



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS - ICEA
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - COEP



LARYSSA BÁRBARA DA SILVA

**A IMPORTÂNCIA DA MODELAGEM 3D E MANUFATURA ADITIVA NA
INDÚSTRIA 4.0: INOVAÇÕES E APLICAÇÕES NA ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

JOÃO MONLEVADE

2025

LARYSSA BÁRBARA DA SILVA

**A IMPORTÂNCIA DA MODELAGEM 3D E MANUFATURA ADITIVA NA
INDÚSTRIA 4.0: INOVAÇÕES E APLICAÇÕES NA ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do curso de Engenharia de Produção do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharelado em Engenharia de Produção.
Orientador: Prof. Dr. Rafael Lucas Machado Pinto

JOÃO MONLEVADE

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586i Silva, Laryssa Barbara da.
A importância da modelagem 3D e manufatura aditiva na indústria 4.0
[manuscrito]: inovações e aplicações na Engenharia de Produção. /
Laryssa Barbara da Silva. - 2025.
64 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Me. Rafael Lucas Machado Pinto.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de
Produção .

1. Engenharia de Produção - Currículos - Mudança. 2. Engenharia de
Produção - Formação profissional. 3. Engenheiros de produção -
Competências essenciais. 4. Ensino superior - Efeito das inovações
tecnológicas. 5. Indústria - Inovações tecnológicas. 6. Inovações
educacionais. I. Pinto, Rafael Lucas Machado. II. Universidade Federal de
Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.5:005.336.2

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Laryssa Bárbara da Silva

A Importância da Modelagem 3D e Manufatura Aditiva na Indústria 4.0: Inovações e Aplicações na Engenharia de Produção

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção.

Aprovada em 14 de agosto de 2025.

Membros da banca

Prof. Dr. Rafael Lucas Machado Pinto - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Profa. Dra. Clarissa Barros da Cruz - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Samuel Martins Drei - Universidade Federal de Ouro Preto

Rafael Lucas Machado Pinto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/08/2025



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Lucas Machado Pinto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/08/2025, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0967775** e o código CRC **F3B7F228**.

RESUMO

A Indústria 4.0 trouxe avanços tecnológicos que desafiam os cursos de Engenharia a formarem profissionais capazes de lidar com processos digitais, integrados e sustentáveis. Entre essas inovações, destacam-se a modelagem tridimensional (3D) e a manufatura aditiva (MA), que vêm transformando a forma de projetar e fabricar produtos, exigindo novas competências dos futuros engenheiros. Este trabalho analisa a aplicabilidade da modelagem 3D e da MA como ferramentas pedagógicas estratégicas no ensino de Engenharia de Produção, com foco no curso ofertado pelo ICEA/UFOP. A pesquisa, de natureza aplicada e caráter descritivo, envolveu revisão bibliográfica, análise da matriz curricular vigente e proposição de atividades práticas em laboratório, utilizando softwares CAD, técnicas de fotogrametria e impressão 3D. Foram selecionadas as disciplinas Expressão Gráfica, Engenharia de Processos Mecânicos e Controle Estatístico da Qualidade por sua aderência a conteúdos técnicos e ao potencial de integração com práticas laboratoriais. Os resultados apontam que a incorporação dessas tecnologias ao ambiente acadêmico favorece o desenvolvimento de competências técnicas, cognitivas e analíticas, estimulando aprendizagem ativa orientada à solução de problemas reais. Como exemplo, a utilização da impressão 3D nas práticas de Controle Estatístico da Qualidade possibilita aos alunos analisar parâmetros de repetibilidade e precisão de peças impressas, conectando teoria e prática. Além de reforçar a interdisciplinaridade, o pensamento crítico e a experimentação, a proposta contribui para alinhar a formação em Engenharia de Produção aos princípios de inovação, sustentabilidade e digitalização industrial. Os achados deste estudo podem subsidiar ajustes na matriz curricular do ICEA/UFOP e servir de referência para outras instituições que buscam adequar seus cursos às demandas da Indústria 4.0.

Palavras-chave: Engenharia de Produção; Modelagem 3D; Manufatura Aditiva; Indústria 4.0; Ensino por Competências.

ABSTRACT

Industry 4.0 has introduced technological advances that challenge Engineering programs to prepare professionals capable of dealing with digital, integrated, and sustainable processes. Among these innovations, three-dimensional modeling (3D) and additive manufacturing (AM) stand out, transforming the way products are designed and manufactured while demanding new skills from future engineers. This study analyzes the applicability of 3D modeling and AM as strategic pedagogical tools in Production Engineering education, focusing on the program offered at ICEA/UFOP. The research, applied in nature and descriptive in character, involved a literature review, analysis of the current curriculum, and the proposal of laboratory-based activities using CAD software, photogrammetry techniques, and 3D printing. The disciplines Graphic Expression, Mechanical Process Engineering, and Statistical Quality Control were selected due to their technical content and potential for integration with laboratory practices. The results indicate that incorporating these technologies into the academic environment fosters the development of technical, cognitive, and analytical skills, promoting active learning oriented toward solving real-world problems. For instance, the use of 3D printing in Statistical Quality Control practices enables students to analyze parameters such as repeatability and accuracy of printed parts, effectively linking theory and practice. In addition to reinforcing interdisciplinarity, critical thinking, and experimentation, the proposal contributes to aligning Production Engineering education with principles of innovation, sustainability, and industrial digitalization. The findings of this study may support adjustments to ICEA/UFOP's curriculum and serve as a reference for other institutions seeking to adapt their programs to the demands of Industry 4.0.

Keywords: Production Engineering; 3D Modeling; Additive Manufacturing; Industry 4.0; Competency-Based Education.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Modelo tridimensional desenvolvido em software CAD.....	29
Figura 2 — Simulação CAE do fatiamento para impressão 3D.....	30
Figura 3 - Impressora 3D utilizada na etapa de fabricação das peças prototipadas.....	31
Figura 4 — Peça finalizada após processo de manufatura aditiva.....	31
Figura 5 — Objeto a ser digitalizado.....	35
Figura 6 — Objeto após o processo de impressão.....	35
Figura 7 — Protótipo virtual desenvolvido em software antes do processo de impressão 3D.....	36
Figura 8 — Medição dimensional da peça utilizando paquímetro digital.....	38
Figura 9 – Réplica da peça impressa em 3D utilizada na análise dimensional.....	39
Figura 10 – Carta de controle Xbar-R para o comprimento.....	46
Figura 11 – Carta de controle Xbar-S para o comprimento.....	46
Figura 12 – Carta de controle Xbar-R para o diâmetro.....	47
Figura 13 – Carta de controle Xbar-S para o diâmetro.....	48
Figura 14 – Peça "Biela" impressa em 3D utilizando filamento PLA, como parte da atividade prática da disciplina ENP 701 – Engenharia de Processos Mecânicos.....	50
Figura 15 – Peça "Shuriken" impressa em 3D com filamento PLA, representando a diversidade geométrica explorada na disciplina ENP 701 – Engenharia de Processos Mecânicos.....	51
Figura 16 — Imagem 2D de referência utilizada na conversão para modelo 3D.....	54
Figura 17 — Visualização do modelo gerado automaticamente na plataforma MakerWorld.....	55
Figura 18 — Modelo 3D importado no software Creality Slicer para configuração dos parâmetros de impressão.....	55
Figura 19 – Pré-visualização do modelo fatiado, pronto para impressão 3D.....	56
Figura 20 — Busto final impresso em 3D a partir da imagem modelada digitalmente.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Principais materiais empregados em impressão 3D.....	15
Tabela 2 — Principais tipos de laboratórios e suas características.....	17
Tabela 3 - Oportunidades de aplicação das disciplinas.....	19
Tabela 4 — Alinhamento às DCNs/2019 e benchmarks (ABET/WEF)	20
Tabela 5 — Medidas do comprimento obtidas das amostras.....	39
Tabela 6 — Medidas do diâmetro obtidas das amostras.....	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.2. JUSTIFICATIVA	10
1.3. OBJETIVOS.....	11
1.3.1. Objetivo Geral	11
1.3.2. Objetivos Específicos	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1. Indústria 4.0.....	12
2.1.1. Modelagem e impressão 3D	13
2.1.2. Processos de impressão 3D	14
2.1.3. Materiais para impressão 3D.....	15
2.1.4. Desafios das Instituições de Ensino Superior no Contexto da Indústria 4.0.....	16
2.2. Práticas de Laboratório para Ensino de Engenharia.....	17
2.3. Matriz Curricular do Curso de Engenharia de Produção e Oportunidades para Atividades Práticas Envolvendo Impressões 3D	18
2.4. Análise da Matriz Curricular do Curso de Engenharia de Produção do Icea.....	20
2.4.1. Alinhamento às DCNs/2019 e benchmarks (ABET/WEF).....	20
2.4.2. Oportunidades por disciplina (objetivos, atividades, recursos e avaliação).....	21
2.4.3. Eletivas/módulos temáticos sugeridos (Indústria 4.0).....	22
2.4.4. Síntese.....	23
3. METODOLOGIA DE PESQUISA	24
3.1. Classificação metodológica da pesquisa.....	24
3.2. Etapas para desenvolvimento da pesquisa.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1. Análise da Matriz Curricular	26
4.2. Aplicações da Modelagem 3D nas Disciplinas do Curso.....	26
4.2.1. Expressão Gráfica.....	26
4.2.2. Engenharia de Processos Mecânicos	27
4.2.3. Controle Estatístico da Qualidade	27
4.2.4. Desenvolvimento de Produto	28
4.2.5. Simulação e Gestão da Produção.....	28
4.3. Projeto Prático no ICEA: Fabricação de Peça Utilizando Impressora 3D	28
4.4. Aplicação da Fotogrametria no ICEA	33
4.5. Desenvolvimento de Peças para Suporte e Análise no CEQ.....	37
4.5.1. Análise via CEQ dos Resultados Dimensionais	43
4.5.1.1. Comprimento	45
4.5.1.2. Diâmetro	47
4.5.2. Conclusão da Análise Dimensional.....	48
4.6. Aplicação Prática na Disciplina de Engenharia de Processos Mecânicos.....	49

