

## SINERGIA ENTRE MODELAGEM 3D E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA OTIMIZAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

 <https://doi.org/10.56238/arev6n4-297>

**Data de submissão:** 18/11/2024

**Data de publicação:** 18/12/2024

### **Jonathan Oliveira Dias**

Pós-graduando no Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Meio Ambiente pelo Instituto Galileu de Tecnologia e Educação da Amazônia (EPMSA/ITEGAM)  
ORCID: 0009-0007-6760-2371

### **Milton Vieira Junior**

Professor do Mestrado Profissional de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Meio Ambiente do Instituto Galileu de Tecnologia e Educação da Amazônia (EPMSA/ITEGAM)  
ORCID: 0000-0002-8333-289X

### **Jandecy Cabral Leite**

Professora do Mestrado Profissional de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Meio Ambiente do Instituto Galileu de Tecnologia e Educação da Amazônia (EPMSA/ITEGAM)  
ORCID: 0000-0002-1337-3549

### **Genilson Roberto Maciel Ferreira**

Bacharel em Sistemas de Informação  
Instituto de Desenvolvimento Tecnológico (INDT)  
ORCID: 0009-0006-2720-9228

## **RESUMO**

A manufatura aditiva (MA), amplamente conhecida como impressão 3D, desporta como uma das tecnologias fundamentais da Indústria 4.0, possibilitando a fabricação de peças com alta complexidade geométrica e personalização. Este estudo investiga como a integração entre modelagem 3D e Redes Neurais Artificiais (RNAs) potencializa a eficiência e a qualidade dos processos de MA. A modelagem 3D fornece suporte para simulações detalhadas do comportamento dos materiais e dos processos de fabricação, enquanto as RNAs oferecem análise preditiva e aprendizado com grandes volumes de dados, permitindo ajustes automáticos e dinâmicos em parâmetros como velocidade, temperatura e padrões de preenchimento. Os resultados demonstram melhorias significativas na confiabilidade, redução de desperdícios e consumo energético, alinhando a produção às demandas de sustentabilidade. Adicionalmente, o grau de maturidade da Indústria 4.0 contribui para essa integração, com o uso de ferramentas como IoT, computação em nuvem e big data, criando um ambiente produtivo inteligente e conectado. Apesar dos desafios relacionados à infraestrutura tecnológica, à qualificação da mão de obra e ao desenvolvimento de algoritmos para RNAs, os benefícios superaram os obstáculos, resultando em maior flexibilidade e personalização dos processos produtivos. Este trabalho conclui que a integração de modelagem 3D e RNAs na manufatura aditiva representa um marco na transformação digital e na competitividade do setor industrial, destacando-se como uma abordagem promissora para otimização de processos e tomada de decisão baseada em dados.

**Palavras-chave:** Modelagem 3D, Redes Neurais Artificiais (RNA), Otimização de Processos, Manufatura Aditiva, Indústria 4.0.

## 1 INTRODUÇÃO

Para (Gao et al., 2015), a Indústria 4.0 refere-se à quarta revolução industrial, caracterizada pela integração de tecnologias digitais avançadas nos processos de produção e manufatura. Ela combina automação, inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT), big data e sistemas ciberfísicos para criar fábricas inteligentes, onde máquinas, dispositivos e sistemas se comunicam e operam de maneira autônoma e otimizada. O objetivo principal da Indústria 4.0 é aumentar a eficiência, flexibilidade e personalização dos processos produtivos, permitindo maior adaptação às necessidades do mercado e melhor utilização dos recursos.

A Manufatura Digital, envolve o uso de tecnologias digitais avançadas para automatizar e otimizar os processos de produção. Segundo Silva e Andrade (2020), essa abordagem utiliza ferramentas como a modelagem 3D, simulação, inteligência artificial e a integração de dados em tempo real para conectar de maneira inteligente as operações industriais. Dessa forma, permite que todo o ciclo de vida do produto/projeto seja gerido digitalmente. Conforme Almeida (2019), esse modelo favorece a personalização dos produtos, a redução de custos e a melhoria da eficiência, o que permite uma adaptação mais ágil às mudanças do mercado

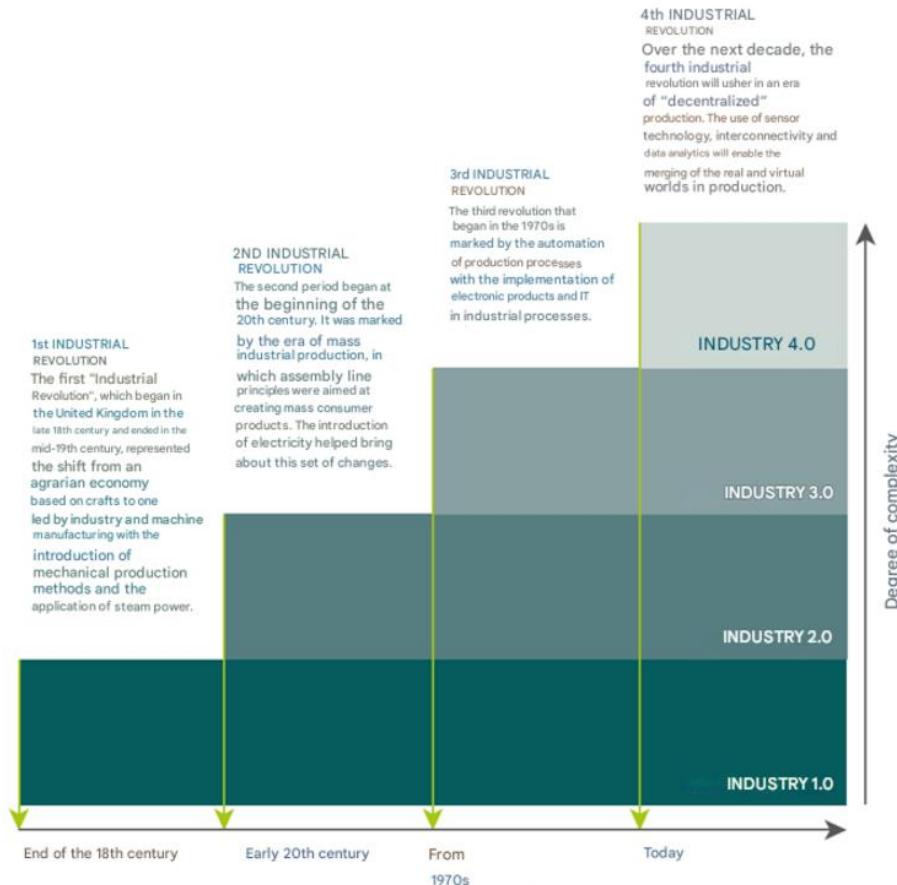
O presente trabalho tem por objetivo investigar o comportamento de peças produzidas por meio da manufatura aditiva em comparação às peças produzidas por meio de outros métodos convencionais de manufatura, buscando a otimização com o uso de recursos da integração de CAD/CAM/CAE, no contexto da Indústria 4.0 e aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) na aprendizagem dos resultados obtidos a partir de simulações, para a tomada de decisão quanto as melhores propriedades dos materiais.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 FUNDAMENTOS DA INDUSTRIA 4.0

Para CNI (2024), a Indústria 4.0, também conhecida como a quarta revolução industrial, representa a integração de tecnologias digitais avançadas no ambiente industrial. Ela é caracterizada pela adoção de sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, big data, inteligência artificial e manufatura aditiva. A Figura 1 mostra essa evolução ao longo do tempo, conforme apontado por DELOITTE (2015, apud FIRJAN, 2016). Destaca-se que a I4.0 fundamenta-se na produção descentralizada e na conectividade.

FIGURA 1: AS QUATRO REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS.

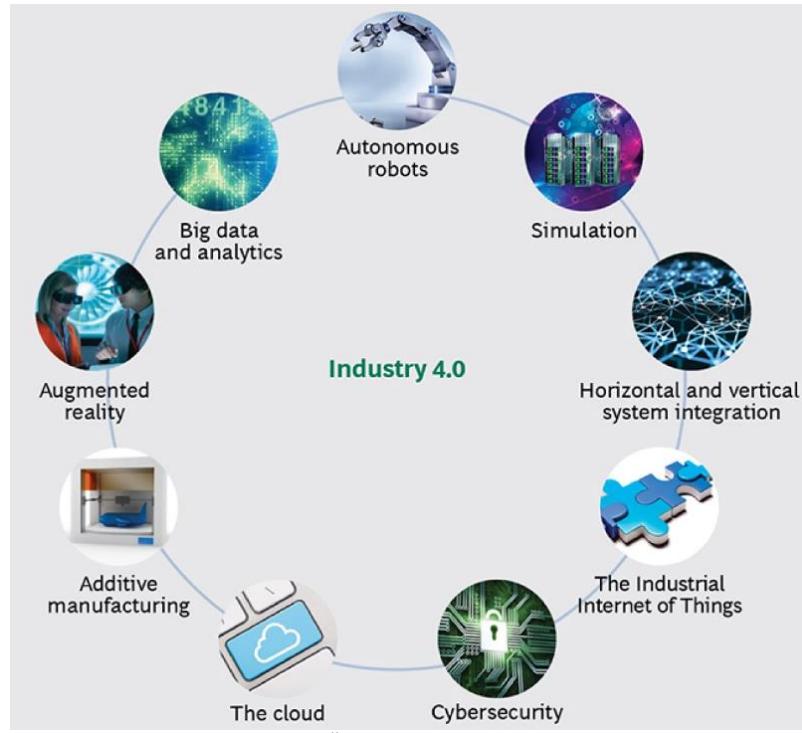


Fonte: Adaptado de DELOITTE, (2015).

