

Museu de Astronomia e Ciências Afins – MAST / MCTI

**Mestrado Profissional em Preservação de Acervos de Ciência e Tecnologia –
PPACT**

***Aplicação da impressão 3D na criação de
acondicionamento customizado para
preservação de acervos***

Jéssyca Janiffer Diniz de Almeida
Matrícula: 2020-45

Orientação: Prof^ª. Dra. Heloisa Meireles Gesteira

Agosto 2023 - Rio de Janeiro / Brasil

Aplicação da impressão 3D na criação de acondicionamento customizado para preservação de acervos

por

Jéssyca Janiffer Diniz de Almeida,

Aluna do Mestrado Profissional em Preservação

de Acervos de Ciência e Tecnologia

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Preservação de Acervos de Ciência e Tecnologia, do Museu de Astronomia e Ciências Afins – MAST/MCTI, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Preservação de Acervos de Ciência e Tecnologia.

Área de concentração: Preservação de acervos de ciência e tecnologia

Linha de Pesquisa: Acervos, Conservação e Processamento

Orientador: Prof^ª. Dra. Heloisa Meireles Gesteira

MAST/MCTI - RJ, julho de 2023

Ficha Catalográfica

A448a Almeida, Jéssyca Janiffer Diniz de.
Aplicação da impressão 3D na criação de acondicionamento customizado para preservação de acervos /Jéssyca Janiffer Diniz de Almeida. – Rio de Janeiro, 2023.
118 f. : il. color.
Orientação: Prof. Dr. Heloisa Meireles Gesteira.
Referências: f. 109-118.

Dissertação (Mestrado Profissional em Preservação de Acervos de Ciência e Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Preservação de Acervos de Ciência e Tecnologia, Museu de Astronomia e Ciências Afins – MAST, Rio de Janeiro, 2023.

1. Impressão 3D. 2. Patrimônio de Ciência e Tecnologia. 3. Preservação de Acervos. 4. Acondicionamento de acervos. I. Museu de Astronomia e Ciências Afins. II. Gesteira, Heloisa Meireles. III. Título.

Jéssyca Janiffer Diniz de Almeida

Aplicação da impressão 3D na criação de acondicionamento customizado para preservação de acervos

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Preservação de Acervos de Ciência e Tecnologia, do Museu de Astronomia e Ciências Afins – MAST/MCTI, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Preservação de Acervos de Ciência e Tecnologia.

Aprovado em: ___/___/___

Banca Examinadora:

Orientador: _____

Prof.(a) Dra. Heloisa Meireles Gesteira
PPACT/Museu de Astronomia e Ciências Afins

Examinador Interno: _____

Prof^ª Dr^ª. Cláudia Penha dos Santos
PPACT/Museu de Astronomia e Ciências Afins

Examinador Externo: _____

Prof. Dr. Ricardo Cunha Michel
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Suplente interno: _____

Prof^ª Dr^ª. Ozana Hannesch
PPACT/Museu de Astronomia e Ciências Afins

Suplente externo: _____

Prof.^a Dr.^a. Jaqueline Dias Senra
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, 2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram no desenvolvimento desta dissertação, direta ou indiretamente.

À minha orientadora, Heloisa Gesteira, pela sua dedicação, paciência e orientação durante todo o processo de pesquisa. Seus valiosos insights, críticas construtivas e visão acadêmica foram fundamentais para moldar a direção deste estudo.

À minha família, que sempre me apoiou em todas as etapas da minha jornada acadêmica. À minha mãe, meu pai e minhas irmãs, agradeço a compreensão e por estarem ao meu lado, me dando força nos momentos desafiadores.

À Ana Luisa, pelo apoio inabalável ao longo desta jornada acadêmica. Seu amor, paciência e encorajamento foram fundamentais para minha motivação e sucesso neste trabalho. Obrigada por compreender as horas dedicadas aos estudos e a pesquisa, por me apoiar emocionalmente nos momentos de pressão e por sempre acreditar em mim, mesmo quando eu duvidava das minhas próprias habilidades. Sua presença constante ao meu lado, compartilhando as alegrias e os desafios desta jornada, foi um fator crucial para a minha perseverança.

Aos colegas de classe, que compartilharam seus conhecimentos e experiências, enriquecendo ainda mais meu aprendizado. Suas discussões estimulantes e debates foram cruciais para o desenvolvimento de novas ideias.

Aos professores do programa que contribuíram com seu conhecimento e experiência ao longo desta trajetória acadêmica. Em especial à Cláudia Penha, suas contribuições foram essenciais para a realização deste trabalho. Estendo o agradecimento aos professores de outros programas, em especial ao Ricardo Michel, por suas colocações e disponibilidade.

Ao Grupo de Catálise Ambiental e Sustentabilidade Energética – GCAS, da UERJ, em especial à Nakédia Carvalho, pela parceria e o fornecimento da infraestrutura e dos recursos necessários para a realização deste estudo. Este apoio foi crucial para a consecução deste trabalho de pesquisa.

Ao N@PIn – Núcleo de apoio à análise e popularização da informação científica e tecnológica –, em especial à Jaqueline Senra, por acreditar no meu potencial e pela confiança de me permitir compartilhar os conhecimentos adquiridos.

A todos que, direta ou indiretamente, tiveram algum papel nesta jornada acadêmica, meu sincero agradecimento. Sem o apoio, orientação e incentivo de cada um de vocês, esse trabalho não seria possível.

RESUMO

A preservação de artefatos de ciência e tecnologia em museus é um desafio constante, pois esses objetos requerem cuidados especiais devido à sua natureza única e delicada. Nesse contexto, a tecnologia de impressão 3D tem se mostrado uma tecnologia promissora, com aplicações que abrangem desde a preservação e restauração de objetos, à criação de réplicas para exposição e promoção da acessibilidade. Assim, este trabalho se propõe a demonstrar a possibilidade de usar a tecnologia para criar acondicionamentos customizados sob medida para proteção e conservação de acervos a partir do desenvolvimento de um protótipo de acondicionamento customizado para uma bússola de marinha. Inicialmente, foram analisadas as características específicas da bússola, como forma, tamanho e funcionamento, identificando-se os requisitos necessários para o seu acondicionamento. Em seguida, utilizou-se um software de modelagem 3D para criar o design do protótipo, que foi preparado para futura impressão, considerando aspectos como geometria, espessura de parede e facilidade de fechamento. Além disso, o estudo destacou a importância da seleção de materiais adequados com base nas propriedades desejadas, como resistência e durabilidade, bem como identificou os parâmetros de impressão ideais para garantir uma proteção mais eficiente e precisa. Este estudo contribui para a aplicação da tecnologia de impressão 3D na criação de protótipos de acondicionamento personalizados, fornecendo uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações que atendam aos requisitos de proteção, estabilidade e funcionalidade, minimizando os danos causados pelo manuseio, exposição a condições ambientais adversas e outros fatores de deterioração.

Palavras-chave: impressão 3D; fabricação por filamento fundido; bússola de marinha; patrimônio de ciência e tecnologia; preservação de acervos.

ABSTRACT

Preserving artifacts of science and technology in museums is an ongoing challenge, as these objects require special care due to their unique and delicate nature. In this context, 3D printing technology has emerged as a promising tool with applications ranging from preservation and restoration of objects to creating replicas for exhibition and promoting accessibility. Therefore, this study aims to demonstrate the potential use of this technology to create custom-made enclosures for the protection and conservation of museum collections by developing a prototype of a custom enclosure for a marine compass. Initially, the specific characteristics of the compass, such as shape, size, and functionality, were analyzed to identify the necessary requirements for its enclosure. Subsequently, a 3D modeling software was used to design the prototype, which was prepared for future printing, considering aspects such as geometry, wall thickness, and ease of closure. Moreover, the study emphasized the importance of selecting appropriate materials based on desired properties such as strength and durability, as well as identifying optimal printing parameters to ensure more efficient and precise protection. This research contributes to the application of 3D printing technology in the creation of custom enclosure prototypes, providing a solid foundation for future research and applications that meet the requirements of protection, stability, and functionality while minimizing damage caused by handling, exposure to adverse environmental conditions, and other factors of deterioration.

Keywords: 3D printing; fused filament fabrication; marine compass; science and technology heritage; preservation science.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3DP – Impressão 3D.

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno.

AM – Manufatura Aditiva.

ASTM – American Society for Testing and Materials.

CAD – Computer-Aided Design.

DLP – Processamento Digital de Luz.

FDM – Modelagem por Fusão e Deposição.

FFF – Fabricação por Filamento Fundido.

HIPS – Poliestireno de Alto Impacto.

MA – Manufatura Aditiva.

MAST – Museu de Astronomia e Ciências Afins.

PC – Policarbonato.

PC&T – Patrimônio de Ciência e Tecnologia.

PCC&T – Patrimônio Cultural da Ciência e Tecnologia.

PEEK – Poliéter Éter Cetona.

PEI – Polietirimida.

PETG – Polietileno Tereftalato com Glicol-modificado.

PLA – Poli (ácido láctico).

PPS – Polifenileno.

PPSU – Polifenilsulfona.

RepRap – The Replicating Rapid Prototyper.

SME – Society of Manufacturing Engineers.

SLS – Sinterização Seletiva a Laser.

STL – Estereolitografia.

TPE – Elastômero Termoplástico.

TPU – Poliuretano Termoplástico.

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Agentes de deterioração.

Figura 2 – Níveis de envoltório.

Figura 3 – Bússola Magnética.

Figura 4 – Bússola Giroscópica e Bússola Magnética para comparação.

Figura 5 – Bússola de Marinha (ON) de Kelvin, Bottomley & Baird Ltd, Glasgow, séc. XX.

Figura 6 – Bússola de Marinha (ON) de L. Casella/Jose Maria dos Reis, Londres e Rio de Janeiro, séc. XIX.

Figura 7 – Parte superior da Bússola de Marinha.

Figura 8 – Anel móvel da Bússola de Marinha.

Figura 9 – Parte inferior da Bússola de Marinha.

Figura 10 – Divisão das tecnologias de manufatura aditiva.

Figura 11 – Visualização das diferentes técnicas de impressão 3D.

Figura 12 – Classificação geral dos processos de prototipagem rápida.

Figura 13 – Tipos de manufatura aditiva: a) Estereolitografia; b) Sinterização Seletiva a Laser; c) FDM/FFF - Fabricação por Filamento Fundido.

Figura 14 – Pintura convertida em relevo 3D para ser experimentada por pessoas com deficiência visual.

Figura 15 – Embalagem produzida por impressão 3D.

Figura 16 – Processo de impressão 3D comum a todas as técnicas.

Figura 17 – Um modelo CAD à esquerda convertido em formato STL à direita.

Figura 18 – Definindo a orientação no software Slicer.

Figura 19 – Imagem de um modelo digital CAD seguido de imagens com camadas de tamanhos diferentes.

Figura 20 – Princípio das camadas nos objetos impressos em 3D.

Figura 21 – Diferentes tipos de impressora 3D.

Figura 22 – Como uma impressora 3D funciona.

Figura 23 – Partes componentes do cabeçote de extrusão.

Figura 24 – Diferentes tamanhos do diâmetro do bico extrusor.

Figura 25 – Linhas de deposição de filamento.

Figura 26 – Esquema ilustrativo da tecnologia de Impressão 3D FFF.

Figura 27 – Parâmetros de Impressão 3D.

Figura 28 – Orientação de impressão

Figura 29 – Ângulo de impressão e largura do filamento.

Figura 30 – Comparação do tamanho das camadas.

Figura 31 – Espessura da camada externa.

Figura 32 – Estruturas internas com densidades variadas.

Figura 33 – Distintos padrões de preenchimento.

Figura 34 – Exemplo de uso do filamento HIPS como estrutura de suporte para impressão.

Figura 35 – Esquema com as medidas da bússola de marinha.

Figura 36 – Bússola de marinha modelada digitalmente com o uso do Tinkercad.

Figura 37 – Modelos digitais e impressos dos diferentes tipos de fechamento de caixa testados.

Figura 38 – Modelo digital da caixa pensada para acondicionamento da bússola de marinha.

Figura 39 – Impressora GTMAX3D CORE A2V2.

Figura 40 – Modelo de corpo de prova.

Figura 41 – Preenchimento interno de acordo com a densidade.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Quantidade de publicações por ano sobre o tema de Impressão 3D relacionado com o Patrimônio Cultural.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Softwares para modelagem 3D.

Quadro 2 – Softwares fatiadores para impressora 3D.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores indicados de temperaturas para cada tipo de filamento.

Tabela 2 – Impressora GTMAX3D CORE A2V2.

Tabela 3 – Características técnicas do PLA para impressão.

Tabela 4 – Parâmetros de processamento analisados.

Tabela 5 – Parâmetros fixos de processamento utilizados.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. PATRIMÔNIO CULTURAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA	18
2.1 PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO CULTURAL.....	27
2.2 BÚSSOLA DE MARINHA	31
3. IMPRESSÃO 3D E SEUS USOS EM MUSEUS	40
3.1 APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D EM MUSEUS	48
3.2 PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D.....	56
3.3 FUNCIONAMENTO DE UMA IMPRESSORA 3D FDM/FFF.....	63
3.3.1 <i>Parâmetros para impressão 3D</i>	68
3.3.1.1 Orientação de construção.....	71
3.3.1.2 Ângulo de impressão	72
3.3.1.3 Largura do filamento	73
3.3.1.4 Espessura da camada	73
3.3.1.5 Velocidade de impressão	75
3.3.1.6 Temperatura do bico e da mesa de impressão	75
3.3.1.7 Densidade de preenchimento	76
3.3.1.8 Padrão de preenchimento.....	77
3.4 MATERIAIS UTILIZADOS NA IMPRESSÃO 3D FDM/FFF.....	78
3.4.1 <i>PLA – Poli (ácido lático)</i>	80
3.4.2 <i>ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno</i>	81
3.4.3 <i>PETG – Polietileno Tereftalato com Glicol-modificado</i>	82
3.4.4 <i>Nylon</i>	83
3.4.5 <i>HIPS – Poliestireno de Alto Impacto</i>	84
3.4.6 <i>TPE, TPU e TPC – Filamentos flexíveis</i>	85
3.4.7 <i>PC - Policarbonato</i>	86
3.4.8 <i>PEEK - Poliéter-éter-cetona</i>	87
3.4.9 <i>Tritan – Poliéster de Alta Tensão</i>	87
3.4.10 <i>Outros filamentos</i>	88
4. METODOLOGIA	90
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
REFERÊNCIAS	103

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho investigou a impressão 3D como um caminho para pensar e projetar acondicionamentos customizados para artefatos de ciência e tecnologia mantidos e preservados em acervos de museus e centros de ciência. Para isso, foi utilizada a técnica de impressão 3D FFF (Fabricação por Filamento Fundido) para elaboração de um modelo experimental de embalagem. Também foram observados e identificados os principais parâmetros de impressão e os diferentes polímeros disponíveis no mercado e suas características considerando o desempenho esperado em situações que simulem os riscos a que estes objetos estão sujeitos. Ao final, por meio de um processo de design exploratório e experimental chegou-se a um protótipo de design de embalagem para a guarda e conservação do objeto escolhido.

Para restringir o escopo deste trabalho optou-se por tratar de um objeto tridimensional que integrasse a coleção de objetos científicos do Museu de Astronomia e Ciências Afins – MAST. Foi considerada a coleção de objetos científicos procedentes do Observatório Nacional - ON, primeira a ser registrada pela instituição e que se encontra disponibilizada na base de dados do acervo museológico¹. Segundo o inventário da coleção², esses objetos “foram utilizados em serviços e pesquisas científicas ou de desenvolvimento tecnológico em suas instituições de origem e foram, em sua maioria, fabricados no exterior entre os séculos XIX e XX” (MAST. 2011, p. 5).

Durante pesquisa realizada na base do acervo, destacaram-se alguns objetos, em especial por apresentarem menor tamanho, tais como: astrolábio de prisma, bússola de agrimensor, horizonte artificial, bússola de marinha, luneta colimadora e tubos espectrais. Definiu-se então pela Bússola de Marinha de Kelvin, Bottomley & Baird Ltd (registro museológico 1994/0358), por suas dimensões e por ser um objeto portátil, o que facilita o escaneamento e modelagem e posterior impressão. Além disso, o instrumento apresenta-se incompleto, com um dos pinos faltantes e sem o morteiro, este um acondicionamento característico e importante para o funcionamento dele.

O patrimônio cultural pode ser ameaçado por ações humanas, por forças da natureza ou pela simples passagem do tempo. Uma fração significativa dos acervos se encontra exposta, por exemplo, a níveis expressivos de risco de incêndio, danos por água, biodeterioração e/ou danos mecânicos (D’ÁLMEIDA, 2013).

¹ Disponível no endereço eletrônico: http://site.mast.br/hotsite_museologia/pesquisa_na_base.html

² Disponível no endereço eletrônico: http://site.mast.br/hotsite_museologia/inventario_colectao_objetos2011.pdf

O desenvolvimento tecnológico e o uso de tecnologias digitais têm exercido relevante papel nesse contexto, auxiliando na preservação e divulgação do patrimônio cultural e científico, proporcionando às estratégias de preservação novas dimensões e abordagens cada vez mais eficazes e menos invasivas em relação aos objetos preservados. Verifica-se a sua presença seja no uso de aparelhos para monitoramento e controle de temperatura e umidade de ambientes, na análise química dos materiais ou na digitalização dos acervos por exemplo.

As tecnologias digitais 3D vêm ganhando notoriedade nessa transformação do cenário da conservação-restauração. Nos últimos anos o uso de tecnologias 3D tem sido notado na documentação, pesquisa, preservação, conservação-restauro e divulgação do patrimônio cultural. Frequentemente dependentes e realizados em estreitas colaborações interdisciplinares, os projetos com foco no uso de tecnologias 3D no campo do patrimônio têm despontado na última década, demonstrado por um aumento considerável de publicações científicas. Essas tecnologias estão em constante desenvolvimento, tanto no campo de *hardware* e *software*, quanto no sentido de automatizar a aquisição de informações sobre objetos do patrimônio histórico.

A expansão das técnicas de Manufatura Aditiva – AM³, por exemplo, e da variedade de metodologias de fabricação digital aplicadas em outras áreas do conhecimento permite projetar essas possibilidades no campo do patrimônio. Essa tecnologia é usada em uma variedade de indústrias, desde a saúde até a aeroespacial, e permite a criação de formas altamente detalhadas e complexas que seriam difíceis ou impossíveis de produzir usando técnicas de fabricação tradicionais. Alguns dos materiais mais comuns usados na impressão 3D incluem plástico, metal e cerâmica, embora uma ampla variedade de materiais possa ser usada, dependendo da aplicação desejada.

Além do uso industrial e comercial, há uma comunidade em rápido crescimento de pessoas que usam a prototipagem rápida para produzir coisas em pequenas quantidades em casa e para pesquisa, usando redes *peer-to-peer* para trocar informações sobre seus protótipos e designs. Por suas funcionalidades e possibilidades, a tecnologia 3D tem o potencial de revolucionar a forma como projetamos e produzimos objetos, e já foi usada para criar de tudo, desde membros protéticos até edifícios inteiros.

É neste contexto que se explorou as possibilidades da Impressão 3D no domínio do patrimônio cultural. A prototipagem rápida promete uma experiência mais aprimorada de modelos 3D, mesmo que a maioria das impressoras 3D ainda só possa imprimir com um

³ Também conhecida como Fabricação Aditiva, Impressão 3D ou Prototipagem Rápida.

esquema de cores limitado e tenha pouca versatilidade em materiais. No entanto, deve ser uma mera questão de tempo até que impressoras 3D coloridas mais poderosas entrem nos domínios da produção artística e do patrimônio cultural, e não parece fora de alcance que elas sejam capazes de representar características como textura ou atributos mecânicos dos objetos.

Na última década, museus e outras instituições culturais em todo o mundo passaram a indagar e testar como a impressão 3D poderia ser aplicada para auxiliar na preservação e divulgação de seus acervos. Dada a sua fragilidade e importância histórica, os objetos do acervo geralmente não podem ser tocados e são normalmente expostos às pessoas atrás de vitrines fechadas, mas alguns projetos têm focado na fabricação digital para mudar esta relação do público com os objetos, pois acreditam que ser capaz de tocar, explorar a forma e sentir o peso por meio de uma réplica de um artefato tem o potencial de transformar as experiências do público com o patrimônio cultural.

Um exemplo é a réplica da tumba de Tutancâmon no Vale dos Reis no Egito, feita pela empresa Factum Arte. A réplica – ou fac-símile, como a empresa chama – permite que os turistas visualizem, por meio de uma representação, como é o interior da tumba do rei sem danificar o local original do sepultamento. Um outro caso é do Museu Americano de História Natural, que pediu aos alunos que digitalizassem, imprimissem e montassem ossos de dinossauros e identificassem espécies como os paleontólogos fazem. Já o MediaLab do Metropolitan Museum of Art em Nova York criou réplicas comestíveis de artefatos de museus a partir de ingredientes como chocolate, queijo e arroz para os visitantes saborearem (SAMAROU DI; RODRIGUEZ ECHAVARRIA, 2019).

Esses exemplos demonstram a amplitude das aplicações de impressão 3D por instituições que cuidam do patrimônio cultural. Algumas implantações podem parecer incomuns enquanto outras podem desencadear discussões sobre a originalidade da obra de arte em comparação com reproduções “falsas” ou sobre o direito de capturar e distribuir amplamente modelos 3D imprimíveis de artefatos de museus *online*.

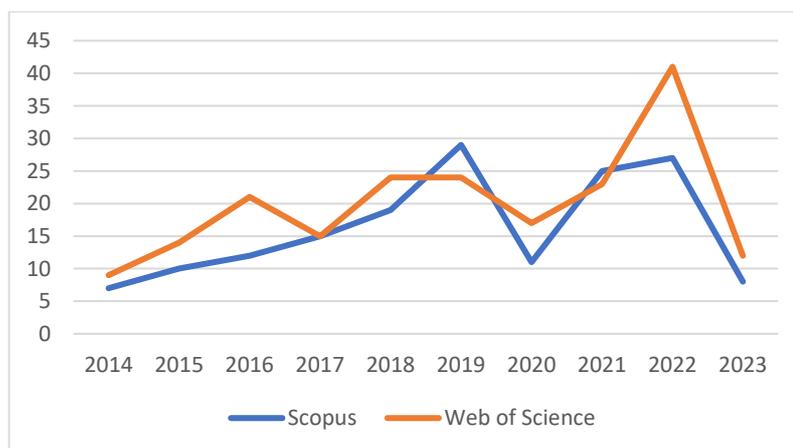
A novidade das réplicas fabricadas digitalmente é que elas podem ser extremamente precisas em relação ao formato do original – o processo de reprodução utiliza, entre outros meios, *scanners* a laser de alta tecnologia. O poder das réplicas fabricadas digitalmente também reside em sua natureza digital. Isso significa que elas podem ser facilmente armazenadas, editadas e compartilhadas em todo o mundo. Pessoas interessadas em patrimônio cultural

podem acessar essas réplicas digitais, por exemplo, de sites de museus, e imprimir-las em casa ou em um Fablab⁴ próximo em uma impressora 3D de mesa.

Um exemplo de repositório que disponibiliza conteúdo relevante para o campo do patrimônio é o disponibilizado pelo Smithsonian Institution⁵, que abrange uma variedade de imagens digitalizadas em diferentes áreas. Há também a plataforma Scan The World⁶, uma iniciativa que visa compartilhar modelos digitais de esculturas e artefatos culturais para impressão em 3D, a fim de torná-los mais acessíveis. O sítio eletrônico da plataforma Sketchfab⁷ também disponibiliza uma seção com centenas de modelos 3D voltados para o patrimônio cultural.

Para verificar o impacto deste tema na literatura científica, foi realizado um levantamento nas bases de dados Web of Science e Scopus utilizando os termos “3D printing” e “cultural heritage” como palavras-chave, onde foi possível perceber a crescente aplicação desta tecnologia. De um total respectivo de 217 e 172 publicações identificadas, o Gráfico 1 corresponde ao número de publicações obtidas por ano sobre o tema em diferentes idiomas, o que demonstra o interesse pelo tema na última década⁸.

Gráfico 1 – Quantidade de publicações por ano sobre o tema de Impressão 3D relacionado com o Patrimônio Cultural.



Fonte: Elaborado pela autora.

⁴ Fablab é um laboratório de experimentação e alta tecnologia ligado ao movimento cultura maker e que fomenta a criatividade, colaboração e inovação para makers, empresas e instituições de ensino (CASA FIRJAN, [s.d.]).

⁵ Disponível em: <https://3d.si.edu/>

⁶ Disponível em: <https://www.myminifactory.com/scantheworld/full-collection>

⁷ Disponível em: <https://sketchfab.com/categories/cultural-heritage-history>

⁸ Relacionamos a queda de publicações no ano de 2020 à pandemia causada pela COVID-19 e o isolamento social imposto por essa crise sanitária.

No entanto, no panorama lusófono estes números são menos expressivos. Embora seja promissora, a impressão 3D ainda é uma tecnologia pouca difundida nas áreas que tratam do patrimônio cultural no Brasil. Em grande medida isto se deve por uma certa complexidade no manuseio e no desenvolvimento das peças, que requerem conhecimentos específicos e tempo de estudo e prática para o aperfeiçoamento da utilização da ferramenta. Tal fato pode acarretar perda gradativa de interesse, uma vez que tal tecnologia possa ser um pouco complicada no início. Além disso, não há padrões e parâmetros pré-definidos, o que leva a diferentes abordagens baseadas em intuições e experiências, tornando o processo mais demorado pela necessidade de refazer as etapas de testes com diferentes configurações de fatiamento para obter o resultado desejado.

Desse modo, este trabalho descreveu o processo de desenvolvimento de um invólucro próprio e customizado para acondicionar uma bússola de marinha que integra a coleção do Museu de Astronomia e Ciências Afins, de modo a possibilitar não apenas a guarda na reserva técnica do instrumento científico em questão, mas o seu transporte seguro em casos de transporte interno ou externo, bem como permitir recuperar a funcionalidade do objeto pela recriação de um suporte que permita o movimento da bússola.

O trabalho divide-se em duas partes: a primeira dedicada ao entendimento da noção de patrimônio e sua preservação e o papel do acondicionamento adequado neste processo, partindo primeiro do entendimento do que é o patrimônio cultural e da complexidade e discussões que norteiam o tema, para demonstrar a relevância da preservação. Num segundo tópico foi elaborada uma breve descrição do artefato com a finalidade de identificar os detalhes de seu *design* e sua funcionalidade para melhor explorar e desenvolver uma proposta de acondicionamento apropriada.

Já a segunda parte se dedicou a apresentar os usos das tecnologias 3D em museus e compreender e contextualizar as tecnologias de manufatura aditiva propriamente, identificando a influência dos parâmetros de impressão 3D, bem como dos materiais disponíveis, nas características físicas e estruturais de peças impressas. Esse levantamento e análise foi essencial para determinar os parâmetros para impressão do protótipo apresentado em forma digital como resultado deste trabalho.

2. PATRIMÔNIO CULTURAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Definir a noção de patrimônio é uma tarefa complexa, visto a polissemia do conceito, uma vez que pode lhe ser atribuído uma multiplicidade de sentidos. Evocado por diversas áreas do conhecimento e em constante construção, o caráter multifacetado do patrimônio deve ser compreendido com base nas diferentes interpretações dessa categoria à luz das relações que estabelece no tempo e no espaço. É uma construção social, como afirma Arantes (2006) em seu artigo sobre a dimensão do patrimônio cultural e seus usos e, portanto, deve ser considerado no contexto que o forma, a partir das práticas sociais que o geram e lhe conferem sentido. Nessa mesma linha, Poulot (2009) reflete como o conceito cujo significado se reveste de diferentes atributos varia conforme quem o emprega, a finalidade com que o emprega e o tempo histórico a que se refere.

Dentre os diversos entendimentos da noção de patrimônio, consideramos que o patrimônio não é uma entidade objetiva e fixa, mas sim resultado de processos históricos, políticos, econômicos e culturais e que, por isso, está em constante transformação e negociação, sendo importante considerar sua natureza dinâmica. Fazemos uso então das ideias de Márcia Chuva (2009; 2012), historiadora e especialista em estudos críticos do patrimônio. A autora explora o entendimento da noção de patrimônio visando compreender as múltiplas perspectivas, reconhecer os fluxos culturais, promover a participação e diálogo entre os atores envolvidos e valorizar a diversidade cultural são elementos centrais em sua abordagem. Nesse sentido, mais do que um conceito, Marcia Chuva define o patrimônio como resultados de políticas, sempre inserido num emaranhado de disputas entre os atores que definem o que deve ser ou não considerado como patrimônio de uma nação e mesmo de um grupo específico.

Historicamente constituída, a ideia de patrimônio se transforma no tempo e suas diferentes apropriações e interpretações estão atreladas aos processos de construção e afirmação de identidades e de representações simbólicas, conforme afirma Regina Abreu (2007), antropóloga e pesquisadora que se dedica aos estudos acerca do patrimônio brasileiro. A autora demonstra como seus diferentes significados se justapõem entre lembranças e esquecimento, tornando a noção de patrimônio sempre dinâmica.

A docente e pesquisadora na área de patrimônio e memória, Maria Letícia Mazzucchi Ferreira (2006), comenta que, ao ser abordado como categoria de pensamento, o patrimônio

pode ser compreendido como esse esforço constante de resguardar o passado no futuro; e para que exista patrimônio é necessário que ele seja reconhecido, eleito, que lhe seja conferido valor, o que se dá no âmbito das relações sociais

e simbólicas que são tecidas ao redor do objeto ou do evento em si (FERREIRA, 2006, p. 79).

A própria origem da palavra – do latim *Patrimonium* – remete a ideia de posse, de bens legados pelos nossos antepassados (ARAUJO, 2019). Quando se fala em patrimônio, em geral, o sentido evocado é o de memória e herança, de algo que se constrói e se acumula com o passar do tempo, de permanência de um passado que deve ser lembrado.

Sua definição esteve por muito tempo ligada a estruturas familiares e jurídicas, à herança familiar. Com o passar dos anos a definição de patrimônio foi se ampliando e seu conceito foi abarcando tudo aquilo que gera pertencimento ou herança em geral. A noção de patrimônio começou a adquirir o sentido de propriedade coletiva e definidor da identidade de um grupo social, sobretudo no contexto de construção dos estados nacionais na Europa ao longo do século XIX (CHUVA, 2012; D’ALESSIO, 2012; TUGORES TRUYOL).

Durante a Revolução Francesa foram dados os primeiros passos para a construção de uma concepção coletiva de patrimônio, com a nacionalização das coleções privadas da nobreza e do clero. Nesse contexto, o surgimento dos Estados Nacionais no Ocidente ao longo do século XIX provocou alterações importantes no conceito e na dimensão de política de Estado voltadas para a identificação e valorização do patrimônio de uma coletividade nacional. Foi a partir deste nacionalismo que se começou a entender os monumentos como bens de todos, heranças dos povos, ainda que eleitos como tal por um grupo específico. O Estado se organizou de modo a formar uma estrutura administrativa com mecanismos de aquisição, conservação e transmissão de obras por meio da criação de atos jurídicos que visavam à proteção dos bens (FUNARI; PELEGRINI, 2009).

Aos poucos a concepção de patrimônio cultural foi adquirindo novas dimensões e conotações. Ainda segundo Abreu (2009), com o final da Segunda Guerra Mundial e a criação da Unesco, o desenvolvimento do conceito antropológico de cultura tomou forma, refletindo no campo do patrimônio a ideia da diversidade cultural, incluindo as realizações materiais e imateriais da vida em sociedade, passando-se a adotar o termo patrimônio cultural.

Lopis aponta, que atualmente,

os discursos sobre patrimônio enfatizam seu caráter de construção ou invenção, derivado das concepções antropológicas de cultura, que passa a ser tomada como sistema simbólico, como estruturas de significado pelas quais os homens orientam suas ações. Vale notar que, em vez da ideia de autenticidade – originalidade e permanência – que guiava o campo da preservação, agora são tomadas como parâmetro as noções de referência cultural e de continuidade histórica (LOPIS, 2017, p. 15).

A abrangência conceitual do patrimônio cultural engloba aspectos de fundamental importância para as noções de memória, de identidade, de riqueza e de criatividade de uma nação. Faz parte, assim, da construção histórica e cultural de grupos sociais, e diz respeito aos conjuntos de bens materiais ou imateriais considerados de interesse e de relevância devido aos valores atribuídos em determinadas circunstâncias e, frequentemente, articulados às políticas públicas voltadas para a construção de identidades.

Chuva (2009; 2012) ressalta que existe uma relação intrínseca entre patrimônio e identidade, argumenta ainda que o patrimônio cultural desempenha um papel crucial na construção e afirmação das identidades individuais e coletivas. Ao reconhecer e valorizar as diferentes expressões culturais presentes em uma sociedade, a identificação do patrimônio, em alguns casos, contribui para o fortalecimento da diversidade cultural e para a promoção da inclusão.

Um dos pontos enfatizados pela autora é justamente a necessidade de considerar as múltiplas perspectivas e narrativas presentes na definição do patrimônio. Ela destaca a importância de incluir diferentes vozes e pontos de vista, evitando visões unilaterais e estáticas e reconhecendo a diversidade de significados atribuídos a ele por diferentes grupos e comunidades. A autora também destaca a importância da participação e do diálogo entre diferentes atores e grupos na gestão e preservação do patrimônio. Ela reconhece que o patrimônio envolve não apenas especialistas e instituições governamentais, mas também as comunidades locais e organizações não governamentais. A colaboração e o engajamento ativo desses atores são fundamentais para garantir uma gestão participativa e inclusiva do patrimônio.