4.7. Aplicação Prática: Modelagem 3D de personalidade pública	53
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 caracteriza-se pela integração de tecnologias digitais, automação avançada e manufatura inteligente, transformando profundamente os processos produtivos e exigindo novas competências dos profissionais de engenharia. Nesse cenário, destaca-se a necessidade de formar engenheiros capazes de atuar em ambientes complexos, digitais e interconectados, preparados para lidar com a inovação tecnológica constante.

A formação em Engenharia de Produção enfrenta o desafio de acompanhar essas mudanças. Embora as universidades brasileiras já contemplem disciplinas voltadas a processos produtivos tradicionais, ainda existe uma lacuna quanto à integração de ferramentas da Indústria 4.0 nos currículos, sobretudo aquelas que potencializam a aprendizagem prática e o desenvolvimento de habilidades multidisciplinares.

Entre essas ferramentas, a modelagem tridimensional (3D) e a manufatura aditiva (MA) também conhecida como impressão 3D ocupam papel estratégico. Essas tecnologias permitem a criação de peças complexas com precisão e rapidez, reduzindo desperdícios e possibilitando maior personalização. Do ponto de vista educacional, estudos como os de Gibson, Rosen e Stucker (2015) e Mancio e Sellitto (2017) destacam que a utilização de modelagem e impressão 3D em ambientes de ensino amplia a experimentação prática, promove criatividade, fortalece a aprendizagem ativa e conecta os alunos a problemas reais da indústria.

No contexto da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), campus ICEA, o curso de Engenharia de Produção apresenta potencial para incorporar essas tecnologias em sua matriz curricular. Disciplinas como Expressão Gráfica, Engenharia de Processos Mecânicos e Controle Estatístico da Qualidade possuem relação direta com a aplicação de modelagem digital e impressão 3D, permitindo que os alunos transitem desde a concepção do produto até a avaliação de sua qualidade.

A manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, refere-se ao processo de fabricação em que objetos tridimensionais são produzidos camada por camada, a partir de modelos digitais. Essa abordagem contrasta com os métodos tradicionais de usinagem ou moldagem, que geralmente envolvem a remoção ou conformação de material (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

A principal vantagem da MA está em sua capacidade de produzir peças com geometrias complexas, utilizando diferentes materiais, como polímeros reforçados, metais e compósitos, com alta precisão e controle dimensional. Isso permite que os alunos experimentem novos materiais e processos de fabricação, testando, por exemplo, como diferentes insumos impactam na resistência mecânica, no acabamento superficial ou na leveza das peças.

Diante disso, este trabalho busca responder à seguinte questão de pesquisa: como a modelagem 3D e a manufatura aditiva podem contribuir para o aprimoramento do aprendizado dos alunos de Engenharia de Produção do ICEA, preparando-os para os desafios da Indústria 4.0? Para tanto, a investigação analisa a matriz curricular, discute a integração dessas tecnologias em disciplinas-chave e propõe atividades práticas que aproximem a formação acadêmica das demandas contemporâneas da indústria.

1.2. JUSTIFICATIVA

A Indústria 4.0 demanda engenheiros capazes de atuar em processos produtivos digitalizados, flexíveis e sustentáveis. No entanto, muitos cursos de Engenharia de Produção ainda apresentam uma lacuna quanto à integração de ferramentas tecnológicas emergentes em sua matriz curricular, o que limita a vivência prática dos alunos em contextos alinhados às transformações industriais contemporâneas.

Nesse sentido, a modelagem tridimensional (3D) e a manufatura aditiva (MA) configuram-se como ferramentas pedagógicas estratégicas, pois permitem unir teoria e prática por meio da criação de protótipos, simulações e experimentação em laboratório. Estudos como Gibson, Rosen e Stucker (2015) e Mancio e Sellitto (2017) destacam que essas tecnologias reduzem barreiras entre concepção e fabricação, estimulam a aprendizagem ativa, a resolução de problemas e o desenvolvimento de competências técnicas e cognitivas. Assim, sua adoção amplia o escopo formativo dos estudantes, favorecendo tanto o domínio de *hard skills* (CAD, prototipagem, análise de processos) quanto de *soft skills* (criatividade, pensamento crítico, autonomia).

Além disso, a inclusão da modelagem 3D e da manufatura aditiva no ensino superior dialoga diretamente com as Diretrizes Curriculares Nacionais (Resolução CNE/CES nº 2/2019), que reforçam a importância de práticas pedagógicas voltadas ao desenvolvimento de competências, à inovação tecnológica e à responsabilidade socioambiental. Nesse contexto, a proposta aqui apresentada busca alinhar a formação em Engenharia de Produção às demandas atuais da Indústria 4.0, contribuindo para a formação de profissionais mais preparados e competitivos.

Outro aspecto relevante é o potencial dessas tecnologias para estimular a sustentabilidade industrial. Por sua natureza aditiva, a impressão 3D utiliza apenas a quantidade necessária de material, reduzindo desperdícios em comparação aos processos convencionais de usinagem. Além disso, a produção sob demanda diminui estoques excessivos e impactos logísticos, fortalecendo práticas mais limpas e alinhadas à economia circular. Ao vivenciarem

essas práticas no ambiente acadêmico, os estudantes desenvolvem consciência crítica sobre inovação responsável e ampliam sua capacidade de projetar soluções mais eficientes, com menor impacto ambiental.

Dessa forma, este estudo justifica-se pela relevância acadêmica, pedagógica e social de propor a integração da modelagem 3D e da manufatura aditiva na matriz curricular do curso de Engenharia de Produção do ICEA/UFOP, consolidando um caminho de modernização do ensino e preparação de engenheiros para os desafios da Indústria 4.0.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Analisar como as técnicas de modelagem 3D e manufatura aditiva podem ser integradas à matriz curricular do curso de Engenharia de Produção do ICEA, com o intuito de aprimorar o ensino prático e preparar os alunos para os desafios da Indústria 4.0. A proposta visa proporcionar uma abordagem inovadora no ensino, alinhando as práticas acadêmicas às demandas tecnológicas da indústria moderna, favorecendo o desenvolvimento de competências técnicas e práticas dos estudantes.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Mapear disciplinas da matriz curricular do curso de Engenharia de Produção do ICEA com potencial para integração de atividades práticas de modelagem 3D e manufatura aditiva, especialmente no Laboratório de Engenharia de Modelagem e Prototipagem (LEMOP).
- Desenvolver atividades práticas nas disciplinas selecionadas, utilizando softwares CAD e impressão 3D.
- Aplicar técnicas de fotogrametria para criação de modelos tridimensionais e validação por prototipagem física.
- Realizar análises dimensionais e de controle estatístico da qualidade nos protótipos produzidos, utilizando cartas de controle e software de apoio.
- Avaliar os impactos didáticos da proposta por meio da análise dos resultados obtidos em laboratório, considerando a eficácia das atividades quanto ao desenvolvimento de competências técnicas e à aplicabilidade prática.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Indústria 4.0

A Indústria 4.0, também chamada de Quarta Revolução Industrial, representa a integração de tecnologias digitais, físicas e biológicas para promover sistemas produtivos mais autônomos, conectados e inteligentes. Para contextualizar, a Primeira Revolução Industrial foi marcada pela mecanização a vapor (século XVIII), a Segunda pela eletrificação e produção em massa (século XIX), e a Terceira pela automação e pelo uso de tecnologias da informação (século XX). Nesse percurso histórico, a Quarta Revolução Industrial se destaca pela convergência entre Internet das Coisas (IoT), Big Data, Inteligência Artificial, Robótica Avançada, Realidade Aumentada, Computação em Nuvem e Manufatura Aditiva (Schwab, 2016).