## 2.2 MANUFATURA ADITIVA

A Manufatura Aditiva (MA), conforme estabelecido pela ISO/ASTM 52900 (2015), é um processo de fabricação que envolve a junção de materiais, geralmente camada por camada, para criar objetos físicos a partir de um modelo digital tridimensional. Esse método se diferencia dos processos tradicionais de manufatura, como o subtrativo, onde o material é removido para moldar o objeto, e o formativo, no qual o material é moldado para alcançar a forma desejada. A Figura 2 apresenta as tecnologias conhecidas como pilares da indústria 4.0, dos quais a MA faz parte.

FIGURA 2: PILARES DA INDUSTRIA 4.0

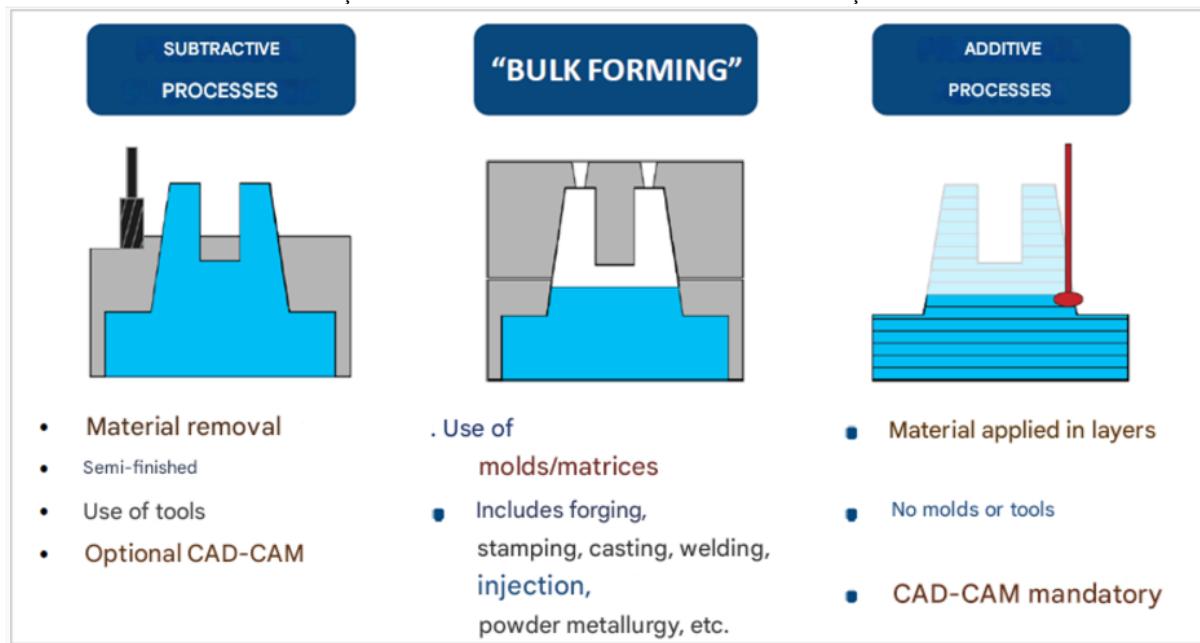


Fonte: RÜßMANN *et al.*, (2015).

Dentre as vantagens da manufatura aditiva, quando comparada com as demais formas convencionais de manufatura, podem ser citadas: 1. Liberdade Geométrica; 2. Eficiência de Material e Energia; 3. Redução da Necessidade de Ferramentas Específicas; 4. Agilidade na Prototipagem e Produção de Pequenos Lotes.

Dentre as desvantagens da manufatura aditiva, quando comparada com as demais formas convencionais de manufatura, podem ser citadas: 1. Qualidade Superficial e Dimensional; 2. Limitação de Materiais Disponíveis; 3. Custo Elevado; 4. Distorções e Empenamentos; 5. Menor Velocidade de Produção:

FIGURA 3: COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO MAIS UTILIZADOS



Fonte: Portal edisciplina.usp.br; Disciplina Manufatura Aditiva. Acesso: 28.11.2024.

### 2.2.1 Principais processos e tecnologias de manufatura aditiva.

De acordo com a Additive Manufacturing Technology Standards ASTM F2792, os tipos principais de tecnologias de fabricação aditiva são:

- FDM - Modelagem por Deposição de Material Fundido (Fused Deposition Modeling).
- SLA - Estereolitografia (Stereolithography).
- SLS - Sinterização Seletiva a Laser (Selective Laser Sintering).
- DMLS – Sinterização direta a laser de metal (Direct Metal Laser Sintering)
- LENS - Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (Laser Engineered Net Shaping)
- LOM - Manufatura de Objetos em Lâminas (Laminated Object Manufacturing).
- SGC - Cura Sólida na Base (Solid Ground Curing).
- MJT - Impressão por Jato de Tinta (Multi Jet Modeling).

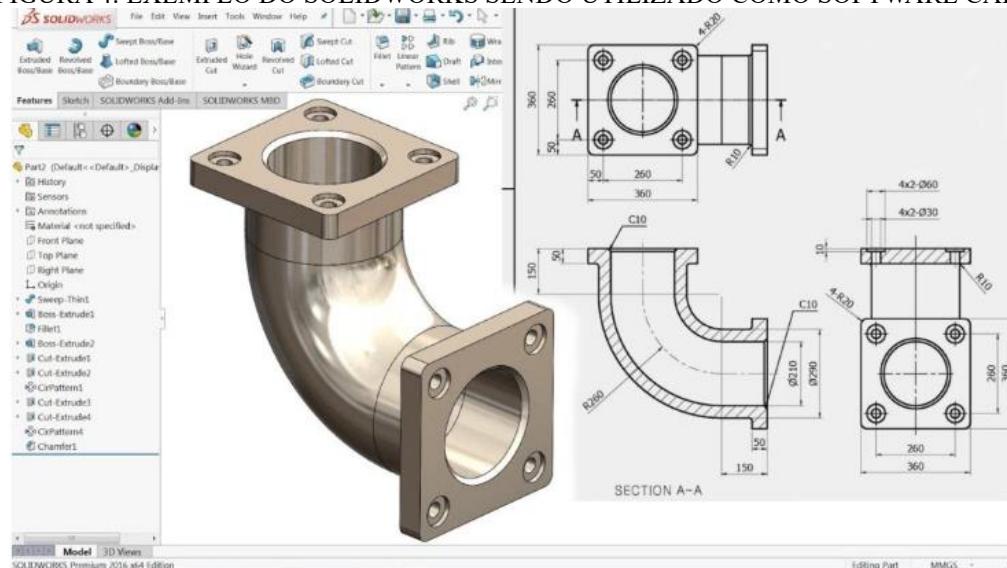
### 2.3 MODELAGEM 3D E FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

A Modelagem 3D, é realizada por meio de sistemas CAD. Com a evolução dos sistemas CAD, as funcionalidades se expandiram para incluir a simulação e a análise de desempenho dos projetos, integrando-se com ferramentas CAE e CAM. Estas ferramentas não apenas facilitam o desenho técnico, mas também permitem a simulação detalhada das características e propriedades físicas dos componentes, além da realização de testes de performance.

### 2.3.1 Desenho Assistido por Computador (CAD)

O CAD proporciona uma série de vantagens sobre métodos tradicionais de desenho (Figura 4), incluindo maior precisão, eficiência e a capacidade de realizar alterações rápidas e econômicas no projeto (SALDANHA, 2017; SILVA *et al.*, 2019).

FIGURA 4: EXEMPLO DO SOLIDWORKS SENDO UTILIZADO COMO SOFTWARE CAD.

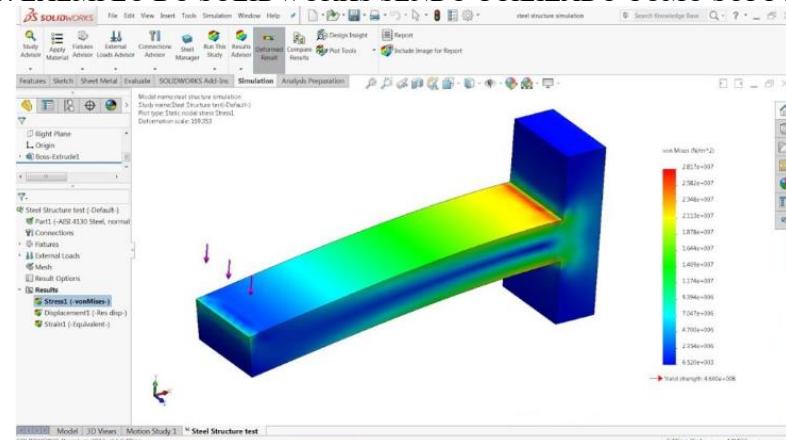


FONTE: [HTTPS://VFGENGENHARIA.COM/ENTENDA-A-DIFERENCA-ENTRE-CAD-CAE-E-CAM/](https://VFGENGENHARIA.COM/ENTENDA-A-DIFERENCA-ENTRE-CAD-CAE-E-CAM/), (2024).