Essa perspectiva atual do patrimônio cultural considera-o como o resultado da construção coletiva de uma sociedade. Nessa visão, o patrimônio cultural é mais do que apenas um legado do passado, é uma expressão material da identidade e história de um grupo social. Ao atribuir significado e valor aos bens culturais, a sociedade constitui laços de pertencimento e perpetuação, criando uma conexão entre o presente e o futuro. O patrimônio cultural deixa de ser apenas uma herança do passado a ser preservada, e passa a ser encarado como uma construção dinâmica.

Essa abordagem prospectiva do patrimônio cultural reconhece a importância de preservar e transmitir valores culturais, ao mesmo tempo em que incentiva a inovação, a adaptação e a renovação de seus significados. O patrimônio cultural, nessa perspectiva, pode ser uma força motriz para o desenvolvimento e o enriquecimento da sociedade, permitindo que as identidades culturais evoluam e sejam compartilhadas de forma contínua, não devem ser, portanto, portadores de uma tradição estática.

Isso destaca a importância de compreendermos o patrimônio cultural não apenas como uma coleção de objetos isolados, mas como um conjunto de elementos que estão intrinsecamente ligados à cultura e às tradições de uma sociedade. Cada objeto, monumento ou manifestação cultural possui significados e simbolismos específicos que podem ser compreendidos de forma mais completa quando considerados em relação à sua origem e ao contexto cultural no qual foram criados.

Para Vogt (2008), o conceito de patrimônio cultural permitiu ampliar o espectro de ação política nas últimas décadas, pois não foram só os bens tangíveis ou materiais que tiveram seu valor realçado, mas também se acrescentou uma nova qualificação de patrimônio, o imaterial ou intangível. O patrimônio material pode ser entendido como o conjunto de bens culturais móveis e imóveis cuja conservação seja de interesse coletivo. Já o patrimônio imaterial pode ser entendido como as práticas, representações, expressões, conhecimentos e técnicas que as comunidades e os indivíduos reconhecem como representativo de sua identidade. Sua construção, dessa forma, baseia-se o propósito de articular e expressar a identidade e a memória de grupos, da sociedade ou da nação.

O conceito de Patrimônio está, portanto, atrelado à perspectiva de valor cultural, aos valores e interações a ele conferidos. Expressa relações com os indivíduos, estabelecidos no tempo e no espaço, e que se transformam e variam conforme condições temporais e sociais; é imbuído de significação e suas diversas apropriações colaboram com a construção de identidades. Conforme afirmado por Poulot (2009, p. 12), "a história do patrimônio é, em grande parte, a história de como uma sociedade constrói seu próprio patrimônio". Isso significa que a seleção, a preservação e a valorização dos elementos considerados patrimônio são reflexo das escolhas e das concepções de uma sociedade em relação à sua cultura e história.

Diversos objetos ou artefatos podem ser considerados como bens patrimoniais, e todos possuem um tempo finito de existência. O que os caracteriza como tal é a atribuição de valores que nele se inserem. Tema central na discussão do patrimônio, a valoração é uma atividade complexa, coletiva e mutável. É um ato ao mesmo tempo objetivo e subjetivo e pode abarcar diferentes entendimentos que coexistem, visto que depende do sujeito, da sua emissão de juízo. O processo de atribuição de valor se inicia quando indivíduos, instituições ou comunidades decidem, segundo sua percepção, o que representa algo sobre eles ou sobre suas memórias e história e que seja merecedor de ser conservado e lembrado. A delimitação do que constitui o patrimônio cultural é, então, fruto de uma escolha, segundo os significados atribuídos pelas pessoas a objetos, lugares ou práticas culturais, tornando-os representativo da sua identidade, da sua história, da sua cultura.

O patrimônio pode ser – e é – por entanto, valorizado de diferentes formas, segundo diferentes motivações, as quais vão corresponder a diversos ideais e percepções. Os principais componentes do valor cultural são os valores cognitivos, formais, afetivos, pragmáticos e éticos, que não existem isoladamente, mas sim coexistem, se combinando e se superpondo, e se alterando e multiplicando ao longo do tempo, no contexto de construção das identidades dos grupos sociais. Um mesmo objeto cultural pode ter diversos valores atribuídos a ele, mesmo que esses valores sejam contraditórios entre si. Por exemplo, uma obra de arte pode ser valorizada tanto por seu aspecto estético e econômico como por seu valor histórico.

O campo do patrimônio deixa a rigidez de se pautar em valores predeterminados para existir a partir das interpretações e experiências dos indivíduos. A patrimonialidade passa a vir dos sujeitos e da interação destes com os objetos, e não mais do objeto per se. Os critérios que passam a identificá-lo se estabelecem sobre fontes de informação variadas que não tratam mais apenas da forma e matéria, mas também de seu uso, função, contexto e tradição (MENESES, 2012; VIÑAS, 2015).

A discussão dos valores atribuídos ao patrimônio cultural formalizou-se com a Carta de Burra, em 1980, que a introduziu em nível de legislação ao postular a significação cultural, o que proporcionou a construção de metodologias de trabalho baseadas na atribuição de valor, tendo na conservação o campo com maior avanço, devido a implicação dos valores nas tomadas de decisões nas atividades de preservação.

O desenvolvimento da noção de patrimônio cultural possibilitou que, cada vez mais, diferentes tipologias de objetos passassem a ser legitimadas como bens patrimoniais. No Brasil, têm-se como referência primeira acerca do conceito de patrimônio cultural a Constituição Federal de 1988, que abarca as dimensões material e imaterial do patrimônio, sendo esta um importante avanço, pois passa a entender patrimônio como referente às identidades coletivas, sendo o Estado responsável por sua salvaguarda. No artigo 216, Seção II, traz sua definição como:

(...) os bens de natureza material e imaterial, tomados individualmente ou em conjunto, portadores de referência à identidade, à ação, à memória dos diferentes grupos formadores da sociedade brasileira, nos quais se incluem: I. as formas de expressão; II. modos de criar, fazer e viver; III. **criações científicas, artísticas e tecnológicas**; IV. as obras, objetos, documentos, edificações e demais espaços destinados às manifestações artístico-culturais; V. os conjuntos urbanos e sítios de valor histórico, paisagístico, artístico, arqueológico, paleontológico, ecológico e científico (BRASIL, 1988, grifo nosso).

Nessa concepção se insere o Patrimônio de Ciência e Tecnologia (PC&T), constituído por bens produzidos e/ou utilizados nas atividades de pesquisa científica e de desenvolvimento

tecnológico. Ao tratarmos de ciência e tecnologia, é possível observar diversos materiais produzidos em distintos espaços, como laboratórios, universidades e centros de pesquisa. Entre uma diversidade de objetos que foram criados e ou utilizados para produzir ciência e desenvolver tecnologias, destacamos os instrumentos científicos.

Nos últimos anos, diferentes perspectivas em relação aos objetos científicos vêm sendo discutidas. Paolo Brenni, por exemplo, aborda como os objetos foram afetados com a introdução de novas técnicas e de novos materiais na sua produção; Lorraine Daston e Peter Galison, focados na História das Ciências, tratam da criação de novos objetos nas atividades de pesquisa científica, sua relação com a tecnologia, evidenciando sua história e inter-relação com imagens e textos; e Samuel Alberti propõe a construção da história de museus de ciências baseada na trajetória das coleções e da vida social dos objetos, articulando os estudos em História da Ciência e da Tecnologia com os estudos oriundos da museologia.

Parte integrante da infraestrutura científica, esses objetos tendem a ser valorizados por seus usos nos processos de construção do conhecimento, sendo fontes relevantes para pesquisa, ensino e extensão. Como afirmam Araujo e Granato (2017, p. 239), “os estudos realizados a partir de objetos da ciência e tecnologia podem incluir muitas informações ligadas ao cotidiano da prática científica, que podem nos auxiliar a entender os processos que lhe são inerentes”. Ou seja, o PC&T nos permite entender e apreciar a evolução, com avanços e recuos, do processo de desenvolvimento científico e tecnológico ao longo do tempo, proporcionando maior entendimento sobre as abordagens e métodos utilizados em diferentes épocas, o que é essencial para o desenvolvimento contínuo da ciência e da tecnologia.

Piccinini (2015) comenta em sua pesquisa sobre as redes de colaboração de pesquisadores na transmissão e preservação de valores e práticas científicas e tecnológicas, que a ideia de patrimônio de C&T foi impactado pelo processo de renovação conceitual que o patrimônio cultural experimentou ao longo do século XX. Segundo a autora,

seus sentidos dependem dos usos da linguagem científica, das relações entre pares e do conhecimento técnico e tecnológico, demonstrando o quanto esse conceito [Patrimônio de C&T] foi abrangido para além da antiga noção de “instrumentos científicos”. Tal conceito social relacionado ao patrimônio faz-se presente, em vista de uma memória e de uma história de grupos e sociedades científicas, as quais criam laços de pertencimento e de distinção, pois retomam valores do passado e, ao mesmo tempo, focam-se num presente atravessado pela modernidade, pela globalização e pela aceleração das inovações tecnológicas (PICCININI, 2015, p. 20).

No entanto, definir claramente tudo o que constitui a memória de C&T ainda é um desafio, visto sua grande variedade tipológica, pois abrange uma variedade de objetos, artefatos,

documentos, espaços e práticas relacionados à ciência, à tecnologia e à inovação. Como coloca Araújo (2019), toda produção de conhecimento científico e tecnológico pode se transformar em um patrimônio cultural, desde que os indivíduos inseridos naquela comunidade o reconheçam como tal e atribuam a isso significação.

Para Santos, Brasil e Granato, constitui-se como patrimônio nacional de C&T

“todo o conhecimento científico e tecnológico produzido pelo homem, bem como, [...] todos aqueles objetos (inclusive documentos em suporte papel), coleções arqueológicas, etnográficas e espécimes das coleções biológicas que são testemunhos dos processos científicos e do desenvolvimento tecnológico. Também se incluem nesse grande conjunto as construções arquitetônicas produzidas com a funcionalidade de atender às necessidades desses processos e desenvolvimentos” (SANTOS; BRASIL; GRANATO, 2008, p.7).

Dessa forma, o patrimônio cultural de ciência e tecnologia compreende não apenas o conhecimento das ideias e teorias científicas, mas também objetos materiais, como documentos e coleções formadas em contextos da produção de conhecimento, além de edificações cujas características que desempenharam um papel significativo na história do avanço científico e tecnológico. Pode ser entendido, portanto, como o conjunto de objetos e práticas de diversas tipologias relacionadas a circunstâncias específicas de construção de conhecimento produzido pelos homens, a que se atribuem valores. Granato e Miranda (2011) vão mais além ao afirmar que o patrimônio científico é constituído por objetos que são vestígios dos processos científicos e do desenvolvimento tecnológico que não são mais utilizados no contexto de práticas científicas.

A Carta do Rio de Janeiro sobre o Patrimônio Cultural da Ciência e Tecnologia (PCC&T), importante documento que busca contribuir para a preservação no Brasil e garante maior visibilidade a esta categoria de patrimônio, expressa que “estes bens [científicos e tecnológicos], em sua historicidade, podem se transformar e, de forma seletiva lhe são atribuídos valores, significados e sentidos, possibilitando sua emergência como bens de valor cultural” (ARAÚJO; GRANATO. 2017 apud CARTA DO RIO DE JANEIRO, 2017, p. 3).

Define ainda o PPC&T como

“o legado tangível e intangível relacionado ao conhecimento científico e tecnológico produzido pela humanidade, em todas as áreas do conhecimento, que faz referência às dinâmicas científicas, de desenvolvimento tecnológico e de ensino, e à memória e ação dos indivíduos em espaços de produção de conhecimento científico” (CARTA DO RIO DE JANEIRO, 2017, p. 03).

Outra questão importante que a Carta aborda é sobre as zonas de contato que esse patrimônio apresenta com outros tipos de recortes patrimoniais, o que demonstra “a amplitude da cultura científica na sociedade contemporânea”. O Patrimônio científico engloba, assim,

objetos de significação cultural da ciência e da tecnologia de todas as áreas do conhecimento, bem como as dinâmicas e práticas, relacionados aos processos de construção e produção do conhecimento científico e tecnológico num dado contexto social e representa um extrato da comunidade científica contemporânea. Desempenham um papel fundamental na compreensão das vicissitudes da produção de conhecimento, pois nos permite traçar processos que levam as novidades científicas, das invenções e das realizações tecnológicas que moldaram o mundo em que vivemos. Essa herança inclui desde inúmeros artefatos, entre eles instrumentos científicos antigos até dispositivos eletrônicos modernos, de manuscritos a arquivos digitais, de espaços de pesquisa e experimentação a laboratórios e fábricas, de desenhos a mão a um conjunto de imagens produzidas por técnicas analógicas e digitais.

Além disso, ações educativas podem ter papel estratégico. O PC&T oferece oportunidades de aprendizado prático, permitindo que as pessoas explorem e experimentem os princípios científicos e tecnológicos de forma tangível. Museus e centros de ciência dedicados a esse patrimônio desempenham um papel importante na disseminação do conhecimento científico para o público em geral, promovendo a alfabetização científica e inspirando jovens a seguir carreiras em ciência e tecnologia.

No entanto, preservar o patrimônio de ciência e tecnologia apresenta desafios específicos, pois tem uma dimensão e distribuição desconhecidas e possui pouca visibilidade na sociedade, sendo em diversos momentos negligenciado nas ações de preservação do patrimônio cultural. Conforme afirmado por Bertoni e Bertoni (2021), isso fica evidente na história da UNESCO, dos Estados Agência das Nações Unidas que, apesar de preocupar com a preservação do patrimônio mundial da humanidade, praticamente não direciona esforços para a preservação do patrimônio de C&T, o que fica claro no número limitado de itens classificados pela UNESCO como Patrimônio Mundial, já que em uma lista de quase 1.000 itens, apenas três se qualificam como patrimônio científico.

Para além da complexidade de sua definição e escopo, a preservação sustentável do patrimônio científico também apresenta desafios que perpassam desde questões institucionais a questões relacionadas com a sua pesquisa e estudo, conservação e divulgação. Envolve um amplo espectro de agentes, desde museus a universidades, escolas secundárias, hospitais acadêmicos, historiadores da ciência, arquivistas, entre muitos outros. Marta Lourenço (2013), especialista em museologia e história da tecnologia, atribui que a vulnerabilidade desses bens advém, principalmente, da falta de orientação e financiamento, o que resulta em poucas iniciativas na preservação da herança da ciência.

Em um trabalho realizado por Granato, Maia e Santos (2014) a respeito da valorização do patrimônio científico e tecnológico brasileiro, identificou-se, através de um levantamento nacional, que a maior parte dos objetos de C&T anteriores ao século XX já se perdeu, e que existem muitos objetos contemporâneos que se encontram abandonados em instituições científicas, pois perderam o valor de uso no contexto da produção de conhecimento. Os resultados alcançados por este trabalho ressaltaram a importância da identificação, valorização e preservação do patrimônio cultural de ciência e tecnologia ao demonstrar a atual situação de objetos que perderam o seu valor de uso na construção do conhecimento.

À exceção das coleções que se encontram nos museus, grande parte do patrimônio da ciência encontra-se disperso em instituições “que não possuem nem vocação, nem missão, nem orçamento, nem pessoal qualificado, nem, muitas vezes, sensibilidade para a sua preservação e divulgação (LOURENÇO, 2009, p. 47).

Para isso, é preciso um movimento de aproximação de ambos os lados. Por um lado, uma sensibilização crescente dos historiadores para a existência e potencial das coleções para a investigação, acompanhada de formação ao nível da cultura material. Por outro lado, uma crescente sensibilização dos próprios museus para a importância das suas coleções como fontes permitindo a sua melhor documentação. [...] Os benefícios são mútuos. Os historiadores têm nas coleções e no patrimônio um nicho com enorme potencial de crescimento. A história da ciência, em geral, ganha novos insights, porventura até agora insuspeitados. Os museus ficam com as coleções valorizadas e, não o esqueçamos, com oportunidades de interpretar e expor ao público as histórias que os objetos contam (LOURENÇO, 2009, p. 51).

A conscientização sobre o patrimônio de ciência e tecnologia é fundamental para salvaguardar esses objetos que estão em situação vulnerável e abandono, sujeitos a danos irreversíveis ou até mesmo perda completa. É importante ressaltar o valor desses objetos como evidências tangíveis de descobertas e avanços científicos e seu potencial educacional para o público em geral. Nesse sentido, diversos atores desempenham um papel crucial, como instituições governamentais, acadêmicas e de pesquisa, museus, centros de ciência, comunidades locais e profissionais especializados. Eles são responsáveis por garantir a preservação, divulgação e acesso a esse patrimônio, possibilitando seu apreço e compreensão pela sociedade.

Além disso, a conscientização deve enfatizar a necessidade de preservação e sustentabilidade do patrimônio, buscando abordagens que minimizem o impacto ambiental e garantam sua longevidade. Também é fundamental envolver as comunidades locais, que possuem conhecimentos e vínculos afetivos com o patrimônio, e colaborar com profissionais e

especialistas para fortalecer a pesquisa, documentação e interpretação desses artefatos. Somente através do reconhecimento coletivo de sua importância e do compromisso em protegê-lo, poderemos garantir sua efetiva salvaguarda.

Em resumo, a preservação desses objetos permite a construção da memória histórica, a promoção do conhecimento e da pesquisa, a inspiração e o aprendizado, o impulso para o desenvolvimento futuro e a valorização da diversidade cultural. Todos esses aspectos são fundamentais para a compreensão e o avanço contínuo da ciência e da tecnologia.

2.1 PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO CULTURAL

Quando transformados em patrimônio, os bens tornam-se objetos que passam a ser submetidos às práticas de preservação. Entendemos a preservação como um conjunto de ações que envolvem a conservação, restauro (em alguns casos) e sua difusão. Os artefatos patrimoniados passam a pertencer a uma coletividade (grupo ou comunidade nacional) e o acesso a esses bens devem ser amplos, deixando de pertencer a um indivíduo e passando a pertencer a toda uma sociedade. A preservação do patrimônio cultural envolve, assim, princípios como conservação preventiva, restauração e conservação, documentação e pesquisa, educação e sensibilização, cooperação e parcerias, e acesso e difusão. Essas práticas visam prevenir danos, conservar os bens culturais, documentar sua história, envolver a comunidade, colaborar com diferentes atores, e garantir o acesso e a fruição do patrimônio cultural pela sociedade. (VIÑAS, 2015)

Dessa forma, é essencial adotar medidas de proteção, conservação e difusão para garantir a salvaguarda desses objetos. Para efetivamente preservar o patrimônio cultural, é essencial uma abordagem abrangente e colaborativa para enfrentar os desafios significativos, como a degradação natural, o desgaste causado pelo uso, a falta de recursos adequados e a falta de conscientização sobre sua importância.

A ciência da conservação tem se desenvolvido bastante nos últimos anos, utilizando-se de mais ferramentas e com mais pesquisas voltadas ao propósito da salvaguarda do patrimônio. A área tem se preocupado cada vez mais com as formas que o patrimônio cultural é preservado, utilizado e disponibilizado. Como objeto de estudo no campo da preservação, deve-se tratá-lo como um documento, e, sempre que possível, deve-se buscar determinar como o objeto foi produzido, se foi modificado ao longo do tempo, e os diferentes usos, desde sua produção até sua trajetória dentro de uma instituição de guarda. Ou seja, muitas vezes o objeto sofre

alterações em relação a sua condição original. Ou seja, conhecer os aspectos materiais do objeto, do que foi feito, suas funções e possíveis marcas de uso, é importante para compreender seu contexto de origem e produção, identificando suas funções e valores que podem alterar ao longo do tempo (CHIARI, LEONA, 2005).

De Guichen (2013) apresenta uma crítica interessante em relação à perspectiva de pensar na preservação do patrimônio para seu uso futuro. O autor afirma que há uma preocupação em preservar o patrimônio exclusivamente em sua transmissão física para as gerações futuras, desconsiderando as gerações presentes que devem fazer uso deste patrimônio. O público é não apenas beneficiário e passivo, mas também tem um papel importante na salvaguarda do patrimônio. Se a comunidade não valoriza o bem, se não lhe atribui significados, não há interação, então não há propósito, visto que são as relações, os sentidos e os valores que atribuímos que possibilitam que determinados bens sejam entendidos como patrimônio. Contudo, algumas ações voltadas para conservar os objetos propriamente ditos é o que nos interessa aqui.

Contudo, algumas ações voltadas para conservar os objetos propriamente ditos é o que nos interessa aqui. A conservação preventiva surgiu como uma política moderna com Salvador Víñas, que propõe uma teoria contemporânea da conservação onde o interesse primário está nos sujeitos e não mais nos objetos, sendo a conservação feita em função dos significados do objeto. Com a mudança de paradigma na conservação, passou-se de uma abordagem reativa, focada em reparos e tratamentos após a ocorrência de danos, para uma abordagem proativa, que visa evitar danos antes que ocorram.

A política de conservação preventiva baseia-se em princípios científicos e conhecimentos especializados para identificar e mitigar os fatores que causam danos aos objetos. Isso inclui fatores ambientais, como luz, umidade, temperatura e poluentes, bem como fatores de manuseio, armazenamento e exposição inadequados. Além disso, envolve a implementação de medidas práticas e estratégias para minimizar ou eliminar esses fatores de risco. Isso pode incluir o controle de condições ambientais em galerias e depósitos de museus, o uso de materiais de embalagem adequados, a criação de diretrizes de manuseio seguro, a implementação de programas de treinamento e conscientização para funcionários e visitantes, entre outras ações. Essa abordagem busca estabelecer um ambiente seguro e estável para os objetos culturais, reduzindo a exposição a condições prejudiciais e prevenindo danos a longo prazo. Além disso, a conservação preventiva também é uma abordagem mais econômica, pois evita a necessidade de tratamentos e restaurações dispendiosas.

O gerenciamento de riscos se insere no atual contexto como metodologia complementar à conservação preventiva. É uma ferramenta de gestão que define prioridades e potencializa o processo de tomada de decisões dirigidas à conservação dos bens patrimoniais com base em conhecimentos técnico-científicos de distintas áreas e estimativas científica e estatisticamente fundamentadas da probabilidade de ocorrência, da natureza e da magnitude de impactos possíveis sobre os bens patrimoniais. Realizada de modo cíclico e contínuo, estabelece o uso efetivo e racional dos recursos disponíveis com base no conhecimento prévio e análise dos riscos potenciais (HOLLÓS; PEDERSOLI JUNIOR, 2009).

O risco é entendido como um evento incerto em que se combina desde a frequência de ocorrência de um determinado dano e a gravidade deste. Sua ocorrência pode causar diversos níveis de efeitos negativos e não estão apenas ligados a fatores físicos, geográficos e climáticos, mas também a fatores socioculturais, políticos e econômicos, como, por exemplo, as políticas públicas voltadas para a conservação. Para instituições de guarda, isso significa que seus acervos estão vulneráveis a eventos de magnitudes diversas que podem lhes causar danos ou perdas irreparáveis, e, muitas vezes, há necessidade de grandes investimentos, os custos são altos.

Assim, conhecer suas vulnerabilidades e os riscos a que seu acervo está sujeito permite que as instituições sejam capazes de gerenciar o patrimônio sobre sua custódia a curto, médio e longo prazo, planejando medidas de prevenção, além da aplicação de medidas de controle e resposta a serem tomadas durante e após situações de desastre de forma a minimizar os efeitos negativos sobre o acervo. Identificar os riscos com antecedência favorece o desenvolvimento de ações, possibilita uma melhor alocação de recursos além de permitir o estabelecimento de prioridades em emergências (INSTITUTO BRASILEIRO DE MUSEUS, 2017).

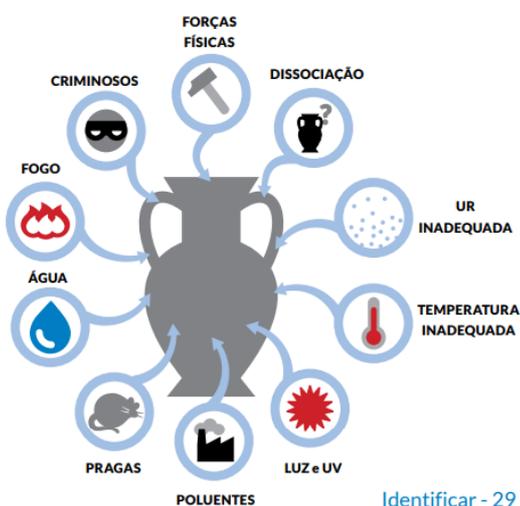
De acordo com Hollós e Pedersoli Junior (2009), é preciso realizar um estudo que defina critérios e políticas de modo que, através de uma alocação de recursos – financeiros, humanos, tecnológicos – adequados, sejam selecionadas e implementadas técnicas de preservação pertinentes. São diversas as estratégias existentes, não havendo uma estratégica única que seja aplicável e capaz de solucionar todas as questões da preservação; diferentes metodologias podem ser válidas e aplicáveis. Assim, as diferentes técnicas devem ser exploradas para que, de acordo com suas particularidades e aplicabilidade, possam ser selecionadas adequadamente de forma a potencializar a longevidade dos artefatos.

O gerenciamento de riscos constitui-se de cinco etapas sequenciais, a saber: estabelecer o contexto em que os riscos serão gerenciados; identificar os riscos de forma sistemática e abrangente; analisar os riscos para quantificar sua magnitude; avaliar os riscos para decidir

quais deles serão tratados e com que prioridade; e tratar os riscos identificados como prioridade para reduzi-los a níveis aceitáveis (HOLLÓS; PEDERSOLI JUNIOR, 2009).

Os riscos existentes podem ser estruturados sistematicamente considerando-se a ação de dez agentes de deterioração (Figura 1), em seis diferentes níveis de envoltórios (Figura 2) e a possibilidade que o evento ocorra – raro, comum ou cumulativo. Para verificar ou quantificar a magnitude dos riscos, deve-se calcular a frequência em que se espera que o dano ocorra, juntamente com a perda de valor para o acervo decorrente da extensão do dano causado e da fração afetada (IBERMUSEUS; ICCROM, 2017).

Figura 1: Agentes de deterioração



Fonte: Extraído de IBERMUSEUS; ICCROM, 2017

Figura 2: Níveis de envoltório



Fonte: Extraído de IBERMUSEUS; ICCROM, 2017

Dentre os agentes de degradação são considerados para esse trabalho as forças físicas, que são danos causados por choque, vibração, tensão, compressão, fricção, abrasão, dentre outros que podem ser causados por ação humana (Manuseio, armazenamento, montagem e transporte inadequados; colisões acidentais, tráfego de veículos, etc.) ou por desastres naturais (terremoto, deslizamento de terra, ventanias, dentre outros), podendo causar deformações, rupturas, perfurações, rasgos, abrasões, perda de partes, estilhaçamento e desgastes de todo o tipo, até mesmo a perda total.

Para Moreira e Ono (2011), acidentes com o acervo podem ocorrer inclusive dentro das instituições, pelo manuseio incorreto do acervo e durante operações de reforma, manutenção ou restauro. A preservação requer a adoção de medidas preventivas e reativas para evitar a deterioração causada por agentes como água, fogo, pragas, substâncias contaminantes, radiação

luminosa, condições climáticas inadequadas e ações criminosas. Essas medidas devem ser aplicadas em diferentes níveis do acervo, incluindo o edifício, salas de exposição e armazenamento, unidades de exposição e armazenamento, e materiais de guarda e embalagem.

O acondicionamento adequado dos materiais do acervo é uma medida essencial neste contexto. Trata-se da utilização de estruturas apropriadas, como caixas, embalagens ou recipientes específicos, para armazenar e proteger os objetos. Essas estruturas desempenham um papel crucial ao oferecer uma camada de invólucro protetor, que ajuda a evitar danos causados por diferentes agentes de deterioração, como umidade, poeira, luz, temperatura inadequada, pragas e manuseio inadequado. Ao proporcionar uma barreira física entre os objetos e esses agentes, o acondicionamento adequado minimiza os riscos de deterioração e danos irreversíveis, facilitando o armazenamento, transporte e manuseio dos mesmos (D'ÁLMEIDA, 2013).

Além disso, o acondicionamento adequado pode fornecer suporte estrutural para objetos frágeis ou delicados. Por exemplo, o uso de suportes adequados pode ajudar a evitar a deformação ou a quebra de objetos delicados, garantindo sua estabilidade durante o armazenamento e a exibição. Facilita também o manuseio seguro dos mesmos, reduzindo o risco de danos acidentais ao mover, transportar ou exibir os objetos.

Para garantir o acondicionamento adequado de objetos em museus, é necessário identificar os materiais que compõem os objetos do acervo, avaliar as condições ambientais do local onde os objetos serão armazenados e exibidos e escolher materiais apropriados de acondicionamento com base nas características dos objetos, nas condições ambientais e no tempo de exposição. Como é provável que o objeto permaneça nessa embalagem a longo prazo, os materiais de embalagem escolhidos devem ser duráveis e estáveis, para que não causem degradação ao objeto ao longo do tempo e devem ser projetados levando em consideração as características específicas dos objetos, como tamanho, fragilidade e material de composição, para oferecer suporte e proteção personalizados. Também é preciso que as caixas de armazenamento sejam rotuladas claramente para facilitar a identificação do objeto e evitar danos durante o manuseio (FRONER, 2018; ROSADO, 2018; STOLOW, 1981).

Em suma, o acondicionamento adequado desempenha um papel vital na preservação do patrimônio, protegendo os objetos contra danos físicos e deterioração, fornecendo suporte estrutural, permitindo o manuseio seguro, facilitando a documentação e identificação, e contribuindo para a exposição e acessibilidade adequadas.

2.2 BÚSSOLA DE MARINHA

A bússola, ou agulha de marear, é um dispositivo importante para se orientar na superfície da Terra, e serve também para observar a declinação magnética. O Serviço de Documentação da Marinha, em sua publicação *Introdução à História Marítima Brasileira* (2006, p. 20), caracteriza a bússola como sendo um instrumento composto “por uma agulha imantada que se alinha em função do campo magnético natural da terra, podendo-se saber a direção em que está o pólo norte magnético, propiciando ao navio traçar seu rumo, sua direção”.

As bússolas podem operar em princípios magnéticos ou giroscópios ou determinando a direção do Sol ou de uma estrela. No Ocidente, são usadas principalmente como auxílio à navegação, sendo um dos instrumentos mais importantes para tal fim, mas as culturas asiáticas e do Oriente Médio também as usaram para orientação espiritual. Em seu uso mais antigo, as bússolas provavelmente eram usadas como *backups* para quando o sol, as estrelas ou outros pontos de referência não podiam ser vistos. Eventualmente, à medida que as bússolas se tornaram mais confiáveis e mais exploradores entenderam como lê-las, os dispositivos se tornaram uma ferramenta de navegação crucial (ROYAL MUSEUMS GREENWICH, 2022).

Segundo a enciclopédia Britânica (2022), acredita-se que as primeiras bússolas possam ter consistido em uma agulha de ferro magnetizada por um pedaço de magnetita presa a uma lasca de madeira ou a um junco flutuando livremente em um prato de água. À medida que a agulha se assentasse, a extremidade marcada apontaria para o norte magnético. Em uma versão posterior, a agulha teria sido colocada perto do centro da tigela em um pino fixado no fundo.

Durante vários séculos, cientistas e historiadores debateram sobre a origem da bússola e, apesar de existir um grande desacordo sobre onde e quando o instrumento foi inventado, já que tanto os europeus do norte a reivindicaram, assim como os italianos, os árabes e os chineses. É inquestionável que o instrumento desempenhou um papel significativo no desenvolvimento marítimo, sendo aplicado aos desenhos de cartas portulanas e cartas náuticas, o que permitiu o aprimoramento destas (KREUTZ, 1973).

Ao longo dos séculos, uma série de melhorias técnicas foram feitas na bússola magnética à medida que se aprendia mais sobre magnetismo: a agulha da bússola foi montada e colocada em um pino no fundo da tigela, no meio de um cartão que mostrava os pontos cardeais — norte, sul, leste e oeste. O ponto norte era enfatizado por uma larga ponta de lança e a letra T que representava tramontana, nome latino dado ao vento norte. Por volta de 1490, essa combinação evoluiu para um design de flor-de-lis, ainda hoje quase universalmente usada, e se tornou tão familiar que é chamada de bússola, embora essa palavra originalmente significasse a divisão do

horizonte. A bússola magnética é, portanto, o tipo mais antigo e conhecido de bússola e, embora o design e a construção desse tipo de bússola tenham mudado significativamente ao longo dos séculos, o conceito de como ela funciona permaneceu o mesmo, sendo usada de diferentes formas em aeronaves, navios e veículos terrestres e por agrimensores.

Durante o século XV, os exploradores perceberam que o norte indicado por uma bússola não era o mesmo que o verdadeiro norte geográfico da Terra, mas fazia um ângulo com o meridiano local. Essa discrepância entre o norte magnético e o norte verdadeiro foi originalmente chamado pelos marinheiros de nordeste da agulha, mas atualmente é chamada de variação (por marinheiros ou pilotos) ou declinação magnética (por navegadores terrestres) e varia de acordo com a localização. A variação não é significativa ao usar bússolas magnéticas perto do Equador, mas próximo aos polos Norte e Sul a diferença é muito maior e pode levar alguém muitos quilômetros para fora do curso. Por um tempo, os fabricantes de bússolas nos países do norte montavam a agulha torta no cartão para que a flor-de-lis indicasse o norte verdadeiro quando a agulha apontava para o norte magnético, mas esta prática extinguiu-se porque a declinação em um determinado local varia ao longo do tempo, só funcionando para viagens curtas perto do local onde a bússola foi feita, causando confusão e dificuldade em viagens mais longas, especialmente na travessia do Atlântico até a costa americana, onde a declinação era oeste em vez de leste como na Europa (BRITANNICA, 2022; RODGERS, 2022. GESTEIRA, 2022).