No cenário brasileiro, pesquisas recentes da Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2022) apontam que cerca de 70% das empresas industriais ainda estão em fases iniciais de digitalização, o que revela um grande potencial de expansão, mas também uma lacuna de competências tecnológicas. O SENAI e a ABDI (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial) vêm incentivando a implantação de “fábricas do futuro” e laboratórios de inovação para acelerar essa transição.

No campo educacional, esse movimento impulsionou a criação de espaços como os *FabLabs* (Fabrication Laboratories) e os *Makerspaces*, que permitem a alunos e professores desenvolverem projetos reais utilizando tecnologias da Indústria 4.0. Esses ambientes estimulam a experimentação, a interdisciplinaridade e o aprendizado ativo, articulando teoria e prática. Exemplos relevantes incluem o projeto da USP com foco em inovação didática na Engenharia de Produção e iniciativas do SENAI com laboratórios de manufatura avançada.

Autores como Rosa et al. (2020) reforçam que a integração dessas tecnologias no ensino da engenharia é fundamental para formar profissionais capazes de operar, adaptar e inovar em ambientes industriais dinâmicos. Além disso, Koren (2018) destaca que a manufatura avançada vai além da automação tradicional, pois envolve flexibilidade, personalização em massa e inteligência no processo produtivo, exigindo engenheiros preparados para atuar em contextos complexos e digitalizados.

Dessa forma, compreender os pilares da Indústria 4.0 e suas implicações no ensino de Engenharia de Produção é essencial para alinhar currículos, práticas laboratoriais e metodologias pedagógicas às demandas atuais e futuras do setor produtivo.

2.1.1. Modelagem e impressão 3D

A utilização de tecnologias de impressão 3D no ensino de Engenharia de Produção é uma evolução natural, considerando o impacto que essas inovações já exercem no mercado. Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015), a manufatura aditiva amplia a flexibilidade de design e possibilita atender demandas específicas com menor desperdício de material.

Mais do que um avanço técnico, a impressão 3D representa uma transformação nos paradigmas da engenharia e do design industrial, sendo muitas vezes chamada de “revolução da impressão 3D”. Essa revolução está associada à descentralização da produção, à personalização em massa e à redução do tempo entre concepção e fabricação. Além disso, introduz o conceito de *User Experience* (UX), pois muda a forma como os usuários interagem com produtos e serviços, integrando a experiência do usuário ao processo de desenvolvimento de soluções físicas.

Na prática, existem diversas ferramentas digitais para modelagem 3D, cada uma com vantagens pedagógicas distintas. Softwares como AutoCAD e SolidWorks são amplamente usados no meio acadêmico por sua robustez em projetos técnicos; o Fusion 360 se destaca pela integração com simulações e usinagem CNC; o Blender, por ser gratuito e de código aberto, favorece a democratização do acesso; enquanto plataformas como o MakerWorld possibilitam a criação colaborativa e o compartilhamento de modelos em comunidades de prática. Essas opções permitem que instituições adaptem a escolha das ferramentas de acordo com seus objetivos didáticos, recursos disponíveis e perfil dos estudantes.

A versatilidade da impressão 3D já é evidente em setores como a saúde, com a fabricação de próteses personalizadas e modelos anatômicos para treinamento; no setor automotivo, com a prototipagem rápida de componentes; no aeroespacial, com peças leves e resistentes otimizadas para missões; e na arquitetura, com maquetes detalhadas que facilitam a visualização de projetos. Esses exemplos ilustram como a tecnologia conecta teoria e prática em diferentes contextos produtivos.

No ensino de Engenharia de Produção, a modelagem e a manufatura aditiva permitem não apenas projetar e fabricar peças, mas desenvolver soluções completas em ciclos iterativos, alinhados às metodologias ágeis de desenvolvimento de produto. A prototipagem rápida favorece o aprendizado ativo, reduz o tempo de feedback e estimula a autonomia dos estudantes, fortalecendo competências essenciais para a Indústria 4.0, como criatividade, análise crítica e adaptabilidade.

2.1.2. Processos de impressão 3D

A aplicação de tecnologias de manufatura aditiva em disciplinas como *Expressão Gráfica*, *Engenharia de Processos Mecânicos* e *Controle Estatístico da Qualidade* oferece aos alunos uma compreensão prática e direta dos desafios enfrentados pela indústria moderna. Ao desenvolver peças em softwares CAD (Computer-Aided Design) e transformá-las em modelos físicos, os estudantes percorrem toda a cadeia de concepção e fabricação, desde o projeto até a prototipagem, favorecendo a aprendizagem ativa e o pensamento crítico (Martins; Ribeiro, 2019).

Os principais processos de impressão 3D apresentam diferentes níveis de aplicabilidade no ensino:

- **FDM (Fused Deposition Modeling)**: mais acessível em termos de custo, utiliza polímeros termoplásticos. Ideal para ambientes acadêmicos por sua simplicidade e baixo investimento inicial, embora ofereça menor precisão superficial.
- **SLA (Stereolithography)**: permite alta resolução e acabamento fino, sendo indicado para protótipos de design e peças que demandam detalhes, mas com maior custo de insumos e manutenção.
- **SLS (Selective Laser Sintering)**: utiliza pós poliméricos ou metálicos, possibilitando a produção de geometrias complexas sem suportes, embora o investimento em equipamentos seja elevado.
- **Binder Jetting**: emprega ligantes líquidos sobre pó metálico ou cerâmico, possibilitando prototipagem rápida em escala industrial, mas ainda pouco acessível no contexto educacional.

Comparativamente, o FDM é o mais utilizado em universidades por conciliar baixo custo e velocidade de produção, enquanto o SLA se destaca em disciplinas que exigem precisão dimensional e acabamento. O SLS, por sua vez, permite explorar geometrias complexas e aplicações em engenharia mecânica e de materiais, ampliando a compreensão sobre desempenho estrutural.

Estudos de caso em instituições como o MIT e a USP evidenciam que a introdução de diferentes processos de impressão em ambientes acadêmicos amplia a aprendizagem prática, desenvolve competências em seleção de materiais e estimula a capacidade de avaliar critérios como custo, tempo e qualidade. Essa diversidade de experiências favorece a formação de engenheiros mais preparados para escolher a tecnologia adequada em diferentes contextos industriais.

2.1.3. Materiais para impressão 3D

Na disciplina de *Engenharia de Processos Mecânicos*, a ênfase recai sobre os materiais utilizados na manufatura aditiva e suas propriedades mecânicas. A impressão 3D permite explorar uma ampla gama de insumos, desde polímeros de baixo custo até compósitos de alto desempenho, possibilitando aos alunos compreender a relação entre materiais, processos e desempenho final do produto.