### 2.3.2 Simulação e Análise por Computador (CAE)

O CAE, ou "Computer Aided Engineering" (Engenharia Assistida por Computador), desempenha um papel fundamental no processo de desenvolvimento de produtos, este envolve o uso de softwares para realizar simulações e análises que avaliam o comportamento e o desempenho dos produtos sob diferentes condições. Essas análises incluem simulações de estresse, dinâmica dos fluidos e transferência de calor, conforme exemplo da Figura 5, permitindo a identificação de problemas antes da fabricação física (NASCIMENTO *et al.*, 2017).

FIGURA 5: EXEMPLO DO SOLIDWORKS SENDO UTILIZADO COMO SOFTWARE CAE.

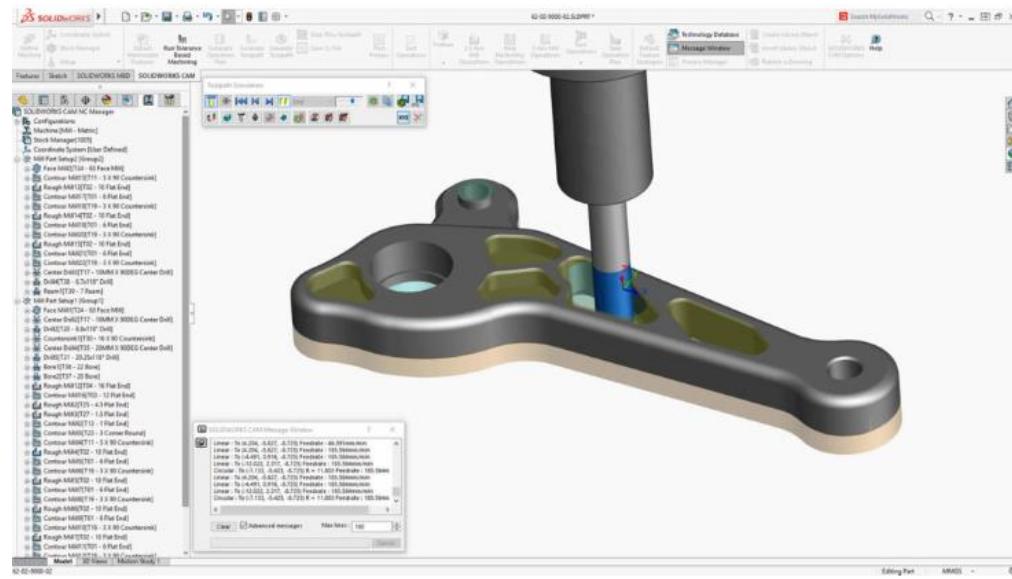


Fonte: <https://vfgengenharia.com/entenda-a-diferenca-entre-cad-cae-e-cam/>, (2024).

### 2.3.2 Fabricação Assistida por Computador (CAM)

O termo CAM, que vem de "Computer Aided Manufacturing" (Fabricação Assistida por Computador), refere-se à utilização de sistemas computacionais para controlar o processo de manufatura. O CAM surgiu como uma extensão do CAD, com o objetivo de melhorar a automação e a precisão na produção de peças e componentes conforme mostra a Figura 6.

FIGURA 6: EXEMPLO DO SOLIDWORKS SENDO UTILIZADO COMO SOFTWARE CAM.



Fonte: <https://vfgengenharia.com/entenda-a-diferenca-entre-cad-cae-e-cam/>, (2024).

## 2.4 PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Para que a integração CAD/CAE/CAM possa ser realizada, com uma análise completa do comportamento de peças projetadas em simulação, é preciso conhecer as principais propriedades mecânicas que podem interferir no desempenho das peças, conforme detalhadas a seguir.

#### **2.4.1 Módulo de elasticidade (módulo de Young)**

Mede a rigidez do material, indicando como este se comporta sob tensão. Essa propriedade expressa a relação entre a força aplicada por unidade de área e a deformação resultante no material, sendo representada em unidades de pressão, como N/m<sup>2</sup> (Pascal). Segundo Callister e Rethwisch (2014), o módulo de elasticidade permite avaliar a resistência do material à deformação elástica sob carga.

#### **2.4.2 Limite de escoamento**

Define a tensão máxima que um material pode suportar antes de começar a sofrer deformação plástica permanente. Quando um material possui um maior limite de escoamento, isso indica que ele pode suportar forças mais intensas sem se deformar de maneira irreversível, comparado a materiais com um limite de escoamento menor.

#### **2.4.3 A resistência à tração e à compressão**

São propriedades mecânicas que descrevem como um material responde a diferentes tipos de forças aplicadas. A resistência à tração refere-se à capacidade de um material suportar forças que tendem a esticá-lo ou alongá-lo, enquanto a resistência à compressão mede a capacidade do material de resistir a forças que tendem a compactá-lo ou a esmagá-lo.

#### **2.4.4 Massa específica**

Também conhecido como densidade. De acordo com Callister e Rethwisch (2014), uma massa específica maior pode significar que o material é mais robusto e oferece uma maior resistência a forças externas, o que é benéfico em aplicações estruturais onde a resistência e a durabilidade são importantes. Em contraste, materiais com menor massa específica são mais leves e, portanto, podem ser mais vantajosos em situações em que a redução de peso é importante, por exemplo em mecanismo e sistemas de acionamentos. Resistência a tração e compressão.

### **2.5 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA)**

As redes neurais artificiais (RNAs) são sistemas computacionais inspirados na estrutura e no funcionamento do cérebro humano e consistem em camadas de neurônios artificiais interconectadas que processam informações por meio de algoritmos matemáticos. Cada conexão possui pesos convenientes, estes são calibrados durante uma etapa de treinamento, com a intenção de melhorar a capacidade de previsão ou classificação. As RNAs, como são chamadas as Redes Neurais Artificiais,

são amplamente utilizadas em áreas como reconhecimento de padrões, processamento de imagens e tomada de decisões, permitindo avanços avançados em inteligência artificial, tendo seus algoritmos estruturados e desenvolvidos em diversos tipos de linguagens de programação (DataGeeks, 2023; CAPES, 2023).

No âmbito acadêmico e industrial brasileiro, as RNAs são ferramentas essenciais para solucionar problemas complexos envolvendo grandes volumes de dados. Em áreas como saúde e segurança, eles viabilizam diagnósticos mais precisos e sistemas de vigilância eficientes. Em áreas de pesquisa, permitem o aprendizado de situações complexas e são aplicadas principalmente para evitar falhas em processos. Além disso, tecnologias como backpropagation e regularização mitigam problemas de overfitting, o que permite maior robustez dos modelos desenvolvidos. O uso de RNAs exige grande capacidade computacional e um planejamento cuidadoso para evitar vieses ou erros de interpretação que melhorem sua eficácia (DataGeeks, 2023; CAPES, 2023).

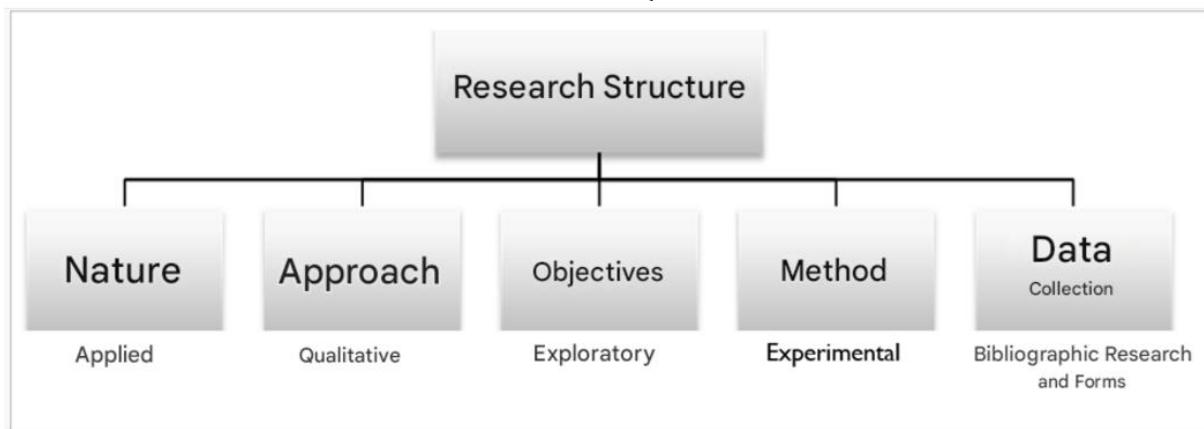
Apesar dos desafios, as RNAs representam um campo em expansão, com aplicação crescente no Brasil. Estudos e investimentos contínuos permitem o desenvolvimento de soluções mais acessíveis e eficazes. Um exemplo é a integração de redes neurais em sistemas industriais para prever falhas e melhorar processos produtivos, o que contribui para maior competitividade e inovação, principalmente quando integrado a outras tecnologias e Indústria 4.0. Essa evolução destaca a relevância das RNAs não apenas como ferramentas técnicas, mas também como motores de transformação social e econômica (CAPES, 2023; DataGeeks, 2023).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia de pesquisa adotada neste estudo baseia-se no desenvolvimento e análise do fluxo de etapas de fabricação do protótipo de uma peça mecânica, utilizando o processo de manufatura digital, da Indústria 4.0, com foco na Manufatura Aditiva (MA). Pretende-se modelar, simular, prototipar e comparar os resultados obtidos entre o processo de MA e o processo convencionais de manufatura por usinagem CNC, assim como investigar os benefícios e vantagens da utilização de softwares de modelagem e simulações (CAD/CAM/CAE).