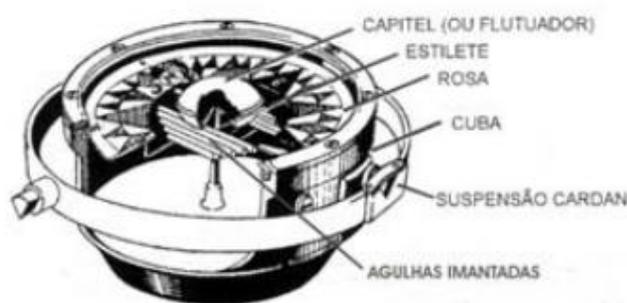
Ainda de acordo com a enciclopédia Britannica (2022), a bússola magnética, apesar de seu valor reconhecido, permaneceu por muito tempo um instrumento frágil, problemático e pouco confiável, sujeito a perturbações misteriosas. Algumas bússolas antigas não tinham água na tigela e eram conhecidas como bússolas de cartão seco; suas leituras eram facilmente perturbadas por choques e vibrações. Embora tenham sido menos afetadas pelo choque, as bússolas cheias de líquido foram afetadas por vazamentos e eram difíceis de reparar quando o pivô se desgastava. Nem o tipo de cartão líquido nem o de cartão seco foram decisivamente vantajosos até 1862, quando a primeira bússola líquida foi feita com uma boia no cartão que tirava a maior parte do peso do pivô. Um sistema de foles foi inventado para expandir e contrair com o líquido, evitando a maioria dos vazamentos.

Os refinamentos, destinados a reduzir os efeitos da vibração do motor e o choque de tiros, continuaram ao longo do século: ajustes como colocar bolas de ferro macio (chamadas esferas Kelvin) e ímãs de barra (chamadas barras Flinders) perto da bússola ajudaram a aumentar a precisão das leituras. Com essas melhorias, as bússolas líquidas tornaram as bússolas de cartão seco obsoletas no final do século XIX, fazendo com que a navegação

marítima evoluísse para uma técnica totalmente sistemática, combinando a simplicidade e a confiabilidade exigidas por seus praticantes com o rigor e a precisão fundados nas habilidades e conhecimentos de astrônomos, matemáticos, cartógrafos e fabricantes de instrumentos. Os princípios de navegação, técnicas e dispositivos em uso por volta de 1900 formaram uma base segura sobre a qual imensas mudanças foram sobrepostas durante o século XX.

A bússola magnética líquida, modelo usado quase universalmente, consiste em um conjunto de agulhas de aço com uma bússola, presa a uma boia, em uma tigela com água e álcool. A Figura 3 representa seus mecanismos interno e externo.

Figura 3 – Bússola Magnética.



Fonte: Silva (2010, p. 39)

Nos instrumentos modernos, o elemento magnético é muitas vezes na forma de um ímã de anel, encaixado dentro do flutuador. O cartão é geralmente de mica ou plástico com graduações impressas fotograficamente. Os cartões são geralmente graduados no sentido horário de 0° ao norte até 359°, com os oito pontos principais indicados.

Um suporte é colocado no centro do flutuador para apoiar um pivô com ponta de irídio preso ao bojo da bússola. O líquido no qual o sistema direcional é colocado serve a dois propósitos: reduzir o peso no ponto de pivô e, assim, minimizar o atrito; e amortecer as oscilações do movimento do navio. A tigela é fechada na parte superior e inferior por vidro, o vidro inferior permite a iluminação por baixo e é montado em uma suspensão Cardan, do inglês gimbal⁹. Um diafragma flexível ou fole acoplado ao recipiente acomoda a mudança de volume do líquido causada por mudanças de temperatura. A proa do navio é lida com o auxílio da linha

⁹ Gimbal – ou cardã – é um suporte giratório que permite a rotação de um objeto em torno de um único eixo. Seu uso em bússolas serve para mantê-las retas em relação ao horizonte, apesar do lançamento e rolamento do navio. Chamada de suspensão Cardan, essa suspensão da tigela da bússola em gimbals foi mencionada pela primeira vez em 1537 e era originalmente usada para manter as lâmpadas na posição vertical em navios lançados.

lubber¹⁰, que é orientada para a parte dianteira da bússola para indicar a direção da linha central do navio.

Também conhecida como bússola náutica, agulha de marear ou ainda bússola Cardan, de acordo com o Inventário da Coleção de Objetos de Ciência e Tecnologia do Museu de Astronomia e Ciências Afins, a bússola de marinha

é um instrumento especialmente utilizado no mar para fins de orientação, podendo ser utilizado também em terra, nos levantamentos topográficos, para indicar a direção do meridiano magnético do ponto onde se encontra o observador. O dispositivo cardan, característica fundamental das bússolas de marinha, mantém a rosa-dos-ventos e a agulha suspensa, permitindo que flutuem numa caixa hermeticamente fechada, compensando deste modo o balanço do navio (MUSEU DE ASTRONOMIA E CIÊNCIAS AFINS, 2011, p. 02).

O Thesauros de Acervos Científicos em Língua Portuguesa a define ainda como uma “bússola de declinação destinada a dirigir a marcha dos navios nos mares, possuindo um sistema de equilíbrio (Cardan) que permite manter a bússola sempre na horizontal, independentemente da inclinação do navio”.

Segundo Morel-Fatio (1853), podem ser de dois tipos: bússolas de direção e bússolas de variação (ou declinação). A bússola de direção consiste em uma agulha magnética presa a um papelão circular que arrasta consigo em seu movimento. Este cartão, marcado pela rosa dos ventos, é dividido em oito partes iguais representando os pontos cardeais; cada divisão é novamente dividida em quatro partes iguais que indicam um quarto, meio, três quartos de um ponto. A circunferência é dividida em graus, a fim de mostrar imediatamente o ângulo compreendido entre duas áreas. Idealizada para embarcações, a bússola marítima de direção é mantida no *cockpit* em um tipo de caixa ou armário; é tanto um objeto de primeira necessidade para a segurança da bússola quanto um ornamento para a retaguarda dos navios de guerra.

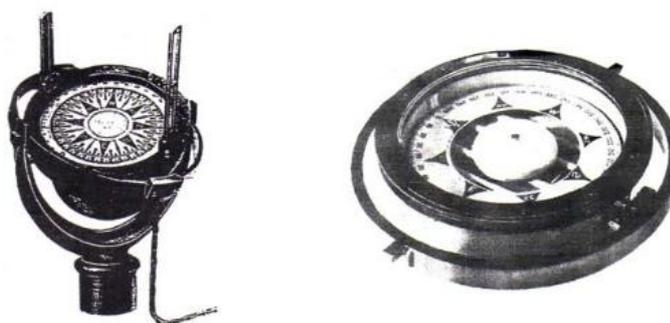
Já a bússola de variação ou declinação, também chamada de bússola de azimute, difere da anterior apenas por ser provida de pínulas, utilizadas para a passagem dos raios visuais, e por meio das quais o observador obtém a orientação de objetos distantes, com os quais consegue depois calcular os ângulos. Essa mesma bússola também é usada para medir a variação (ou declinação) da agulha magnética. Diz-se variação o número de graus pelos quais a agulha magnética se desvia do norte verdadeiro para o leste ou oeste.

Assim, especialmente para seu uso na navegação marítima, a bússola magnética teve que sofrer modificações significativas ao longo do tempo. Atualmente, no entanto, devido às

¹⁰ Linha fixa em uma bússola que indica a posição do plano de radar apontando para a frente do navio e correspondendo à linha central da embarcação (sendo a direção habitual do movimento).

leituras errôneas que comumente ocorriam em aeronaves e embarcações pequenas e rápidas durante alterações abruptas de rumo ou velocidade, o dispositivo mais utilizado é a giro bússola (Figura 4) – ou bússola giroscópica – que, inventada no início do século 20, usa um giroscópio giratório para seguir o eixo de rotação da Terra para apontar para o norte verdadeiro e não o magnetismo da Terra. Como o norte magnético não é medido, a variação não é um problema. Uma vez que o giroscópio comece a girar, o movimento não o perturbará. Este tipo de bússola é frequentemente usado em navios e aeronaves (BRITANNICA, 2022; RODGERS, 2022).

Figura 4 – Bússola Giroscópica e Bússola Magnética para comparação.



Fonte: Silva (2010, p. 34)

Embora atualmente nos navios a bússola giroscópica seja o instrumento normalmente utilizado como fonte primária para obtenção de direções (rumos e marcações), a bússola magnética ainda é frequentemente usada de forma secundária para atender às emergências e são geralmente montadas em binóculos, pedestais cilíndricos com provisão para iluminar a face da bússola por baixo. Cada bitácula contém ímãs especialmente colocados e peças de aço que cancelam os efeitos magnéticos do metal do navio. Nas embarcações menores, com poucos recursos de energia elétrica, só existe a agulha magnética (RODGERS, 2022; SILVA, 2010).

O instrumento utilizado para esta pesquisa trata-se de uma bússola magnética de direção portátil, um objeto composto por uma tigela cheia de líquido de material que aparenta ser latão esmaltado pintado em cinza, com duas câmaras de expansão na base abaixo da tampa externa e montado em um anel de sistema Cardan que também aparenta ser de latão, pintado de cinza com 6,1" (15,5 cm) de diâmetro. No interior a tigela é pintada de branco e equipada com centro flutuante abobadado, também branco, no qual está anexado o cartão da rosa dos ventos na cor branca com marcação preta, graduado para 1/4 pontos e 360 graus, com as inscrições: "KELVIN, BOTTOMLEY & BAIRD LTD", "CAPTAIN CHETWYND'S PATENTS Nº 25965/06" e "GLASGOW & LONDON".

Como foi dito anteriormente, o instrumento apresenta-se incompleto, com um dos pinos faltantes e sem o morteiro (Figura 5), acondicionamento característico e importante para o funcionamento dele, já que se trata de uma caixa de madeira criada para evitar a variação da declinação magnética e que pode ser observado em instrumentos semelhantes (Figura 6).

Figura 5 – Bússola de Marinha (ON) de Kelvin, Bottomley & Baird Ltd, Glasgow, séc. XX.



Fonte: Coleção do autor.

Figura 6 – Bússola de marinha (ON) de L. Casella/José Maria dos Reis, Londres e Rio de Janeiro, séc. XIX.



Fonte: Base de dados de instrumentos museológicos do MAST [s.d.].

Na parte superior da tigela há um visor circular de vidro transparente; ao redor do mesmo tem uma escala gravada em suporte de metal e contendo 12 parafusos. Na superfície dentro do círculo encontra-se uma rosa dos ventos flutuante em cartão impresso com uma estrela de oito pontas com pontos de bússola em relevo branco. O cartão é do tipo Chetwynd de diâmetro reduzido e as graduações são pretas sobre fundo branco. A ponta Norte está decorada com um grande motivo e há uma escala em toda a circunferência (Figura 7). Este círculo é móvel e suspenso por um sistema Cardan que permite flutuar no interior da panela, usado especialmente para navegação.

Circundando a panela e presa à mesma através de dois parafusos diametralmente opostos, há um suporte em latão na cor cinza. Neste, existem duas tampas circulares destacáveis, diametralmente opostas, com orifício no centro. Este suporte é circundado por um anel móvel (Figura 8), graduado em 360°, que se encontra preso ao mesmo em dois pontos e é encaixado na borda da bússola. No bordo externo deste anel, existe um orifício e um pino no ponto diametralmente oposto.

Na parte inferior, apresenta a inscrição “KELVIN & JAMES WHITE’S PATENT REGISTERED WTB 16-18-20 CAMBRIDGE ST, GLASGOW” (Figura 9) em um recipiente

de vidro hemisférico cheio de líquido encaixado na base da pesada tigela de latão, a qual se refere a uma empresa que estava em atividade, como tal, de 1914 a 1965.

O instrumento foi fabricado por volta de 1910 em Glasgow & London, Grã-Bretanha, por Kelvin, Bottomley & Baird Ltd., uma empresa britânica de engenharia especializada na fabricação de instrumentos de precisão, especialmente para a indústria naval. Além disso traz as melhorias de patente do Captain Chetwynd's sob o registro nº 25965/06.

Figura 7 – Parte superior da Bússola de Marinha.



Fonte: Coleção do autor.

Figura 8 – Anel móvel da Bússola de Marinha.



Fonte: Coleção do autor.

Figura 9 – Parte inferior da Bússola de Marinha.



Fonte: Coleção do autor.

3. IMPRESSÃO 3D E SEUS USOS EM MUSEUS

A Manufatura Aditiva – MA¹¹ representa um grupo de tecnologias de fabricação digital, que são capazes de criar objetos físicos em três dimensões – altura, largura e comprimento –, a partir de modelos tridimensionais nato-digitais ou digitalizados. A técnica consiste na deposição sucessiva de materiais, camada por camada, umas sobre as outras, de forma a construir um objeto a partir de dados de um modelo computacional em 3D (SILVA et al., 2021). Volpato e Carvalho (2018) ressaltam que uma característica importante dessa tecnologia é a sua facilidade de automatização, minimizando consideravelmente a intervenção do operador durante o processo.

As tecnologias de MA passaram a ter visibilidade a partir dos anos 80 e ficaram conhecidas inicialmente como prototipagem rápida, pois seu principal benefício é a velocidade de fabricação de um protótipo, de um modelo físico. Chua, Leong e Lim (2003) afirmam que há uma grande variedade de termos usados ao redor o mundo para se referir aos mesmos processos tecnológicos. Sabe-se que existem hoje diversas tecnologias diferentes de MA, cada qual com sua particularidade quanto ao funcionamento do equipamento e, embora tenha sido usado por muito tempo, especialmente para a produção de protótipos, o termo “impressão 3D” é agora o mais amplamente usado, dentre uma gama de outros termos, para descrever o método de fabricação aditiva, independentemente da tecnologia, material ou aplicação específica envolvida¹².

Antes dos processos aditivos serem formalizados na década de 1980, os principais processos de fabricação eram baseados em princípios de moldagem, de subtração de material, conformação – deformação plástica do material inicial –, na união de componentes ou na divisão destes (VOLPATO; CARVALHO, 2018). Tradicionalmente toda fabricação controlada por computador era subtrativa e os equipamentos eram conhecidos como “máquinas CNC – Controle Numérico por Computador” (SAMPAIO, 2017).

Da mesma forma, a fabricação aditiva também pressupõe o controle do processo por meio de algum computador. Por isso, são também chamados de equipamentos de prototipagem rápida, posto que a criação dos objetos físicos é realizada diretamente a partir de dados de computador gerados por softwares de modelagem CAD – Computer-Aided Design (SAMPAIO, 2017).

¹¹ Também conhecida como Fabricação Aditiva.

¹² No desenvolvimento deste trabalho, para evitar repetições de palavras, serão utilizados os termos “impressão 3D”, “manufatura aditiva” e “prototipagem rápida”.

Nos anos 2000, o desenvolvimento da modelagem por fusão e deposição, ou a prototipagem rápida por meio da deposição de filamentos poliméricos, levou a uma rápida democratização do processo e deu ao público em geral um vislumbre das amplas possibilidades oferecidas pela impressão 3D, em termos de economia e desenvolvimento industrial. De acordo com Vaccarezza e Papa (2014), as tecnologias aditivas tiveram avanços rápidos mais recentemente por conta da redução de custos devido à popularização da tecnologia, da engenharia de computadores e da expansão de aplicações digitais.

O desenvolvimento da tecnologia se reflete no mercado. De acordo com os dados divulgados em 2021 pelo Departamento de Pesquisa da Statista¹³, plataforma online especializada em dados de mercado e consumidores, o mercado mundial de produtos e serviços de impressão 3D foi avaliado em US\$ 12,6 bilhões, em 2020, com uma previsão de que em 2026 o valor do mercado deva chegar a US\$ 37,2 bilhões, apresentando um crescimento anual de 21% até 2028.

Já segundo o relatório anual sobre o progresso mundial da indústria de impressão 3D e manufatura aditiva da Wohlers Associates¹⁴, empresa desenvolvida pela American Society for Testing and Materials (ASTM International), o setor teve um crescimento de 19,5% em 2021, superior ao crescimento de 7,5% em 2020, em que foi fortemente impactado pela pandemia de COVID-19.

À medida que a tecnologia e a indústria amadurecem, um número crescente de empresas está usando a MA para produtos personalizados e produção em série, visto que as impressões tridimensionais têm papel essencial na indústria 4.0, ao lado de tecnologias como internet das coisas, big data, inteligência artificial e biologia sintética, e seu mercado é amplo e atrativo. De acordo com Cabreira (2018), diversas empresas adotaram a tecnologia para acelerar o desenvolvimento ou a produção dos seus produtos, como a Boeing por exemplo, no setor aeronáutico, que começou a utilizar SLS para a produção de componentes para suas aeronaves. No mesmo ramo, a GE Aviation e SpaceX também adotaram a tecnologia, assim como outras indústrias. Componentes impressos são utilizados, por exemplo, pela Koenigsegg, BMW e Mercedes nos seus automóveis.

Segundo Silva et al. (2021), existem diferentes sistemas de manufatura aditiva usados na fabricação de modelos disponíveis no mercado atualmente, cada qual usado para atender a

¹³ Disponível em: <https://www.sproutfi.com/pt-BR/insights/impressao-3d-os-principais-avancos-do-mercado-e-as-empresas-que-se-destacam-no-mundo/>

¹⁴ Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/wohlers-associates-publishes-its-2022-state-of-3d-printing-report-206157/>

objetivos específicos, utilizando-se de matérias-primas distintas e com uma forma característica de fabricação e, por isso, podem ser classificadas de várias maneiras.

Em 2009, a American Society for Testing and Materials (ASTM) e a Society of Manufacturing Engineers (SME) criaram o Comitê F42 para Tecnologias de Manufatura Aditiva, o qual formulou um conjunto de diretivas que classificam os processos aditivos em categorias. Essas diretivas deram origem à norma ISO/ASTM 52900:2015, que trata da terminologia acerca das tecnologias de manufatura aditiva, propõe uma divisão das diferentes técnicas de fabricação aditiva, conforme ilustrado na Figura 10, entre as quais se destaca o grupo designado por extrusão de materiais (DILBEROGLU, 2017; TONATTO, 2017).

Figura 10 – Divisão das tecnologias de manufatura aditiva.



Fonte: Tonatto (2017, p.58).

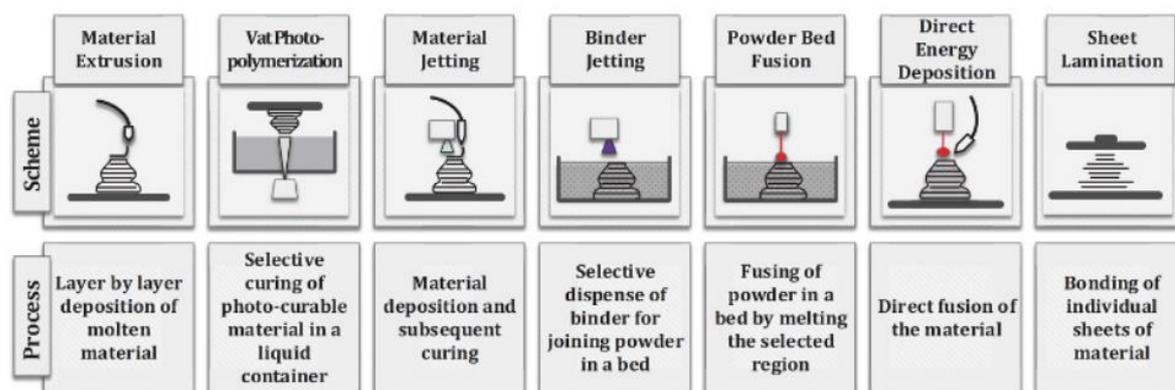
De acordo com Volpato et al. (2017) e Silva et al. (2020), essas tecnologias podem ser definidas como:

- **Fotopolimerização** (VP, sigla do inglês para *Vat Photopolymerization*) – fabricação a partir de resinas poliméricas líquidas, no qual a matéria prima é solidificada por irradiação por meio de uma fonte de luz, incluindo: Estereolitografia (STL) e Processamento Digital de Luz (DLP).
- **Jateamento de aglomerante** (BJ, sigla do inglês para *Binder Jetting*) - fabricação por aplicação seletiva de um líquido aglomerante à um material em pó;
- **Jateamento de material** (MJ, sigla do inglês para *Material Jetting*) - fabricação por deposição seletiva de material líquido, curado por energia luminosa à cada camada;

- **Deposição direta por aplicação de energia** (DED, sigla do inglês para *Direct Energy Deposition*) - fabricação cujo processo consiste na aplicação de energia térmica concentrada para fundir o material sólido enquanto é depositado;
- **Extrusão de material** (ME, sigla do inglês para *Material Extrusion*) - fabricação por extrusão e deposição de um termoplástico ou solução por meio de um bocal, incluindo: Modelamento por deposição de material fundido (FDM, sigla do inglês para *fused deposition modeling*);
- **Fusão seletiva em leito de pó** (PBF, sigla do inglês para *Powder Bed Fusion*) - fabricação em que a energia térmica funde seletivamente regiões em uma “cama” de pó;
- **Adição de laminados** (SL, sigla do inglês para *Sheet Lamination*) - fabricação por corte, sobreposição e união de chapas metálicas ou plásticas.

Assim, os processos de MA podem variar de acordo com o estado inicial da matéria prima, fonte de energia, método de formação de camadas e as condições em que as peças são construídas (XU et al., 1999). A Figura 11 ilustra essas diferenças.

Figura 11 – Visualização das diferentes técnicas de impressão 3D.



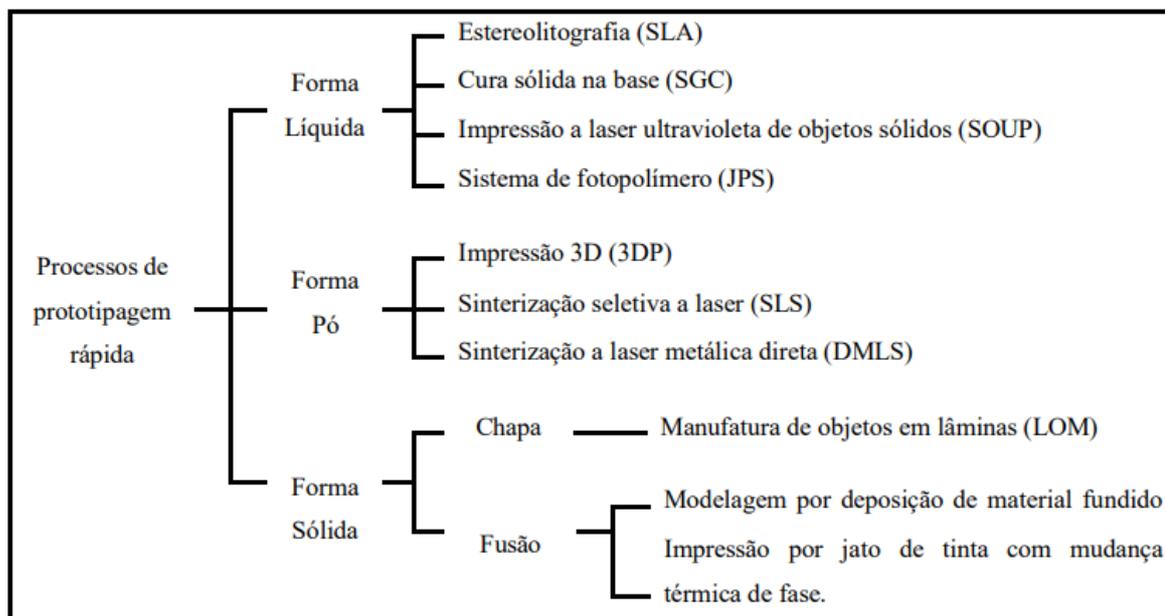
Fonte: Perrot e Amziane (2019, p. 6).

Outra maneira amplamente utilizada para classificar os vários métodos de manufatura aditiva no mercado é pela forma inicial do material, ou seja, o material com o qual o protótipo ou peça é construído. Por esta classificação os métodos são categorizados em base líquida, base sólida e base em pó. Na Figura 12 observa-se a classificação geral dos processos segundo o tipo de material.

Dentre os diversos processos de manufatura aditiva, os mais populares são: a Estereolitografia – SLA (Figura 13a), primeira técnica bem-sucedida de prototipagem rápida que utiliza radiação ultravioleta para solidificação de resinas líquidas; a Sinterização Seletiva a Laser – SLS (Figura 13b), que sinteriza materiais pulverulentos utilizando um raio de laser; e a

Modelagem por Fusão e Deposição - FDM ou ainda Fabricação por Filamento Fundido – FFF (Figura 13c), um dos métodos mais difundidos, acessíveis e com maior popularidade no mercado que utiliza filamentos de polímeros como matéria-prima.

Figura 12 – Classificação geral dos processos de prototipagem rápida.



Fonte: SHEREMETIEFF JR; GONÇALVES (2020, p.84).

A SLA foi a técnica pioneira e é ainda a mais utilizada no mundo. Baseia-se na polimerização de uma resina fotossensível através de um feixe de laser. Neste processo, o equipamento constrói a peça pela superposição de camadas de resina polimérica líquida. De acordo com o modelo digital, os raios laser UV solidificam uma resina fotossensível, camada a camada dos contornos do objeto pretendido sobre uma plataforma, até completar a formação da peça. Quando pronto, o modelo sólido é removido do banho e lavado. Os suportes são retirados e o modelo é introduzido num forno de radiação ultravioleta para ser submetido a uma cura completa (BADOTTI, 2003; GORNI, 2011).

Já no processo SLS, uma fina camada de polímeros em pó é depositada e espalhada sobre uma superfície com auxílio de um rolo e se solidifica com a incidência de um feixe de laser de CO₂. O pó não sinterizado funciona como suporte e é removido quando a peça estiver completa. Uma grande vantagem desse processo é a maior disponibilidade de materiais e a considerável resistência mecânica e térmica dos protótipos, no entanto, apresenta um custo muito elevado em comparação com outras técnicas (SOUZA; ULBRICH, 2013; VOLPATO, 2007)

Quanto ao processo FDM/FFF, baseia-se na extrusão de materiais, ou seja, consiste na deposição de filamentos de resina termoplástica aquecidas que são extrudadas a partir de uma matriz que se move num plano X-Y. É importante ressaltar que, na literatura, é comum encontrar o termo FDM. O método denominado de FDM é um nome comercial patentado com restrições de uso e foi inventado por Scott Crump (Fundador da Stratasys Inc.) em 1988, com o objetivo de servir a um público-alvo que engloba desde grandes fabricantes, *designers*, engenheiros, educadores até outros profissionais ou usuários *hobbistas* (MIER et al., 2015).

Em 2009, um ano após a queda a patente da tecnologia FDM, que pertencia à empresa Stratasys Inc., surgiu o projeto RepRap (The Replicating Rapid Prototyper), criado pelo engenheiro mecânico Adrian Bowyer, que pensava uma impressora capaz de fazer peças para fabricar outras impressoras do mesmo tipo. Com uma estrutura colaborativa, arquitetura *open-source*, e utilizando componentes eletrônicos que já estavam à venda no varejo, o projeto fez com que os preços das impressoras 3D reduzissem drasticamente, facilitando o acesso e difundindo o conhecimento, o que possibilitou que as impressoras 3D se popularizassem (AGUIAR, 2016; SAMPAIO, 2017).

Este método também passou a ser conhecido, então, como Fabricação por Filamento Fundido, termo de uso livre e que se refere ao mesmo tipo de fabricação por extrusão de material fundido (AGUIAR, 2016). O método FFF permite produzir formas complexas usando menos material que os métodos de fabricação tradicionais. Uma de suas vantagens é a alta flexibilidade em comparação com o processo tradicional que leva à reprodução física, e a capacidade de obter peças físicas semiacabadas, customizadas, de modo automático e de alta complexidade e detalhes (3DHUBS, [2023]).

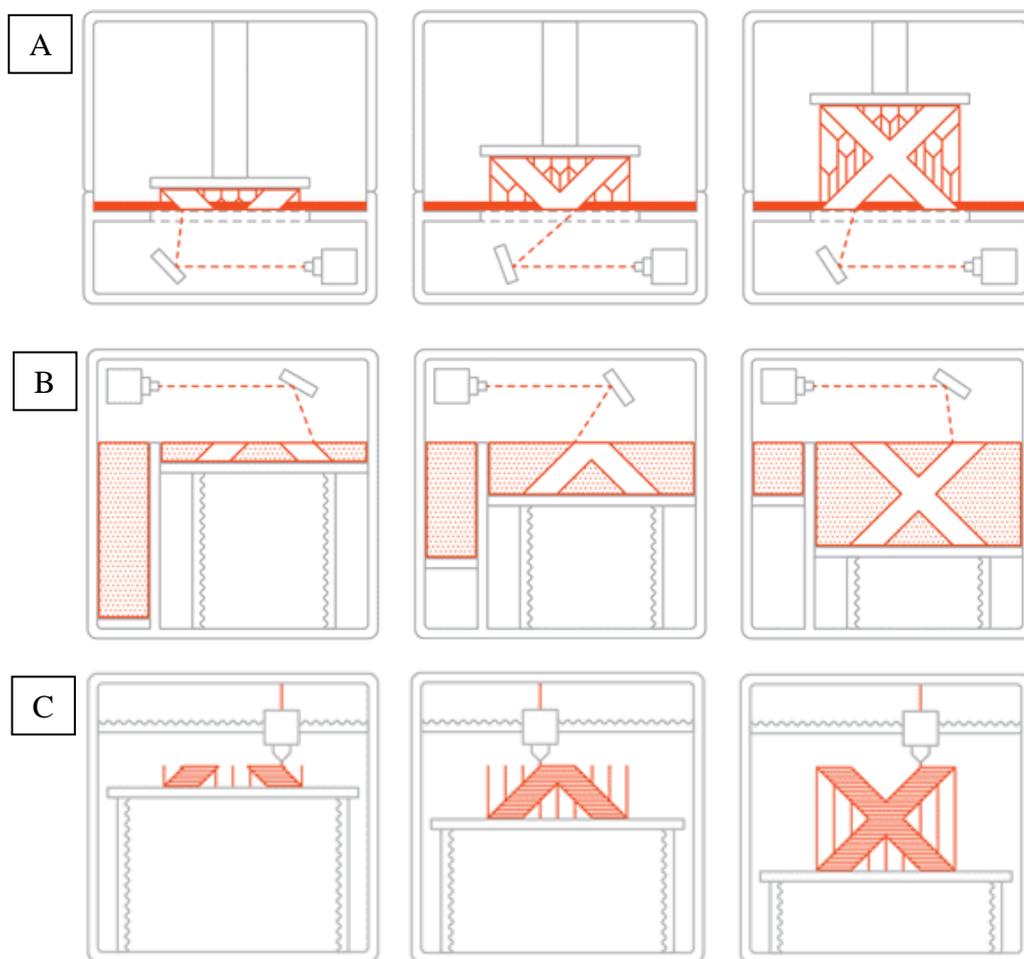
A impressão 3D pode ser considerada como uma tecnologia de MA de elevado impacto. De acordo com Cunha (2019), das várias tecnologias de impressão, a fabricação por filamento fundido tornou-se a que apresenta uma maior expressividade. Isso se deve não apenas pela redução dos custos dos equipamentos, o que auxiliou na disponibilização dessas ferramentas para um público mais amplo, mas também pela facilidade de encontrá-los e o elevado ritmo com que a técnica tem evoluído, tanto no que concerne às máquinas, quanto aos materiais disponíveis.

Essa evolução tem permitido que a impressão 3D ganhe gradualmente níveis de precisão, permitindo a produção de formas complexas e customizadas. Este tipo de fabricação permite a obtenção de matrizes ideais para o emprego na produção de lotes pilotos e possibilita o desenvolvimento de produtos mais rapidamente e com menor custo. O processo se torna mais

rápido e reduz ou elimina ferramentas e perdas de material, já que a fabricação das peças ocorre apenas na demanda.

Figura 13 – Tipos de manufatura aditiva: a) Estereolitografia; b) Sinterização Seletiva a Laser;

c) FDM/FFF - Fabricação por Filamento Fundido.



Fonte: 3DLAB (2018).

A possibilidade de criar objetos de qualquer formato, sem investimento em ferramentário, juntamente com a diminuição dos custos dos equipamentos, levou a uma diversificação de aplicação. De tal forma, essa tecnologia emergente tem se destacado e vem sendo utilizada para a criação de implantes, modelos, pesquisas, educação e peças de reposição nos mais diversos setores, tais como: aeroespacial, automobilística, medicina, clínica-hospitalar, alimentícia, educação, engenharia civil, arquitetura, dentre outros (CABREIRA, 2018; VOLPATO, CARVALHO, 2018; SILVA et al., 2021).

Os benefícios de sua aplicação, sejam diretos ou indiretos, são variados: apresenta custos fixos e relativamente baixos por não requerer nenhum ferramentário especial para cada

produto; apresenta menor gasto de matéria-prima visto que a utiliza de forma aditiva, evitando cortes e descarte de material; capacidade de produzir objetos físicos de qualquer complexidade em um período de tempo relativamente curto; formas mais orgânicas e esculpidas por razões funcionais ou estéticas podem ser acomodadas para atender a requisitos diversos sem alterar consideravelmente o prazo; dentre outros (CHUA; LEONG; LIM, 2017).