Os principais materiais empregados em impressão 3D podem ser comparados conforme a tabela a seguir:

Tabela 1 — Principais materiais empregados em impressão 3D

Material	Propriedades Mecânicas	Custo	Sustentabilidade	Aplicações
PLA (Ácido Polilático)	Fácil de imprimir, boa rigidez, baixa resistência térmica	Baixo	Biodegradável	Protótipos, modelos educacionais
ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno)	Alta resistência ao impacto, maior durabilidade térmica	Médio	Não biodegradável	Peças funcionais, indústria automotiva
PETG (Polietileno Tereftalato Glicol)	Boa resistência química, flexibilidade e durabilidade	Médio	Reciclável	Protótipos industriais, embalagens
Resinas Fotopolimerizáveis (SLA/DLP)	Alta precisão e acabamento superficial, mas frágeis mecanicamente	Médio/Alto	Limitada	Protótipos detalhados, odontologia, joalheria
Metais (Aço, Alumínio, Titânio – SLM/SLS)	Alta resistência mecânica e térmica	Alto	Recicláveis	Aeroespacial, biomédico, moldes industriais

Segundo Kalita (2020), o uso de polímeros reforçados com fibras de vidro ou de carbono tem ampliado a produção de componentes de alto desempenho, fundamentais para setores como o automotivo e o aeroespacial. Além disso, pesquisas recentes têm avançado no desenvolvimento de materiais sustentáveis, como o **PLA reciclado** e compósitos obtidos a partir de resíduos industriais, promovendo soluções mais alinhadas à economia circular e à responsabilidade ambiental.

No contexto educacional, a experimentação com diferentes materiais oferece aos estudantes a oportunidade de analisar custo, desempenho e sustentabilidade, exercitando a tomada de decisão em projetos reais. Essa abordagem reforça a interdisciplinaridade e aproxima os futuros engenheiros dos desafios técnicos e ambientais enfrentados pela Indústria 4.0.

2.1.4. Desafios das Instituições de Ensino Superior no Contexto da Indústria 4.0

A incorporação de tecnologias da Indústria 4.0 no ensino de Engenharia traz ganhos significativos, mas também impõe desafios às instituições de ensino superior. Entre os principais obstáculos estão:

- **Infraestrutura:** a implantação de laboratórios inteligentes demanda investimentos elevados em impressoras 3D, softwares CAD/CAE e equipamentos de realidade aumentada, muitas vezes inviáveis para instituições com orçamento restrito.
- **Capacitação docente:** a atualização constante dos professores em tecnologias emergentes é essencial, mas ainda limitada em muitos cursos. A ausência de formação continuada pode dificultar a integração de práticas inovadoras.
- **Custo de equipamentos e manutenção:** além do investimento inicial, a manutenção de máquinas e insumos pode onerar os programas de ensino.
- **Resistência cultural:** tanto docentes quanto discentes podem apresentar resistência à adoção de metodologias ativas, por estarem habituados a abordagens mais tradicionais.

Apesar dessas barreiras, existem experiências de sucesso que apontam caminhos de superação. Universidades como o **MIT** e a **Stanford University** lideram a criação de *Factories of the Future* e *Makerspaces*, aproximando ensino, pesquisa e prática. No Brasil, a **USP** implantou laboratórios de manufatura avançada em Engenharia de Produção, enquanto o **SENAI** estruturou centros de inovação voltados à Indústria 4.0, com foco em extensão tecnológica e capacitação.

Para superar os desafios, algumas estratégias têm se mostrado eficazes:

- **Parcerias com empresas** → compartilhamento de recursos e desenvolvimento de projetos conjuntos.

- **Projetos de extensão universitária** → aproximando a comunidade acadêmica das demandas industriais reais.
- **Capacitação docente continuada** → programas de atualização em metodologias ativas e tecnologias digitais.
- **Modelos híbridos de infraestrutura** → uso de laboratórios virtuais, simulações e parcerias interinstitucionais para ampliar o acesso às tecnologias.

Segundo Souza et al. (2021), a criação de laboratórios inteligentes com tecnologias como IoT, manufatura aditiva e realidade aumentada promove não apenas a simulação de processos complexos, mas também o desenvolvimento de competências técnicas, cognitivas e socioemocionais. Assim, a superação dos desafios estruturais e pedagógicos é condição essencial para que os cursos de Engenharia formem profissionais preparados para atuar de forma crítica, inovadora e colaborativa na Indústria 4.0.

2.2. Práticas de Laboratório para Ensino de Engenharia

A manufatura aditiva tem permitido o desenvolvimento de componentes personalizados, como posições para moldes de injeção, que podem ser aplicados em plásticos e outros materiais. A utilização de processos como a estereolitografia (SLA) resulta em peças com propriedades mecânicas aprimoradas, maior durabilidade e resistência (Williams; Simpson, 2020). Além disso, estudos apontam que o uso de resinas fotopolimerizáveis reforçadas com fibras de carbono e nanopartículas de sílica contribui para reduzir custos e prazos de desenvolvimento de novos moldes, favorecendo a experimentação prática em cursos de engenharia.

No contexto educacional, laboratórios equipados com tecnologias da Indústria 4.0 assumem papel central na formação de engenheiros preparados para ambientes digitais e colaborativos. De acordo com Lima et al. (2020), espaços como *FabLabs*, *Makerspaces* e “Fábricas do Futuro” promovem o aprendizado ativo, a prototipagem rápida e a interdisciplinaridade, conectando teoria e prática.

Uma tabela comparativa pode ilustrar os principais tipos de laboratórios e suas características:

Tabela 2 — Principais tipos de laboratórios e suas características

Tipo de laboratório	Características principais	Benefícios educacionais
Laboratórios tradicionais	Equipamentos básicos, foco em ensaios convencionais	Exercício de fundamentos técnicos

Laboratórios digitais	Impressoras 3D, softwares CAD/CAE, realidade aumentada	Prototipagem rápida, integração com disciplinas práticas
FabLabs/Makerspaces	Acesso aberto, colaboração interdisciplinar, inovação aberta	Engajamento, criatividade, aprendizagem baseada em projetos
Fábricas do Futuro	Ambientes que simulam processos industriais complexos	Desenvolvimento de competências técnicas e socioemocionais alinhadas à Indústria 4.0

Os impactos educacionais da adoção desses espaços já foram documentados: aumento do engajamento dos alunos (Santos; Rodrigues, 2021), melhoria no desempenho em disciplinas práticas e maior participação em projetos de extensão e pesquisa.

Exemplos concretos incluem o Laboratório de Manufatura Avançada da USP, que integra modelagem 3D e impressão aditiva em disciplinas de Engenharia de Produção, e os projetos do SENAI com ambientes de aprendizagem voltados à Indústria 4.0, que aproximam estudantes das demandas do setor produtivo.

Assim, a integração de práticas laboratoriais ao currículo não se limita ao uso técnico dos equipamentos, mas constitui uma estratégia pedagógica para desenvolver competências técnicas, cognitivas e socioemocionais exigidas pelo mercado, fortalecendo a formação de engenheiros alinhados às demandas da Indústria 4.0.

2.3. Matriz Curricular do Curso de Engenharia de Produção e Oportunidades para Atividades Práticas Envolvendo Impressões 3D

Segundo Torres (2018), a impressão 3D permite fabricar peças com geometrias complexas inviáveis por métodos convencionais, oferecendo maior flexibilidade e adaptabilidade aos processos produtivos. Integrar essa tecnologia ao currículo de Engenharia de Produção não apenas moderniza a abordagem pedagógica, mas também prepara os futuros engenheiros para um setor em constante evolução.

A proposta está em consonância com a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (Lei nº 9.394/1996) e com a Resolução CNE/CES nº 2/2019, que reforçam a importância do ensino por competências, destacando a integração de tecnologias digitais, metodologias ativas e experiências práticas.

Para viabilizar a aplicação, é possível estruturar um plano de integração gradual da modelagem e da manufatura aditiva:

- Curto prazo (1–2 anos): introdução em disciplinas básicas (*Expressão Gráfica*), com uso de softwares CAD e prototipagem simples.
- Médio prazo (3–4 anos): ampliação para disciplinas de caráter técnico (*Engenharia de Processos Mecânicos*), explorando materiais e propriedades mecânicas.
- Longo prazo (5 anos): consolidação em disciplinas analíticas (*Controle Estatístico da Qualidade*), com análise de precisão, repetibilidade e desempenho de protótipos.