O trabalho pode ser classificado como uma pesquisa de natureza aplicada, pois tem foco no uso em ambiente industrial, e com abordagem qualitativa; tem objetivos exploratórios, pois busca-se conhecer mais sobre a chamada manufatura digital e a manufatura aditiva. Com relação ao método de pesquisa, o trabalho tem caracterização de experimental, pois é baseado em experimentos de fabricação convencional e de fabricação por manufatura aditiva. E a coleta de dados será por meio do uso de formulários com resultados de observações dos experimentos e estudos documentais (Figura 7).

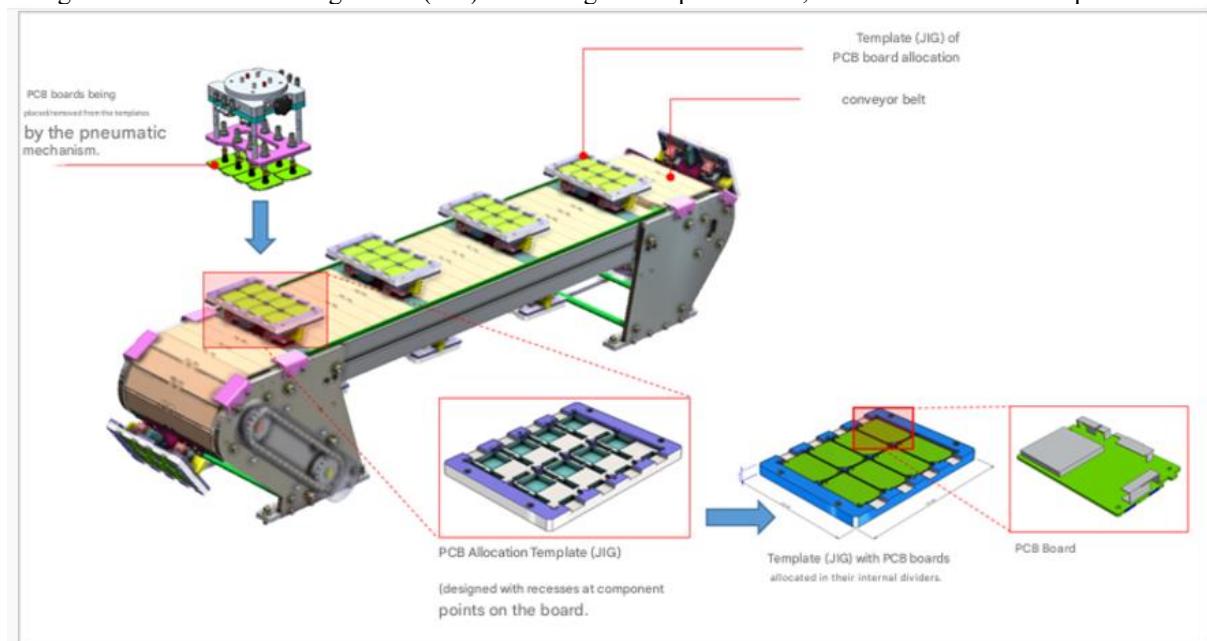
FIGURA 7: ESTRUTURA DA CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA APLICADA.



Fonte: Autores, (2024).

A peça a ser prototipada pertence a um projeto de automação e P&D desenvolvido pelo Instituto IBBI, em parceria com uma empresa do Polo Industrial de Manaus. Esta peça será um gabarito (também chamado de JIG), com 08 divisórias internas, destinadas para a alocação de 08 (oito) placas de circuito impresso (PCB) em cada. Esse gabarito será montado sobre a estrutura móvel de uma esteira transportadora, sendo um total de 10 gabaritos montados nessa esteira, que será utilizada em uma linha de produção SMT automatizada, conforme indicado na Figura a seguir o detalhamento do gabarito e da montagem das placas PCB. Esta esteira transportadora, apresentará a função de transportar as placas PCB entre dois postos de trabalho, onde as placas PCB serão colocadas e retiradas por robôs industriais dotados de um sistema com ventosas pneumáticas, conforme indicado na Figura 8 o detalhamento do gabarito e da montagem das placas PCB.

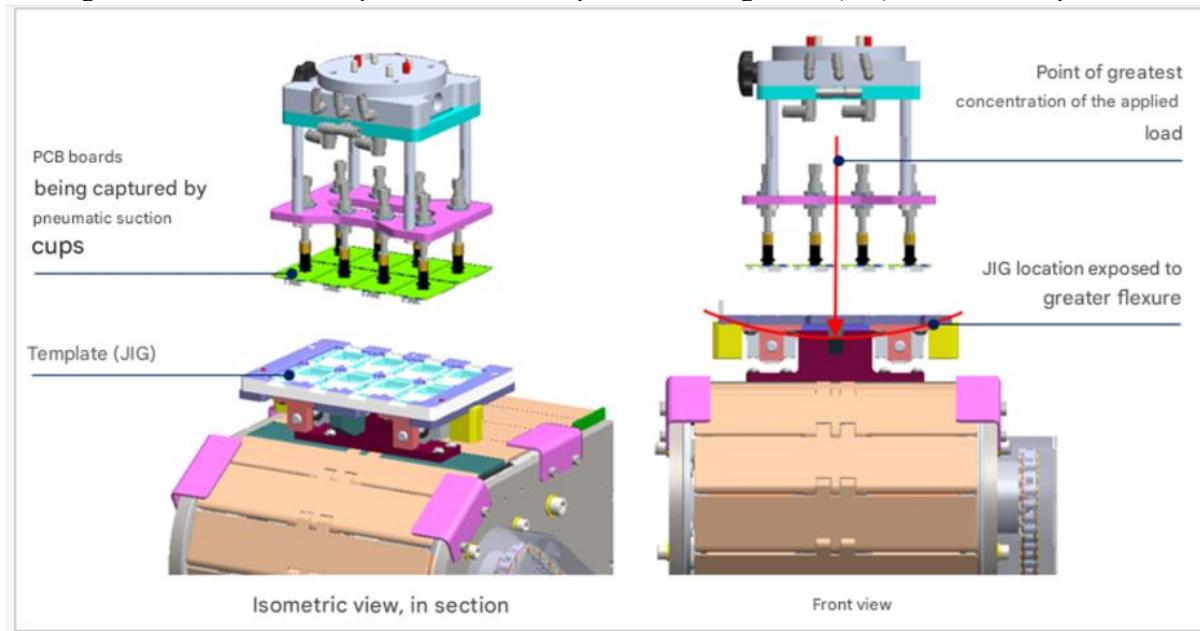
Figura 8: Detalhamento do gabarito (JIG) de montagem das placas PCB, item a ser desenvolvido pelo IBBI.



Fonte: Autores, (2024).

Na entrada da esteira, um robô industrial, dotado de uma garra com ventosas pneumáticas, posicionará as placas PCB dentro das divisórias do gabarito e ao final da esteira outro robô com sistema similar realizará a retirada das Placas PCB do gabarito e moverá para outra etapa do processo produtivo. O gabarito deverá ser fabricado em material que resista ao processo de movimentação contínua da esteira, e as constantes aplicações de cargas, proveniente da pressão exercida pelas ventosas nas garras dos robôs, na entrada e saída da esteira transportadora. Na Figura 9 é ilustrado os detalhes do posicionamento das placas PCB no gabarito (peça a ser desenvolvida e prototipada neste projeto), além de enfatizar o ponto de carga e a região que estará mais propícia a sofrer flexão, condição essa que deverá ser evitada, através de análises e simulações, seguido da escolha do melhor material e processo, com o auxílio de simulações por softwares e prototipação por MA.

Figura 9: Detalhamento do posicionamento das placas PCB no gabarito (JIG) da esteira transportadora



Fonte: Autores, (2024).

### 3.1 CONCEPÇÃO E REQUISITOS DA PEÇA A SER PROTOTIPADA

O produto (peça) foi desenhado inicialmente em CAD 3D, utilizando o software Solidworks®, e previamente projetado para assegurar as seguintes características abaixo, conforme análise do processo e definição do cliente, como requisitos do projeto.

- Apresentar resistência mecânica a cargas estáticas oriundas da pressão exercida pelas ventosas pneumáticas durante a alocação e retirada das placas PCB. Considerar carga máxima de 5N;
- Suportar temperaturas de trabalho até 80°C, próximo ao Servo motor e 50°C em contato com a PCB, já considerando uma larga tolerância de 20%;
- Suportar pressão de trabalho de 50Kgf ou 5N;
- A massa do gabarito (JIG) não deve ultrapassar 0,9 Kg, pois serão 10 JIGs montados na esteira (requisito do projeto, solicitado pelo cliente);

A primeira etapa consistiu na definição dos requisitos funcionais e de desempenho da peça (gabarito). A segunda etapa consistiu na seleção de alguns materiais aplicáveis à manufatura tradicional (subtrativa) e à aditiva, e que atendam total ou parcialmente as características supracitadas, e de disponibilidade comercial local de aquisição dos materiais e lista de materiais aprovados, para uso interno nas linhas de montagem do cliente.

Para a manufatura aditiva, selecionou-se os seguintes materiais, com base nas informações levantadas nos pré-requisitos da peça/protótipo: 1. Filamento de PLA (Ácido Polilático); 2. Filamento

de PETG (Polietileno Tereftalato Glicol); 3. Filamento de PP (polipropileno). Para a manufatura tradicional, selecionou-se os seguintes materiais, com base nas informações levantadas nos pré-requisitos da peça/protótipo; 1. Copolímero Acetal (POM); 2. Liga de Alumínio 1060; 3. Chapa de fenolite. Os equipamentos disponibilizados para utilização são: 1. Equipamentos e Ferramentas mecânicas, como paquímetro, fresa de bancada, furadeira /parafusadeira, brocas, parafusos, entre outros elementos de fixação; 2. Máquina CNC (Computer Numerical Control): Yamazak; 3. Impressora 3D: Creality Ender 3 V2®.