No entanto, é importante ressaltar que, apesar do potencial das tecnologias de fabricação aditiva em oferecer flexibilidade e reduzir a necessidade de ferramentas dedicadas para a criação de formas, a maioria delas, atualmente, apenas substitui as limitações dos métodos tradicionais por novas restrições e desafios. Algumas das principais dificuldades associadas à impressão 3D são:

- **Qualidade e precisão:** A qualidade e a precisão das peças impressas em 3D podem variar dependendo da tecnologia e dos parâmetros de impressão utilizados. Pequenos detalhes e superfícies complexas podem ser desafiadores de reproduzir com alta precisão, resultando em peças com imperfeições.

- **Limitações de materiais:** Embora haja uma ampla variedade de materiais disponíveis para impressão 3D, cada tecnologia possui suas limitações. Alguns materiais podem ser mais difíceis de imprimir do que outros, exigindo ajustes específicos nos parâmetros de impressão. Além disso, certos materiais podem não ser compatíveis com determinadas tecnologias de impressão 3D.

- **Tamanho e escala:** A capacidade de impressão 3D em termos de tamanho e escala é limitada. O tamanho máximo da peça que pode ser impressa depende do volume de construção da impressora 3D. Peças muito grandes podem exigir impressoras industriais especializadas e podem ser mais difíceis e demoradas de serem produzidas.

- **Tempo de impressão:** A impressão 3D é geralmente um processo lento, especialmente quando se trata de peças grandes e complexas. O tempo de impressão pode variar de horas a dias, dependendo do tamanho, complexidade e tecnologia de impressão utilizada. Isso pode ser uma limitação para projetos que requerem prazos curtos.

- **Pós-processamento e acabamento:** Após a impressão 3D, muitas vezes é necessário realizar pós-processamento e acabamento nas peças para obter a qualidade desejada. Isso pode envolver remoção de suportes de impressão, lixamento, polimento ou pintura, o que pode adicionar tempo e trabalho adicional ao processo.

- **Limitações estruturais:** Dependendo da tecnologia de impressão 3D utilizada, as peças podem ter limitações em termos de resistência estrutural. A orientação das camadas de

impressão e a natureza anisotrópica das peças podem resultar em propriedades mecânicas diferentes em diferentes direções.

É importante estar ciente dessas dificuldades e limitações ao considerar a impressão 3D para um projeto específico. No entanto, apesar desses desafios, a impressão 3D continua a evoluir e oferecer oportunidades empolgantes em diversos campos, desde prototipagem rápida até fabricação personalizada e produção em pequena escala.

3.1 APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D EM MUSEUS

O uso desta tecnologia contribui com a divulgação e a preservação do patrimônio e na promoção da acessibilidade física por meio de reproduções de bens culturais. As principais temáticas dentro deste campo se debruçam na criação de réplicas para promoção de acessibilidade, interação e educação; na reconstrução virtual de obras de arte fragmentadas; e no uso de modelos digitalizados como suporte para o planejamento de restauração, visto que a pesquisa auxiliada por tecnologias 3D permite um exame visual detalhado e não intrusivo do exterior e do interior do objeto, sem manipulação ou impacto na integridade física do artefato (ROSSI; SILVA; KINDLEIN JUNIOR, 2013).

Scopigno, Cignoni, Callieri, et al. (2003) definiram duas maneiras de usar modelos digitais para apoiar o trabalho de conservação e restauração do patrimônio cultural: como mídia de apoio, a fim de documentar um projeto de restauração ou para arquivar e integrar dados multimídia produzidos por estudos científicos, e como instrumento ou ferramenta de pesquisa para o trabalho de conservação e restauração, na execução de investigações específicas. Um exemplo desse uso versátil dos modelos 3D é demonstrado na restauração da Fonte de Netuno em Bolonha, que se utiliza de um modelo muito detalhado do monumento, realizado por meio de modernas técnicas de modelagem 3D de objetos, como base do sistema de informação para planejamento do processo de restauro e estudo da obra antes e durante o seu tratamento.

Além disso, é possível para combinar imagens 2D, 3D e multiespectrais para pesquisa e para fornecer preservação ideal desta documentação. Desenhos técnicos de artefatos culturais podem ser produzidos e modelos 3D podem auxiliar no monitoramento do estado de conservação do artefato. Pesquisadores inclusive estão usando dados 3D para rastrear a condição de um item de coleção ao longo do tempo usando ferramentas de análise de desvio 3D, mostrando exatamente quais mudanças ocorreram em um objeto ao longo do tempo (ACKE et al., 2021). Dentre as publicações mais recentes, conforme observado pelos autores, a

impressão 3D tem sido mais utilizada e relevante em metodologias de restauração, apresentando diversas possibilidades de uso dentro do processo.

Xu, Ding e Love (2017) foram pioneiros neste campo de pesquisa combinando digitalização 3D com 3DP (Impressão 3D) para a reabilitação de estruturas históricas e elementos ornamentais. Os autores restauraram o pedestal de uma histórica coluna de pedra, essencial para suportar cargas mais elevadas, garantir o apoio lateral e evitar que a coluna seja afetada diretamente por água na área em contato com o solo, além de proporcionar um acabamento mais estético.

Uma colaboração entre arqueólogos do Instituto de Arqueologia Digital (IDA) da Universidade de Oxford e da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) resultou na recriação do Arco do Triunfo de Palmyra, arco romano de 1.800 anos da Síria, destruído pelos extremistas do grupo ISIS. O protótipo foi erguido pela primeira vez na Trafalgar Square, em Londres, em 2016, e tem cerca de 2/3 da escala do original (6m de altura), pesando 11 toneladas e produzido com tecnologia 3DP, a partir de imagens 2D do arco original. Dois robôs RobotMills desenvolveram diferentes blocos, posteriormente montados no local (JESUS et al., 2023).

A Concr3de, empresa holandesa que sugeriu a aplicação de 3DP para a restauração da Catedral de Notre-Dame, replicou a icônica gárgula encontrada no telhado da catedral com uma mistura de calcário e cinzas, materiais semelhantes aos encontrados após o fogo. As imagens digitais disponíveis da gárgula foram encontradas na internet e depois impressas com uma impressora 3D de pequeno porte, capaz de trabalhar com pedra e materiais semelhantes, garantindo alta precisão na criação de réplicas para diferentes tipos de elementos (JESUS et al., 2023).

Step Moga et al. (2022), aplicaram o uso das tecnologias digitais 3D para a impressão de estruturas auxiliares como uma estratégia para adesão de fragmentos em artefatos de cera. O estudo de caso utilizou um modelo anatômico obstétrico do século XVIII feito pelo escultor da Corte de Madri Juan Cháez e pelo modelista Luigi Franceschi, que pertencia ao gabinete anatômico do Royal College of Surgery de San Carlos em Madri. Os autores demonstraram em seu trabalho o processo de digitalização realizado empregando scanners de luz estruturada, modelagem digital e impressão 3D para criação de estruturas auxiliares adequadas para apoiar as várias peças originais a serem coladas, garantindo a posição exata de cada fragmento durante o processo de cura do adesivo, bem como a reintegração volumétrica das falhas em áreas de alta complexidade da escultura, garantindo máxima precisão, segurança e eficiência durante o processo.

Mais recentemente, Saha et al. (2023) propuseram um método para criar uma réplica de uma estatueta de cerâmica de Vênus a partir de um molde da coleção do Museu de Técnicas de Cerâmica em Koło, Polônia, parte do acervo do museu. Este trabalho proporcionou uma avaliação da peça que incluiu uma análise técnica do estado de degradação do molde e permitiu criar materiais educativos para o museu sobre antigas tecnologias de fabricação de peças de cerâmica pelo uso de moldes de gesso. Uma vez finalizado o processo de impressão 3D, os autores fizeram correções nas peças usando técnicas tradicionais realizadas por conservadores de arte, o que levou a um resultado mais realista do que seria observado se apenas um software 3D tivesse sido usado.

A impressão 3D também foi utilizada para a elaboração de uma réplica de um modelo didático dermatológico pertencente ao Museu Olavide a partir do molde original. Os autores obtiveram uma figura altamente realista, que representou, com grande detalhe, os pequenos relevos superficiais das lesões cutâneas do molde original, bem como a sua cor, recriando, com precisão, um modelo didático sem a necessidade de utilizar a peça original no processo, o que evita qualquer risco de deterioração (HERNÁNDEZ-MUÑOZ et al., 2023).

Já Laycock et al. (2015) demonstraram o uso da tecnologia na reconstrução de peças de xadrez cantonesas incompletas do século XIX. Os artefatos originais, por serem muito delicados e compostos por várias peças individuais, se mostravam incompletos devido a quebras e perdas de algumas das peças individuais ou de suas partes constituintes. Como as peças possuíam elementos comuns, foi possível utilizar o escaneamento preciso de uma peça para ajudar na reconstrução de outra peça danificada ou incompleta para sua posterior impressão 3D. Os autores ressaltaram que as técnicas digitais 3D podem ser facilmente adaptadas por museus para reparar artefatos danificados ou fazer modelos de reprodução precisos para fins educacionais ou comercialização.

Um exemplo de como a tecnologia pode ser usada para fins educacionais é demonstrado no trabalho de Arias et al. (2022) através do uso de modelos 3D como recurso didático em arqueologia. O artigo apresenta um estudo de caso da geração de uma reprodução 3D em escala e confiável de uma torre de castelo muçulmano no sítio arqueológico de Cástulo, Jaén, no sul da Espanha. O artigo descreve o processo de aquisição, processamento, gerenciamento de dados arqueológicos e geração de um modelo impresso em 3D, destacando o potencial dessas técnicas como ferramentas educacionais em arqueologia. Os autores ainda ressaltam que a impressão 3D também auxilia na divulgação do sítio em estudo para públicos com diferentes níveis de especialização, além de ajudar a fornecer uma visão geral, referências espaciais e, às vezes, conjecturas sobre a forma, localização e relação dos edifícios originais.

Os modelos 3D são ainda uma ferramenta eficaz para garantir a integridade e confiabilidade da documentação do patrimônio cultural. Ao criar modelos tridimensionais precisos e detalhados, é possível obter informações relevantes sobre a condição física e os materiais presentes no ambiente estudado, além de uma representação visual clara do patrimônio em questão, permitindo uma compreensão mais aprofundada de suas características. Eles capturam informações detalhadas sobre a estrutura, arquitetura, relevos, ornamentos e outros elementos que o compõem. Esses modelos ajudam a documentar de forma completa e detalhada o ambiente estudado, fornecendo uma base sólida para análises, estudos e tomada de decisões relacionadas à conservação, restauração e gestão do patrimônio.

As réplicas 3D também são um suporte ideal para permitir que pessoas com deficiência visual explorem esculturas ou obras de arte com os dedos, sem entrar em contato direto com o original. Isso pode ser feito simplesmente produzindo uma réplica tocável ou projetando/adotando métodos que melhorem a percepção do detalhe da forma sobre a superfície da réplica. Metodologias interessantes também foram projetadas para transformar pinturas ou fotografias em modelos 3D, conforme exemplo da Figura 14, que podem ser experimentados por pessoas com deficiência visual por meio de réplicas físicas.

O poder tátil de uma réplica não se limita apenas a pessoas com deficiência visual: pode também ser um recurso valioso para crianças ou outros visitantes de um museu, uma vez que o toque é uma das nossas principais abordagens para experimentar, compreender e apreciar o mundo exterior. Nesse sentido, as réplicas 3D podem ir além do atual modo de percepção visual para experiências multissensoriais mais ricas (SCOPIGNO et al., 2015).

Figura 14 – Pintura convertida em relevo 3D para ser experimentada por pessoas com deficiência visual.



Fonte: SCOPIGNO et al. (2015).

No Brasil, tem-se como exemplo o Museu de Arte Sacra de São Paulo que, em parceria com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, utilizou a tecnologia de impressão 3D para produzir réplicas de esculturas e objetos de arte que foram danificados durante um incêndio ocorrido em 2013. Posteriormente essas peças integraram a exposição intitulada “Arte Sacra para Ver e Sentir”, com curadoria de sua conselheira Mari Marino, composta por 60 peças, em ABS, no município de Iguape. Esse projeto compôs o MAS Itinerante, que buscou levar um recorte de seu acervo para apresentá-lo ao público, composto de réplicas exatas dos originais em ABS, permitindo que os visitantes pudessem tocar e conhecer obras de iconografia sacra, raros exemplares de numismática e ourivesaria. Somou-se a isso, obras de Antônio Francisco Lisboa, o Aleijadinho, Frei Agostinho da Piedade, Benedito Calixto, Anita Malfatti, entre outros nomes excepcionais da cultura artística brasileira (MUSEU DE ARTE SACRA DE SÃO PAULO, 2019).

O Museu de Arte Sacra de Mato Grosso, em Cuiabá, também utilizou a impressão 3D em uma exposição intitulada Museu de Arte Sacra 3D, uma exposição acessível com peças táteis e audiodescrição, composta por 43 réplicas tridimensionais das principais obras do acervo, cujo objetivo era possibilitar aos deficientes visuais a percepção tátil de detalhes das obras originais. As peças selecionadas pertencem todas ao acervo musealizado e apresentam tipologias diversas, sendo: edificações com fachada, esquadrias, conjuntos arquitetônicos, mesas de altares, retábulos, imagens, crucifixos, objetos litúrgicos celebrativos, mobiliários, pintura e busto (LOZI, 2022).

Uma significativa aplicação dessa tecnologia tem sido na recuperação da memória de peças perdidas durante o incêndio sofrido pelo Museu Nacional do Rio de Janeiro em 2018. Instituição precípua da ciência no Brasil abrigava em seu acervo coleções de paleontologia, antropologia, geologia, zoologia, arqueologia e etnologia biológica, que representavam os avanços científicos e o conhecimento e riqueza cultural do país e do mundo.

A partir de um projeto de digitalização prévio ao incêndio, em que cerca de 300 peças foram escaneadas em 3D ou através de equipamentos de imagem, como tomógrafos, está sendo possível efetuar a criação de réplicas tridimensionais, além de viabilizar reconstituições e restaurações de peças danificadas. Embora não substituam os originais, o uso dessa tecnologia possibilita uma representação fidedigna dos objetos para estudo, mediação cultural ou reposição de acervo perdido, resguardando a memória da instituição (CARVALHO, 2019; MOTTA; SILVA, 2020).

Outro exemplo de aplicação da impressão 3D no Brasil é a exposição “3D: Imprimindo o Futuro”, realizada em 2017 pelo Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST) a partir da

exposição "3D Printing the Future", do Science Museum, de Londres, em que a própria peça impressa se tornou objeto de exposição. Mais de cem objetos impressos a partir de pesquisas científicas foram expostos de forma a demonstrar a evolução da tecnologia em diversas áreas do conhecimento científico e tecnológico.

Apesar da versatilidade da tecnologia, seu uso também tem gerado várias discussões e debates entre profissionais e especialistas. Um dos principais debates diz respeito à reprodução de artefatos culturais: enquanto alguns argumentam que a reprodução digital pode ajudar a preservar e disponibilizar réplicas de peças históricas para estudo e exibição, outros levantam preocupações sobre a autenticidade e o valor histórico das cópias digitais. Também há discussões sobre a adequação da impressão 3D como método de restauração, uma vez que envolve a substituição de partes originais por réplicas produzidas digitalmente. Essas discussões refletem a complexidade e as diferentes perspectivas envolvidas no uso da 3DP no campo do patrimônio.

As tecnologias de fabricação também podem ter um grande impacto na criação de embalagens sob medida ou estruturas de suporte para armazenamento, envio ou exibição de obras de arte e objetos frágeis. Também reduz a manipulação de obras de arte frágeis, uma vez que o habitual processo manual de tentativa e erro (tirar as medidas da obra de arte, produzir a embalagem, testar se a obra de arte se encaixa bem, modificar a embalagem, verificar novamente etc.) é reduzido, já que neste caso o processo começa a partir de um modelo 3D digital de entrada que produz automaticamente uma estrutura de suporte personalizada (SCOPIGNO et al., 2015).

Um aparelho de embalagem personalizado pode ser projetado usando sistemas de modelagem 3D padrão ou seguindo abordagens de pesquisa recentes, geralmente baseadas em tecnologias de fresagem. Conforme afirma Scopigno et al. (2015), as soluções de fresagem são baseadas na ideia de cortar uma aproximação da forma da obra de arte a partir de um bloco de material macio (por exemplo, isopor ou espuma de polietileno). Sanchez et al. (2015) propuseram um algoritmo para a produção semiautomática de embalagens personalizadas para artefatos usando fresadora CNC. A adoção de uma tecnologia de fresagem permite escolher o material de reprodução que melhor se adapta às características da obra a ser protegida enquanto o algoritmo calcula a posição ideal para a obra de arte, de forma a maximizar a superfície de contato em relação à base da caixa.

Uma abordagem diferente projeta, a partir da fabricação aditiva, uma estrutura reticulada, composta com o negativo da peça ou com seu molde, para se encaixar perfeitamente em torno das obras de arte (ver Figura 15). O acondicionamento impresso em 3D pode ser uma

solução de gerenciamento de risco para museus, fornecendo uma opção de embalagem segura e personalizada para artefatos valiosos e delicados. A tecnologia permite designs precisos e personalizáveis que podem ser adaptados para se adequarem à forma e dimensões únicas de um objeto, reduzindo o risco de danos durante o transporte ou armazenamento. Uma questão em aberto neste caso é o uso de dispositivos de impressão que ofereçam multimateriais, para que possam construir estruturas de suporte com elementos muito macios próximos à superfície do objeto (MEDEIROS et al., 2012).

Além de proporcionar um melhor ajuste, a embalagem impressa em 3D também pode oferecer proteção superior em comparação com materiais de embalagem tradicionais, como espuma ou plástico bolha. Dependendo do material utilizado, pode fornecer maior resistência, durabilidade e resistência a impactos, umidade e outros fatores ambientais que podem representar um risco para o objeto. Além disso, também pode ser uma solução econômica, já que o custo de uma impressão 3D é proporcional à quantidade de matéria-prima empregada, e sustentável para museus, pois permite a criação de designs de embalagem específicos e personalizados, reduzindo a necessidade de múltiplos materiais de embalagem para um mesmo objeto.

Figura 15 – Embalagem produzida por impressão 3D.



Fonte: MEDEIROS et al. (2012).

No entanto, há que se considerar que por não ser ainda uma aplicação muito explorada, algumas dificuldades e desvantagens podem ser encontradas, como:

- Limitação de materiais: nem todos os materiais de impressão 3D podem ser adequados para criar embalagens para objetos e artefatos de museus. Alguns materiais podem não fornecer resistência ou durabilidade suficientes para proteger o objeto durante o transporte e armazenamento. Além disso, certos materiais podem não ser compatíveis com o objeto, como aqueles que podem causar reações químicas ou danificar a superfície do objeto.
- Tempo de impressão: dependendo da complexidade do design e do tamanho do objeto, a impressão 3D da embalagem pode ser um processo demorado.
- Manutenção: a embalagem impressa em 3D pode exigir manutenção ou reparos ao longo do tempo, o que pode adicionar custos e tempo adicionais ao processo. Também se considera a manutenção da máquina, que está sujeita a diversas falhas durante o processo e problemas de funcionamento.
- Falta de padronização: como a impressão 3D permite a personalização, pode ser um desafio criar uma solução de embalagem padronizada que possa ser usada para vários objetos ou compartilhada entre museus.

Por ser uma técnica em desenvolvimento e pesquisa, as embalagens impressas em 3D devem ser cuidadosamente projetadas, testadas e monitoradas para garantir proteção adequada e atender aos requisitos específicos de cada objeto ou artefato, visto que ainda há desafios a serem superados em relação à durabilidade e estabilidade dos materiais impressos ao longo do tempo. Além disso, a tecnologia de impressão 3D ainda não é capaz de reproduzir com precisão todos os tipos de materiais, texturas e cores presentes em objetos de museus e arquivos.

Essas possibilidades destacam a relevância de se pensar a aplicação das tecnologias de digitalização e impressão 3D no fluxo de trabalho das instituições patrimoniais. Além dos cenários em que já vêm sendo aplicada e pesquisada, podem ser úteis para uma gama muito mais ampla de possibilidades de que tradicionalmente têm-se acesso a elas. Nesse sentido, a proposta aqui apresentada se caracteriza pela investigação do potencial da impressão 3D na preservação do patrimônio, bem como das vantagens que sua aplicação pode apresentar no fluxo de trabalho das instituições de guarda, em especial dos museus.

3.2 PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

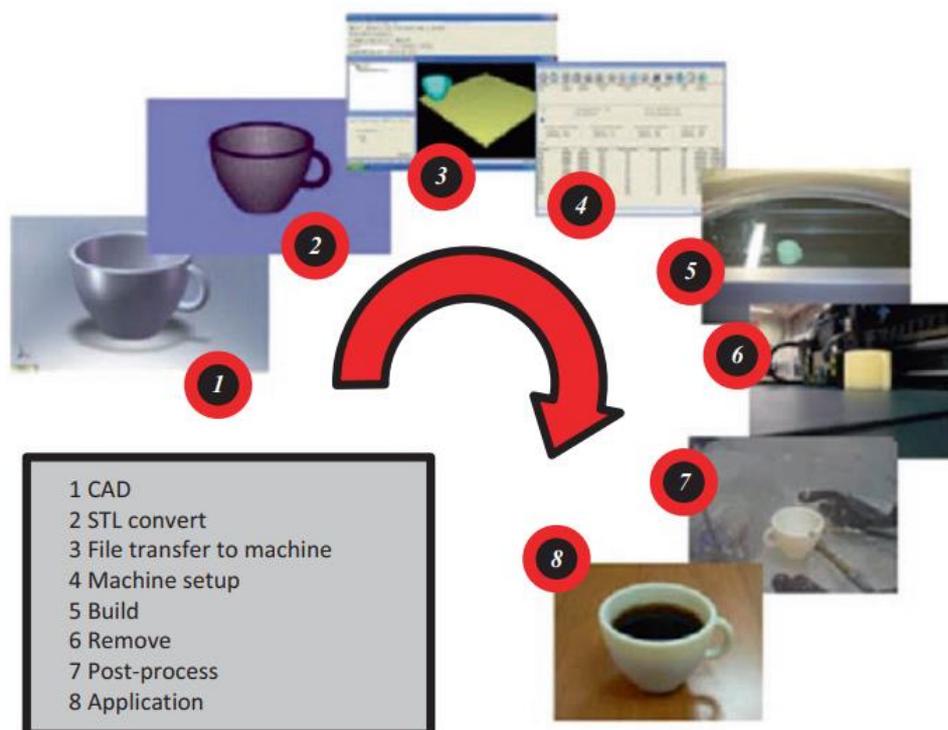
Conforme descrito previamente, todas as tecnologias de MA adotam a mesma abordagem básica e são caracterizados por uma cadeia de processos, utilizando-se de informações computacionais de geometria que contém informações que delimitarão a maneira como a fabricação por camadas ocorrerá. Esse processo envolve uma série de etapas que vão desde a criação de um CAD¹⁵ até a peça física resultante. Gibson et al. (2021) delimitam este processo em oito etapas, conforme Figura 16. Há ainda autores que consideram como cinco etapas: modelagem 3D, conversão e transmissão de dados, verificação e preparação, construção e pós-processamento.

Assim como em outros processos de fabricação, é necessário planejamento antes do início da Impressão 3D, pois é importante conhecer exatamente a cadeia de processo padrão e o fluxo de dados entre CAD e MA. Também deve haver conhecimento do nível de aplicação do produto final e a interação com a cadeia de processos da MA e o projeto CAD, para que os vários fatores e parâmetros que influenciam o desempenho de cada operação sejam examinados e decididos (GEBHARDT; KESSLER; THURN, 2018).

O ponto de partida do processo de impressão portanto é a modelagem 3D, ou seja, a criação de um modelo digital 3D a partir de um *software* que descreva completamente a geometria do objeto a ser impresso. Pré-requisito geral nos processos de MA, é geralmente a parte mais demorada de toda a cadeia de processo, já que um conjunto de dados 3D completo e sem erros é indispensável para dar continuidade ao processo de impressão (CHUA; LEONG; LIM, 2017).

¹⁵ Abreviatura para o termo em inglês *Computer Aided Design*, que se trata de uma tecnologia para design e documentação técnica que substitui o desenho manual por um processo automatizado (AUTODESK, [s.d.]).

Figura 16 – Processo de impressão 3D comum a todas as técnicas.



Fonte: Extraído de GIBSON et al. (2021, p.5).

Segundo Aguiar (2016, p. 118), a modelagem 3D

é o processo de desenvolver ou obter uma representação digital em três dimensões do objeto que se deseja construir com a impressora 3D. O modelo 3D pode ser feito a partir do zero, utilizando um software de modelagem 3D como o SketchUp, ou obtido, por exemplo, em sites dedicados ao compartilhamento de modelos. Outra maneira de desenvolver a modelagem é com a utilização de técnicas de digitalização 3D de objetos reais, que podem ser realizadas desde o uso de câmeras digitais, sensores de movimento de videogames e scanners 3D dedicados a esta operação.

Devido ao crescente uso da manufatura aditiva por particulares ou por profissionais cuja atividade principal não é no campo de AM, sistemas CAD fáceis de manusear e conjuntos de dados 3D prontos para uso são cada vez mais importantes. Assim, a modelagem 3D pode envolver o uso de quase qualquer *software* de modelagem 3D, visto que há uma variedade de *softwares* disponíveis, tanto pagos quanto gratuitos, mas é necessário que a saída seja de um objeto 3D ou uma representação de sua superfície. Alternativamente, um scanner e outros processos para a geração de imagens digitais também podem ser aplicados.

Conforme explicam Chua, Leong e Lim (2003) em seu livro sobre Prototipagem Rápida, o modelo que representa a parte física a construir deve ser representado como superfícies fechadas que definam inequivocamente um volume fechado, ou seja, os dados devem especificar o interior, o exterior e o limite do modelo. Isso porque esse requisito garantirá que

todas as seções transversais horizontais essenciais para a impressão sejam curvas fechadas para criar o objeto sólido.

Uma vez que o modelo esteja pronto, deve ser salvo em formato de arquivo STL¹⁶, que conterá um conjunto de instruções para as impressoras com todas as informações geométricas necessárias para representar o modelo digital. Há no mercado diversos *softwares* disponíveis para realizar essa primeira etapa e citamos alguns dos mais conhecidos no Quadro 1.

Quadro 1 – Softwares para modelagem 3D.

Software	Usuário	Disponibilidade	Plataforma
Blender	Avançado/Profissional	Gratuito	Windows, macOS, Linux
SolidWorks	Profissional	Licença	Windows
Zbrush	Intermediário/Avançado	Licença	Windows, macOS
Fusion 360	Intermediário/Profissional	Gratuito	Windows, macOS
Tinkercad	Iniciante	Gratuito	Web (Navegador)
Meshmixer	Intermediário	Gratuito	Windows, macOS

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da modelagem, também é possível realizar o escaneamento 3D da peça que se pretende imprimir, caso já exista um modelo físico, pois esta tecnologia permite capturar a geometria física de um objeto no mundo real e transformá-la em um modelo digital tridimensional. Esse modelo digital pode, então, ser utilizado como base para a impressão 3D.

Existem várias técnicas de escaneamento 3D disponíveis, que variam em termos de princípios de funcionamento e precisão, sendo as principais:

- **Escaneamento por luz estruturada:** Nessa técnica, um projetor ou uma fonte de luz emite padrões estruturados sobre o objeto. A deformação desses padrões é capturada por uma câmera, permitindo a reconstrução da forma tridimensional do objeto.
- **Escaneamento por fotogrametria:** Nessa abordagem, várias fotografias do objeto são capturadas a partir de diferentes ângulos. O software de escaneamento 3D analisa as sobreposições entre as imagens e utiliza algoritmos de correspondência para calcular a geometria 3D.
- **Escaneamento por luz laser:** Nesse método, um feixe de luz laser é projetado no objeto e mede-se o tempo que o laser leva para refletir de volta ao sensor. Essas medições são usadas

¹⁶ Este formato é originário da 3D Systems, pioneira no método da Estereolitografia.

para calcular a distância entre o objeto e o sensor em diferentes pontos, criando assim um modelo 3D.

Após o processo de escaneamento, o modelo 3D resultante pode passar por um processo de pós-processamento para remover quaisquer imperfeições ou ruídos. Em seguida, o modelo é exportado para o formato adequado para impressão 3D.

Uma outra forma de imprimir em 3D é encontrar modelos *online* que outras pessoas já criaram e compartilharam na internet. A comunidade de impressão 3D *online* está crescendo o tempo todo, então cada vez mais coisas estão sendo compartilhados todos os dias. Um dos repositórios mais conhecidos é o Thingiverse, uma comunidade social ativa para compartilhar modelos 3D.

Uma vez que se tenha o modelo 3D, ele pode ser importado para um software de fatiamento (*slicing*), onde são configurados parâmetros como orientação, densidade de enchimento e resolução de camadas. O software divide o modelo em fatias horizontais e, no caso da impressão FDM/FFF, gera um arquivo G-code, que contém as instruções necessárias para a impressora 3D seguir durante o processo de impressão.

Quando guardado num arquivo STL, pode acontecer do modelo apresentar erros, como furos e camadas sobrepostas, por exemplo. Para isso existem *softwares* dedicados a reparações, como o Netfabb, MeshFix, ReMESH e MeshLab.

Figura 17 – Um modelo CAD à esquerda convertido em formato STL à direita.



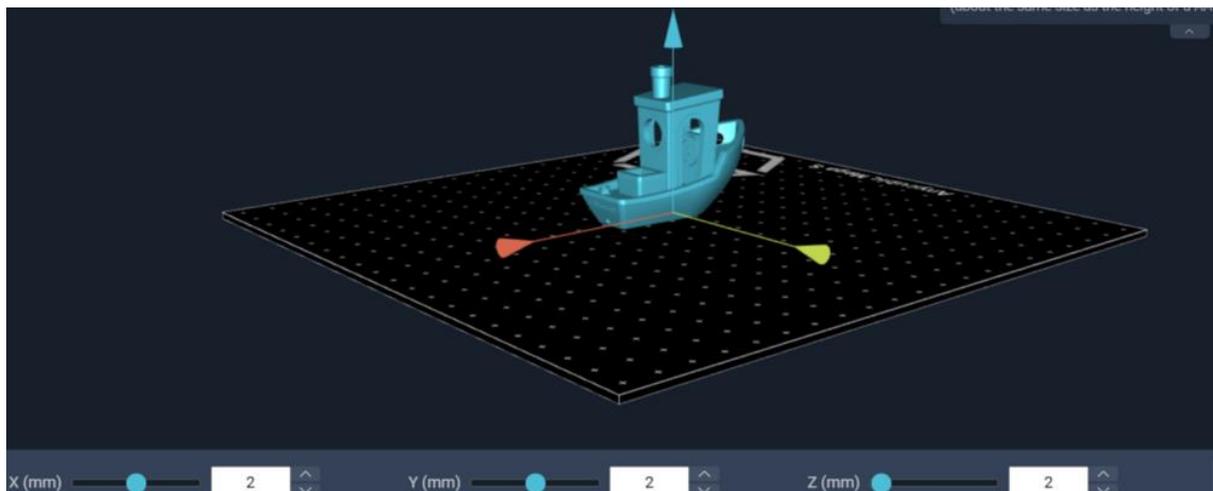
Fonte: GIBSON et al. (2021, p.25).

Independentemente de como o conjunto de dados 3D é gerado – via escaneamento 3D ou modelagem digital –, depois de reparado a próxima etapa consiste em sua estratificação por meio de um *software* intermediário conhecido como *slicer* – ou fatiador – que decompõe a peça em camadas – *layers*.

Uma vez que o arquivo STL seja carregado no *slicer*, o primeiro passo a ser definido é a orientação, ou seja, é preciso alinhar o modelo 3D dentro da plataforma de construção em

relação a eixos X, Y, Z conforme observado na Figura 18. Posteriormente definem-se todos os parâmetros de impressão.

Figura 18 – Definindo a orientação no software Slicer.



Fonte: FABHEADS [s.d.].

Como resultado, o arquivo previamente salvo em formato .stl que descreve a peça será então convertido e exportado em um formato de arquivo G-Code contendo um conjunto de dados de contorno (x-y), dados de espessura (dz) e o número da camada (ou coordenada z) de cada camada e que é responsável por transmitir as informações a serem interpretadas e executadas pela impressora 3D. O arquivo G-Code é uma linguagem de programação de controle numérico computadorizado (CNC) que controla o movimento do bico através de combinações alfanuméricas. Isso significa que o *software* efetua os cálculos necessários para saber a altura de cada camada, o caminho que a ferramenta deverá efetuar, assim como a quantidade de material necessária para a impressão da peça (GEBHARDT, 2011; 3D PRINTING INDUSTRY, 2014). Visualmente falando, o modelo 3D será convertido em inúmeras camadas, conforme observado na Figura 19.

Figura 19 – Imagem de um modelo digital CAD seguido de imagens com camadas de tamanhos diferentes.



Fonte: GIBSON et al. (2021, p.3).

De um modo geral, fatiar significa justamente converter o arquivo do modelo 3D em uma linguagem de máquina que pode ser reconhecida pela impressora, e para isso também há distintos softwares que realizam essa etapa, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Softwares fatiadores para impressora 3D.

Software	Disponibilidade	Sistema Operacional
Cura	Gratuito/Licença	Windows, macOS, Linux
Simplify3D	Licença	Windows, macOS
PrusaSlicer	Gratuito	Windows, macOS, Linux
Slic3r	Gratuito	Windows, macOS, Linux
Repetier	Gratuito	Windows, macOS, Linux
Z-SUITE	Gratuito	Windows, macOS
MakerBot Print	Gratuito	Windows, macOS

Fonte: Adaptado de ALL3DP [s.d.].