Uma tabela comparativa pode sintetizar as oportunidades de aplicação:

Tabela 3 — Oportunidades de aplicação das disciplinas

Disciplina	Competências desenvolvidas	Atividades práticas com impressão 3D	Recursos necessários
Expressão Gráfica	Modelagem digital, interpretação de projetos	Criação de peças em CAD e prototipagem inicial	Softwares CAD, impressoras 3D FDM
Engenharia de Processos Mecânicos	Conhecimento de materiais e processos de fabricação	Testes com polímeros, compósitos e resinas	Impressoras 3D SLA/FDM, insumos de materiais
Controle Estatístico da Qualidade	Análise de processos, precisão e repetibilidade	Avaliação de peças impressas via cartas de controle	Software Minitab, paquímetros, micrômetros
Gestão de Projetos/Produto (opcional)	Integração de inovação e prototipagem rápida	Desenvolvimento de produtos em ciclos ágeis	FabLab/Makerspace, metodologias ágeis

Assim, a integração da modelagem 3D e da manufatura aditiva na matriz curricular proporciona uma formação mais equilibrada entre teoria e prática, alinhada às demandas reais da indústria. Essa abordagem contribui tanto para o avanço da engenharia de manufatura quanto

para o aprimoramento do ensino em Engenharia de Produção, promovendo profissionais mais preparados para os desafios da Indústria 4.0.

2.4. Análise da Matriz Curricular do Curso de Engenharia de Produção do Icea

A matriz atual do curso apresenta base sólida em fundamentos matemáticos, estatísticos, computacionais e de gestão. Contudo, frente às demandas da Indústria 4.0, há oportunidade de integrar de forma estruturada a modelagem tridimensional (3D) e a manufatura aditiva (MA) para intensificar práticas laboratoriais, interdisciplinaridade e desenvolvimento de competências.

2.4.1. Alinhamento às DCNs/2019 e benchmarks (ABET/WEF)

Tabela 4 — Alinhamento às DCNs/2019 e benchmarks (ABET/WEF)

Diretriz / Framework	Como a matriz atende hoje	Lacunas identificadas	Contribuição da Modelagem 3D/MA
DCNs/2019 – Formação por competências	EG, EPM e CEQ desenvolvem fundamentos técnicos	Integração transversal e avaliação por competências	Projetos CAD → Impressão → Medição, rubricas por competência técnica e socioemocional
DCNs/2019 – Metodologias ativas	Uso pontual de práticas	Ausência de PBL/ABP sistematizados	Sprints de prototipagem com feedback, ciclos iterativos (DFAM)
DCNs/2019 – Integração com setor produtivo	Estágio/empresa júnior	Poucos desafios reais em sala	Projetos com parceiros (jigs/fixtures, mockups funcionais) e cartas de controle
DCNs/2019 – Sustentabilidade	Conteúdos conceituais	Aplicação prática limitada	Comparativos MA × usinagem (material/energia),

			PLA reciclado, descarte de suportes
ABET – resultados 1,2,3,5,6	Evidenciados de forma difusa	Instrumentos de avaliação específicos	Ensaios e métricas (Cp/Cpk, X-R/X-S), relatórios técnicos, trabalho em equipe
WEF – competências do futuro	Trabalho em equipe e comunicação	Pensamento sistêmico, literacia digital	Iteração rápida, análise de dados de processo, autonomia na resolução de problemas

2.4.2. Oportunidades por disciplina (objetivos, atividades, recursos e avaliação)

Na disciplina Expressão Gráfica (ENP004), o objetivo é assegurar o domínio da modelagem CAD 3D e da leitura de projetos. As atividades previstas envolvem modelagem paramétrica e a prototipagem em impressoras FDM de peças com e sem suportes, de modo a possibilitar a comparação de tolerâncias e o entendimento de limitações geométricas do processo. Para isso, utilizam-se softwares CAD (SolidWorks, Fusion 360 ou FreeCAD), duas a três impressoras FDM e instrumentos de medição como paquímetros. A avaliação concentra-se no erro dimensional médio das peças, na qualidade de superfície e na elaboração de um relatório técnico sucinto que descreva decisões de projeto e resultados obtidos.

Em Engenharia de Processos Mecânicos (ENP701), busca-se relacionar material, processo e desempenho. As práticas contemplam princípios de *Design for Additive Manufacturing* (DFAM) como espessuras, infill e orientação de camadas e a comparação entre diferentes materiais (PLA, ABS, PETG e resina SLA), complementada por mini-ensaios de verificação. Os recursos incluem impressoras FDM e SLA, corpos-de-prova e instrumentos de medição. A avaliação ocorre por meio do preenchimento de fichas de processo, do cálculo do custo por peça e do monitoramento da taxa de retrabalho.

Na disciplina de Controle Estatístico da Qualidade (ENP141), o foco recai sobre a medição e o controle da variação do processo de impressão. Realiza-se amostragem de peças para construção de cartas de controle X-R ou X-S em software estatístico (Minitab ou equivalente livre), além do cálculo de índices de capacidade (Cp/Cpk) e de estudos de causa considerando variáveis como temperatura, diâmetro do bico e orientação de impressão. Utilizam-se paquímetros e micrômetros, além do software estatístico. A avaliação contempla a

verificação da estabilidade do processo, os valores de Cp/Cpk e um relatório de investigação que discuta as fontes de variação e as ações de melhoria.

Por fim, em Sistema de Desenvolvimento de Produtos (ENP159) disciplina com forte sinergia com o tema pretende-se conduzir ciclos ágeis de desenvolvimento com prototipagem rápida. O trabalho organiza-se a partir de um backlog, com sprints e testes com usuários (UX), gerando versões iterativas do protótipo ($V1 \rightarrow Vn$). São utilizados ambientes do tipo FabLab/Makerspace, impressoras, materiais e um quadro Kanban para gestão visual. A avaliação considera o *lead time* de prototipagem, o número de iterações realizadas e a satisfação do usuário-alvo. Como apoio, Gestão de Projetos (ENP534) e Simulação (ENP161) podem incorporar o planejamento por *gates* e a simulação do fluxo de impressão (filas, tempos de setup e capacidade), reforçando a integração entre projeto, processo e controle.

2.4.3. Eletivas/módulos temáticos sugeridos (Indústria 4.0)

Como trilha optativa, propõe-se a oferta de quatro componentes articulados às demandas da Indústria 4.0. O Laboratório de Prototipagem Rápida (60h) tem por foco o desenvolvimento de competências avançadas em CAD e em *Design for Additive Manufacturing* (DFAM), com uso de tecnologias FDM e SLA e procedimentos de metrologia. Ao final, o estudante entrega um protótipo funcional acompanhado de relatório de capacidade do processo, evidenciando parâmetros e variações observadas.

A disciplina Manufatura Aditiva e Sustentabilidade (45h) aborda materiais reciclados e biodegradáveis e realiza a comparação de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) entre manufatura aditiva e usinagem convencional. O produto final consiste em um estudo de pegada de carbono de um caso selecionado, discutindo implicações ambientais e trade-offs técnicos.

Em Digitalização 3D e Fotogrametria (45h), o estudante vivencia a captura de geometrias, o tratamento de malhas e a definição de tolerâncias, aplicando esses conhecimentos na reconstrução de componentes. O entregável é um projeto de *reverse engineering*, no qual o artefato digitalizado é modelado e preparado para fabricação.

Por fim, o Projeto Integrador Indústria 4.0 (60–90h) organiza o processo de aprendizagem em PBL/ABP com Design Thinking e, preferencialmente, participação de parceiro externo. O trabalho percorre ciclos iterativos de concepção, prototipagem e teste com usuários, resultando em uma solução prototipada e em um business case que justifica técnica e economicamente a proposta.

2.4.4. Síntese

A integração planejada de modelagem 3D e MA alinha a matriz do ICEA às DCNs/2019 e às referências internacionais (ABET/WEF), estruturando metodologias ativas (PBL/ABP/Design Thinking), fortalecendo a ponte universidade–indústria e desenvolvendo competências técnicas e socioemocionais cruciais para a Indústria 4.0. O roadmap e os KPIs permitem implementação e avaliação objetiva e incremental.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1. Classificação metodológica da pesquisa

Esta pesquisa é de natureza aplicada, uma vez que busca gerar conhecimentos voltados para a solução de problemas práticos, especialmente no contexto da formação acadêmica em Engenharia de Produção (GIL, 2008; TURRIONI; MELLO, 2012). O foco está na integração de tecnologias emergentes, como a modelagem tridimensional e a manufatura aditiva, ao processo de ensino-aprendizagem em disciplinas técnicas do curso oferecido pelo ICEA/UFOP.