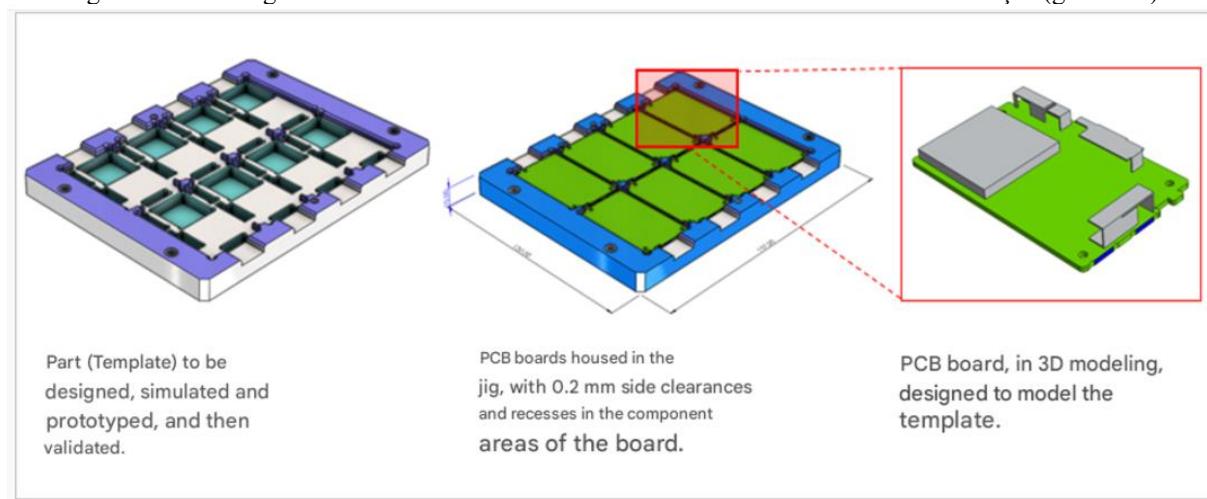
Softwares utilizados:

- Solidworks 2022®: Software com suporte a ferramentas CAD/CAM/CAE, empregado na modelagem 3D de projetos, simulações e manufatura.
- FlashPrint 5®: Software de impressão 3D, free e de código aberto.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise comparativa entre os processos de Manufatura Aditiva e subtrativa, integrados com as ferramentas de modelagem 3D (CAD), simulações (CAM/CAE) e prototipagem, foram realizadas no contexto da Indústria 4.0, buscando identificar o método mais eficiente e adequado para a produção de um componente específico (Gabarito), conforme modelagem 3D ilustrada na Figura 10.

Figura 10: Modelagem 3D e dimensionamento da Placas PCB a ser armazenada nos berços (gabaritos)



Fonte: Autores, (2024).

##### 4.1 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

As principais propriedades mecânicas avaliadas foram o módulo de elasticidade, limite de escoamento, resistência a tração, compressão e massa específica. Estas propriedades são disponibilizadas pelo software de modelagem e simulação, a partir da inserção das informações do tipo

de material, tratamentos superficiais, desenho 3D da peça e outros dados disponíveis. Segundo a Figura 11, entre os três materiais pré-selecionados, destinados à manufatura aditiva, o filamento que apresenta as melhores propriedades mecânicas foi o Filamento de PLA (ácido poliláctico), seguido pelo PETG (polietileno tereftalato de glicol). dentre os três materiais pré-selecionados, destinados a manufatura subtrativa ou convencional a chapa de Fenolite apresentou o melhor desempenho, seguida pela chapa de alumínio (liga comercial).

Figura 11: Comparação das principais propriedades mecânicas de alguns materiais utilizados no processo de manufatura aditiva e subtrativa

Mechanical properties	Unit	Additive Manufacturing (AM)			Subtractive manufacturing	
		PLA (Polylactic Acid) Filament	PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) Filament	Braskem PP (polypropylene) filament	Acetal Copolymer (POM)	1060 Aluminum Alloy
Elastic modulus:	$\times 10^9 \text{ N/m}^2$	3.5	2.1	1.6	2.7	6.9
Poisson's ratio:	N/A	0.36	0.38	0.42	0.35	0.33
Shear modulus:	$\times 10^9 \text{ N/m}^2$	1.2	0.8	0.6	1	26
Specific mass:	Kg/m <sup>3</sup>	1250	1270	900	1410	2700
Tensile strength:	$\times 10^6 \text{ N/m}^2$	60	50	30	70	110
Compression resistance:	$\times 10^6 \text{ N/m}^2$	60	50	30	70	110
Yield limit:	$\times 10^6 \text{ N/m}^2$	48	45	25	50	40
Thermal expansion coefficient:	$1 \times 10^{-6}/\text{K}$	68	75	100	80	24
Thermal conductivity:	W/(m.K)	0.13	0.22	0.22	0.3	237
Specific heat:	J/(Kg.K)	1800	1200	2000	1500	900
						1300

Caption:

Better mechanical properties, by material type.

Best material, by manufacturing type (additive and subtractive)

Fonte: Autores, (2024).

A escolha do material depende, além da análise das propriedades mecânicas, da aplicação a qual será destinada. Um material pode ter características mecânicas inferiores a outros, porém atendem a outros requisitos importantes e mostram-se economicamente mais viáveis, apresentar maior facilidade de manufatura, armazenamento, transporte etc.

#### 4.2 MODELAGEM E SIMULAÇÕES: ANÁLISE DE MALHAS PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

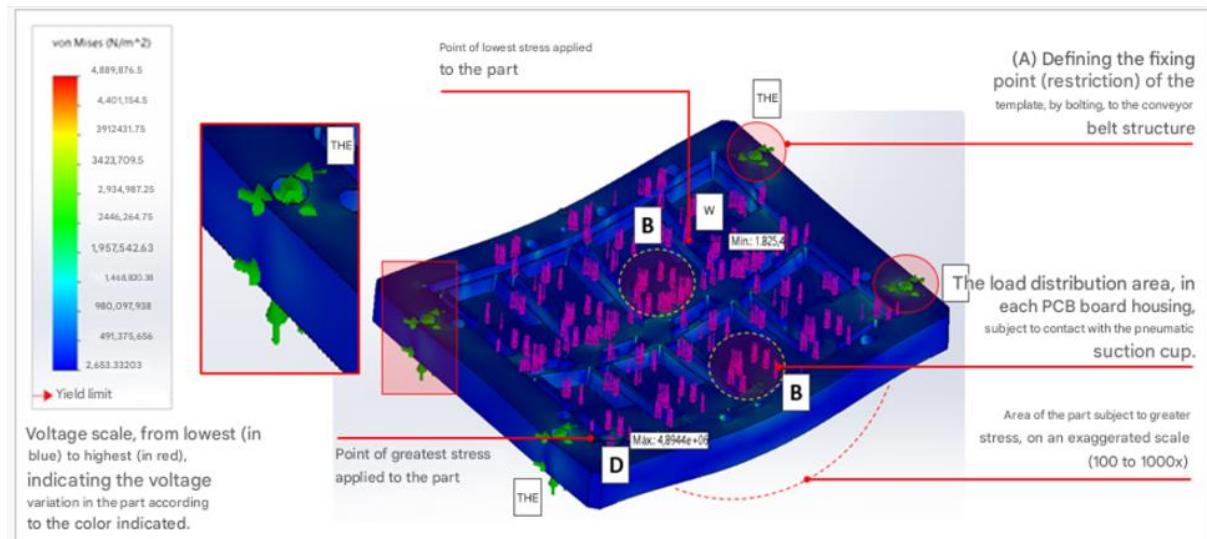
Na análise de elementos finitos (FEA) realizada no Solidworks® ou em outros softwares de simulação, três dos principais resultados obtidos são a tensão de Von Mises, o deslocamento e a

deformação. Esses três resultados formam a base da avaliação de uma análise de elementos finitos, permitindo prever o comportamento da peça ou estrutura em condições reais de operação.

Durante a etapa de preparação do ambiente de simulação, precisa-se definir o tipo de simulação, tipo carga aplicada (força ou pressão), ponto ou área de aplicação e os pontos ou áreas de fixação da peça e tipo de fixação, para então gerar as malhas e realizar a simulação pelo método de elementos finitos. Para este estudo, foi selecionado a simulação de análise estática, e um carregamento de força igual a 50N, sobre toda a superfície de contato da placa PCB com o gabarito (berço), área que receberá a carga oriunda da pressão exercida pelo contato da ventosa de sucção pneumática com a placa PCB. É de conhecimento que a pressão real do contato da ventosa de sucção com a placa PCB é muito inferior, porém foi definido pelo cliente pela aplicação este valor para simular uma condição extrapolada (exagerada) e assim obter resultados melhores, uma vez que é possível evidenciar melhor a distinção de resultados entre os diferentes materiais. O próximo passo foi definir os pontos de fixação (engastamento) da peça, e os acessórios de fixação, parafusos métricos do tipo Allen cabeça cilíndrica M5 e arruelas lisa, para então gerar as malhas e plotar os valores da simulação

Após a definição dos parâmetros de entrada, são então geradas as malhas para a peça em estudo, assim como plotados os gráficos e tabelas com os dados de tensão deformação e deslocamento máximos e mínimos, tipo de malha, tamanho de elementos, tamanho de nós, tempo de simulação, entre outros. A Figura 12 exemplifica uma análise pelo MEF, com destaque para a Tensão de Von Misses a que cada elemento é submetido, o deslocamento de cada nó e a deformação em cada elemento.