O *software* de fatiamento também desempenha outras quatro tarefas importantes: posicionar o modelo de forma ideal para a impressão; criar estruturas de suporte para garantir a estabilidade do objeto durante a impressão; gerar a estrutura de preenchimento; selecionar os parâmetros de impressão. O modelo 3D então pode ser parcialmente modificado durante esta etapa, para que tenha o tamanho, posição e orientação corretos para a impressão, visto que neste momento são definidos os parâmetros de impressão de acordo com as necessidades do projeto,

do tipo de tecnologia utilizado e do tipo de material definido. Para maior compreensão, essas configurações serão melhor detalhadas adiante.

Quando a tarefa de posicionamento é realizada adequadamente, por exemplo, em alguns casos, pode eliminar a necessidade da criação de estruturas de suporte. A utilização dessas estruturas não apenas economiza material, mas também reduz o tempo de impressão. Dependendo da aplicação específica, a densidade de enchimento, a orientação da estrutura e a espessura da parede devem ser cuidadosamente selecionadas. Já em outros casos, não é necessário preencher completamente o interior de um objeto do ponto de vista estrutural. Em vez disso, os *softwares* de fatiamento utilizam estruturas que ocupam uma determinada porcentagem do espaço vazio, o que é conhecido como densidade de enchimento (FERNANDES, 2016).

Uma vez que sejam definidos todos os parâmetros, é iniciada a etapa de impressão. A construção da peça é em grande parte um processo automatizado e pode levar várias horas para construir, dependendo do tamanho e do número de camadas necessárias. Durante a impressão recomenda-se um monitoramento superficial da máquina para garantir que nenhum erro tenha ocorrido, como falta de material, falhas de energia ou software, bico entupido ou vazando, empenamento da peça etc. (GIBSON et al., 2021).

Vale ressaltar que as peças produzidas por meio da tecnologia de camadas mostram o chamado efeito de escada, conforme exemplificado na Figura 20. A quantidade de seções em que o modelo é dividido está diretamente relacionada à resolução da impressora. Quanto maior for a resolução, menor será a espessura da camada que pode ser impressa, o que resulta em um maior número de seções para o modelo. Uma resolução mais alta geralmente leva a um acabamento superficial mais refinado (FERNANDES, 2016).

Figura 20 – Princípio das camadas nos objetos impressos em 3D.



Fonte: GEBHARDT (2011, p. 4).

3.3 FUNCIONAMENTO DE UMA IMPRESSORA 3D FDM/FFF

As impressoras FDM podem apresentar diferentes arquiteturas e tamanhos, conforme observado na Figura 21. Usualmente, esta estrutura suporta a placa de controle, a fonte, a mesa e o cabeçote de injeção que também pode ser chamado de extrusora (CABREIRA, 2018).

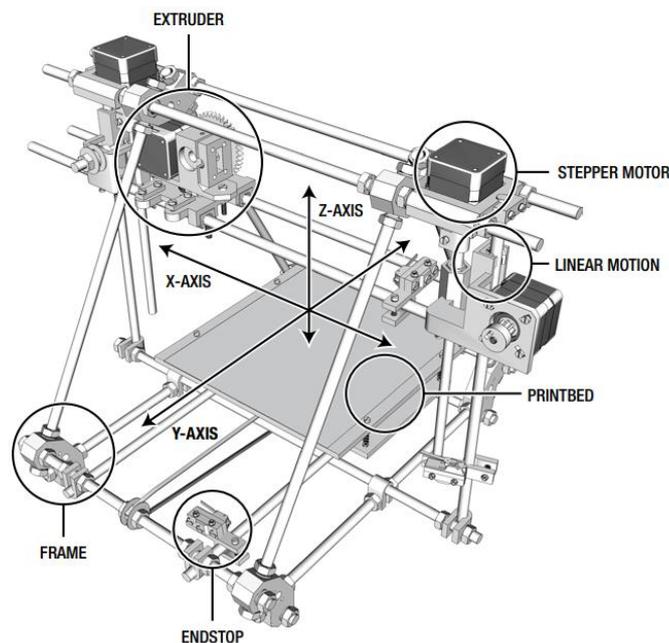
Figura 21 – Diferentes tipos de impressora 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A estrutura deve ser firme e possibilitar a livre movimentação do cabeçote e da mesa, quando ocorre, de maneira a diminuir o erro de posicionamento. Na Figura 22 encontra-se um esquema básico de uma impressora 3D onde é possível visualizar as partes componentes.

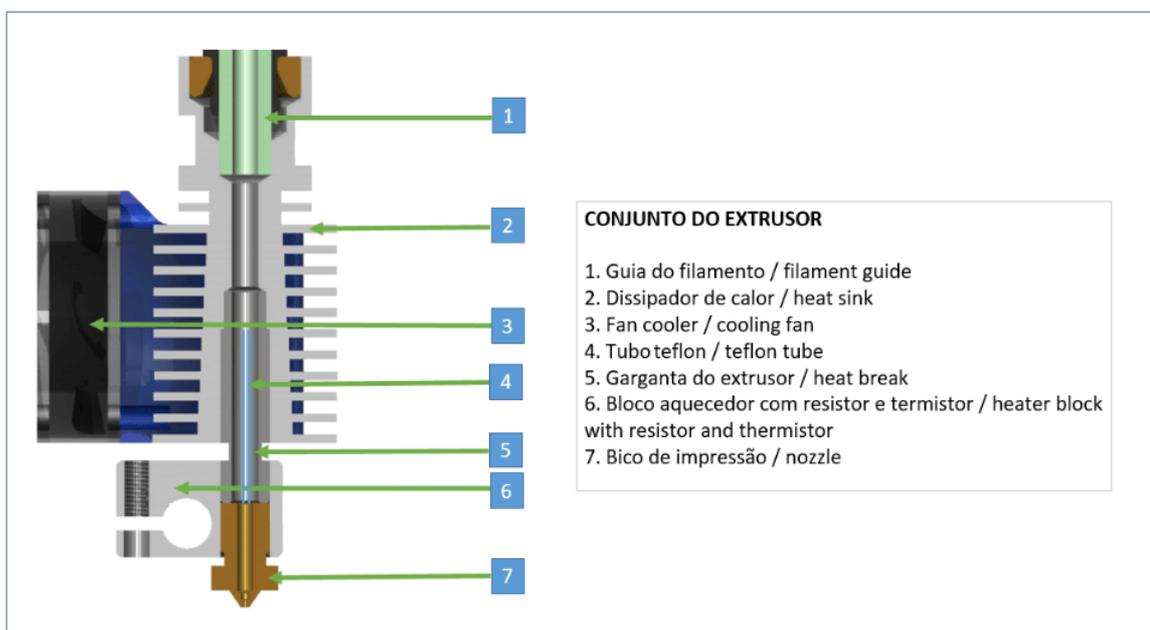
Figura 22: Como uma impressora 3D funciona.



Fonte: EVANS (2012, p 2).

A parte que efetivamente extruda o material e dá forma ao objeto também possui diferentes modelos. A cabeça de extrusão é o componente responsável pela transformação de um material sólido em um moldável e pode-se movimentar no plano X-Y, no X-Z ou no Y-Z, sendo que a escolha do plano varia de empresa para empresa, e até mesmo de impressora para impressora. Durante o processamento, o material entra no estado sólido numa das extremidades deste componente, chamada de *cold end*, e por ação do calor gerado por uma resistência elétrica ele é aquecido ao seu estado viscoso, na parte conhecida como *hot end*, sendo seguidamente extrudado pelo bico – ou *nozzle* – que se encontra na outra extremidade da cabeça de extrusão. A rosca força o material por uma matriz, tomando a forma do produto de maneira contínua, mas limitada a seções transversais (FERNANDES, 2016; CABREIRA, 2018). A Figura 23 demonstra esquematicamente as partes componentes do conjunto extrusor.

Figura 23: Partes componentes do cabeçote de extrusão.



Fonte: 3DLAB (2019).

O bico de impressão é um componente muito pequeno que desempenha um papel vital na impressora 3D, tendo um impacto significativo no tempo e na qualidade da impressão. Estão disponíveis em vários diâmetros, tamanhos e materiais e o diâmetro interno do bico é o que afetará a quantidade de plástico extrudado por segundo, o fluxo e a qualidade final da peça. Especificamente, o diâmetro do bocal determina a altura da camada, diâmetros menores possibilitam peças com melhores qualidades dimensionais e acabamento, mas levam a maior tempo para a fabricação da peça. Já matrizes de maior diâmetro possibilitam maiores velocidades a um custo maior de acabamento (IMPRESORA3D, [s.d.]).

Figura 24 – Diferentes tamanhos do diâmetro do bico extrusor.



Fonte: Acelera3D [s.d.].

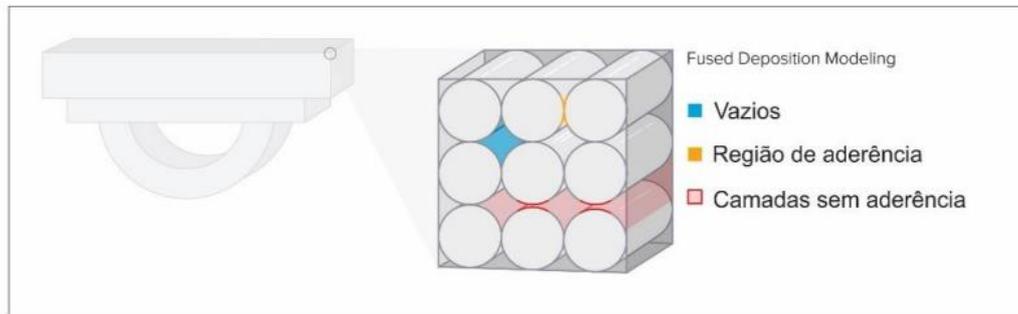
O material extrudado pelo cabeçote é, então, depositado em uma primeira camada sobre uma mesa preparada para recebê-lo, de acordo com o contorno definido e a espessura delimitada. Usualmente a mesa, conhecida como *heated bed*, é aquecida para proporcionar maior aderência das primeiras camadas e prevenir que o material sofra empenamento durante o processo, mas é mantida sob uma temperatura inferior à do material, de forma que o filamento resfrie rapidamente, endurecendo e ganhando forma. Em algumas impressoras a mesa é estacionária e apenas a extrusora se move, mas em outras esta se move nos eixos X-Y enquanto a mesa se movimenta na direção Z (FERNANDES, 2016; CABREIRA, 2018).

Depois de imprimir os contornos, a extrusora preenche a área interna com padrões de preenchimento. Após completar o ciclo a plataforma se abaixa ligeiramente – ou o cabeçote de extrusão sobe ligeiramente – e a matriz de extrusão deposita uma segunda camada sobre a primeira, repetindo o processo camada por camada na área de impressão, crescendo de baixo para cima, até que a peça seja finalizada. Devido à deposição em linhas, podem ocorrer alguns efeitos no processo, ausentes nos processos convencionais, como a formação de vazios entre as linhas de deposição, como observado na Figura 25, mesmo quando o preenchimento da peça é ajustado para 100%. A maioria dos defeitos, no entanto, podem ser eliminados ou reduzidos usando uma boa combinação de parâmetros de processamento.

Uma vez que a máquina tenha concluído a impressão, as peças devem ser removidas. É importante garantir que as temperaturas de operação sejam suficientemente baixas ou que não há partes ativamente móveis antes da retirada da peça. Depois de removidas, a tarefa final na cadeia de processo é a tarefa de pós-processamento. Neste estágio, geralmente algumas operações manuais são necessárias, pois as peças podem exigir uma limpeza adicional antes de estarem prontas para uso, podem ter recursos de suporte que devem ser removidos ou exigirem

preparação e pintura para dar uma textura e acabamento de superfície (CHUA; LEONG; LIM, 2003; GIBSON et al., 2021).

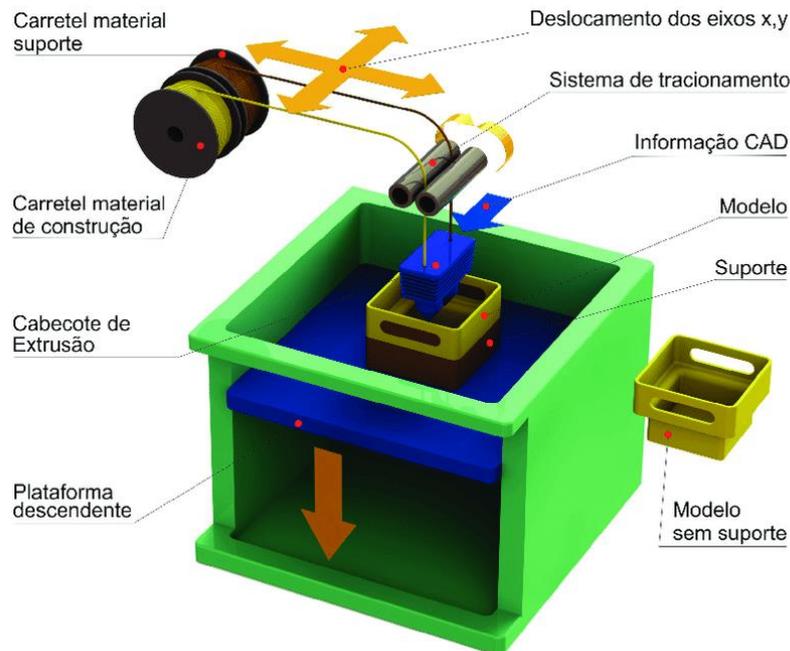
Figura 25 – Linhas de deposição de filamento.



Fonte: CABREIRA (2018, p. 30).

O pós-processamento pode ser caro, trabalhoso e demorado se os requisitos de acabamento forem muito exigentes. Ressalta-se, no entanto, que diferente de outros métodos de MA, a tecnologia FDM/FFF, foco deste trabalho, não requer obrigatoriamente limpeza e nem pós cura após a impressão.

Figura 26 – Esquema ilustrativo da tecnologia de Impressão 3D FFF.



Fonte: ALENCAR, BÁRTOLO (2012).

Uma das principais limitações atuais do FDM, e da manufatura aditiva em geral, é o pequeno volume de construção que o processo permite. Embora existam impressoras com volumes de construção maiores, a maioria das impressoras comerciais tem volumes de

construção inferiores a 30 cm × 30 cm × 30 cm. Da mesma forma, a maioria das impressoras possuem eixo de coordenadas cartesianas.

Tipicamente, as impressoras FDM Cartesianas têm um leito de construção maior, mas uma dimensão de construção menor na direção da altura. A distribuição do volume de impressão é importante, pois pode limitar as orientações possíveis para uma determinada parte, ainda mais levando em consideração que uma das vantagens da MA é evitar montagens desnecessárias ao imprimir componentes como uma única peça. No entanto, o volume limitado do objeto construído pode forçar a divisão do projeto em partes menores e, conseqüentemente, adicionar etapas de montagem ao processo de fabricação (ALAFAGHANI; QATTAWI; ABLAT, 2017).

Uma outra vantagem dessa tecnologia é que ela elimina o tempo necessário até o início da produção para o projeto e produção do molde ou para a configuração da linha de produção. No entanto, o próprio processo de fusão é muito lento. O tempo de impressão é estimulado por muitos fatores, como a velocidade do eixo que controla a extrusora, a espessura da camada e a orientação da peça. A maioria das impressoras FDM comerciais possuem extrusoras que podem se mover a velocidades de até 200 mm/s ou mais.

No entanto, durante a extrusão, uma velocidade de 80 mm/s ou inferior é geralmente usada para melhorar a qualidade das peças. O tempo de fusão também é determinado pela espessura da camada; quanto menor for a espessura da camada, maior será o tempo. Além disso, evitar a necessidade de suportes pode reduzir significativamente o tempo também. Isso pode ser feito eliminando recursos desnecessários que precisam de suporte ou escolhendo uma orientação de construção apropriada que minimize a necessidade de suporte.

3.3.1 Parâmetros para impressão 3D

Os parâmetros de impressão 3D são configurações específicas que determinam como uma peça será impressa. São relatados na literatura como o fator crucial que determina a qualidade e o comportamento do produto final. Eles afetam diretamente a qualidade, precisão e características físicas da peça final, pois podem afetar o encolhimento, a aderência entre as camadas e o empenamento já que a resistência da peça e sua rigidez dependem da resistência da fusão e ligação entre o preenchimento extrudado e os espaços de ar que os separam. É importante ajustar esses parâmetros com cuidado, levando em consideração o tipo de material,

o tamanho da peça e os requisitos específicos do projeto. Os parâmetros essenciais do processo são mostrados na Figura 26.

Conforme afirmam Mohamed, Masood e Bhowmik (2015), a chave do processo de manufatura aditiva depende da seleção adequada dos parâmetros do processo. Uma vez que os parâmetros de impressão 3D serão diferentes dependendo do tipo de tecnologia utilizada e do tipo de material, compreende-se que determinar as melhores condições do processo é uma tarefa importante para garantir a qualidade dos produtos, melhorar a precisão dimensional, evitar desperdícios, aumentar as taxas de produtividade e reduzir o custo e o tempo de produção.

Kumaresan et al. (2022), também identificaram em seu trabalho que o notável desempenho dos produtos FDM depende da seleção adequada dos parâmetros de impressão durante a fabricação. Devido à disponibilidade de vários parâmetros concorrentes, a influência na precisão da variável e nas propriedades do material varia. Os autores ainda complementam que esse é um processo complexo, pois é difícil determinar os parâmetros adequados devido à presença de muitos parâmetros conflitantes que influenciarão a qualidade da peça e as propriedades do material.

Dependendo do processo de impressão, dos materiais e das condições de processamento, as taxas de resfriamento, gradiente de temperatura e taxas de solidificação podem variar significativamente, o que pode produzir uma ampla variedade de estruturas, morfologias e texturas. As peças impressas geralmente sofrem de defeitos como porosidade e rachaduras que degradam as propriedades mecânicas, a qualidade e dificultam a manutenção dos componentes.

Diversos projetos de pesquisa e desenvolvimento vêm sendo realizados com foco na análise e influência dos diferentes parâmetros para fornecer uma melhor compreensão da ciência e tecnologia da impressão 3D para fazer peças de alta qualidade de maneira econômica e eficiente em termos de tempo e gasto de materiais. A pesquisa de Wu et al. (2020), por exemplo, investigou o desempenho das peças a partir de fatores como densidade de preenchimento, espessura da camada e o ângulo de impressão.

O trabalho de Hibbert et al. (2019) explorou que a resistência da peça é afetada pelas densidades de preenchimento, assim como o ângulo de impressão também é um dos parâmetros que afeta o módulo de tenacidade. Já Ma et al. (2020), observaram por meio da impressão 3D de cubos em diferentes preenchimentos, nas proporções de 20, 40, 60 e 80%, e padrões – alveolares, triangulares e retilíneos –, que o padrão de favo de mel apresentou o melhor resultado de absorção de energia em comparação com os outros, bem como a taxa de absorção de energia aumenta conforme a densidade de preenchimento. Christiyan et al. (2016) testaram o efeito da espessura da camada e velocidade de impressão e concluíram que o material

apresenta um melhor desempenho quando impresso em baixa velocidade e com menor espessura de camada.

Figura 27 – Parâmetros de Impressão 3D.



Fonte: Adaptado de KUMERASAN et al., 2022.

Outro trabalho que testou a relação do desempenho mecânico em relação a diferentes padrões de preenchimento foi o de Lubombo e Huneault (2018). A partir da impressão de peças teste em cinco padrões de preenchimento diferentes, os autores observaram que a estrutura com padrão de preenchimento em cubos apresentou as melhores propriedades mecânicas com relação à resistência à tração e a estrutura de preenchimento hexagonal apresentou as melhores propriedades de flexão em relação à resistência à flexão. Já o trabalho de Yeoh et al. (2020)

focou nos padrões de preenchimento concêntrico, grade e zigue-zague e concluiu que o padrão em grade também demonstrou uma maior resistência nos testes em comparação com os outros, o que pode ser atribuído à forte ligação e adesão entre as camadas impressas, exigindo, portanto, uma maior quantidade de força para quebrar a ligação. E em um outro estudo foi verificado por John et al. (2023) que o parâmetro que mais afeta as propriedades mecânicas da peça é o diâmetro do bocal seguido dos padrões geométricos. Os resultados de Assis et al. (2019) concluíram que a escolha adequada entre material polimérico e a respectiva orientação de deposição de material pode definir a tensão máxima suportada pela peça, possibilitando diferentes combinações, com diferentes resistências mecânicas.

Muitos pesquisadores investigaram o efeito dos parâmetros do processo FDM nas propriedades da peça final e a literatura disponível discute melhorias no processo. Apesar dos estudos, no entanto, ainda há uma lacuna em como a combinação dos parâmetros afetam o resultado. É um processo complexo que apresenta muita dificuldade na determinação dos parâmetros ideais devido à presença de muitos parâmetros conflitantes que influenciarão a qualidade da peça e as propriedades do material. Por isso torna-se difícil pré-estabelecer os parâmetros a serem utilizados, visto que variam de acordo com as necessidades de cada projeto (ALAFAGHANI, QATTAWI, ABLAT; 2017). Isso significa que o processo se torna um procedimento experimental, sendo os testes efetuados por meio da modificação dos parâmetros do processo. Tonatto (2017, p. 60) ressalta que a dificuldade aumenta porque, em geral, os “fabricantes de matéria-prima e equipamentos disponibilizam poucas informações sobre condições ideais para a fabricação, repetibilidade e qualidade do produto”.

À luz da revisão da literatura, identificou-se que os parâmetros de maior influência na qualidade das peças impressas e mais comumente estudados para FDM, e que serão abaixo descritos, são: orientação de construção, ângulo de varredura, espessura da camada, densidade de preenchimento, velocidade de impressão, temperatura de extrusão e padrão de preenchimento.

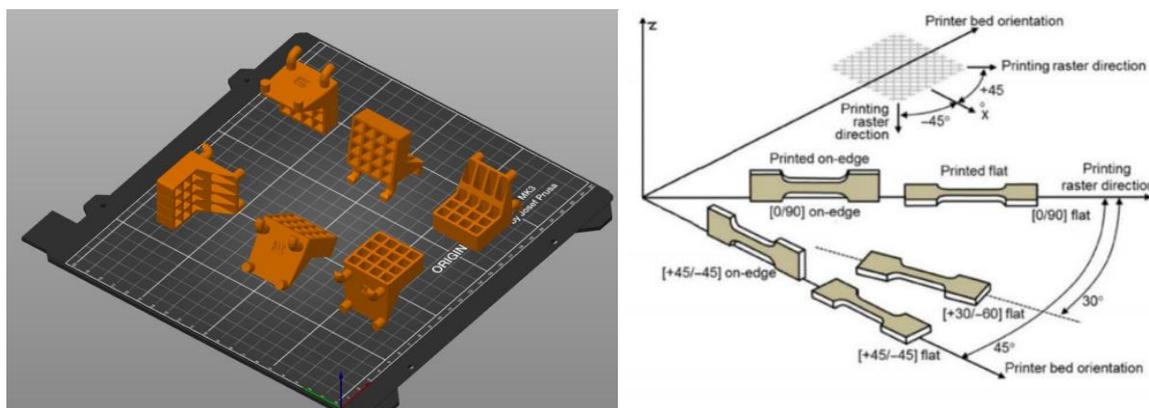
3.3.1.1 Orientação de construção

A orientação de construção é o primeiro parâmetro de pré-processamento a ser pensado, pois refere-se à maneira como a peça é orientada dentro da plataforma de construção em relação aos eixos X, Y, Z, ou seja, é a maneira como a peça estará em contato com a mesa (SILVA, 2022). Alguns exemplos de diferentes orientações de construção são mostrados na Figura 28.

Como a impressão 3D FFF imprime camada por camada, determinar a orientação da impressão no início do processo ajuda a direcionar as escolhas de design, alinhamento e ajuste,

já que as propriedades mecânicas são anisotrópicas, o que significa que diferem dependendo de sua direção e isso afeta diretamente a localização das saliências – e se o projeto precisará de suporte ou não. Isso pode afetar o tempo geral de impressão, o tempo de pós-processamento necessário para remover o material de suporte e o acabamento da superfície de certas faces (TAUFIK; JAIN, 2014).

Figura 28 – Orientação de impressão.

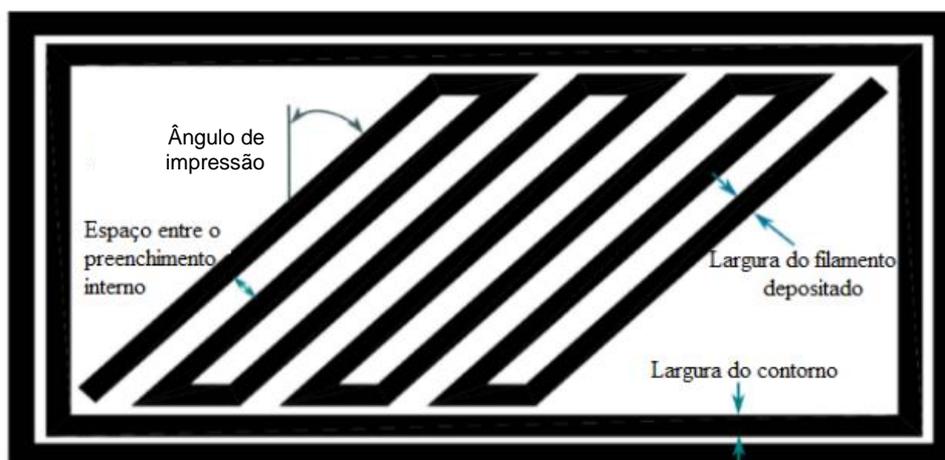


Fonte: ALL3DP [S.D.]; KUMARESAN et al. (2022, p. 21).

3.3.1.2 Ângulo de impressão

O ângulo de impressão – *raster angle* – determina a orientação de cada camada ao imprimir a forma desejada. A Figura 29 mostra como é utilizado na impressão. O ângulo de impressão geralmente varia de 0° a 90° , sendo os ângulos mais utilizados ($0^\circ/90^\circ$) e ($45^\circ/-45^\circ$). No entanto, é possível controlar essa variável para cada camada, seja em um ângulo específico ou em um ângulo diferente. Este parâmetro interfere diretamente na resistência a tração, fornecendo à peça diferentes comportamentos diante dos esforços a que ela será submetida. Há, no entanto, uma divergência quanto qual orientação ao longo do eixo da peça apresenta melhores resultados nos ensaios de impacto. As diferenças nos modelos CAD e em outros parâmetros têm levado a interpretações diferentes entre os diversos autores (CABREIRA, 2018; KUMARESAN et al., 2022).

Figura 29 – Ângulo de impressão e largura do filamento.



Fonte: ALAFAGHANI et al. (2017).

3.3.1.3 Largura do filamento

A largura de varredura – *raster width* – é o tamanho da deposição da gota de material do produto. Essa largura geralmente é de 1,2 a 1,5 vezes o diâmetro da ponta de impressão. A Figura 29 mostra a largura do filamento depositado, que varia de acordo com o diâmetro do bico. Assim, um valor de largura reduzida leva a uma melhoria na resistência e a uma redução no tempo de construção. Sood et al. (2012) relataram que um menor valor de largura do *raster* permite obter melhor acabamento da superfície superior e precisão dimensional.

3.3.1.4 Espessura da camada

A espessura ou altura da camada – *layer thickness* – é uma das características geométricas mais importantes de um objeto. A espessura de cada camada de material depositada durante a impressão e impacta diretamente na resolução do objeto, visto que camadas com menor espessura fornecem alta resolução e superfície lisa. Em contrapartida, o tempo total de impressão tende a ser maior (Figura 30).

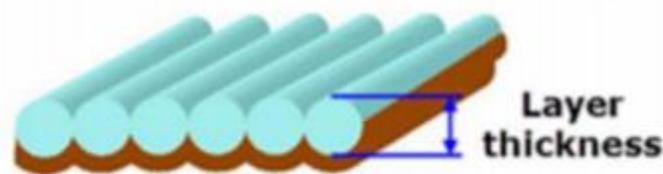
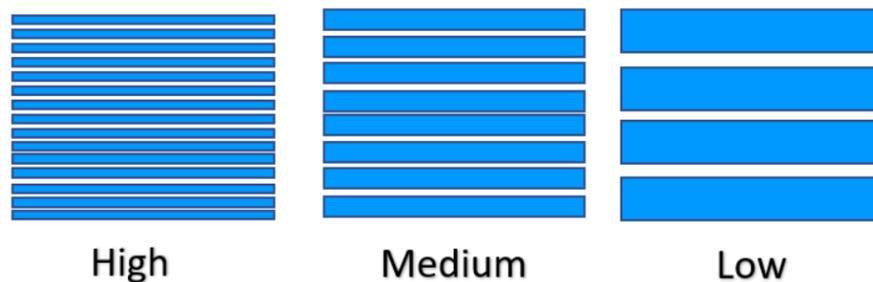
Esse valor dependerá do material e do tamanho do bico extrusor utilizados. A espessura padrão da camada é de cerca de 0,1 mm e o normal para a impressão 3D é o bico de 0,4mm, comumente utilizado pela maioria dos fabricantes deste tipo de equipamento. Este bico pode fornecer uma boa resolução e uma velocidade aceitável de produção.

Um diâmetro menor consegue produzir linhas menores e, portanto, mais qualidade, porém pode levar muito mais tempo, já um diâmetro maior possui menos qualidade e mais velocidade. Ressalta-se que há ainda outros fatores a serem considerados na escolha do bico, como diâmetro para entrada do filamento, altura do bico e o material de que é feito. A escolha

do tipo de bico é importante para evitar erros, vazamentos e entupimentos, já que alguns dos problemas de qualidade das peças fabricadas pela FFF podem ser influenciados pelas condições do bocal que pode causar desalinhamentos geométricos ou pode levar à falha durante a impressão 3D (KUMARESAN et al., 2022).

Figura 30 – Comparação do tamanho das camadas.

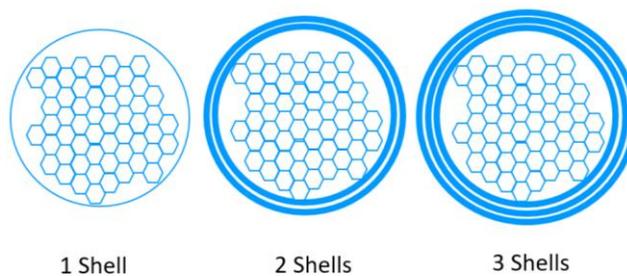
Resolution	Layer Height	Relative Print Time
Low	0.3mm-0.4mm	Short
Medium	0.2mm-0.3mm	Medium
High	0.1mm-0.2mm	Long



Fonte: Acelera3D [s.d.]; KUMARESAN et al. (2022, p. 21).

A camada externa que constrói a parede do objeto é chamada de invólucro ou perímetro do objeto. A resistência do objeto depende do número de camadas de parede presentes.

Figura 31 – Espessura da camada externa.



Fonte: Fabheads [s.d]

3.3.1.5 Velocidade de impressão

Esse parâmetro define a velocidade na qual o bico de impressão se move sobre a plataforma de construção durante a impressão e pode interferir diretamente em características morfológicas dos modelos impressos, influenciando na aderência entre uma camada e outra do modelo impresso, devido a maneira como o material fundido resfria. Assim, a velocidade de impressão afeta diretamente o tempo de impressão, a qualidade da superfície e a precisão dos detalhes. Além disso, tem um efeito máximo na deformação do produto, pois durante a produção, uma impressão rápida pode induzir tensões residuais substanciais (CABREIRA, 2018). Vinitha et al. (2012) examinaram o efeito da velocidade de impressão em peças fabricadas por FDM e relataram que reduzir a velocidade de impressão aumentaria o acabamento da superfície do produto.

Segundo Fernandes (2016, p. 28), a velocidade de impressão se divide em cinco tipos de velocidade diferentes:

- Velocidade da primeira camada: esta não deve ser muito elevada, para proporcionar uma boa adesão do material à cama de impressão.
- Velocidade de enchimento: corresponde à velocidade de impressão das estruturas de enchimento. Esta pode ser um pouco mais elevada.
- Velocidade das paredes de topo e de fundo: esta pode ser igual à da primeira camada.
- Velocidade da parede lateral exterior: é aquela referente ao perímetro exterior da espessura da parede lateral. Esta não deve ser muito elevada, para se obter uma boa qualidade superficial.
- Velocidade da parede lateral interior: é aquela referente aos perímetros interiores que formam o resto da espessura da parede lateral. Esta deve estar compreendida entre a velocidade de enchimento e a velocidade da parede lateral exterior.

3.3.1.6 Temperatura do bico e da mesa de impressão

Uma das configurações mais importantes do *slicer* é a temperatura, crucial para garantir uma boa aderência entre as camadas de material. Essas temperaturas variam de acordo com o tipo de material utilizado. A temperatura de operação é categorizada em temperatura do bico – temperatura de extrusão – e temperatura da mesa. Antes do processo de impressão, é necessário que o bico atinja uma temperatura específica para derreter o filamento e imprimir o produto. Da mesma forma, durante o processo a mesa precisa estar em uma temperatura adequada. Uma temperatura inadequada pode levar a problemas como descolamento da peça da mesa de impressão ou falhas na aderência das camadas.

A temperatura de extrusão afeta a precisão dimensional dos objetos impressos, essencial para a confiabilidade do equipamento em produzir peças de acordo com os resultados esperados e o encaixe nas estruturas projetadas. Temperaturas mais altas determinam um aumento na fluidez do filamento, permitindo que ele se expanda mais livremente e, assim, causando maiores

desvios dimensionais. Além disso, este parâmetro deve ser calibrado de acordo com as configurações de velocidade de impressão. É importante aumentar a temperatura se a velocidade de impressão estiver definida para um número mais alto. Isso porque, se a velocidade de impressão não for compatível com a temperatura, pode ocorrer “extrusão insuficiente” devido ao derretimento inadequado dos filamentos. Além disso, altas temperaturas podem levar a “extrusão excessiva” e resultar em bolhas (FABHEADS, 2021; KUMARESAN et al., 2022).