A abordagem adotada é mista, contemplando tanto métodos qualitativos quanto quantitativos (CRESWELL, 2014). A dimensão qualitativa está presente na análise documental da matriz curricular e na observação das atividades desenvolvidas no ambiente laboratorial, permitindo a compreensão dos impactos educacionais da proposta. Já a dimensão quantitativa se manifesta na coleta de dados experimentais, como tempo de impressão, número de falhas, precisão dimensional e repetibilidade dos modelos impressos, possibilitando análises estatísticas dos resultados.

Do ponto de vista dos objetivos, trata-se de uma pesquisa descritiva–exploratória: é descritiva porque envolve observação, registro e análise sem alterar o fenômeno; e é exploratória porque testa a integração de uma tecnologia (modelagem 3D e manufatura aditiva) em um contexto que não tinha aplicação prévia consolidada no curso (GIL, 2008; TURRIONI; MELLO, 2012).

Em relação aos procedimentos técnicos, o estudo se caracteriza como um estudo de caso, por investigar em profundidade a aplicação da proposta em um contexto específico: o curso de Engenharia de Produção do ICEA e as atividades realizadas no Laboratório de Ensino de Modelagem e Prototipagem (LEMOP). A análise é fundamentada em documentos oficiais, como a matriz curricular do curso, nos registros das atividades práticas realizadas em disciplinas específicas, e nos dados obtidos durante a produção e avaliação dos protótipos impressos.

Dessa forma, a metodologia adotada neste trabalho permite um olhar abrangente e fundamentado sobre a aplicabilidade das tecnologias da Indústria 4.0 no ambiente acadêmico, contribuindo com subsídios teóricos e empíricos para a proposição de melhorias no ensino da Engenharia de Produção.

3.2. Etapas para desenvolvimento da pesquisa

A proposta deste trabalho é identificar, dentro da matriz curricular do curso de Engenharia de Produção do ICEA, oportunidades para a utilização de modelagem 3D e manufatura aditiva, propondo atividades práticas que contribuam para o aprimoramento do

aprendizado. A seleção das disciplinas foi realizada por análise documental, ementas e planos de ensino, seguindo critérios explícitos e ponderados: (i) aderência conceitual entre os conteúdos previstos e os tópicos de CAD/modelagem, processos de fabricação e controle de qualidade; (ii) viabilidade operacional no LEMOP (disponibilidade de impressoras, softwares, insumos e carga horária); (iii) potencial de integração transversal entre etapas do ciclo de desenvolvimento de produtos (modelar → fabricar → medir/analisar); (iv) avaliabilidade por indicadores objetivos (tempo de impressão, falhas, precisão, repetibilidade e análise estatística); e (v) alinhamento às DCNs/2019 no que tange a metodologias ativas e desenvolvimento de competências. Cada critério recebeu julgamento em escala ordinal (baixa, média, alta), convertido para escores e ponderado (maior peso para aderência e viabilidade). O resultado dessa triagem apontou Expressão Gráfica (ENP004), Engenharia de Processos Mecânicos (ENP701) e Controle Estatístico da Qualidade (ENP141) como as disciplinas com maior pontuação combinada, por cobrirem, de forma encadeada, modelagem, transformação em produto físico e mensuração/controle do processo.

No plano temporal, o estudo foi conduzido ao longo do 1º semestre letivo do ano de 2025. A fase de diagnóstico e planejamento que compreendeu a análise documental e o desenho das práticas ocorreu em maio; a execução técnico-didática das atividades de laboratório distribuiu-se da primeira quinzena de junho, com sessões semanais; e a sistematização, tratamento estatístico e discussão dos resultados deu-se entre a segunda quinzena de junho e julho, em consonância com o calendário acadêmico.

O processo experimental seguiu a sequência já descrita: obtenção do modelo tridimensional (com fotogrametria simplificada via MakerWorld quando pertinente), refinamento CAD com correção de malha e ajustes dimensionais, preparação para impressão (conversão para STL e fatiamento no *slicer* com definição de altura de camada, *infill*, temperatura e velocidade), e impressão FDM em PLA, monitorando tempo total, ocorrência de falhas, retrabalhos e fidelidade dimensional entre o CAD e a peça final. Esses registros compuseram a base para a análise quantitativa e apoiaram a discussão qualitativa sobre as possibilidades didáticas e técnicas de cada prática, mantendo rastreabilidade dos parâmetros e das decisões de projeto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise da Matriz Curricular

A matriz curricular do curso de Engenharia de Produção do ICEA apresenta oportunidades significativas para a inserção de tecnologias emergentes, como a modelagem 3D e a manufatura aditiva, especialmente em disciplinas com forte componente prático e técnico. Essa análise foi realizada com base na identificação de conteúdos que tratam de processos de fabricação, sistemas de desenvolvimento de produtos, planejamento e controle da produção (PCP), controle estatístico da qualidade e expressão gráfica. A proposta está alinhada às Diretrizes Curriculares Nacionais dos Cursos de Engenharia (Resolução CNE/CES nº 2/2019), que enfatizam a importância de métodos de ensino inovadores, laboratórios experimentais e tecnologias aplicadas à formação de engenheiros.

A integração dessas tecnologias permite aos alunos não apenas compreender os conceitos teóricos, mas vivenciar de forma prática o ciclo de projeto e produção de componentes industriais, favorecendo uma formação voltada para os desafios da Indústria 4.0 (Fernandes, 2019; Gibson, Rosen e Stucker, 2015).

4.2. Aplicações da Modelagem 3D nas Disciplinas do Curso

A priorização das disciplinas decorre da análise da matriz curricular e da decisão das disciplinas, que combinaram aderência conceitual, viabilidade no LEMOP, potencial de integração modelar → fabricar → medir/analisar, avaliabilidade por indicadores e alinhamento às DCNs/2019. O encadeamento proposto inicia em Expressão Gráfica, avança para Engenharia de Processos Mecânicos e culmina em Controle Estatístico da Qualidade, permitindo que os estudantes vivenciem, de forma progressiva, o ciclo completo de desenvolvimento de produtos. As atividades contribuem diretamente para competências previstas nas DCNs, como resolução de problemas de engenharia, experimentação e interpretação de resultados, comunicação, trabalho em equipe, aprendizagem ativa e responsabilidade socioambiental.

4.2.1. Expressão Gráfica

A aplicação consiste em integrar modelagem CAD 3D à prototipagem FDM, possibilitando que conceitos de representação e leitura de projeto sejam imediatamente conectados à materialização física. Do ponto de vista formativo, além do domínio de ferramentas digitais, a atividade estimula pensamento espacial, integração teoria-prática, trabalho em equipe (modelagem, preparação e operação da máquina) e comunicação técnica por meio de pequenos relatórios.

Métricas de avaliação: erro dimensional por dimensão crítica; necessidade de suportes

e qualidade superficial; taxa de retrabalho (nº de reimpressões); tempo de execução (CAD + impressão) e evidências de criatividade/DFAM segundo rubrica simples (adequação geométrica, economia de material, solução de suporte). Percepção do piloto: observou-se aumento de participação em laboratório e melhoras na consideração de restrições de fabricação já na fase de CAD, com redução visível de reimpressões ao longo das iterações.

4.2.2. Engenharia de Processos Mecânicos

A ênfase recai sobre DFAM e a relação material–processo–desempenho, comparando PLA, ABS, PETG e resina SLA e variando infill, orientação de camadas e temperatura. As competências desenvolvidas incluem análise de trade-offs, raciocínio crítico, tomada de decisão baseada em dados e consciência de sustentabilidade (consumo de material, descarte de suportes).

Métricas de avaliação: qualidade superficial e presença de defeitos; custo por peça (material + tempo de máquina); tempo de ciclo; massa e rigidez relativa (quando houver ensaio simples); registro estruturado em fichas de processo comparando alternativas. Percepção do piloto: os estudantes passaram a justificar escolhas de parâmetro e material com base em desempenho e custo, articulando teoria e prática de forma mais consistente.

4.2.3. Controle Estatístico da Qualidade

Nesta etapa, as peças impressas tornam-se fonte de dados reais para aplicar cartas X-R/X-S e discutir estabilidade e capacidade (C_p/C_{pk}) do processo, conectando CEQ a um fluxo de produção tangível. Desenvolvem-se competências de experimentação, análise estatística, comunicação de resultados e melhoria contínua.