Figura 12: Análise de malhas pelo Método de Elementos Finitos (MEF)



Fonte: Autores, (2024).

As simulações realizadas foram úteis, pois informam, de forma estimada, os pontos em que a peça está mais sujeita a danos por fadiga e stress e propensa a colapsar ou sofrer algum dano ou desgaste excessivo e mais rápido. Os dados obtidos norteiam a escolha do melhor material ou a tomada de decisão referente a relação custo x benefício do material a utilizar, método de fabricação e correções do design, com a adição ou remoção de material, pontos de alívio, chanfros etc. A Figura 13 apresenta os dados sumarizados, da simulação pelo MEF, aplicado aos materiais selecionados o processo de manufatura aditiva e subtrativa.

Figura 13: Tópicos de análise pelo MEF, aplicados aos materiais destinados a manufatura aditiva.

Topics for analysis by MEF		Unit	Additive Manufacturing (AM)			Subtractive manufacturing		
			PLA (Polylactic Acid) Filament	PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) Filament	PP (polypropylene) filament	Acetal Copolymer (POM)	1060 Aluminum Alloy	phenolite sheet
Strengths	Resultant force	N		50 N			50	
Volumetric properties	Mass	kg	0.14317	0.14546	0.10308	0.15920		0.15462
	m <sup>3</sup>		0.00011	0.00011	0.00011	0.00011		0.00011
	Density	Kg/m <sup>3</sup>	1250	1270	900	1390		1350
	Weight	N	1,40302	1,4255	1.01018	1.56016		1.51526
von Mises voltage	Von Mises stress max.	N/m <sup>2</sup>	4889876.5	4893539	4899759.5	4894369.5		4888347.5
	Von Mises stress min.	N/m <sup>2</sup>	2653.33	1855.98	1999.13	1825.41		2687.39
	Yield limit	N/m <sup>2</sup>	48000000	45000000	25000000	50000000		55000000
	Percentage yield limit	N/m <sup>2</sup>	10%	11%	20%	10%	#DIV/0!	9%
Resulting displacement	Max displacement.	mm	0.079031	0.131317	0.170965	0.105956		0.027697 0
	Min displacement.	mm	0	0	0	0		-
Equivalent Deformation	Max. deformation (mm)	mm	0.00086	0.00146	0.00197	0.00183		0,00030
	Max. deformation (mm)	mm	4,032E-07	7,461E-07	1,447E-06	6,430E-07		1,416E-07

Caption:

- Better mechanical properties, by material type.
- Best material, by manufacturing type (additive and subtractive)

Fonte: Autores, (2024).

Entre os materiais utilizados na manufatura subtrativa (convencional), a peça fabricada em fenolite apresentou o melhor desempenho, com a menor tensão resultante, deslocamento e deformação, o que indica maior resistência mecânica e estabilidade dimensional para aplicações que envolvem processos de usinagem. Para a manufatura aditiva (impressão 3D), o PLA se destacou como o material que apresentou os menores valores de tensão resultante, deslocamento e deformação. Esses resultados sugerem que o PLA é um material adequado para impressão 3D em cenários que demandam uma menor suscetibilidade a deformações e tensões.

De maneira geral, considerando todos os materiais avaliados nas duas abordagens de manufatura, o fenolite demonstrou, em média, os melhores resultados. Ele exibiu uma combinação superior de propriedades mecânicas, tornando-se uma escolha ideal para projetos que requerem alta estabilidade sob cargas e variações dimensionais mínimas.

#### 4.3 APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA) NA SELEÇÃO DO MATERIAL COM AS MELHORES PROPRIEDADES MECÂNICAS

As ferramentas de simulação apresentaram resultados eficazes na análise do tipo de material, pelo Método de Elementos Finitos (MEF), e dos cenários em que serão aplicados. Contudo, em situações que exigem a avaliação de múltiplos materiais ou cenários simultaneamente, é necessário compilar todos os dados gerados para realizar uma análise comparativa e identificar os resultados mais promissores de forma eficiente e precisa.

Com a integração de algoritmos de aprendizagem baseados em redes neurais artificiais, é possível organizar e sintetizar as informações provenientes de diversas simulações CAD/CAE/CAE, como as propriedades mecânicas dos materiais aplicados a manufatura específica, em um formato consolidado, como planilhas ou bancos de dados. Esses dados podem ser processados em algoritmos implementados em linguagens de programação específicas, como Python, permitindo a identificação do material mais adequado para cada aplicação. Além disso, a utilização de redes neurais possibilita o armazenamento e o aprendizado contínuo a partir dos dados obtidos, proporcionando comparações mais rápidas e precisas em simulações futuras.

Essa abordagem não apenas otimiza o processo de tomada de decisão, mas também cria uma base de conhecimento aprimorada, permitindo que informações de materiais e simulações passadas sejam aplicadas em novos projetos conforme mostra a Figura 14.

Figura 14: Algoritmo de Redes Neurais, programado em Python, para a seleção do melhor material para manufatura, a partir das suas propriedades mecânicas

Fonte: Autores, (2024).

Os dados obtidos por meio das simulações realizadas no software devem ser organizados, de forma manual ou automatizada, em um arquivo no formato .xlsx. O algoritmo projetado para essa aplicação acessará as informações diretamente desse arquivo, que, para fins de padronização, será salvo como "materiais.xlsx". Após o processamento, o algoritmo consolidará os resultados e gerará uma nova planilha, renomeada como "classificação\_material\_resultado.xlsx", armazenada no mesmo diretório do arquivo original.

A planilha gerada apresentará os dados detalhados de forma estruturada e destacará o material mais adequado com base nas propriedades mecânicas avaliadas. Além disso, os resultados também serão exibidos diretamente na interface do compilador da linguagem Python, fornecendo uma visualização imediata e complementar dos dados que foram processados. Essa abordagem não apenas facilita o gerenciamento e a análise dos dados, como também automatiza etapas do processo, reduzindo o risco de erros manuais e agilizando a identificação do material ideal, para a aplicação em questão.

Tabela 1: Planilha gerada a partir do algoritmo programado em Python, com a identificação do melhor material para manufatura, a partir das suas propriedades mecânicas

Unnamed: 0	Max elastic modulus	Max Yield Limit	Max tensile strength	Max Resistance the compression	Max Specific Heat	Highest Repetition
PLA Filament	0.0028	0.0384	0.048	0.048	1.44	
PETG Filament	0.001653543	0.035433071	0.039370079	0.039370079	0.94488189	
PP Filament	0.001777778	0.027777778	0.033333333	0.033333333	2,222222222	
POM polyacetal	0.001914894	0.035460993	0.04964539	0.04964539	1.063829787	
Aluminum Alloy 1060	0.002555556	0.014814815	0.040740741	0.040740741	0,333333333	
Fenolite	0.008	0.044	0.056	0.144	1.04	Fenolite

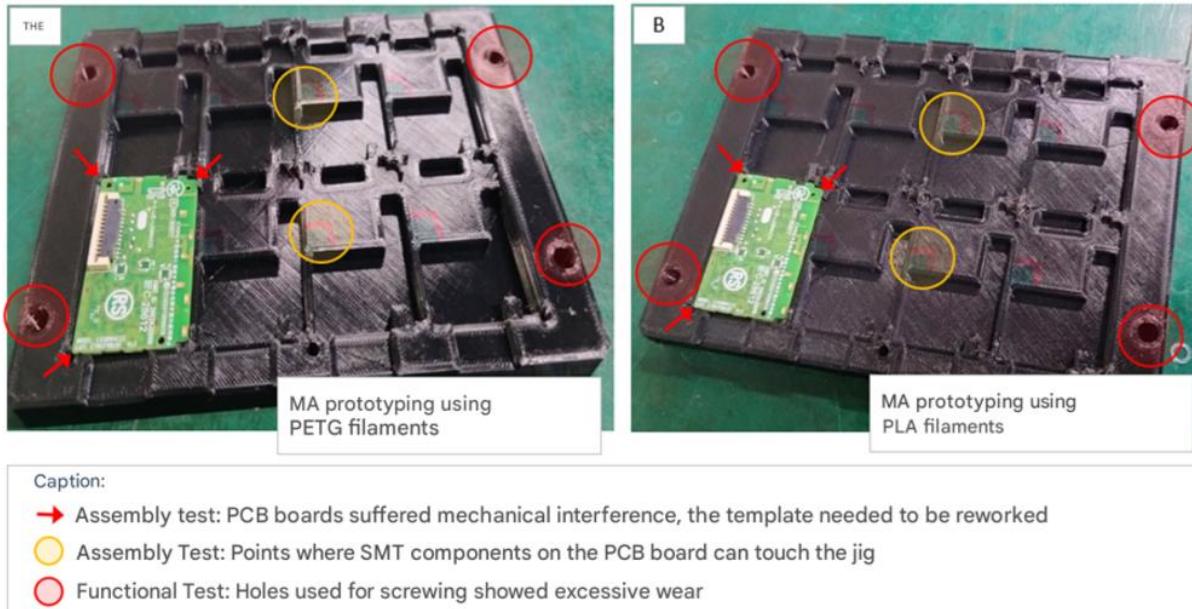
Fonte: Autores, (2024).