Outro fator importante a considerar ao controlar a temperatura é o tipo de material utilizado no processo de impressão. Abaixo está uma lista de materiais com valores definidos de temperaturas usadas na impressão 3D.

Tabela 1 – Valores indicados de temperaturas para cada tipo de filamento.

Material	(Nozzle) Extrusion Temperature	Print Bed Temperature
PLA	180 to 230 °C	20 to 60 °C
ABS	210 to 250 °C	80 to 110 °C
PETG	80 to 110 °C	50 to 75 °C
Nylon	240 to 260 °C	70 to 100 °C
TPU	210 to 230 °C	30 to 60 °C.

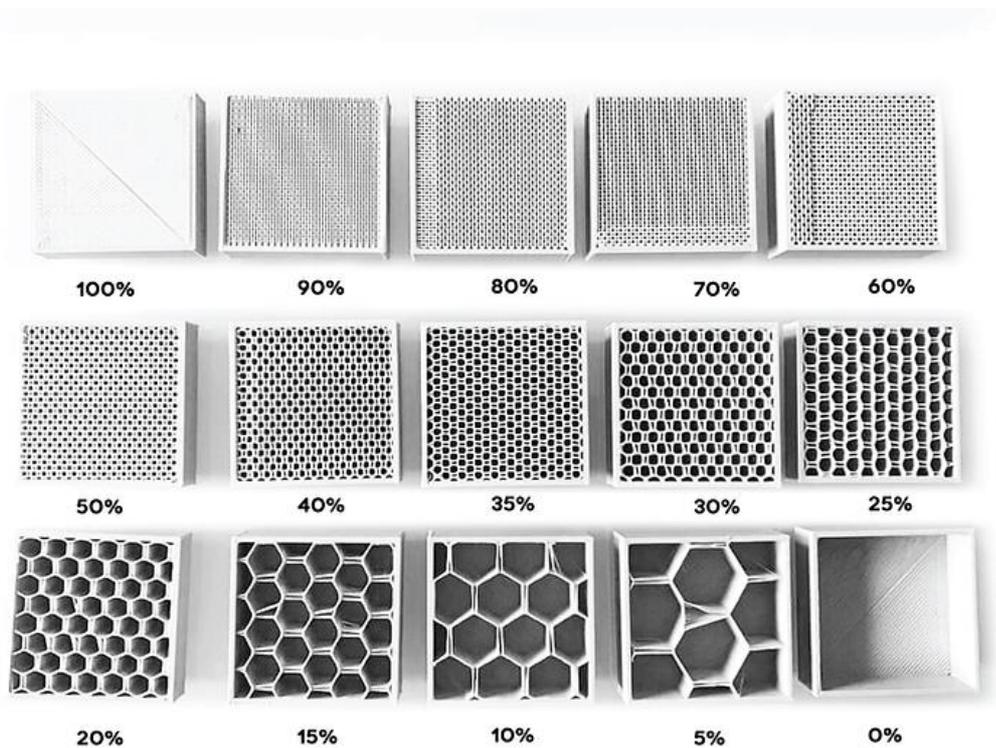
Fonte: FABHEADS, 2021.

3.3.1.7 Densidade de preenchimento

A densidade de preenchimento – *infill* – refere-se à quantidade de material que é depositada dentro da estrutura da peça, ou seja, é toda a parte interna da peça impressa. A densidade varia de projeto para projeto e está associada diretamente à resistência, peso do objeto impresso e duração do tempo de impressão. Um preenchimento mais denso torna a peça mais resistente, mas também aumenta o consumo de material e o tempo de impressão.

O *infill* é extrudado em uma porcentagem que pode variar de 0% a 100%, conforme demonstrado na Figura 32. Fernandes (2016, p. 8) afirma que “os casos extremos dessa escala, 0% e 100%, representam um objeto oco e um objeto totalmente preenchido, respectivamente”. A estrutura sólida então tem alto uso de material e alta resistência à tração, e uma estrutura interna oca, ao contrário, tem menos uso de material, baixa resistência à tração e menos tempo de fabricação.

Figura 32 – Estruturas internas com densidades variadas.

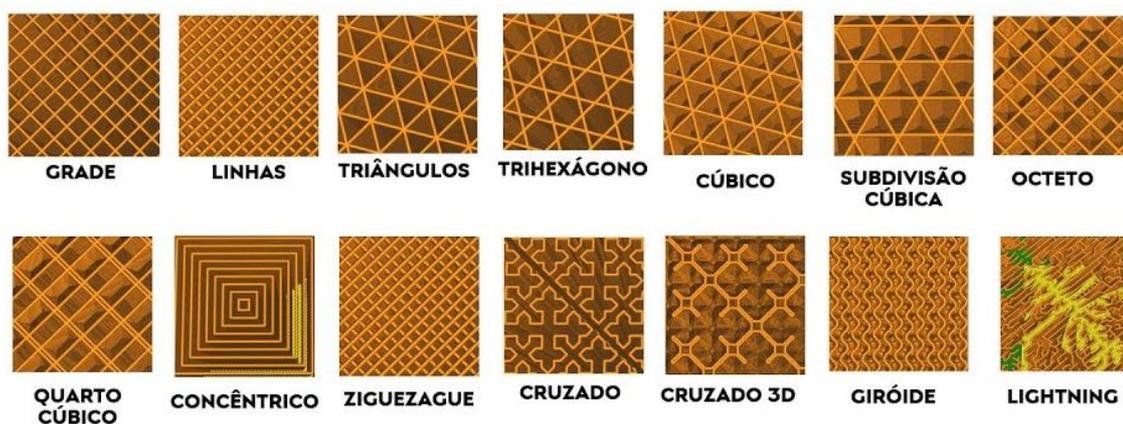


Fonte: IMPRIMALAB [s.d.].

3.3.1.8 Padrão de preenchimento

O padrão de preenchimento é a estrutura, forma e técnica do material dentro da peça e influencia diretamente no tempo de impressão, peso, velocidade de impressão, resistência do objeto e propriedades mecânicas. Há distintos padrões, conforme ilustrado na Figura 33, e o design definido pode ter um impacto na resistência e flexibilidade das impressões 3D.

Figura 33 – Distintos padrões de preenchimento.



Fonte: ENGENHEIRO DE PLANTÃO (2022).

Uma quantidade considerável de pesquisas tem sido realizada nos parâmetros do FDM para melhorar os parâmetros do processo visando aprimorar o acabamento superficial, a precisão dimensional e as características mecânicas dos componentes impressos. Uma vez que os parâmetros do processo são essenciais para melhorar as propriedades mecânicas, o tempo de construção, a precisão dimensional e a rugosidade superficial, diversos pesquisadores propuseram que os efeitos dos parâmetros do processo nas peças produzidas por FDM sejam analisados com designs computacionais adequados e técnicas de otimização para reduzir o esforço experimental e aumentar a viabilidade (KUMARESAN et al., 2022).

De acordo com levantamento feito por Kumaresan et al. (2022), a espessura da camada e a orientação de construção são os fatores mais importantes para a precisão dimensional e a rugosidade superficial do produto. Reduzir a espessura da camada aumentará a precisão dimensional e a rugosidade superficial. Além disso, a baixa velocidade de impressão e a temperatura de extrusão também são fatores importantes para aumentar o acabamento superficial. A orientação de construção determina as propriedades de tração do produto, e a resistência à tração e à flexão é maior em 0°. É recomendado aumentar a densidade de preenchimento e a temperatura de extrusão para aumentar a resistência.

3.4 MATERIAIS UTILIZADOS NA IMPRESSÃO 3D FDM/FFF

De acordo com Fernandes (2016), os materiais mais comumente utilizados na tecnologia FDM são termoplásticos, que são polímeros que apresentam viscosidade suficiente em determinada temperatura para serem moldados em uma ampla variedade de geometrias e mantêm sua forma após o resfriamento. Existem diversos materiais termoplásticos disponíveis para a confecção de filamentos utilizados na impressão 3D por FDM, cada um com características físicas, químicas e mecânicas distintas. Essas características proporcionam diferentes níveis de resistência, durabilidade e flexibilidade aos objetos impressos, tornando a escolha adequada do filamento essencial para garantir a qualidade e as propriedades desejadas do produto final.

Atualmente, os filamentos mais comuns utilizados na impressão 3D por FDM/FFF incluem PLA, ABS e Nylon para a impressão das peças em si, enquanto PVA e HIPS são utilizados como filamentos de suporte devido à sua capacidade de dissolução. Além desses materiais tradicionais, novos filamentos estão sendo desenvolvidos, como TPE (Elastômero Termoplástico) ou TPU (Poliuretano Termoplástico), que oferecem uma elasticidade superior

ao ABS e PLA. Segundo Alafaghani, Qattawi e Ablat (2017), entre os três filamentos mais comuns, o Nylon tem a maior resistência e flexibilidade, seguido do PLA que possui resistência média e menor flexibilidade. Finalmente, o ABS tem a menor resistência acompanhada de maior flexibilidade do que o PLA.

Além disso, os filamentos compostos, que combinam termoplásticos com materiais como fibra de carbono, pó metálico ou fibras de madeira, ampliam ainda mais as propriedades e possibilidades de aplicação dos objetos impressos. A diversidade de materiais está em constante expansão, buscando melhorar a aplicabilidade dessa técnica. No entanto, é importante notar que a maioria dos materiais disponíveis para FDM são limitados a termoplásticos e compósitos com termoplásticos. Essa restrição ocorre devido às limitações das impressoras por extrusão de material comerciais, que geralmente operam em temperaturas de até 300°C. Essa temperatura é necessária para permitir a solidificação rápida do material e garantir que as camadas impressas não percam sua forma. No entanto, devido às baixas temperaturas de fusão e transição vítrea, a maioria dos filamentos comerciais não são adequados para aplicações de alta temperatura acima de 200°C. (ALAFAGHANI, QATTAWI, ABLAT, 2017; KUMARESAN et al., 2022; ROBERSON, 2015).

Apesar das limitações, a variedade de materiais está em constante crescimento, oferecendo uma ampla gama de opções para diferentes aplicações. Além disso, pesquisas e desenvolvimentos constantes estão impulsionando a criação de novos materiais com propriedades aprimoradas, que são reforçados para melhorar o desempenho de impacto e fratura, expandindo ainda mais as possibilidades. Exemplos dos avanços em materiais são os que funcionam em temperaturas mais altas e são quimicamente resistentes, como sulfeto de polifenileno (PPS), polieterimida (PEI), polifenilsulfona (PPSU) e poliéter éter cetona (PEEK), ou os compostos baseados em fibras de vidro, fibras de carbono e nanomateriais dispersos.

Embora a variedade de materiais para FDM esteja em constante crescimento, ainda existem desafios a serem superados. A influência dos parâmetros de processamento nas características do material e a capacidade de processar diferentes materiais ainda são áreas de pesquisa em desenvolvimento. Além disso, as limitações das máquinas de impressão 3D atuais podem restringir a utilização de certos materiais poliméricos.

Uma outra dificuldade é a falta de padronização na disponibilização das informações sobre as propriedades de desempenho desses materiais. Faltam padrões definidos para classificar os materiais ou parâmetros de processamento/fabricação padronizados usados para especificar as propriedades de uma peça final. Embora os fabricantes forneçam algumas informações sobre os testes de propriedades mecânicas, essas informações não são completas.

Alguns fabricantes fornecem parâmetros de impressão, enquanto outros não fornecem nenhum. Conforme ressalta Forster (2015), a qualidade dos materiais antes da impressão não é bem definida e não são relatadas informações sobre a variabilidade da massa molar, viscosidade, presença de vazios, cristalinidade, tipos de aditivos e outras propriedades importantes para uma especificação adequada.

Em suma, a escolha adequada do material termoplástico é fundamental para obter resultados de impressão 3D satisfatórios. Ao escolher o material adequado, também deve-se levar em consideração o ambiente em que a impressora 3D será colocada. Alguns materiais requerem espaços abertos e bem ventilados por serem mais tóxicos, como o ABS, enquanto outros podem ser utilizados em ambientes fechados com pouca ventilação. Outros ainda apresentam resultados melhores se impressos em impressoras abertas ou fechadas. Também é importante verificar o diâmetro de filamento suportado pela impressora. A maioria das impressoras comercializadas hoje trabalham com o diâmetro de 1,75 mm, no entanto há máquinas que utilizam apenas filamentos de 3 mm (EVANS, 2012).

3.4.1 PLA – Poli (ácido lático)

O PLA, ou poli (ácido lático), é um polímero biodegradável com potencial para substituir polímeros baseados no petróleo. É um dos materiais mais populares na impressão 3D atualmente. É conhecido por sua facilidade de uso, baixo custo e ampla aceitação em diferentes impressoras. Além disso, é produzido a partir de materiais renováveis, como amido de milho e cana-de-açúcar e não emite gases nocivos. Esse material é especialmente indicado para a impressão de peças que não requerem acabamentos pós-impressão e para a criação de protótipos que não serão submetidos a desgaste ou testes de carga.

Um aspecto relevante na escolha desse material é o fato de que, ao ser impresso, ele libera um aroma "semi doce", considerado mais agradável em comparação com outros plásticos queimados. Quando derretido, o PLA se torna mais fluido do que a maioria dos outros plásticos, permitindo a obtenção de detalhes de alta qualidade, como cantos pontiagudos. É resistente quando resfriado, embora um pouco mais quebradiço, e possui um limite de temperatura mais baixo do que o ABS, com temperatura de extrusão em torno de 180°C. Uma plataforma de impressão aquecida não é absolutamente necessária; no entanto, se você tiver uma, imprimir com a plataforma configurada para 60°C melhora a qualidade da impressão. Além de suas propriedades térmicas, apresenta uma barreira para CO₂ e O₂ comparável ao PET, e baixa toxicidade possibilita sua utilização diretamente em contato com os alimentos ou, até mesmo, em implantes biológicos (CABREIRA, 2018).

O PLA é amplamente utilizado em impressoras domésticas e com finalidades educacionais. Sua popularidade se deve ao fácil processamento, variedade de cores e ampla disponibilidade. É também biocompatível, termicamente estável e possui um baixo impacto ambiental. Suas propriedades mecânicas, como resistência à tração e módulo de elasticidade, são superiores a outros filamentos convencionais, como ABS e PETG. No entanto, o PLA também apresenta algumas limitações, como fragilidade, baixo alongamento e baixa resistência ao impacto (FERNANDES, 2016; KUMARESAN et al., 2022; LACERDA et al., 2021).

3.4.2 ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

O ABS é considerado um termoplástico amorfo com alta resistência ao impacto, baixa condutividade térmica, resistência ao calor e boa tenacidade. É o mesmo material usado para fabricar peças de LEGO, o que demonstra sua durabilidade e adequação para diversos fins. Uma das vantagens do ABS é a sua versatilidade quando se trata de pós-impressão, pois pode ser lixado, pintado e colado com facilidade usando cola plástica específica. Além disso, pode ser dissolvido com acetona, tornando possível realizar ajustes e uniões precisas.

Assim como o PLA, o ABS é amplamente utilizado em diversas aplicações devido às suas boas propriedades mecânicas e térmicas. Derivado do petróleo, apresenta alta resistência ao impacto e durabilidade, sendo capaz de suportar uso e desgaste extras. No geral, o ABS é um material robusto e resistente, adequado para uso em várias aplicações, incluindo ambientes externos. No entanto, como com qualquer material, é sempre aconselhável considerar as condições de uso e aplicar medidas de proteção adequadas para garantir a longevidade das peças impressas.

É importante destacar que o ABS tem um ponto de decomposição térmica relativamente alto em comparação com outros materiais plásticos, começando a se decompor em temperaturas em torno de 400°C. Mas a temperatura de extrusão normalmente utilizada para imprimir em ABS é muito inferior ao seu ponto de decomposição, variando tipicamente entre 220°C e 250°C, dependendo da impressora 3D e das configurações específicas. Portanto, durante a impressão 3D, o ABS é aquecido apenas o suficiente para se tornar maleável e fundir para formar as camadas da peça. Ainda assim é importante garantir uma ventilação adequada no ambiente de impressão para evitar a inalação dos gases liberados durante a decomposição do ABS em altas temperaturas.

Outro ponto relevante é que o filamento de ABS tende a se contrair durante o resfriamento, podendo causar empenamento nas peças. Portanto, é recomendado o uso de uma impressora 3D fechada e com mesa aquecida para garantir a fixação adequada da peça à mesa

e para evitar deformações e rachaduras durante o resfriamento das peças, especialmente em impressões maiores.

Por muito tempo, o ABS foi o material preferido pela comunidade de impressão 3D pessoal, sendo um dos mais baratos disponíveis no mercado de filamentos para impressão 3D, muito embora a crescente disponibilidade do PLA tenha alterado um pouco essa preferência.

3.4.3 PETG – Polietileno Tereftalato com Glicol-modificado

É um termoplástico com alta capacidade de processamento, flexibilidade e tenacidade. Sua utilização vem crescendo bastante no mercado devido à necessidade de componentes duráveis e flexíveis. O PETG é um copolímero de PET modificado com glicol, o que lhe confere propriedades únicas: possui alta resistência ao impacto, o que o torna adequado para peças que exigem resistência a choques e impactos e possui boa resistência química, tornando-o adequado para aplicações que requerem contato com substâncias químicas (LACERDA, 202).

É semirrígido e tem uma ótima resistência mecânica ao impacto e à flexão, além de resistência química e boas características térmicas, o que permite que o plástico esfrie eficientemente com deformação quase insignificante e resista à exposição solar. Pode ser utilizado em impressoras abertas ou fechadas, com mesa aquecida ou não e não apresenta odor durante o seu processamento, além de ser fácil de imprimir e apresentar boa aderência entre as camadas.

Uma das principais vantagens do PETG é sua transparência e clareza. Ele é frequentemente usado para impressão de peças transparentes ou translúcidas, como embalagens, protótipos e peças decorativas. Outra característica importante do PETG é sua resistência à umidade. Ao contrário de outros materiais comuns de impressão 3D, como o PLA, o PETG possui baixa absorção de umidade, o que evita a degradação e o empenamento das peças ao longo do tempo. Isso torna o PETG adequado para aplicações em ambientes úmidos.

O PETG é relativamente fácil de imprimir e possui uma ampla janela de temperatura de impressão. Geralmente, as temperaturas de extrusão variam entre 220°C e 240°C e uma temperatura da mesa de 50-90°C. É importante ressaltar que o PETG requer uma plataforma de impressão aquecida para garantir uma boa aderência das peças à mesa. No que diz respeito à resistência à degradação com a exposição ao sol, o PETG é mais resistente do que o PLA e o ABS. Ele possui maior estabilidade UV, o que significa que pode resistir melhor aos efeitos dos raios solares sem sofrer deterioração significativa. No entanto, exposição prolongada ao sol pode levar a uma leve alteração na cor das peças impressas em PETG (SINGH, REDDY, ARJULA, 2018).

Em resumo, o PETG é um material popular na impressão 3D, pois combina a facilidade de uso do filamento PLA com a resistência e durabilidade do filamento ABS. Sua resistência é muito maior do que a do PLA, e é aprovado pela Food and Drug Administration – FDA, agência federal do Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos Estados Unidos, para uso em recipientes de alimentos e ferramentas utilizadas para consumo de alimentos. Ao contrário do filamento ABS, ele raramente empena e não produz odores ou vapores durante a impressão. O filamento PETG não é biodegradável, mas é 100% recuperável. Sua resistência à umidade e estabilidade UV o tornam adequado para uma variedade de aplicações, incluindo embalagens, protótipos e peças funcionais.

3.4.4 *Nylon*

O nylon é um material versátil e amplamente utilizado em diversas indústrias, incluindo têxtil, moda, eletrônica, automotiva e manufatura em geral. Sua ampla gama de aplicações se deve principalmente à sua resistência e durabilidade. Ele é capaz de suportar impactos, tornando-o ideal para peças que estão constantemente em movimento. Além disso, o nylon possui baixo coeficiente de atrito, o que o torna adequado para aplicações com peças móveis que precisam resistir ao desgaste. A flexibilidade do nylon é outra vantagem significativa. Em geometrias mais finas, o nylon pode ser flexionado repetidamente sem quebrar, tornando-o adequado para a fabricação de peças que exigem certa flexibilidade.

Uma das principais desvantagens do nylon, no entanto, é sua higroscopicidade, ou seja, sua capacidade de absorver umidade do ar. Isso pode afetar a qualidade da impressão 3D, tornando necessário o armazenamento adequado do filamento de nylon e a utilização de impressoras fechadas, com mesa aquecidas e ambientes controlados para minimizar os efeitos da umidade.

Apesar dos desafios, o nylon oferece benefícios significativos na impressão 3D. Sua resistência à abrasão, durabilidade e flexibilidade o tornam adequado para a criação de peças funcionais. Além disso, a capacidade do nylon de absorver corantes de tecido e tintas em spray facilita o pós-processamento e a personalização das peças impressas. É inclusive utilizado no campo da medicina, o nylon tem sido usado em aplicações de impressão 3D, como implantes de titânio e bioimpressão de órgãos artificiais.

3.4.5 HIPS – Poliestireno de Alto Impacto

O filamento de HIPS é um material amplamente utilizado na impressão 3D. Trata-se de um copolímero que combina a rigidez do poliestireno com a elasticidade do polibutadieno, resultando em um filamento com características únicas.

Uma das principais aplicações do filamento de HIPS na impressão 3D é como material de suporte. Nas impressoras 3D, quando se deseja imprimir estruturas com avanços ou partes suspensas no ar, é necessário utilizar um suporte (Figura 34) para garantir a estabilidade e evitar deformações durante a impressão. O HIPS é especialmente adequado para essa função, pois pode ser facilmente dissolvido em limoneno, uma substância solvente. Isso significa que, após a conclusão da impressão, é possível remover o suporte de HIPS imergindo a peça em uma solução de limoneno, deixando o objeto final limpo e pronto para uso.

Além de ser um excelente material de suporte, o filamento de HIPS também possui outras vantagens. Ele é mais resistente do que o PLA e o ABS, com boa resistência ao impacto, tornando-se uma opção adequada para peças que precisam resistir ao desgaste e à quebra. O HIPS também tem menor tendência a deformações do que o ABS, facilitando a obtenção de impressões mais precisas e estáveis. Outra vantagem do HIPS é a sua versatilidade em termos de pós-processamento. Ele pode ser facilmente lixado, pintado e colado, permitindo a personalização e aprimoramento das peças impressas.

O plástico HIPS, apesar de suas vantagens, também apresenta algumas desvantagens a serem consideradas. Uma delas é sua vulnerabilidade à degradação quando exposto a diversos produtos químicos, como solventes, ácidos e álcalis. Isso pode resultar em fragilidade, descoloração ou deterioração do material ao longo do tempo. Além disso, tem resistência limitada à luz UV, o que pode causar amarelamento e fragilidade com exposição prolongada, reduzindo sua vida útil. O HIPS também apresenta baixa resistência ao fogo e pode facilmente pegar fogo e queimar, tornando-o inapropriado para aplicações em que a segurança contra incêndios é uma preocupação. Por fim, o HIPS não é biocompatível e não é ideal para uso externo devido à sua suscetibilidade à luz UV, umidade e temperaturas extremas, que podem acelerar sua degradação e reduzir sua vida útil.

Figura 34: Exemplo de uso do filamento HIPS como estrutura de suporte para impressão.



HIPS is mainly used as a support structure (Image credits: Zortrax)

Fonte: 3DNATIVES (2023).

3.4.6 TPE, TPU e TPC – Filamentos flexíveis

Elastômeros Termoplásticos – TPE são plásticos com propriedades semelhantes às da borracha, conferindo-lhes extrema flexibilidade e durabilidade e qualidade de acabamento. Essa característica torna o TPE amplamente utilizado na fabricação de peças automotivas, eletrodomésticos e suprimentos médicos. No mundo da impressão 3D, o TPE é frequentemente utilizado como filamento de impressora 3D devido à sua capacidade de suportar movimentos físicos intensos, algo que os filamentos ABS e PLA não conseguem. No entanto, a impressão com TPE pode ser desafiadora, pois esse material é mais difícil de extrudar.

Os filamentos flexíveis apresentam outras duas variações conhecidas: o Poliuretano Termoplástico – TPU, que se apresenta um pouco mais rígido e mais durável do que o TPE e é conhecido por sua durabilidade e alta resistência à abrasão, óleos, produtos químicos e temperaturas extremas, sendo mais fácil para imprimir; e o Copoliéster Termoplástico – TPC, que apresenta maior resistência à exposição química e altas temperaturas e tem excelente resistência aos raios UV. Por essa razão, é amplamente utilizado em aplicações biomédicas, dispositivos médicos e vestíveis.

Quando se trata de escolher entre os filamentos TPE, TPU ou TPC para impressão 3D, a decisão depende do tipo de objeto que você deseja criar. Se a peça precisa suportar desgaste intenso, como brinquedos, capas de telefone ou acessórios como pulseiras, o TPE ou TPU são as opções mais adequadas. Já o TPC é especialmente indicado para aplicações em ambientes mais agressivos, como ambientes externos, ou quando a peça estará exposta a altas temperaturas, como em um carro.

Em resumo, os filamentos TPE, TPU e TPC apresentam flexibilidade excepcional, sendo ideais para peças que requerem dobras ou compressões. No entanto, vale ressaltar que a impressão com esses materiais pode ser desafiadora devido à necessidade de caminhos de filamento apertados e velocidades de impressão mais lentas.

3.4.7 PC - Policarbonato

O policarbonato é um dos materiais mais versáteis e duráveis disponíveis para a impressão 3D. Este material é conhecido por suas excelentes propriedades de resistência ao impacto, transparência e alta resistência mecânica, além de ser moderadamente flexível. Ele é amplamente utilizado em uma variedade de aplicações industriais e agora está se tornando cada vez mais popular na impressão 3D.

O policarbonato é um termoplástico que pode ser derretido e moldado repetidamente quando submetido a altas temperaturas. Uma de suas principais vantagens é a sua resistência excepcional. Ele é capaz de suportar forças de impacto significativas sem se deformar ou quebrar, tornando-o ideal para a produção de peças robustas e duráveis. Além disso, o policarbonato é altamente transparente a luz visível, permitindo a criação de peças com alta clareza óptica.

No entanto, a impressão 3D com policarbonato pode apresentar alguns desafios. Devido à sua alta temperatura de fusão, o filamento de policarbonato requer uma impressora 3D capaz de alcançar temperaturas mais altas do que as necessárias para materiais como PLA ou ABS. Além disso, o policarbonato é propenso a *warping* – empenamento – durante o processo de resfriamento, o que pode causar problemas de aderência à plataforma de impressão. Portanto, é recomendável o uso de uma mesa aquecida e adesivos adicionais para garantir uma boa aderência e minimizar o empenamento. Outro fator negativo é o fato de possuir uma baixa resistência a ataques químicos, sendo solúvel em muitos compostos químicos (FERNANDES, 2016).

A aplicação do filamento de policarbonato na impressão 3D é ampla. Ele é frequentemente usado para criar peças funcionais, como caixas de engrenagens, peças de máquinas, componentes eletrônicos e até mesmo protótipos de alta resistência. Sua transparência também o torna adequado para aplicações ópticas, como lentes e dispositivos de iluminação.

3.4.8 PEEK - Poliéter-éter-cetona

Mais conhecido como PEEK, é um termoplástico semicristalino de alta performance amplamente utilizado na indústria de manufatura devido às suas propriedades mecânicas excepcionais. Nos últimos anos, o PEEK também se tornou um material popular no setor de manufatura aditiva, sendo amplamente utilizado nas indústrias aeroespacial, médica e automotiva devido à sua resistência ao calor e ao desgaste, podendo até mesmo ser usado como substituto para alguns metais devido à sua relação resistência-peso.

No entanto, é importante ressaltar que é um material exigente para a impressão 3D, pois requer o cumprimento de vários parâmetros para uma impressão bem-sucedida. O PEEK pertence à família de poliariletercetonas (PAEK), conhecida por suas altas propriedades termomecânicas. Possui uma estrutura semicristalina, o que significa que, quando derretido, suas moléculas se organizam sob o efeito do calor, criando uma certa ordem até que o material se solidifique completamente. Essa estrutura semicristalina permite que ele mantenha suas características mecânicas quando a temperatura é aumentada.

Durante a impressão o processo de cristalização deve ser controlado, pois parte do material irá cristalizar, alterando a densidade do mesmo. Portanto, é necessário manter altas temperaturas de extrusão, da mesa de impressão e da câmara, além de evitar flutuações de temperatura. Para imprimir o PEEK em 3D, é necessário uma impressora 3D com extrusor que possa atingir temperaturas de até 400°C, uma câmara que possa ser aquecida a 120°C e uma mesa de impressão que possa atingir 230°C para garantir a liberação adequada da peça no final e evitar deformações. Durante o processo de impressão, o material passa por mudanças de densidade e, ao resfriar, ocorre contração.

Apesar de ser um material exigente para impressão 3D, o PEEK oferece características mecânicas e químicas muito interessantes para diferentes aplicações. É altamente resistente ao calor e ao desgaste, possui alta resistência química, é esterilizável e possui uma relação resistência-peso elevada e é frequentemente utilizado como substituto para certos metais. Além disso, é resistente ao fogo.

3.4.9 Tritan – Poliéster de Alta Tensão

Tritan™ é um copoliéster de nova geração que ganhou destaque na impressão 3D por oferecer vantagens como facilidade de processamento, resistência a temperaturas mais altas e resistência significativamente maiores a impactos. É um filamento durável que permite a construção de peças com alta resistência mecânica, além de ser resistente às soluções alcalinas, ácidas e à água. Ideal para grandes impressões, possui uma excelente aderência entre as

camadas e à mesa e é muito forte, apesar de ser riscado/arranhado mais facilmente do que o ABS.

De acordo com um estudo realizado por Cavalcanti, Banea e Queiroz (2020), que compara as propriedades mecânicas do PLA, ABS e Tritan™, ele se aproxima muito do PETG em termos de resistência mecânica à tração, ductilidade e, conseqüentemente, tenacidade. No entanto, o Tritan™ pode custar até o dobro do preço e é mais difícil de ser obtido, uma vez que possui poucos fornecedores nacionais em comparação com o PETG, que já enfrentou dificuldades de fornecimento devido à pandemia de coronavírus.

3.4.10 Outros filamentos

A impressão 3D utiliza como matéria-prima os polímeros termoplásticos na forma de filamentos enrolados em uma bobina. Além dos materiais citados, existe uma gama de outros filamentos especializados disponíveis no mercado, como filamentos condutores, filamentos de fibra de carbono, filamentos metálicos, magnéticos, que brilham no escuro, antiviral, que mudam de cor e até mesmo filamentos solúveis em água ou em produtos químicos específicos. Esses filamentos oferecem recursos adicionais para aplicações específicas, como impressão de circuitos eletrônicos, peças leves e resistentes e suportes solúveis para impressões complexas.

Dentre estes outros tipos de filamento, destaca-se o Filamento Antichamas FRP 193 da 3DFila, desenvolvido para uso profissional de criação de protótipos funcionais e peças finais complexas com facilidade. É um material para impressão de peças que necessitam de maior resistência a impacto garantindo boa tenacidade. É fabricado com copolímero e pode ser impresso com impressoras abertas e temperatura de mesa mediana. Foi desenvolvido para otimizar as características térmicas, mecânicas e facilitar a impressão em impressoras que não possuem enclausuramento. O Filamento FRP conta com certificação UL94 que o qualifica como retardante de chamas ou antichamas.

A disponibilidade e a variedade de filamentos no mercado continuam a crescer, oferecendo aos usuários de impressão 3D a capacidade de escolher o material mais adequado para suas necessidades. Vale ressaltar que cada filamento possui suas próprias características de impressão, como temperatura de extrusão, necessidade de plataforma aquecida, configurações de velocidade e resfriamento. Portanto, é importante ler as especificações do fabricante e seguir as orientações adequadas para obter os melhores resultados ao imprimir com cada tipo de filamento.

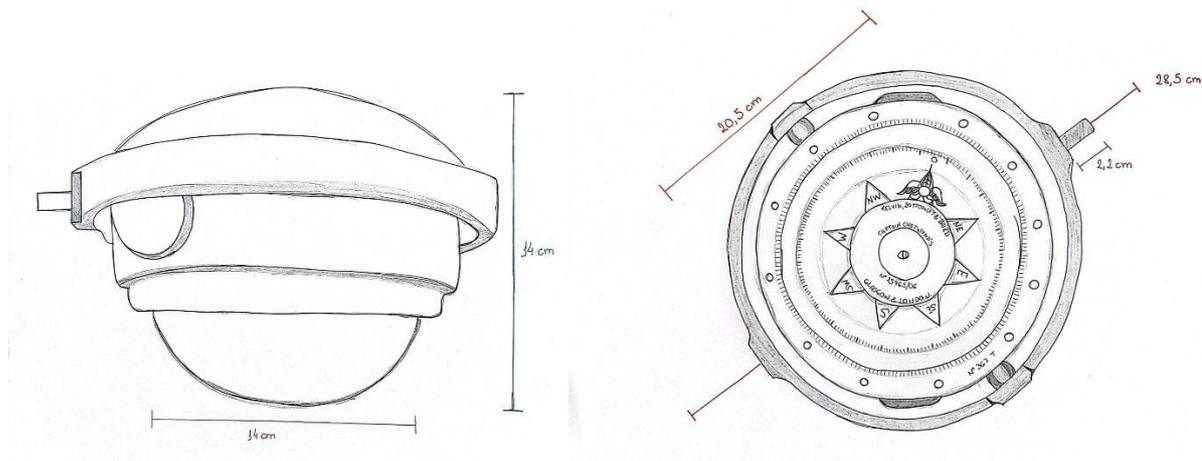
Além disso, as propriedades desejadas são muito importantes a serem consideradas, juntamente com o tipo de processo utilizado, ao pensar no design. O design da peça também

pode influenciar a escolha do material. Para peças que precisam ser fortes e ter um bom acabamento de superfície, os termoplásticos geralmente são a melhor escolha. No entanto, para peças que requerem flexibilidade e resiliência, os elastômeros são uma opção muito melhor. O pós-tratamento também é um fator importante, e certos materiais requerem pós-tratamento para obter o acabamento de superfície ou resistência desejados.