Métricas de avaliação: verificação de estabilidade das cartas; valores de C_p/C_{pk} para dimensões críticas; repetibilidade intra-lote; clareza e completude do relatório de investigação (definição do problema, hipóteses de causa, plano de ação). Percepção do piloto: a presença de variáveis controláveis (temperatura, orientação, infill) facilitou a discussão de causas de variação e a compreensão do papel da padronização de setup. Além dessas três disciplinas-núcleo, Sistema de Desenvolvimento de Produtos (ENP159), Gestão de Projetos (ENP534) e Simulação a Eventos Discretos (ENP161) atuam como suporte e integração, respectivamente com PBL/ABP e sprints de prototipagem, planejamento por gates e modelagem de capacidade/filas com dados coletados no laboratório.

4.2.4. Desenvolvimento de Produto

A integração do ciclo de projeto com prototipagem rápida via modelagem 3D viabiliza um percurso iterativo de ideação → modelagem digital → prototipagem → teste com usuários. Em termos de DCNs, a proposta desenvolve resolução de problemas complexos, comunicação (pitch técnico), trabalho em equipe e aprendizagem ao longo da vida por meio de ciclos de melhoria.

Métricas de avaliação: lead time entre versões ($V1...Vn$); número de iterações e qualidade das justificativas de mudança; satisfação do usuário (escala Likert curta); aderência a critérios de gate (requisitos mínimos, viabilidade técnica e econômica, riscos mitigados). Percepção do piloto: relatos de maior engajamento e senso de autoria, com grupos registrando decisões de projeto embasadas em teste de uso e viabilidade de fabricação.

4.2.5. Simulação e Gestão da Produção

A modelagem de cenários produtivos que incluam a impressão 3D como etapa permite avaliar impactos de fila, setup e capacidade, aproximando os estudantes de práticas de planejamento e controle da produção. A competência central aqui é a tomada de decisão baseada em dados, articulando resultados experimentais do laboratório com a simulação.

Métricas de avaliação: comparação simulado × observado para lead time, WIP e utilização de máquinas; análise de cenários de alocação de jobs e priorização; clareza do relatório de recomendações.

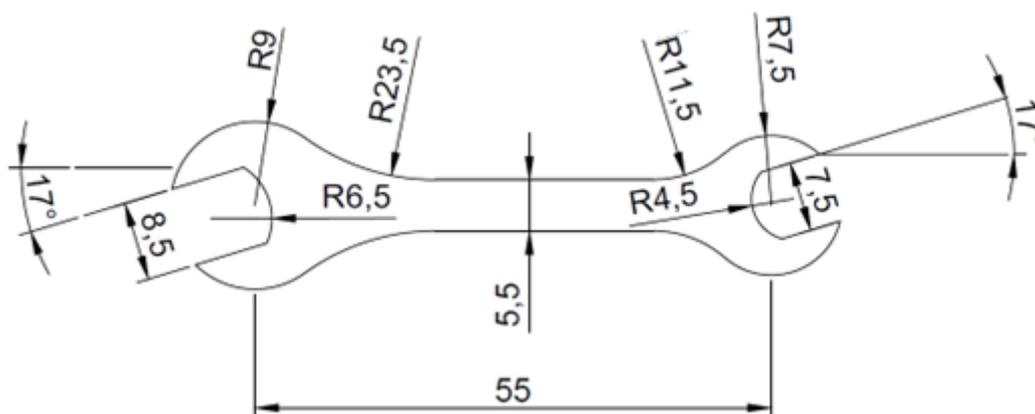
A experiência piloto no LEMOP indicou viabilidade técnica das atividades e ganhos formativos perceptíveis: maior participação nas sessões, melhor conexão entre teoria e prática, e uso mais consciente de dados na tomada de decisão. Ainda que os resultados quantitativos sejam preliminares, as evidências qualitativas (portfólios, diários de campo e relatórios) convergem para ganhos em engajamento, autonomia, comunicação técnica e pensamento crítico, em aderência às DCNs/2019 e a benchmarks internacionais (ABET/WEF).

4.3. Projeto Prático no ICEA: Fabricação de Peça Utilizando Impressora 3D

Como parte das atividades práticas no Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas (ICEA), os alunos do curso de Engenharia de Produção desenvolvem projetos que integram modelagem 3D e manufatura aditiva, proporcionando vivências que conectam teoria e prática. Um exemplo relevante é o projeto de fabricação de uma peça em impressora 3D, realizado no Laboratório de Estudos em Manufatura, Operações e Processos (LEMOP).

A primeira etapa consiste no desenvolvimento do modelo tridimensional em software CAD, no qual os estudantes elaboram o desenho técnico detalhado da peça. Esta etapa é essencial para consolidar os conhecimentos adquiridos em disciplinas como Expressão Gráfica e Desenho Técnico, permitindo a compreensão aprofundada de geometria, tolerâncias e detalhamento técnico (Martins; Ribeiro, 2019). A Figura F ilustra uma peça modelada no software de desenho AutoCad 2025.

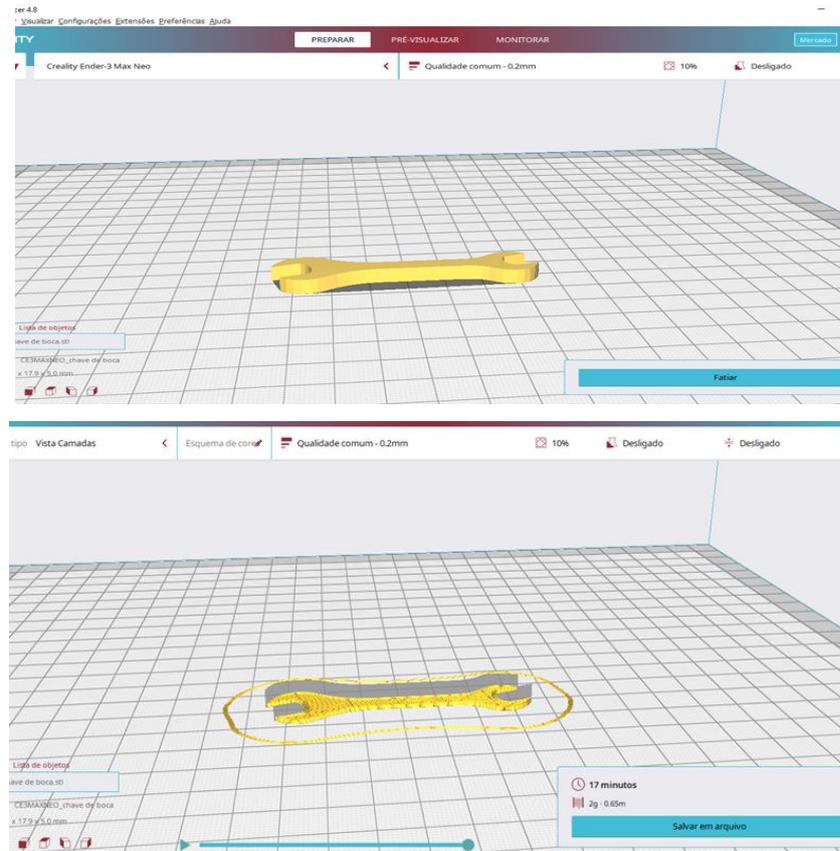
Figura 1 — Modelo tridimensional desenvolvido em software CAD.



Na sequência, ocorre a etapa de **simulação CAE (Computer-Aided Engineering)**, que consiste no uso de softwares avançados para analisar e otimizar o desempenho de peças ou sistemas antes da fabricação. O CAE permite realizar análises estruturais, térmicas, fluidodinâmicas, de vibração e simulações de carga, garantindo que o modelo atenda aos requisitos de desempenho e segurança. No contexto da impressão 3D, o CAE é utilizado para fatiar o modelo digital em camadas (processo conhecido como *slicing*), definir parâmetros como tempo de impressão, consumo de material, orientação da peça e condições de suporte. Com isso, é possível prever deformações, tensões e possíveis falhas durante a fabricação aditiva, além de estimar as propriedades finais do produto. Essa etapa prepara os estudantes para compreender o planejamento e otimização de processos industriais, aproximando a teoria à prática.