#### 4.4 PROTOTIPAÇÃO COM MANUFATURA ADITIVA

Com relação às propriedades dos materiais utilizados, os protótipos foram fabricados por meio de impressão 3D com os filamentos de PLA (ácido polilático) e PETG (polietileno tereftalato glicol). A escolha desses materiais se deu após análises preliminares por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), nas quais o filamento de polipropileno (PP) não apresentou desempenho satisfatório quando comparado aos outros materiais avaliados. Após a impressão, os protótipos foram submetidos a uma série de testes de montagem, com o objetivo de verificar sua viabilidade e adequação ao ambiente operacional proposto.

Os resultados indicaram que tanto o PLA quanto o PETG apresentaram problemas relacionados à precisão dimensional, a alocação das placas PCB ocorreu com interferências mecânicas, porém no desenho do projeto, um gap de 0,2 mm com tolerância simétrica de 0,05 mm deveria ser respeitado. Ambos os materiais demonstraram limitações em termos de resistência mecânica nas condições de montagem e operação contínua, além de ter sido observado desgaste nos pontos de aparafulamento do gabarito na esteira transportadora, após finalizado os testes, onde se aplicou um torque específico e realizou-se o processo de aparafulamento e desaparafulamento de 10 a 20 vezes, conforme os parâmetros especificados pela tabela de torque de parafusos Carlsson, e seguidos como norma interna do cliente de acordo com a Figura 15.

Figura 15; Teste de montagem nos gabaritos fabricados por MA, utilizando filamentos de PETG (A) e PLA (B)



Fonte: Autores, (2024).

Apesar das falhas e melhorias apontadas ao longo do processo, os gabaritos fabricados em PLA e PETG apresentaram desempenho satisfatório nos testes funcionais realizados em uma esteira transportadora de teste. Os protótipos não sofreram colapsos, desgastes físicos significativos, variações dimensionais ou quaisquer danos que comprometessesem sua funcionalidade. Durante os testes e ensaios de fadiga, a esteira foi configurada para simular as condições operacionais reais, com ciclos de movimentação e parada a cada 5 segundos, incluindo movimentos de avanço e recuo contínuos. Esses ciclos foram mantidos por um período de 8 horas diárias, ao longo de 30 dias. Os resultados sugerem que os gabaritos são adequados para uso, suportando os rigores operacionais sem perda de integridade estrutural.

#### 4.5 PROTOTIPAÇÃO COM MANUFATURA SUBTRATIVA (USINAGEM / TRADICIONAL)

Com relação às propriedades dos materiais utilizados, os protótipos foram fabricados por usinagem CNC, utilizando como matéria prima uma amostra de chapa de Fenolite (e Alumínio).

Após a usinagem, os protótipos foram submetidos a uma série de testes de montagem, com o objetivo de verificar sua viabilidade e adequação ao ambiente operacional proposto.

Ao contrário das peças prototipadas por manufatura aditiva, o processo de manufatura subtrativa (usinagem por CNC) exige uma etapa de preparo da matéria prima, uma vez que se faz necessário cortar uma amostra das chapas, em tamanho específico da mesa de usinagem, realizar a limpeza das superfícies e abrir furos para a fixação da chapa a mesa de usinagem.

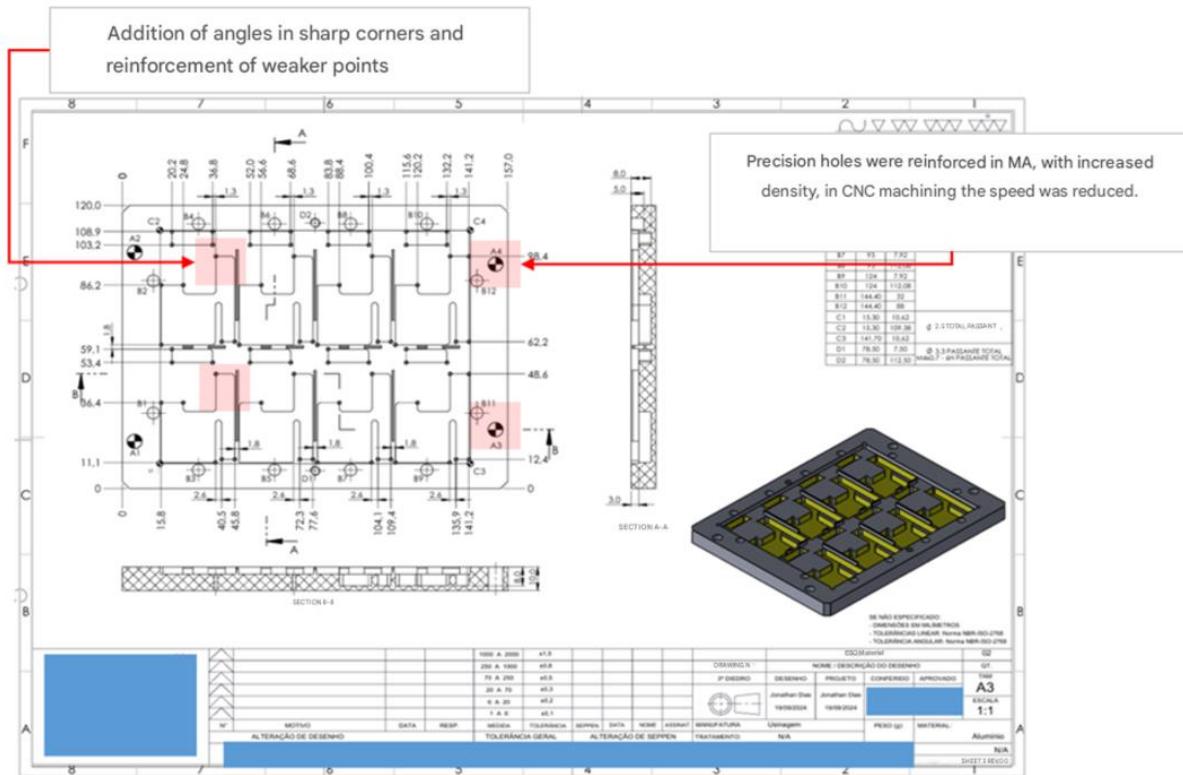
Após finalizada a usinagem, realizada a inspeção visual e dimensional das principais cotas de montagem da peça e realização dos ensaios de montagem e fadiga mecânica, os resultados indicaram a placa de fenolite e alumínio não apresentaram problemas relacionados à precisão dimensional. ambos os materiais não demonstraram limitações significativas em termos de resistência mecânica nas condições de montagem e operação contínua. Também foi observado leve desgaste nos pontos de aparafusamento do gabarito na esteira transportadora, após os ensaios de fadiga, em que se aplicou um torque específico e realizou-se o processo de aparafusamento e desparafusamento de 10 a 20 vezes, conforme os parâmetros especificados pela tabela de torque de parafusos Carlsson, porém sem causar dano estrutural na peça (protótipo).

A prototipagem por manufatura subtrativa (usinagem CNC) se destaca por proporcionar uma melhor precisão das peças produzidas e um tempo menor de fabricação das amostras, melhor acabamento superficial, porém como pontos negativos precisam ser citados o tempo de preparo das amostras e o custo na fabricação de novas amostras, em caso de falhas e pontos de melhorias. Após testes iniciais, novas peças foram confeccionadas e os pontos de não ***conformidade foram corrigidos.***

#### 4.6 DESENHO MECÂNICO 3D REVISADO

Após finalizado os ajustes e correções no desenho 3D, foi gerado, para fins de registro de documentação, o desenho técnico 2D, detalhado conforme as normas técnicas ABNT NBR para desenho técnico.

Figura 13: Teste de montagem nos gabinetes fabricados por MA, utilizando filamentos de PETG (A) e PLA (B)



Fonte: Autores, (2024).

#### 4.7 ANÁLISE DE CUSTOS

Para uma análise abrangente de custos no processo de manufatura, foram consideradas diversas variáveis fundamentais, tais como as características do produto, material e equipamentos e a mão de Obra. Na Tabela 2, são apresentados os dados obtidos a partir de análises realizadas durante a modelagem 3D e simulações do processo de manufatura (CAM), possibilitando a comparação entre a massa inicial do material bruto e a massa final do produto acabado, após o processo de manufatura. Para a manufatura aditiva (MA), o percentual de perdas foi de aproximadamente 15% do material, enquanto na usinagem CNC verificou-se um índice de perdas significativamente maior, de 162%. Essa diferença destaca a eficiência de material da manufatura aditiva em comparação aos métodos convencionais de usinagem, tornando-a uma opção mais sustentável em termos de consumo de material e geração de resíduos.

Tabela 2: Perdas de matéria prima pelos processos de manufatura aditiva (FDM) x convencional (CNC).

Additive Manufacturing (FDM)						
	Density	Initial Volume	Volume Final	Starting Dough	Final dough	Losses (Mass)
PLA	1250	0.000132	0.000115	0.164594	0.1432	-15%
PETG	1270	0.000132	0.000115	0.167227	0.1455	-15%
PP	900	0.000132	0.000115	0.118508	0.1031	-15%

Conventional Manufacturing (CNC)						
	Density	Initial Volume	Volume Final	Starting Dough	Final dough	Losses (Mass)
POM	1390	0.0003	0.000115	0.417	0.1592	-162%
Al.1060	2600	0.0003	0.000115	0.78	0.2977	-162%
Fenolite	1350	0.0003	0.000115	0.405	0.1546	-162%

Fonte: Autores, (2024).