4. METODOLOGIA

O primeiro passo foi a definição dos requisitos do protótipo. Para isso foram analisadas as dimensões e especificações da bússola de marinha, identificando-se os recursos necessários para o acondicionamento, tais como suportes, encaixes e espaços para componentes adicionais.

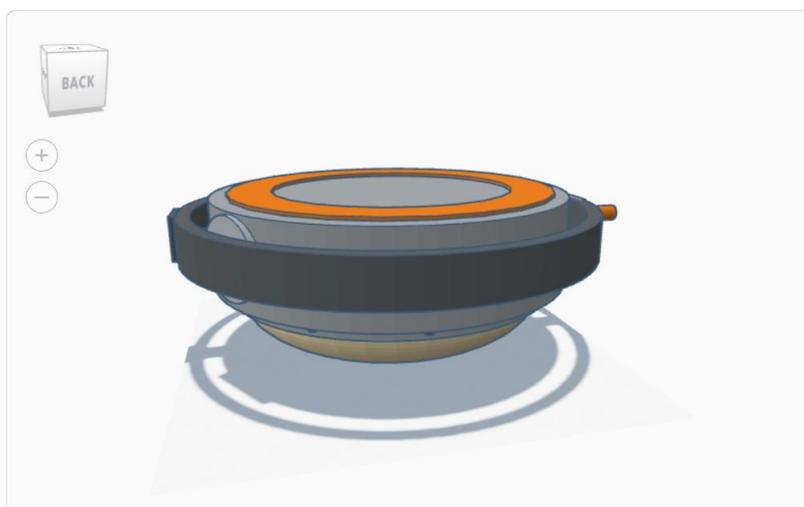
Figura 35 – Esquema com as medidas da bússola de marinha.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida utilizou-se o software de modelagem 3D Tinkercad para criar o design do protótipo, considerando a forma, tamanho e função da bússola, bem como as restrições e requisitos específicos do acondicionamento. Para isso, primeiro modelamos a bússola, conforme Figura 36, para adequar o invólucro às características do objeto, de modo que incluísse detalhes precisos para o encaixe e fixação da bússola.

Figura 36 – Bússola de marinha modelada digitalmente com o uso do Tinkercad.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez modelado o objeto, focou-se no desenvolvimento do acondicionamento, que foi planejado segundo a tipologia do objeto a ser preservado. O intuito era uma caixa que pudesse limitar a entrada de poeiras, sujidades, insetos, água e garantir a estabilidade dos objetos protegendo-os de danos físicos. Assim, o objetivo era construir uma embalagem que não necessitasse de elementos metálicos para sua fixação, para conservação da própria embalagem e para evitar a interação desse tipo de material com as peças, diminuindo a possibilidade de transmissão de óxidos por partes de possíveis elementos metálicos adicionados.

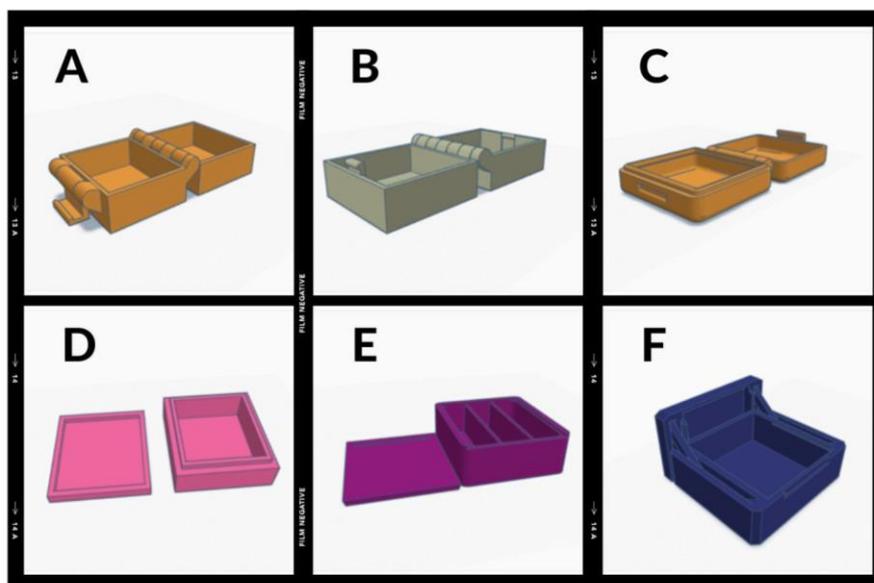
Além disso, observou-se a importância da relação entre a tampa e a caixa, para que o conjunto tenha um funcionamento prático e ao mesmo tempo seja o mais estanque possível. Para definir o tipo de fechamento da caixa, foram então testados seis modelos¹⁷, conforme ilustrado na Figura 37. O fechamento ideal para caixas pode variar dependendo do tipo de caixa, sua finalidade e os requisitos específicos do uso pretendido e deve ser escolhido levando em conta a praticidade, a segurança e as necessidades específicas da situação para o qual será usada.

Dentre os modelos testados, optou-se pelo tipo D, uma embalagem composta por duas peças, a tampa e a caixa, que funcionam de forma autônoma uma da outra. A tampa se encaixa em torno das paredes da caixa, apresentando simplicidade de fechamento e essa relação caixa-tampa evita frestas que possam facilitar a entrada de água, poeira ou insetos no seu interior. O uso de dobradiças nos outros modelos demonstrou uma certa complexidade para realizar o fechamento de forma adequada, pois o plástico endurece ao esfriar, dificultando o movimento da dobradiça. Cogitou-se também o uso de ímãs para auxiliar o fechamento e fixação da tampa. No entanto, esta opção foi descartada pois poderia alterar o funcionamento da bússola, ou até mesmo afetar peças adjacentes, magnetizando-as.

¹⁷ Os modelos foram obtidos no repositório Thingiverse e estão disponíveis nos seguintes links:

- a) <https://www.thingiverse.com/thing:82620>
- b) <https://www.thingiverse.com/thing:82533>
- c) <https://www.thingiverse.com/thing:4775582>
- d) <https://www.thingiverse.com/thing:12686>
- e) <https://www.thingiverse.com/thing:194066>
- f) <https://www.thingiverse.com/thing:5913090>

Figura 37 – Modelos digitais e impressos dos diferentes tipos de fechamento de caixa testados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Escolhido o modelo, foi realizada a modelagem da caixa utilizando como base o modelo digital da bússola. Ao projetar o sistema suporte e embalagem, os objetivos foram o de construir uma forma de suporte com um material sólido o suficiente para absorver choques de deslocamento e que evitasse qualquer dano à superfície do objeto e que cobrisse uma área de superfície máxima do objeto e evitasse tensões em quaisquer pontos frágeis.

Uma segunda proposta era a de que bússola se mantivesse suspensa, sem tocar o piso da caixa, para que pudesse ter livre movimento. Para isso foram feitas duas incisões em lados diametralmente opostos para encaixar os pinos de sustentação do objeto. Além disso, cogitou-se a possibilidade de serem acrescentados puxadores, para facilitar o manuseio. No entanto, considerando que o objeto a ser acondicionado é pesado, optou-se por não os incluir, pois poderiam apresentar fragilidade ao longo do tempo, aumentando o risco de quebra da caixa e possíveis quedas.

Após a modelagem, verificou-se se o design do protótipo estava pronto para a impressão 3D, com geometria adequada, espessura de parede consistente e que não haveria necessidade de suporte estrutural. O modelo 3D (Figura 38) foi salvo no formato .stl e importado no *software* MeshLab para análise de erros e em seguida no *slicer* Simplify 3D, para definir os parâmetros e gerar o código de impressão.

Figura 38 – Modelo digital da caixa elaborada para acondicionamento da bússola de marinha.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os testes foi utilizada a impressora pertencente ao Grupo de Catálise Ambiental e Sustentabilidade Energética da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (GCAS/UERJ) e que se encontra localizada no Instituto de Química da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, da marca GT Max 3D, modelo GTMAX3D CORE A2V2, conforme imagem abaixo.

Figura 39: Impressora GTMAX3D CORE A2V2.



Fonte: GTMAX3D.

O equipamento é fechado e possui um único bico extrusor e mesa de alumínio aquecida, com tampo de vidro (até 135°C) e suporta uma ampla gama de materiais e tem sistema de insumo aberto, o que significa que a máquina aceita filamentos de marcas diferentes. Além disso, a máquina possui nivelamento automático, conectividade USB e cartão SD, alimentação bivolt automática e detecção de fim de filamento e troca automática de filamento. Na Tabela 2 abaixo são descritas outras especificações técnicas da máquina:

O cabeçote extrusor tem liberdade de movimento nos eixos X e Y, e é constituído de um bico extrusor aquecido de diâmetro 0.4. Ao longo do funcionamento, o filamento é puxado do carretel e conduzido para o interior de um bico aquecido, onde é então fundido e posteriormente extrudado.

A matéria-prima selecionada consistiu em um filamento comercial de poliacido láctico (PLA), na cor cinza, com diâmetro de 1,75 mm, da marca 3D Prime. Muito embora a ideia inicial fosse trabalhar com o filamento Tritan HT ou ainda o PETG, optou-se pelo PLA por ser um material mais fácil de trabalhar e por ser mais extensamente estudado na literatura. O fato de ser biodegradável também foi um fator decisivo, devido a necessidade de imprimir peças testes e gerar resíduos plásticos.

Tabela 2 – Impressora GTMAX3D CORE A2V2.

Especificações Técnicas	
Área de impressão	220mm X 220mm X 240mm
Qualidade de impressão	0,05mm à 0,32mm
Velocidade máxima de impressão	Até 150 mm/s
Velocidade de deslocamento	300mm/s
Diâmetro de filamento do material	1,75 mm
Diâmetro do bico extrusor	0.4mm
Volume de impressão	11,6 litros
Dimensões da impressora	L 425mm X P 470mm X A 512mm

Fonte: Sítio eletrônico do fabricante.

Além disso, o PLA adere bem à maioria das superfícies de impressão, reduzindo a probabilidade de problemas de aderência durante a impressão, tem uma boa capacidade de retenção de detalhes e proporciona um acabamento superficial suave nas impressões e, considerando que a impressora estava localizada em uma sala com ventilação limitada, sua baixa toxicidade também foi um fator relevante. Na Tabela 3 são apresentadas algumas características técnicas que o fornecedor disponibiliza do filamento PLA.

Tabela 3 – Características técnicas do PLA para impressão.

Temperatura de Impressão 3D recomendada	180-220°C
Velocidade de Impressão 3D recomendada	40-150 mm/s
Mesa aquecida (opcional)	até 60°C

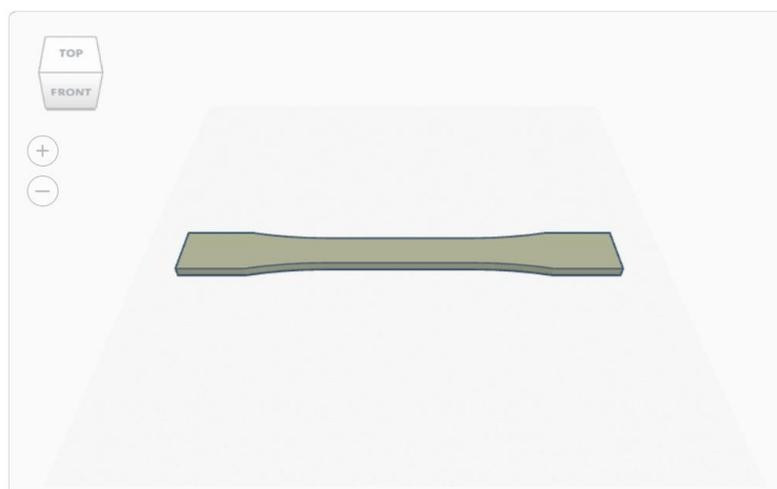
Fonte: Elaborado pelo autor.

Antes de iniciar as impressões teste, foi realizada a calibração do equipamento verificando as coordenadas cartesianas (X,Y,Z), *overhangs*, pontes, *stringing*, extrusão, temperatura que a máquina trabalha. Também foi executado o alinhamento da plataforma de construção, e para isto, a mesa foi aquecida até sua temperatura de trabalho, para posteriormente realizar movimentos com o cabeçote extrusor. Quanto ao bico de extrusão foi feita a limpeza através da extrusão livre, após a sua temperatura de trabalho ser atingida, para prevenção de entupimento no meio da impressão.

A matéria-prima, quando não utilizada, foi protegida do ambiente e intempéries, com o uso de uma embalagem plástica, contendo material desumidificante em seu interior. Ao longo da fabricação das amostras, a temperatura do ambiente foi mantida em aproximadamente 20°C, sem fluxo de ar direcionado ao equipamento.

Para a seleção de parâmetros do processo de fabricação, foram impressos corpos de prova modelados de acordo com a geometria definida pela norma Método de Teste Padrão para Propriedades de Tração de Plásticos ASTM D638-14 modelo 1, conforme Figura 40, e dimensões padronizadas em 165x19x3,2 mm. Os corpos de prova foram produzidos individualmente, centralizados na mesa, de acordo com o planejamento experimental, variando-se os parâmetros de densidade de preenchimento e altura de camada. Durante a fabricação dos corpos de prova, o ambiente foi climatizado a 20 °C, sem fluxo de ar direcionado ao equipamento.

Figura 40 – Modelo de corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a realização dos experimentos foram impressos corpos de prova com densidade de preenchimento de 25%, 50%, 75% e 100% para cada altura de camada testada. A Tabela 4 apresenta uma relação com o tempo de impressão e a quantidade de camadas para cada parâmetro de processamento. Já a Tabela 5 apresenta os demais parâmetros que foram fixados.

Tabela 4 – Parâmetros de processamento analisados.

Altura da Camada	Densidade de Preenchimento	Tempo de Impressão	Quantidade de Camadas
0,2	25%	13m	15
0,2	50%	15m	15
0,2	75%	16m	15
0,2	100%	18m	15
0,3	25%	10m	10
0,3	50%	11m	10
0,3	75%	12m	10
0,3	100%	12m	10
0,4	25%	9m	07
0,4	50%	9m	07
0,4	75%	9m	07
0,4	100%	9m	07

Fonte: Elaborado pelo autor.

A impressão das amostras iniciou-se com a impressão de um contorno – ou *raster* – ao redor da amostra, de forma a eliminar o material mantido em contato com o bico. As amostras foram fabricadas de forma individual e posicionadas no centro da mesa, levando-se a menores flutuações térmicas, e todo o progresso foi monitorado para verificar se ocorreriam problemas ou falhas durante a impressão.

Tabela 5 – Parâmetros fixos de processamento utilizados.

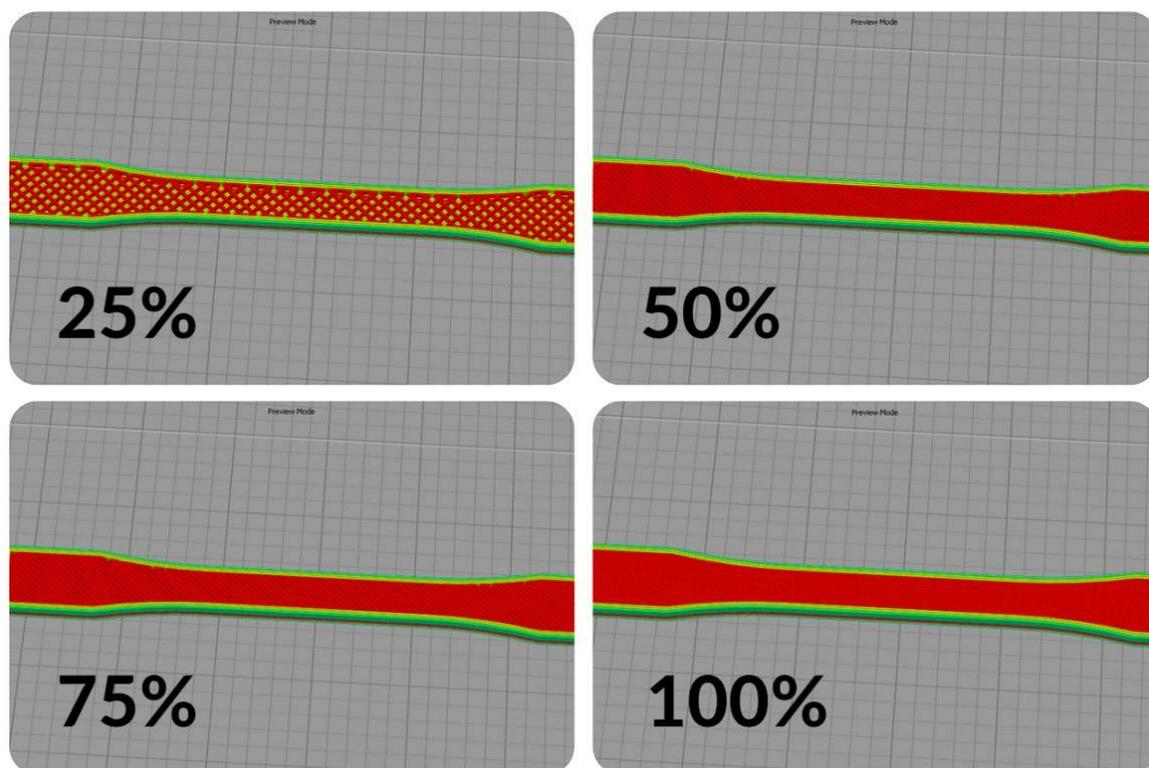
Parâmetro de processamento	Valor
Temperatura de extrusão	215°C
Temperatura da mesa	60°C
Velocidade de Impressão	100 mm/s
Diâmetro do bico extrusor	0,4
Multiplicador de extrusão	1,20
Orientação de preenchimento	45°/-45°

Fonte: Elaborado pelo autor.

No final da realização destas experiências obtiveram-se doze estruturas, todas com a mesma forma e mesma geometria interna, diferenciadas apenas pelos parâmetros com que

foram impressas. O padrão de preenchimento utilizado foi o retilíneo e, conforme ilustrado na Figura 41, é possível verificar como fica o preenchimento interno de acordo com a densidade escolhida. Idealmente, um número maior de combinações de fatores deve ser estudado. Porém, isto não seria possível dentro das limitações deste trabalho, sendo escolhida a interação entre altura da camada e densidade de preenchimento.

Figura 41 – Preenchimento interno de acordo com a densidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir de testes realizados mecanicamente e após análise da literatura, definiu-se para o protótipo do acondicionamento uma impressão com tamanho de camada 0,4, visto que não é necessário dar nenhum enfoque a detalhes e por apresentar maior resistência à absorção de água, conforme verificado por Fernandes (2016, p. 69), no estudo que realizou para identificar a influência de parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PLA. Como observado pelo autor, camadas com menor espessura aumentam a ocorrência de micro lacunas das cadeias poliméricas, facilitando a difusão de moléculas de água e sua consequente penetração nos polímeros. Quanto ao ângulo de impressão, identificou-se que o *raster* de 0°/90° apresenta os melhores resultados, de acordo com os trabalhos de Algarni (2021), Khosravani et al. (2022) e GOH et al. (2020).

Quanto à estrutura, Castanheira (2016) ao analisar a impressão 3D de estruturas para isolamento térmico observou que estruturas impressas com uma configuração de parede sólida e com estruturas com caixas de ar de pequeno diâmetro no seu interior demonstraram um melhor desempenho que as estruturas completamente sólidas quando ao isolamento térmico. Sugere-se então a impressão do protótipo com densidade de preenchimento em 95%. E como observado nos trabalhos de Cabreira (2018), apenas os preenchimentos de padrão linear e retilinear apresentam a possibilidade de um preenchimento completo. Dessa forma, acredita-se que o padrão retilinear, por apresentar camadas intercaladas em orientações perpendiculares, possa ser a melhor opção para maior resistência do protótipo.

Visando uma maior área de impressão, para a fabricação do protótipo foi utilizada uma outra impressora, da marca Creality, modelo CR10, conforme imagem abaixo.

Figura 42 – Impressora CREALITY 3D CR-10.



Fonte: CREALITY.

O equipamento é aberto e possui um bico extrusor aquecido de diâmetro 0.4 e mesa aquecida de vidro, suporta diferentes tipos de materiais e tem sistema de insumo aberto. A máquina possui conectividade USB e cartão SD, alimentação bivolt automática, mas nivelamento e troca de filamento manuais. O cabeçote extrusor tem liberdade de movimento nos eixos X e Z, enquanto a mesa se movimento no eixo Y. Na Tabela 6 abaixo são descritas outras especificações técnicas da máquina:

Tabela 6 – Especificações técnicas da impressora CREALITY 3D CR-10.

Especificações Técnicas	
Área de impressão	300mm X 300mm X 400mm
Qualidade de impressão	0,05mm à 0,4mm
Velocidade máxima de impressão	Até 200 mm/s
Diâmetro de filamento do material	1,75 mm
Diâmetro do bico extrusor	0.4mm
Dimensões da impressora	L 590mm X P 600mm X A 610mm

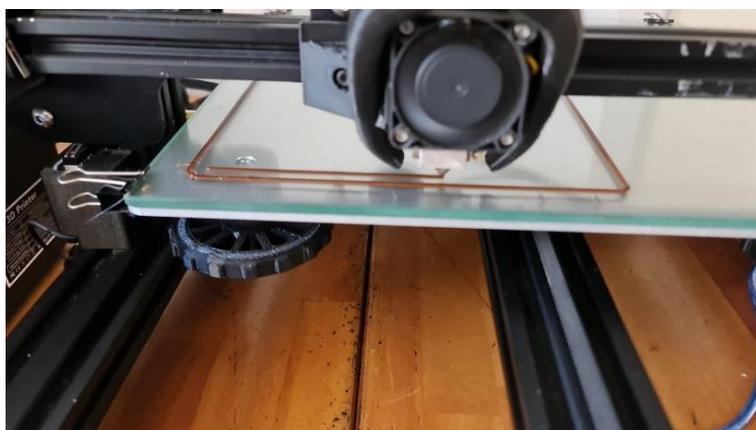
Fonte: Sítio eletrônico do fabricante.

Da mesma forma que a etapa anterior, antes de iniciar a impressão do protótipo foi realizada a calibração do equipamento verificando as coordenadas cartesianas (X,Y,Z), *overhangs*, pontes, *stringing*, extrusão e temperatura que a máquina trabalha. Também foi executado o alinhamento da plataforma de construção e a limpeza do bico extrusor através da extrusão livre.

A matéria-prima selecionada para a impressão da caixa consistiu em um filamento comercial de poli (ácido lático) – PLA, na cor marrom, com diâmetro de 1,75 mm, da marca 3D Procer. Segundo as características técnicas que o fornecedor disponibiliza, o filamento em questão apresenta temperatura de impressão 3D recomendada de cerca de 190°-210°C e temperatura ideal da mesa aquecida de 60°C.

A primeira parte a ser impressa foi a caixa, de tamanho 150mmx150mmx100mm, que iniciou com a impressão do *raster* ao redor da amostra, conforme demonstrado na Figura 43.

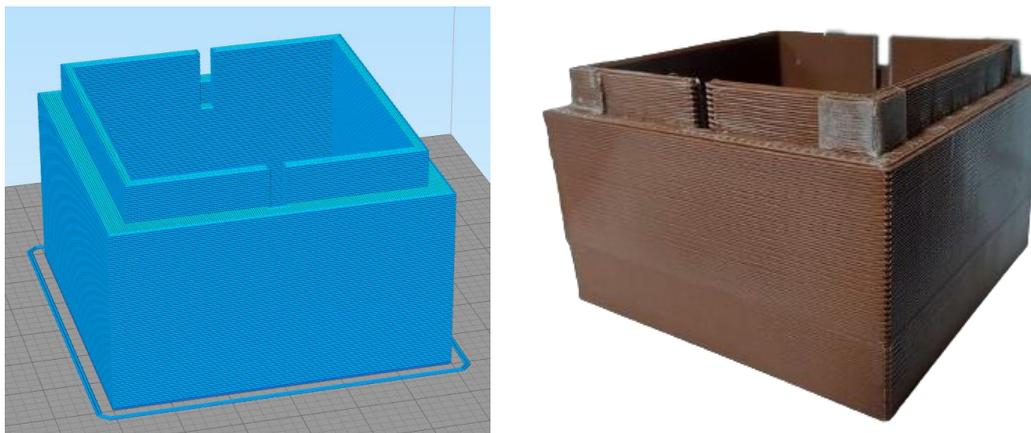
Figura 43 – Início da impressão da caixa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A impressão durou o total de 14 horas e 30 minutos e foi realizada com preenchimento retilinear em 15%, orientação de preenchimento de 90°/-95° e temperatura da mesa em 60°C e de extrusão em 210°C. A Figura 44 mostra o modelo digital ao ser fatiado e o modelo impresso.

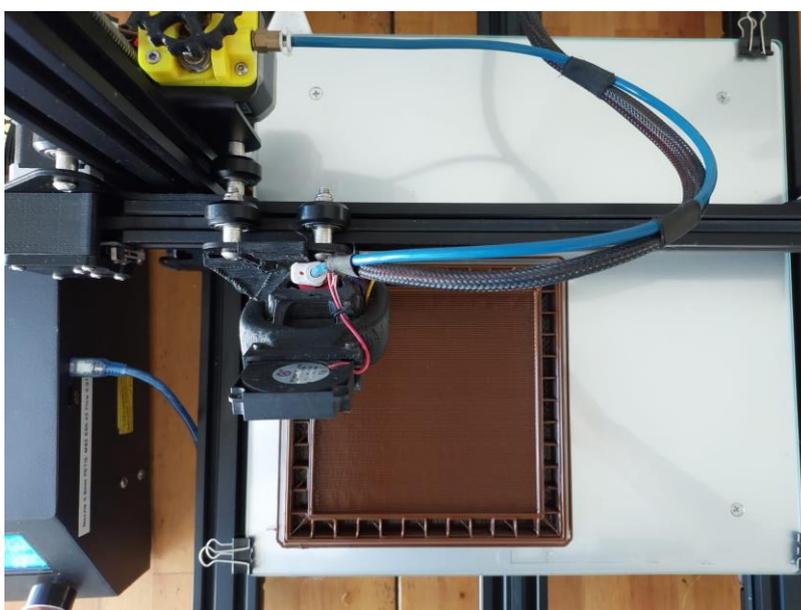
Figura 44 – Protótipo da caixa: modelo digital à esquerda e já impresso à direita.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado na Figura 45, a parede da caixa não apresenta preenchimento completo, pois considerou-se que, além de apresentar melhor desempenho quanto ao isolamento térmico conforme observado no trabalho de Castanheira (2016), uma configuração de parede com estruturas de ar em seu interior poderia, em caso de impacto, auxiliar na absorção e dissipação da energia, reduzindo o dano direto que poderia causar ao objeto se fosse uma parede sólida.

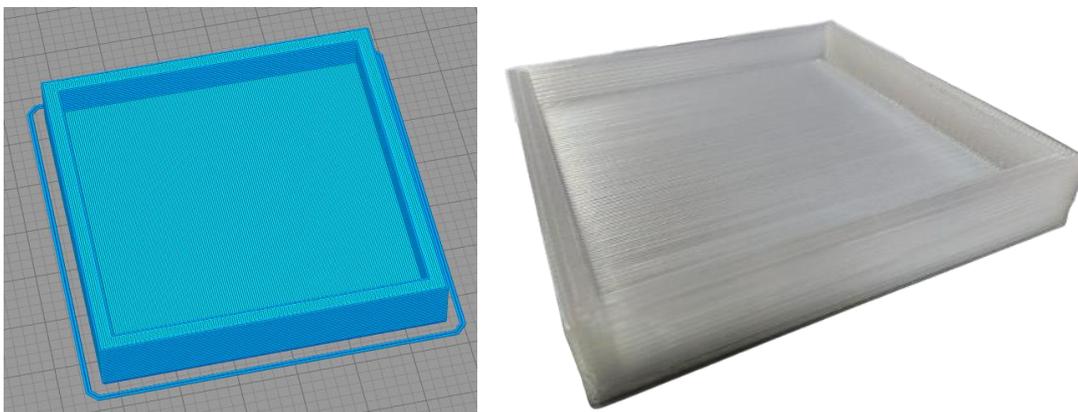
Figura 45 – Impressão das paredes da caixa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já para a impressão da tampa, foi utilizado filamento PLA Premium HT, na cor natural, com diâmetro de 1,75mm, da marca 3D Prime. A temperatura recomendada pelo fabricante é de 190-230°C para o bico e entre 60-70°C para a mesa. Após alguns testes, verificou-se como ideal para a máquina sendo utilizada a temperatura da mesa em 60°C e de extrusão em 210°C. A impressão, de tamanho 150mmx150mmx25mm, durou o total de 6 horas e foi realizada com preenchimento retilinear em 25% e orientação de preenchimento de 90°/-95°. A Figura 46 mostra o modelo digital e o modelo impresso.

Figura 46 – Protótipo da tampa: modelo digital à esquerda e impresso à direita.

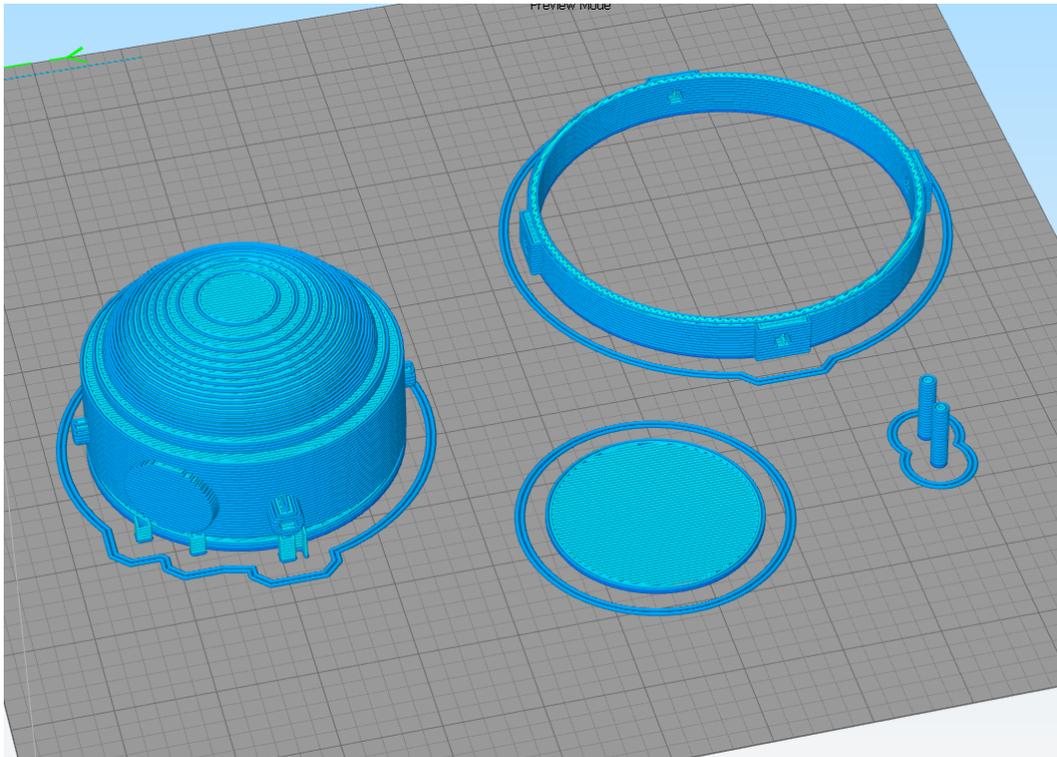


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para verificar se o objeto se adequaria dentro da caixa, foi impressa também uma réplica da bússola de marinha. Para isso foi utilizado filamento PLA, na cor branca, com diâmetro de 1,75 mm, da marca 3D Procer. Segundo as características técnicas que o fornecedor disponibiliza, o filamento em questão apresenta temperatura de impressão 3D recomendada de cerca de 190°-210°C e temperatura ideal da mesa aquecida de 60°C. A impressão foi realizada em partes (Figura 47), sendo o corpo principal da bússola de tamanho 87mmx93mm, o anel de tamanho 100mmx100mm, dois pinos e o topo, única parte impressa em PLA de cor natural para simular o vidro do objeto.

A parte principal da bússola foi impressa de forma invertida para reduzir a necessidade de suportes e, conseqüentemente, do tempo de impressão, cuja duração foi de 3 horas e 40 minutos. Todas as partes foram impressas com preenchimento retilinear de 15% e orientação de preenchimento de 45°/-45°. Uma vez que se verificou que a réplica encaixava dentro da caixa de forma adequada, as partes foram submetidas a um pós-processamento, em que foram lixadas e pintadas manualmente (Figura 48).

