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 10, p. 932-943, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652605002799> . Acesso em: 21 fev. 2023.

O'CONNELL, Jackson. "3D Printing Infill: The Basics for Perfect Results". All3DP. 2023. Disponível em: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/> . Acesso em: 25 jun. 2023.

PEARCE, Joshua; BLAIR, Christine Morris; LACIAK, Kristen; ANDREWS, Rob; NOSRAT, Amir; ZELENIKA-ZOVKO, Ivana. "3-D Printing of Open-Source Appropriate Technologies for Self-Directed Sustainable Development". **Journal of Sustainable Development** v. 3, n. 4, p. 17-29, 2010. Disponível em: <https://www.ccsenet.org/journal/index.php/jsd/article/view/6984> . Acesso: 28 abr. 2023.

POPOV, A. N.; ZELENKOV, G. A.; PAPULOV, D. S. Reconstruction of various navigational scenarios of the «Ever Given» ship, including grounding in the Suez Canal using the bridge simulator with up-to-date electronic navigation charts. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2021. p. 012114.

RODRIGUES, Vinícius Picanço; ZANCUL, Eduardo de Senzi; MANÇANARES, Cauê Gonçalves; GIORDANO, Caio Mezzeti; SALERNO, Mario Sergio. "Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações". **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas** v. 12, n. 3, p. 1, 2017. Disponível em: <https://revista.feb.unesp.br/gepros/article/view/1657> . Acesso em: 22 mar. 2023.

SILVA, Júlio César Augusto. **Design para sustentabilidade: Um guia para projetar soluções de baixo impacto ambiental**. São Paulo: Editora Blücher, 2023

SCHIFFLING, Sarah; VALANTASIS KANELLOS, Nikolaos. Ship Happens: Ever Given and Forgotten. 2021. Disponível em: <https://researchonline.ljmu.ac.uk/id/eprint/14747/>. Acesso em: 03 jan. 2024.

VERBOEKET, Victor; KRIKKE, Harold. "The disruptive impact of additive manufacturing on supply chains: A literature study, conceptual framework and research agenda". **Computers in Industry**, v. 111, p. 91-107, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361519303446> . Acesso em: 03 fev. 2023.

VOLPATO, Neri (org.). **“Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D”**. São Paulo: Blucher 2017.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. Editora Blucher, 2021.

WITTBRODT, Ben; PEARCE, Joshua M. "The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components". **Additive Manufacturing**, v. 8, p. 110-116, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860415000494> . Acesso em: 20 mai. 2023.