Com base nas informações coletadas, estimou-se o custo monetário total (em reais) para a produção do protótipo de um gabarito, levando em consideração fatores determinantes como o tempo de fabricação, a natureza do item (se protótipo/customização ou produção em massa), tipo e custo de matéria-prima, e o custo de mão de obra, direta e indireta. Esses elementos foram quantificados e apresentados na Tabela 3.

Tabela 13: (R\$) Custos de fabricação do protótipo, pelos processos de MA (FDM) x convencional (CNC)

Item / Term	CNC Phenonite	MA (FDM) PLA	Definition
Product	m <sub>t</sub>	0.405	0.154594 Total mass used in the part process (Kg)
	m	0.1546	0.1432 Useful mass of the part (discarding supports, scraps...) (Kg)
	size	4	5.5 Construction time (hour)
	N (T <sub>i</sub> )	1 2	1 Number of pieces to be made 15 Labor time on part (hours)
Material and equipment	---	R\$ 100.000,00	Machinery purchase price
	cm	R\$ 300,00	R\$ 146,10 Material price (R\$/kg)
	Fatigue	0.95	0.95 tolerance/fatigue factor
	Hours	10	10 Daily hours (average)
	Days	20	20 Monthly days (average)
	Months	12	12 Months per year (average)
	Life	15	5 years of life, for good maintenance
work	(TP)	180	180 Monthly labor time (hours)
	(Rm)	R\$ 9.000,00	R\$ 4.000,00 Monthly remuneration
	(Nm)	2	3 Number of machines per employee
Hand parameters calculations auxiliaries	Yvida	36000	12000 Usage hours or lifetime (h)
	CoS	R\$ 2,78	R\$ 0,15 Operating rate (R\$/hour)
	K <sub>r</sub>	0,62	0,13 Recycling factor
	K <sub>s</sub>	1,62	1,13 Support material factor
	CL	R\$ 25,00	R\$ 7,41 Labor rate (R\$/hour)
Cost items and general costs	P <sub>S</sub>	R\$ 11,70	R\$ 0,87 Machinery purchase cost
	O <sub>S</sub>	R\$ 1.011,11	R\$ 275,83 Cost of operating the machinery
	M	R\$ 69,61	R\$ 4,61 Raw material cost (estimated)
	L	R\$ 50,00	R\$ 11,11 Labor cost
<b>CMA</b>		<b>R\$ 1.142,41</b>	<b>R\$ 292,41</b> General manufacturing cost - (with good maintenance)

Fonte: Autores, (2024).

De acordo com os dados da Tabela 4.4, o custo de produção do protótipo de gabarito pelo método convencional foi 74% superior ao custo obtido utilizando a manufatura digital, evidenciando a viabilidade econômica da manufatura aditiva. Contudo, é importante ponderar fatores adicionais que podem influenciar essa análise, como o fato de se tratar de um processo de prototipagem, a natureza diferenciada dos materiais empregados em cada método e outros fatores que podem impactar os custos, como a escala de produção e a complexidade da peça.

Essas considerações são fundamentais para uma análise equilibrada dos custos e das vantagens associadas a cada método de manufatura, auxiliando na escolha do processo mais adequado para cada contexto de produção. Sob a perspectiva das propriedades mecânicas, dos custos envolvidos e da facilidade de fabricação, o estudo evidenciou diferenças entre os processos de produção aditiva (MA) e os métodos de fabricação subtrativa, com o uso de CNC. Para aplicações que envolvem customização ou prototipagem, nas quais não se requer uma produção em escala industrial, o processo de produção aditiva apresentou melhor desempenho, que incluíram uma redução expressiva nos custos associados à mão de obra, matéria-prima e maquinário. Enquanto a produção convencional exige operações especializadas e infraestrutura fabril robusta, a produção aditiva requer menor área física, equipamentos de menor custo e operadores com níveis de qualificação técnica menos elevados, o que

reflete orientações econômicas do processo. Ainda no contexto da prototipagem e da customização, quando integrados ao desenvolvimento de um projeto de produto, a fabricação aditiva apresentou benefícios adicionais. Dentre eles, destaca-se a redução significativa no tempo necessário para a conclusão da curva de desenvolvimento, a simplificação de etapas do projeto e a possibilidade de obter feedbacks mais rápidos e precisos durante o processo de design e validação. Essas vantagens são particularmente relevantes para cenários que exigem alta flexibilidade e agilidade, reforçando o potencial da MA como uma solução estratégica em projetos de baixa escala e elevada complexidade.

No entanto, no que tange à qualidade da fabricação, o método de produção aditiva FDM (Fused Deposition Modeling) apresentou limitações quando comparado ao processo de usinagem convencional. A usinagem obteve maior precisão dimensional e melhores acabamentos superficiais, características importantes em aplicações que exigem tolerâncias rigorosas e superfícies altamente refinadas. Embora existam tecnologias de produção aditivas capazes de atingir níveis elevados de qualidade, essas não foram objeto de estudo neste trabalho, ficando restritas às menções gerais. Em relação às propriedades mecânicas dos materiais usados, verificamos que os materiais usados na fabricação subtrativa convencional ainda apresentam desempenho superior em termos de resistência e durabilidade. No entanto, ao comparar as propriedades dos materiais com os requisitos específicos da proposta de aplicação, foi observado que ambos os processos são tecnicamente viáveis e atendem a critérios específicos. Assim, a escolha do processo pode ser feita com base em outros fatores, como custo, tempo e flexibilidade, sem comprometer o desempenho funcional do produto final.

## 5 CONCLUSÕES

A integração das tecnologias da Indústria 4.0 à fabricação digital e convencional fornece maior precisão na modelagem 3D e na prototipagem, o que permite ajustes contínuos em tempo real, simulações preditivas e monitoramento de processos. A combinação dos softwares CAD, CAM e CAE cria um ecossistema de produção digitalizado e otimizado, resultando em projetos mais precisos, processos de fabricação com menor incidência de falhas e validações estruturais que reduzem custos, aumentam a qualidade e minimizam os impactos ambientais, o que contribui para elevar a competitividade e sustentabilidade das empresas. Apesar dos desafios de implementação, como custos elevados e requalificação da força de trabalho, os benefícios da Indústria 4.0, como a maior eficiência, flexibilidade, sustentabilidade e suporte à tomada de decisão, tornam-na essencial para atender às demandas de um mercado cada vez mais competitivo. Comparando a fabricação convencional (usinagem CNC) e digital (fabricação aditiva, com ênfase ao processo FDM), observa-se que a usinagem é mais adequada para aplicações que exigem maior precisão e resistência mecânica. Por

outro lado, a produção aditiva mostrou vantagens significativas na produção de protótipos funcionais e customizações, devido à sua flexibilidade e redução de custos. A integração CAD/CAM/CAE no contexto da Indústria 4.0 facilita a otimização de projetos e processos produtivos, o que permite ajustes rápidos no projeto e avaliação do desempenho estrutural antes da fabricação, orientando decisões como seleção de materiais e modificações de projeto. Os resultados indicam que a escolha do método de fabricação e material deve considerar os critérios de aplicação e condições operacionais. A fabricação aditiva, embora limitada em resistência mecânica quando comparada à usinagem tradicional, apresenta vantagens em rapidez e facilidade para adaptações e prototipagem. Pesquisas futuras podem incluir testes de longa duração para validar o desempenho em operação e o desenvolvimento de ferramentas de tomada de decisão integradas aos softwares CAD/CAE/CAM, considerando custos, propriedades mecânicas e dimensionais com base em simulações realizadas.

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM), ao ITEGAM e as empresas Salcomp, Foxconn, Procomp/Diebold, Inventus Power, Coelmatic por meio da Lei no. 8.387/1991 de Informática para incentivo a Projetos de PD&I com apoio financeiro PUR044/2023/CITS ao projeto de Mestrado através da Coordenadora do Programa Prioritário da Indústria 4.0 e Modernização Industrial, o Centro Internacional de Tecnologia de Software (CITS)/CAPDA/SUFRAMA/MDIC.

## REFERÊNCIAS

Additive Manufacturing Technology Standards ASTM F2792.

ALMEIDA, JRA Manufatura digital e seus impactos na indústria moderna. São Paulo: Editora Técnica, 2019.

CALLISTER, WD; RETHWISCH, DG Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Wiley, 2014.

CAPES. Redes Neurais Artificiais: uma abordagem para sala de aula. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br>. Acesso em: 28 nov. 2024.

CNI – Confederação Nacional da Indústria. 2024. Disponível em: <https://firjan.com.br/pagina-inicial.htm>. Acesso em: 28 nov. 2024.

DADOS. Redes Neurais: desvendando o cérebro artificial. Disponível em: <https://www.datageeks.com.br>. Acesso em: 28 nov. 2024.

GAO, W. et al. O status, os desafios e o futuro da produção aditiva na engenharia. Design Assistido por Computador, v. 69, p. 65-89, 2015.

NASCIMENTO, JL Propriedades mecânicas de polímeros na produção aditiva. Revista Brasileira de Engenharia de Materiais, v. 3, pág. 245-253, 2016.

RÜBMANN, M. et al. Indústria 4.0: O Futuro da Produtividade e do Crescimento nas Indústrias de Manufatura. BCG Publicações, 2015.

SILVA, M. F.; ANDRADE, PL Indústria 4.0: fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro: Editora ABC, 2020.

VOLPATO, N. Manual de impressão 3D: tecnologias e aplicações. 1.ed. São Paulo: Elsevier, 2017.

Norma ISO/ASTM 52900:2015.