Figura 47 – Modelo digital da réplica da bússola.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 – Réplica da bússola após pintura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado do processo de impressão pode ser verificado na Figura 49. Foi considerado para o protótipo a impressão de uma superfície interna de apoio, que moldasse o formato do objeto e auxiliasse a firmá-lo em caso de impacto. No entanto, para não influenciar o movimento da bússola, parte essencial de sua funcionalidade, optou-se por não o fazer para o objeto em questão. Ainda assim, foi colocada uma camada de plástico bolha no solo da caixa para simular a presença de uma estrutura interna acolchoada, como por exemplo uma placa de espuma de Ethafoam, material de referência para a proteção de objetos sensíveis.

Figura 49 – Modelo final do protótipo contendo a réplica da bússola de marinha.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, investigamos a utilização da impressão 3D como abordagem para o desenvolvimento de acondicionamentos customizados destinados a artefatos de ciência e tecnologia mantidos em acervos de museus e centros de ciência. Os museus são responsáveis por cuidar de uma variedade de objetos valiosos e sensíveis, que abrangem diferentes materiais, tamanhos e formas. Esses acervos possuem um valor imensurável como patrimônio de ciência e tecnologia, pois abrigam objetos que representam importantes avanços científicos, descobertas históricas e conquistas tecnológicas.

É nesse contexto que se destaca a importância do acondicionamento adequado para objetos em museus, especialmente aqueles relacionados à ciência e tecnologia. O acondicionamento desempenha um papel crucial na preservação e na proteção desses objetos, pois atuam como a primeira camada de proteção contra sujeira, poeira e outras influências prejudiciais, garantindo sua integridade física e minimizando os danos causados pelo manuseio, exposição a condições ambientais adversas e outros fatores de deterioração.

Cada objeto possui características únicas que devem ser consideradas ao desenvolver estratégias de acondicionamento. As embalagens e os suportes de armazenamento devem ser projetados de forma a oferecer suporte adequado e estabilidade aos objetos, evitando qualquer movimento ou pressão indesejada que possa resultar em danos. Além disso, é preciso levar em conta fatores como a fragilidade do material, a sensibilidade à luz, umidade e temperatura, bem como as dimensões e a complexidade da estrutura do objeto. Também é fundamental escolher materiais de acondicionamento de qualidade, livres de substâncias químicas que possam causar deterioração ou reações indesejadas com os materiais dos objetos.

Existem no mercado uma grande variedade de materiais de acondicionamento, como madeiras, papéis e plásticos, inclusive com soluções que envolvem elementos metálicos. Cada um desses materiais possui características e funções específicas no contexto do acondicionamento. No entanto, é importante reconhecer que o acondicionamento de objetos em museus vai além da escolha do material e do design da embalagem. Aspectos como controle ambiental, manuseio apropriado e monitoramento contínuo das condições de armazenamento também desempenham um papel fundamental na conservação desses artefatos.

A utilização da impressão 3D representa uma abordagem promissora para a preservação de artefatos de ciência e tecnologia em acervos de museus. A capacidade de criar embalagens sob medida, adaptadas às características específicas de cada objeto, permite uma proteção mais eficiente e precisa. Além disso, a impressão 3D oferece a flexibilidade de utilizar diferentes

materiais, selecionando aqueles que melhor atendem aos requisitos de conservação de cada artefato. Portanto, a combinação de tecnologia, design e materiais adequados permite a criação de embalagens eficientes e personalizadas, contribuindo para a conservação segura desses objetos valiosos.

Durante o processo de pesquisa, exploramos os principais parâmetros de impressão e os principais polímeros disponíveis no mercado, levando em consideração as características necessárias para proteger os objetos de riscos potenciais. Por meio da técnica de impressão 3D FFF (Fabricação por Filamento Fundido), desenvolvemos um modelo experimental de embalagem para a bússola de marinha, objeto pertencente ao acervo do Museu de Astronomia e Ciências Afins. A impressão 3D possibilitou a criação de uma embalagem personalizada, adaptada às características específicas do artefato e capaz de oferecer proteção adequada.

Verificamos, portanto, que a aplicação da impressão 3D no contexto do patrimônio cultural traz benefícios significativos. Além de oferecer uma solução personalizada para acondicionar os objetos, a tecnologia permite a criação de réplicas digitais e físicas, contribuindo para a divulgação e o acesso público a esses itens. Isso é especialmente relevante quando se trata de artefatos únicos, raros ou frágeis, nos quais a exposição direta pode representar riscos à sua preservação. No entanto, é importante ressaltar que a tecnologia 3D não substitui as práticas tradicionais de conservação e restauro, mas sim complementa e potencializa essas técnicas.

A aplicação da impressão 3D no desenvolvimento de embalagens customizadas oferece vantagens significativas para o acondicionamento de objetos em museus. A capacidade de criar estruturas sob medida, com base nas especificidades de cada objeto, permite uma proteção mais eficiente e adaptada às necessidades de conservação. Além disso, a impressão 3D permite a utilização de materiais resistentes e duráveis, que podem ser selecionados de acordo com as características de cada objeto.

Além disso, é importante destacar que o uso da 3DP também apresenta benefícios em termos de sustentabilidade. A fabricação aditiva, como é conhecida a impressão 3D, permite a redução de desperdícios de materiais, uma vez que apenas a quantidade necessária de material é utilizada na produção de cada embalagem. Isso contrasta com os métodos tradicionais de fabricação, que frequentemente resultam em resíduos significativos. Outro aspecto importante é a possibilidade de realizar ajustes e melhorias nos projetos de acondicionamento de forma ágil e flexível. A impressão 3D permite a rápida prototipagem, possibilitando a realização de alterações no design com facilidade, conforme necessário.

No entanto, é fundamental destacar que a aplicação da impressão 3D no acondicionamento de objetos em museus deve ser realizada com cautela e em conjunto com outras práticas de conservação. A tecnologia por si só não é capaz de garantir a preservação a longo prazo dos artefatos. É necessário um planejamento cuidadoso, baseado em conhecimentos especializados em conservação e em um entendimento profundo das propriedades dos materiais utilizados na impressão 3D.

Outro fator a ser considerado é o tempo de execução. Quando comparado à velocidade de produção de outras alternativas e materiais de conservação, verifica-se um aumento significativo no tempo necessário à sua concretização. A esta desvantagem junta-se a ausência de estudos que atestem as características dos novos materiais de impressão e que informem sobre as eventuais interações que possam ter com as obras e que avaliem a eficácia e a durabilidade dessas embalagens ao longo do tempo.

Por fim, concluímos que a impressão 3D oferece uma abordagem promissora para o desenvolvimento de acondicionamentos personalizados em museus, especialmente para artefatos de ciência e tecnologia. Essa tecnologia inovadora permite a criação de soluções sob medida, combinando funcionalidade e estética, para garantir a preservação e a valorização do patrimônio cultural e científico. Embora ainda sejam necessários maiores estudos sobre a influência dos diferentes materiais e parâmetros de impressão, à medida que a impressão 3D continue a evoluir, espera-se que sua aplicação na área de criação de acondicionamento para a preservação se torne cada vez mais relevante e eficaz.

Deixamos como sugestão de trabalhos futuros a necessidade de realizar um estudo comparativo de diferentes materiais de impressão 3D para uso na preservação, bem como averiguar a influência destes materiais quando em contato com os objetos, considerando possíveis reações químicas ou danos potenciais. Indicamos o Polipropileno como sugestão de material a ser considerado na impressão de novos protótipos, tendo em vista que é um material essencialmente inerte, apesar de não ser, porém, biodegradável. Também se sugere maior aprofundamento na análise dos parâmetros de impressão e em suas interações de modo a obter o resultado ideal para a guarda dos artefatos.

Por último, acreditamos ser necessário a realização de uma avaliação da eficácia e durabilidade de embalagens ao longo do tempo considerando fatores como umidade, temperatura, exposição à luz e incidentes envolvendo água e fogo, bem como indicamos a importância de averiguar se os materiais das embalagens e os artefatos apresentam compatibilidade entre si ou se liberam substâncias que podem promover danos, considerando a proximidade entre eles e o tempo que permanecerão juntos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3DHUBS. **What is 3D printing? The definitive guide.** 2023. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/#basics>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

3DLAB. **Guia de comparação dos filamentos 3D.** Disponível em: <<https://3dlab.com.br/comparativo-filamentos-para-impressora-3d/>>. Acesso em: 14 fev. 2021.

3DNATIVES. **All you need to know about hips for 3D printing.** 2023. Disponível em: <https://www.3dnatives.com/en/hips-support-240820205/>. Acesso em: 03 mar. 2023.

3D PRINTING INDUSTRY. **The free Beginner's Guide to 3D Printing.** 2014. Disponível em: <http://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2014/07/3D-Printing-Guide.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2021.

ABREU, Regina. Patrimônio cultural: tensões e disputas no contexto de uma nova ordem discursiva. In: LIMA FILHO, Manuel Ferreira; BELTRÃO, Jane Felipe; ECKERT, Cornelia (Orgs). **Antropologia e patrimônio cultura: diálogos e desafios contemporâneos.** Blumenau: Nova Letra, 2007.

ABREU, Regina. A emergência do patrimônio genético e a nova configuração do campo do patrimônio. In: ABREU, Regina; CHAGAS, Mário (Org.). **Memória e patrimônio: ensaios contemporâneos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Lamparina, 2009. p. 34- 48.

ACKE, Lien; DE VIS, Kristel; VERWULGEN, Stijn; VERLINDEN, Jouke. Survey and literature study to provide insights on the application of 3D technologies in objects conservation and restoration. **Journal of Cultural Heritage.** v 49, 2021.

AGUIAR, L. C. D. **Um processo para utilizar a tecnologia de impressão 3d na construção de instrumentos didáticos para o ensino de ciências.** Dissertação (Mestrado em Educação para Ciência) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2016, 226p.

ALAFAGHANI, A., QATTAWI, A.; ABLAT, M.A. Design consideration for additive manufacturing: fused deposition modelling. **Open Journal of Applied Sciences.** v. 7, 2017. p. 291-318.

ALENCAR, F.; BÁRTOLO, P. J. **A prototipagem rápida e a digitalização ótica no design.** In: PELOSI, O. Ensaio em design: produção e diversidade. Bauru, SP: Canal 6, 2012, p. 128-151.

ALGARNI, M.; GHAZALI, S. Comparative study of the sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's mechanical properties to FDM printing process parameters. **Crystals.** v. 11, n. 995, 2021.

ALL3DP. **The Best Free 3D Printing Software in 2023.** 2023. Disponível em: <https://all3dp.com/1/best-free-3d-printing-software-3d-printer-program/>. Acesso em: 22 jan. 2023.

ARANTES, Antonio Augusto. O patrimônio cultural e seus usos: a dimensão urbana. **Habitus.** Goiânia, v. 4, n.1, p. 425-435, jan./jun. 2006.

ARAUJO, Bruno Melo de. Do Patrimônio Cultural ao Patrimônio Cultural da Ciência e Tecnologia. In: ARAUJO, Bruno Melo de. **Entre Objetos e Instituições: trajetória e constituição dos conjuntos de objetos de C&T das Engenharias em Pernambuco**. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Museologia e Patrimônio, UNIRIO/MAST, 2019.

ARAUJO, Bruno Melo de; GRANATO, Marcus. **Entre o Esquecer e o Preservar: a musealização do patrimônio Cultural de Ciência e Tecnologia**. In: Marcus Granato; Emanuela Sousa Ribeiro; Bruno Melo de Araújo. (Org.). *Cadernos do Patrimônio da Ciência e Tecnologia: instituições, trajetórias e valores*. Rio de Janeiro: MAST, 2017. p. 231-254.

ARIAS, Francisco; ENRÍQUEZ, Carlos; JURADO, Juan Manuel; ORTEGA, Lidia; ROMERO MANCHADO, Antonio; CUBILLAS, Juan José. Use of 3D models as a didactic resource in archaeology: a case study analysis. **Heritage Science**, v. 10, n. 112, 2022.

ASSIS, Cleiton L. F. de; MARTINS, Osvandre A.; MECELIS, Guilherme R.; CARVALHO, Ricardo C. Influência do tipo de material polimérico na resistência de peças impressas em 3D. **Plástico Industrial**. jan. 2019.

BADOTTI, A. **Avaliação do processo de metalização superficial aplicado às peças obtidas por estereolitografia**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. 149p.

BERTONI, Roberto; BERTONI, Filippo. Preserving the heritage of limnology in Italy. **Journal of Limnology**. 80 (3). 2021.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil: Constituição do Brasil, de 5 de outubro de 1988**. Brasília, DF: Senado Federal, 2013. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acesso em: 7 ago. 2021.

BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia. **Compass**. Encyclopedia Britannica. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/compass-navigational-instrument>. Acesso em: 22 jul. 2022.

BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia. **The magnetic compass**. Encyclopedia Britannica. 2022. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/magnetic-compass>. Acesso em: 22 jul. 2022.

CABREIRA, Vinicius. **Avaliação dos parâmetros de processamento em impressão 3D nas propriedades do poliácido láctico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre. 2018. 104p.

CARVALHO, E. **Pesquisadores usam cinzas do Museu Nacional para reconstruir acervo destruído em incêndio**. BBC News Brasil, 2019. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-47781771>>. Acesso em: 25 out. 2020.

CASTANHEIRA, Ana Teresa Gaspar. **Impressão 3D de estruturas para isolamento térmico**. Dissertação (Mestrado integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Portugal:

Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. 2016. 60p.

CAVALCANTI, D. K. K.; BANEJA, M.D.; QUEIROZ, H. F. M. de. Effect of material on the mechanical properties of additive manufactured thermoplastic parts. **Annals of Dunarea de Jos University of Galati**. v. 31, 2020. p. 5–12.

CHIARI, Giacomo; LEONA, Marco. **The state of conservation science**. Conservation: The GC1 Newsletter, v. 20.2, 2005. p. 4-9. Disponível em: <http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/newsletters/20_2/feature.html>. Acesso em: 10 nov. 2020.

CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. **Rapid prototyping: principles and applications**. 3ª ed. Singapore: World Scientific Publishing Company. 2010. 540p.

CHUVA, Márcia. **Os Arquitetos da Memória: sociogênese das práticas de preservação do patrimônio cultural no Brasil**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2009

CHUVA, Márcia (Org.). Por uma história da noção de patrimônio cultural no Brasil. **Revista do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional**. Brasília: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, n. 34, p. 147-165, 2012.

CHRISTIYAN, K.G.J.; CHANDRASEKHAR, U.; VENKATESWARLU, K. A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite. **IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.** 114 (1). 2016.

CUNHA, Paulo Manuel de Freitas. **Impressão 3D de Estruturas Híbridas**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros). Universidade do Minho, Portugal. 2019.

D´ALESSIO, Márcia Mansor. Metamorfoses do patrimônio – O papel do historiador. **Revista do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional**, n. 34, 2012, p.79-90.

D´ÁLMEIDA, Maria Luiza Otero (Coord.); FERREIRA, Daniela Colevati; PARRA, Rogério; DANTAS, Mara Lúcia Siqueira; YASUMURA, Patrícia Kaji; LOPEZ, Gonzalo Antonio Carballeira; MONTEIRO, Maria Beatriz Bacellar; PAGOTTO Júnior, Sidney Oswaldo. **Parâmetros de controle para caixas box destinadas a arquivos**. São Paulo: IPT, 2013. 115 p. (IPT Publicação 3014).

DE GUICHEN, Gael. **Conservación preventiva: ¿en qué punto nos encontramos en 2013?** Patrimonio Cultural de España. Conservación preventiva: revisión de una disciplina, v.7, 2013. pp.15-23. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/ejemplar?codigo=385118&info=open_link_ejemplar>. Acesso em: dez. 2020.

DILBEROGLU, Ugur M.; GHAREHPAPAGH, Bahar; YAMAN, Ulas; DOLEN, Melik. The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**. v. 11, 2017. p. 545-554.

ENGENHEIRO DE PLANTÃO. **Qual é o padrão de preenchimento que mais economiza material na impressão 3D**. Youtube, nov. 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/>

watch?v=HmkdXbldiEA#:~:text=utilizar%20um%20preenchimento%20maior%20n%C3%A9,impress%C3%A3o%20comparando%20com%20os%20outros. Acesso em: 21 fev. 2023.

EVANS, Brian. *Practical 3D printers – the science and art of 3D printing*. New York: Apress. 2012. 321p.

FABHEADS. What is the role of Slicing in 3D printing? Disponível em: <https://fabheads.com/blogs/what-is-the-role-of-slicing-in-3d-printing/>. Acesso em: 21 fev. 2023.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO RIO DE JANEIRO (FIRJAN). Casa Firjan. **Fab Labs**. Disponível em: <<https://casafirjan.com.br/fablab>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

FERNANDES, João Francisco Miranda. **Influência de parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PLA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). IFT Técnico Lisboa. 2016. 113p.

FERREIRA, Maria Letícia Mazzucchi. Patrimônio: discutindo alguns conceitos. **Diálogos**, v. 10, n. 3, p. 79-88, 2006.

FORSTER, A. **Materials testing standards for additive manufacturing of polymer materials: state of the art and standards applicability**. NIST Interagency/Internal Report, National Institute of Standards and Technology. 2015.

FUNARI, Pedro Paulo; PELEGRINI, Sandra C. A. **Patrimônio Histórico e Cultural**. 2. ed. Rio de Janeiro: Zahar, 2009.

GEBHARDT, Andreas. *Understanding additive manufacturing*. Hanser Publications. 2011.

GEBHARDT, Andreas; KESSLER, Julia; THURN, Laura. **3D Printing: understanding additive manufacturing**. Hanser Publications. 2ª ed. 2018.

GESTEIRA, Heloisa Meireles. **Agulha de marear**. In: MAGALHÃES; BOTELHO; LENZI; BEZERRA (Org). *Histórias do Brasil em 100 objetos do Museu Histórico Nacional*. Museu Histórico Nacional. 2022. 496p.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. Springer: New York, NY, USA, 2015.

GOH, G. D.; YAP, Y. L.; TAN, H. K. J.; SING, S. L.; GOH, G. L.; YEONG, W. Y. Process-structure-properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: a review. **Crit. Rev. Solid State Mat. Sci.** 2020, 45, 113–133.

GORNI, A.A. Introdução à Prototipagem Rápida e Seus Processos. **Plástico Ind.** 31:230–239. 2011.

GRANATO, Marcus; MAIA, Elias da Silva; SANTOS, Fernanda Pires. Valorização do patrimônio científico e tecnológico brasileiro: descobrindo conjuntos de objetos de C&T pelo Brasil. **Anais do Museu Paulista**, v. 22, p. 11-34, 2014.

GRANATO, Marcus; MIRANDA, Luiz Roberto Martins de. A restauração na trajetória de um teodolito do acervo do MAST. *Anais do Museu Paulista, São Paulo*, v. 19, jan./jun, n.1, p.279-312. 2011.

HERNÁNDEZ-MUÑOZ, Ó.; ARANDA GABRIELLI D, MARURI PALACÍN A, STERP MOGA E, SÁNCHEZ-ORTIZ A. 3D digital technologies for the elaboration of a replica of a dermatological didactic model belonging to the Olavide Museum from the original mould. *Heritage*. v. 5, n. 2, p. 702–15, 2022.

HIBBERT, K.; WARNER, G.; BROWN, C.; AJIDE, O.; OWOLABI, G.; AZIMI, A. The effects of build parameters and strain rate on the mechanical properties of FDM 3D-printed acrylonitrile butadiene styrene. *Open J. Org. Polym. Mater*. 9 (1). 2019. p. 1-27.

HOLLÓS, Adriana Cox; PEDERSOLI JUNIOR, José Luiz. **Gerenciamento de riscos: uma abordagem interdisciplinar**. Ponto de Acesso, Salvador, v. 3, n. 1, p. 72-81, abr. 2009.

IMPRESORAS3D. **Guia de bocal para impressoras 3D**. Disponível em: <https://www.impresoras3d.com/pt/guia-de-boquillas-para-impressoras-3d/>. Acesso em: 15 mai. 2023.

IMPRIMALAB. + **Info**. Disponível em: https://www.imprimalab.com.br/info?gclid=Cj0KCQjwO-kBhDIARIsAL6LorcWPw8wZPyea-72Ils0HKO4h98phACBhc_gszar__LiRssmCM0XtJgaAkcUEALw_wcB. Acesso em: 18 fev. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MUSEUS. **Cartilha Gestão de riscos ao patrimônio musealizado brasileiro**. Brasília: IBERMUSEUS, Ibram e Ministério da Cultura, 2017. Disponível em: <http://www.iber museos.org/pt/recursos/publicacoes/ cartilla-de-gestion-de-riesgos-al-patrimonio-musealizado-brasileno-2017/>>. Acesso em: 06 fev. 2021.

JESUS, M.; GUIMARÃES, A.S.; RANGEL, B.; LINO ALVES, J. The potential of 3D printing in building pathology: rehabilitation of cultural heritage. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*. 2023.

JOHN, Joel; DEVJANI, Deepak; ALI, Shafahat; ABDALLAH, Said; PERVAIZ, Salman. Optimization of 3D printed polylactic acid structures with different infill patterns using Taguchi-grey relational analysis. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. v. 6, n 1, 2023. P. 62-78.

KHOSRAVANI, M. R.; REINICKE, T. **Effects of raster layup and printing speed on strength of 3D-printed structural components**. In: Proceedings of the 1st European-Structural-Integrity-Society. Virtual European Conference on Fracture. 29 June–1 July 2020; p. 720–725.

KREUTZ, Barbara M. Mediterranean Contributions to the Medieval Mariner's Compass. *Technology and Culture*, v. 14, n. 367. 1973.

KUMARESAN, Rajan; SAMYKANO, Mahendran; KADIRGAMA, Kumaran; HARUN, W.S.W; RAHMAN, Mustafizur. Fused deposition modeling: process, materials, parameters,

properties, and applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 120. 2022.

LACERDA, Nayara; OLIVEIRA, Leonardo; VIMIEIRO, Claysson; SCARI, Alexandre. **Comparative study between 3D printing materials for application in a CESR prosthesis**. 2021.

LAYCOCK, S. D.; BELL, G. D.; CORPS, N.; MORTIMORE, D. B.; COX, G.; MAY, S.; FINKEL, I. Using a combination of micro-computed tomography, CAD and 3D printing techniques to reconstruct incomplete 19th-century cantonese chess pieces. **ACM Journal on Computing and Cultural Heritage**, v. 7, n. 4, 2015.

LOPIS, Erivania Azevedo. Patrimônio histórico cultural: preservar ou transformar? Uma questão conflituosa. **Mosaico**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 12, p. 9-23, 2017.

LOURENÇO, Marta C. O patrimônio da ciência: importância para a pesquisa. **Museologia e Patrimônio**, v.2, n.1, 2009, p.47-53.

LOURENÇO, Marta C. Preserving and studying scientific heritage at the University of Lisbon: Recent developments and perspectives. **Fuentes y Archivos**. Ano 4, número 4, 2013, pp. 95-109.

LOZI, Viviane. **Exposição Museu de Arte Sacra 3D**. Disponível em: <https://www.museudeartesacra.org.br/exhibition/museu-de-arte-sacra-3d/>. Acesso em: 28 abr. 2022.

LUBOMBO, C.; HUNEALUT, M.A. Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts. **Mater. Today Commun.**, 17, 2018. p. 214-228.

MA, Q.; REJAB, M.R.M.; KUMAR, A.P.; FU, H.; KUMAR, N.M.; TANG, J. Effect of infill pattern, density and material type of 3D printed cubic structure under quasi-static loading. **Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.** 2020.

MEDEIROS SÁ, A.; RODRIGUEZ ECHAVARRIA, K.; KAMINSKI, J.; GRIFFIN, M.; COVILL, D.; ARNOLD, D. **Parametric 3D-fitted frames for packaging heritage artefacts**. In: VAST 2012, The 13th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, incorporating 10th Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage. Eurographics Association, 2012. p. 105–112.

MENESES, Ulpiano Toledo Bezerra de. O campo do patrimônio cultural: uma revisão de premissas. In: SUTTI, Weber (Coord.). **I Fórum Nacional do Patrimônio Cultural: sistema nacional de patrimônio cultural – desafios, estratégias e experiências para uma nova gestão**. Brasília, DF: Iphan, p.25-39, 2012.

MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; BHOWMIK, J. L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. **Advances in Manufacturing**, 3(1), 2015. p. 42–53.

MOREIRA, K.B.; ONO, R. **Segurança em Museus**. Brasília: Ministério da Cultura –Instituto Brasileiro de Museus, 2011. Disponível em: <<https://www.museus.gov.br/wp-content/uploads/2012/08/Seguranca-emMuseus.pdf>>. Acesso em: 07 fev. 2021.

MOTTA, F. M. V.; SILVA, R. A. R. A adoção de tecnologias digitais na reconstrução do patrimônio: relato da experiência do Museu Nacional, **Brasil. Inf. & Soc.:**Est. João Pessoa, v.30, n.2, p. 1-16, abr./jun. 2020.

MUSEU DE ARTE SACRA DE SÃO PAULO. **Arte sacra para ver e sentir**. 2019. Disponível em: <http://museuartesacra.org.br/arte-sacra-para-ver-e-sentir-2/>. Acesso em: 15 abr. 2022.

MUSEU DE ASTRONOMIA E CIÊNCIAS AFINS. **Inventário da Coleção de Objetos de Ciência e Tecnologia do Museu de Astronomia e Ciências Afins**. Rio de Janeiro: MAST. 2ª ed., 2011. 233p.

NASCIMENTO, A. A. Tendências tecnológicas em prototipagem rápida e manufatura aditiva. 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. 105p.

PERROT, A.; AMZIANE, S., 2019. **3D Printing in Concrete: General Considerations and Technologies**. In: HOBOKEN, NJ. 3D Printing of Concrete. USA: John Wiley & Sons, Inc., p. 1-40.

PICCININI, Sonia Maria. **Redes de colaboração e patrimônio de C&T: o papel do herbário ICN da UFRGS na transmissão e preservação de valores e de práticas científicas**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Memória Social e Bens Culturais, Centro Universitário La Salle, Canoas. 2015.

POULOT, Dominique. **Uma história do patrimônio no ocidente**. São Paulo: Estação Liberdade, 2009.

ROBERSON, D.A.; SHEMELYA, C.M.; MACDONALD, E.; WICKER, R.B. Expanding the Applicability of FDM-Type Technologies through Materials Development. **Rapid Prototyping Journal**, 21, 2015. p. 137-143.

RODGERS, Alison Ince. **Compass**. National Geographic Society. 2022. Disponível em: <https://education.nationalgeographic.org/resource/compass>. Acesso em: 20 jun. 2022.

ROSADO, Alessandra. **Tópicos em conservação preventiva: manuseio, embalagem e transporte de acervos**. Belo Horizonte: LACICOR– EBA– UFMG, 2008.

ROSSI, Wagner Soares; SILVA, Fábio Pinto da; JÚNIOR, Wilson Kindlein. A utilização de modelos 3D para a preservação e divulgação de peças do patrimônio histórico e cultural: estudo de caso com escarradeira e urinol. **Arcos Design**, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 69-79, dez. 2013.

ROYAL MUSEUMS GREENWICH. **Binnacle and liquid compass**. 2022. Disponível em: <https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-7250>. Acesso em: 15 jun. 2022.

SAHA, Sunita; TOMKOWSKA, Anna; MARTUSEWICZ, Jacek; SITNIK, Robert. Manufacturing of ceramic venus figurine replica from a mold by combining traditional and digital technologies. **Heritage Science**, v. 11, n. 26, 2023.

SAMAROUDI, M.; RODRIGUEZ ECHAVARRIA, K. How 3D printing is transforming our relationship with cultural heritage. **The Conversation**. 2019. Disponível em: <https://theconversation.com/how-3d-printing-is-transforming-our-relationship-with-cultural-heritage-112642>. Acesso em: 18 jun. 2023.

SAMPAIO, C. **Guia Maker de impressão 3D – teoria e prática consolidadas**. [Livro digital Open Source]. 2017, 510p. Disponível em: <http://www.makerlinux.com.br/ebook>>. Acesso em: 12 fev. 2021.

SANTOS, Claudia Penha dos; BRASIL, Zenilda Ferreira; GRANATO, Marcus. Valorização do patrimônio científico e tecnológico brasileiro: objetos da área nuclear, levantamento e inventário como forma de preservação. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO, 9, 2008. São Paulo, **Anais...** São Paulo, USP, 2008.

SCOPIGNO, R.; CIGNONI, P.; PIETRONI, N.; CALLIERI, M.; DELLEPIANE, M. Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey. **Computer Graphics Forum**, 36: 6-21. 2015.

SERVIÇO, DE DOCUMENTAÇÃO DA MARINHA. **Introdução à história marítima brasileira**. Serviço de Documentação da Marinha, 2006. 181p.

SHEREMETIEFF JUNIOR, Alexandre; GONÇALVES, Afrânio A. G. Uma introdução às tecnologias de manufatura aditiva em acordo com a ABNT NBR ISO/ASTM. **Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis**. v. 14 n. 2, 2020.

SILVA, Pedro Coelho; SANTANDREA, Rafael Souza; BRANDÃO, Lincoln Cardoso; XAVIER, Marcos Vinício Antônio; VOLPINI, Victor Lattaro. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 6, n. 11, p. 84502-84515, nov. 2020.

SILVA, Ana Luisa; SALVADOR, Gabriel Maia da Silva; CASTRO, Sílvia V. F., CARVALHO; Nakédia M. F.; MUNOZ, Rodrigo, A. A. A 3D Printer Guide for the Development and Application of Electrochemical Cells and Devices. **Front. Chem.**, 02 jul 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2021.684256/full#h6>>. Acesso em: 15 ago 2021.

SILVA, Renan dos Santos. **Módulo de navegação 1: unidade de estudo autônomo**. MARINHA DO BRASIL. DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS. Ensino Profissional Marítimo. 2ª ed. Rio de Janeiro. 2010. 294 p.

SINGH, Dev; REDDY, Bavala Raji; ARJULA, Suresh. Characterization of Additive Manufactured PETG and Carbon Fiber –PETG AD. **International Journal for Research in Engineering Application & Management**. v. 04, n 02, 2018.

SOOD, A.K.; OHDAR, R.K.; MAHAPATRA, S.S. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. **J Adv Res**. 3(1). 2012. p. 81–90.

SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC**. Princípios e Aplicações. 2ª ed. Artliber. 2013. 332p.

STERP MOGA, Emanuel; HERNÁNDEZ MUÑOZ, Óscar; DEL RÍO ESTEBAN, Javier; SÁNCHEZ ORTIZ, Alicia. 3D digital technologies applied to the design and printing of auxiliary structures for fragment adhesion strategies on wax artifacts. **Heritage Science**, v. 10, n. 103, 2022.

STOLOW, Nathan. **Procedures and conservation standars for museum collections in transit and on exhibition**. UNESCO, 1981. 36 p.

TAUFIK, Mohammad; JAIN, Prashant Kumar. Role of build orientation in layered manufacturing: a review. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**. 27. 2014. p. 47-73.

THESAURUS DE ACERVOS CIENTÍFICOS EM LÍNGUA PORTUGUESA. Bússola de marinha. 2019. Disponível em: <http://thesaurusonline.museus.ul.pt/ficha.aspx?t=o&id=137>. Acesso em: 09 ago. 2022.

TONATTO, André William. **Influência de parâmetros de processamento em propriedades de amostras de um compósito polimérico condutor de eletricidade fabricadas por impressão 3D**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2017. 124p.

TUGORES TRUYOL, Francesca; FERRER PLANAS, Rosa. **Introducción al patrimonio cultural**. España: Trea, S.L., 2006.

VACCAREZZA, Mauro; PAPA, Veronica. **3D printing: a valuable resource in human anatomy education**. Anatomical Science International. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/266628033_3D_printing_A_valuable_resource_in_human_anatomy_education>. Acesso em 15 ago 2021.

VIÑAS, Salvador M. **Teoría Contemporánea de la Restauración**. Editorial Síntesis. Madrid, 2015.

VINITHA, M.; RAO, A.N.; MALLIK, M.K. Optimization of speed parameters in burnishing of samples fabricated by fused deposition modeling. **Int J Mech Ind Eng**. 2(2). 2012. p. 10–12.

VOGT, Olgário Paulo. Patrimônio cultural: um conceito em construção. **MÉTIS: História & Cultura**, v. 7, n. 13, p. 13-31, 2008.

VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. 1ª Edição. São Paulo. Editora Edgard Blücher. 2007.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. **Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D**. In: VOLPATO, Neri. Manufatura aditiva – Tecnologia e aplicações da impressão 3D. 1ª edição. São Paulo – SP – Editora Blucher, 2018.

WU, H.; FAHY, W.P.; KIM, S.; KIM, H.; ZHAO, N.; PILATO, L.; KAFI, A.; BATEMAN, S.; KOO, J.H. Recent developments in polymers/polymer nanocomposites for additive manufacturing. **Prog. Mater. Sci.**, 111, 2020.

XU, F.; LOH, H. T.; WONG, Y. S. Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems. **Rapid Prototyping Journal**, v. 5, n. 2, p. 54-60, 1999.

XU, J., DING, L.; LOVE, P.E.D. Digital reproduction of historical building ornamental components: from 3D scanning to 3D printing. **Automation in Construction**. v 76, 2017. p. 85-96.

FRONER, Yacy-Ara. **Tópicos em conservação preventiva: reserva técnica**. Belo Horizonte (Minas Gerais/Brasil): LACICOR-EBA-UFMG, 2008.

YEOH, C.K.; CHEAH, C.S.; PUSHPANATHAN, R.; SONG, C.C.; TAN, M.A.; TEH, P.L. Effect of infill pattern on mechanical properties of 3D printed PLA and cPLA. **IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.**, 957 (1). 2020.