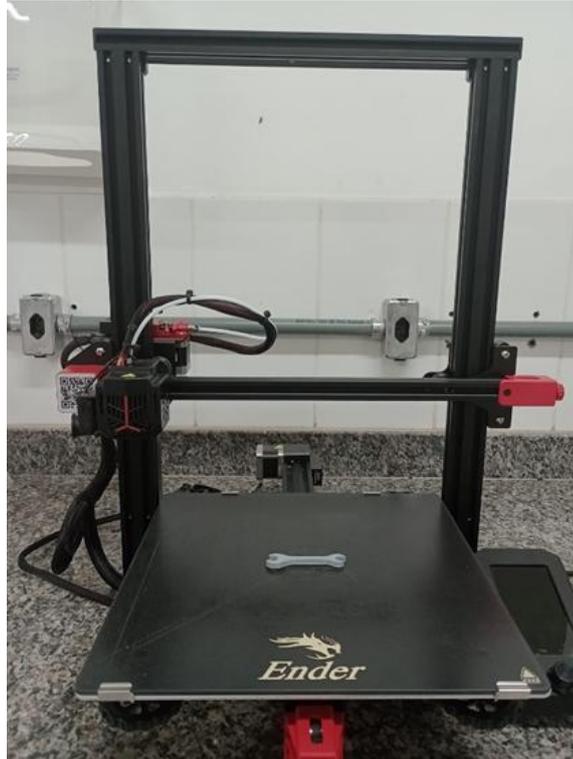
A Figura 2 ilustra esse processo por meio da simulação CAE realizada durante o fatiamento da peça, etapa essencial para converter o modelo tridimensional em instruções interpretáveis pela impressora 3D. Essa simulação permite visualizar a distribuição do material em camadas, ajustar parâmetros de fabricação e antecipar possíveis falhas ou distorções ainda na fase de preparação.

Figura 2 — Simulação CAE do fatiamento para impressão 3D.



Posteriormente, são realizadas as atividades de preparação da matéria-prima e configuração da impressora 3D, incluindo a escolha do tipo de filamento, ajuste das temperaturas do bico extrusor e da mesa, definição da velocidade de impressão e compensação do eixo Z. Este processo reforça conteúdos estudados em disciplinas como Engenharia de Processos Mecânicos, ao envolver controle de variáveis de processo e seleção de materiais (Kalita, 2020). A Figura 3 apresenta a impressora 3D utilizada na realização dessas etapas práticas, evidenciando o ambiente de preparação e configuração do equipamento, que inclui o ajuste físico dos parâmetros e a manipulação direta do filamento e do sistema extrusor. Essa vivência contribui para que os alunos compreendam a aplicação prática dos conceitos estudados em sala de aula.

Figura 3 - Impressora 3D utilizada na etapa de fabricação das peças prototipadas



Durante a manufatura, os alunos acompanham a deposição controlada do material camada a camada, compreendendo desafios relacionados ao controle de qualidade, precisão dimensional e integridade estrutural da peça. Ao final, realizam-se atividades de inspeção dimensional, utilizando paquímetro ou micrômetro para assegurar conformidade com o projeto. A peça é então finalizada, limpa e armazenada, concluindo o ciclo produtivo.

Figura 4 — Peça finalizada após processo de manufatura aditiva.



Esse projeto prático promove o desenvolvimento de competências técnicas e gerenciais, incentiva a experimentação de novas tecnologias e fortalece a autonomia no processo de prototipagem rápida. Além disso, permite aos alunos vivenciar os princípios de

sustentabilidade, uma vez que a manufatura aditiva reduz o desperdício de materiais quando comparada a métodos tradicionais (Torres, 2018).

Assim, a integração dessa atividade no ambiente acadêmico demonstra como a modelagem 3D e a manufatura aditiva contribuem para uma formação alinhada à Indústria 4.0, preparando profissionais capazes de propor soluções inovadoras e sustentáveis para os desafios do setor produtivo.

Durante a execução do projeto, foram observadas falhas típicas de FDM como *warping* na base, pequenas linhas de “*stringing*” entre regiões e delaminação pontual em camadas próximas ao topo que exigiram ajustes de processo. A adoção de *brim* na peça, o recalibrar do nivelamento da mesa, a redução da velocidade nas camadas externas, a orientação da peça para minimizar suportes e o ajuste fino de temperatura do bico dentro da faixa usual para PLA ($\approx 200\text{--}210$ °C) reduziram significativamente as ocorrências. Esses ajustes foram registrados em ficha de processo e incorporados como aprendizagem: os estudantes passaram a prever as causas das falhas e a planejar o setup considerando a geometria e as restrições do método.

Quanto ao atendimento aos requisitos de projeto, a peça final foi verificada contra as dimensões críticas especificadas no desenho (larguras, espessura nominal e raios principais). A conformidade dimensional ficou adequada para uso didático, com pequenas variações localizadas nos raios externos e na espessura, compatíveis com a orientação de impressão e com o tamanho do bico utilizado. As diferenças observadas foram discutidas à luz do comportamento do PLA (contração, efeito de escada em superfícies inclinadas) e dos parâmetros de fatiamento (altura de camada e *infill*), reforçando a relação direta entre propriedade final (rigidez local, acabamento) e decisões de processo.

Com vistas à análise de desempenho do processo, foram consolidados indicadores operacionais e de qualidade: tempo total de impressão (incluindo setup), consumo de material estimado pelo *licer*, taxa de falhas/retrabalhos (número de impressões não conformes por total de tentativas), precisão dimensional (diferença CAD-peça em dimensões de referência) e repetibilidade entre três execuções com o mesmo setup. Observou-se o padrão esperado de FDM: maior variação no eixo Z (efeito de camadas) em comparação aos eixos X/Y e melhor acabamento quando se adota menor altura de camada e menor velocidade de perímetros. A peça foi então utilizada em CEQ para discutir estabilidade do processo e capacidade (C_p/C_{pk}), conectando os dados coletados ao conteúdo estatístico da disciplina.

No eixo de sustentabilidade, a manufatura aditiva mostrou redução de desperdício de material frente a rotas subtrativas (o volume depositado é próximo ao volume útil), ainda que haja consumo adicional associado a suportes e eventuais retrabalhos. Discutiu-se com os

estudantes: (i) a estimativa simplificada de energia elétrica consumida (potência média do equipamento \times tempo de impressão) e (ii) a possibilidade de reciclabilidade do PLA (reaproveitamento de rebarbas/suportes por meio de coleta seletiva ou moagens para filamento reciclado). Como encaminhamento didático, recomenda-se que as próximas turmas registrem massa de suportes, taxa de reaproveitamento e energia (kWh) por job como métricas ambientais básicas, além de comparar, em nível conceitual, a pegada de carbono da rota aditiva com a de uma rota usinada equivalente.

A comparação com processos tradicionais foi explorada de forma formativa. Para peças únicas e geometrias complexas, a rota aditiva apresentou menor *lead time* de desenvolvimento (CAD \rightarrow peça no mesmo dia) e custo total competitivo por eliminar etapas de ferramental. Em contrapartida, para séries maiores e geometrias simples, métodos tradicionais tendem a apresentar melhor produtividade unitária e acabamento superior. Essa reflexão levou os estudantes a posicionar a FDM como tecnologia preferencial de prototipagem e de produção sob demanda de baixa escala, entendendo limites e oportunidades em termos de custo, tempo e qualidade.

Por fim, quanto aos impactos educacionais, os registros de aula e os relatos espontâneos indicaram alto engajamento nas sessões de laboratório, maior integração teoria-prática e evolução em comunicação técnica (relatórios mais objetivos, com justificativas baseadas em dados). A alternância entre tentativa-erro-ajuste favoreceu o pensamento crítico e a autonomia na tomada de decisão, competências centrais nas DCNs/2019 e no perfil de engenheiro para a Indústria 4.0. Em síntese, o projeto prático cumpriu o papel de contextualizar conteúdos, produzir dados reais para análise e desenvolver competências técnicas e socioemocionais em um ambiente seguro e controlado, coerente com a proposta pedagógica do curso.

4.4. Aplicação da Fotogrametria no ICEA

Além dos projetos de modelagem e manufatura aditiva, o Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas (ICEA) também explora a fotogrametria como tecnologia complementar no contexto da Indústria 4.0. A fotogrametria consiste em uma técnica de aquisição de dados tridimensionais a partir de um conjunto de fotografias bidimensionais, permitindo a geração de modelos digitais detalhados de objetos físicos.

No ICEA, foram realizados testes utilizando a plataforma online Bambu Lab e MakerWorld, que possibilita transformar imagens comuns em modelos 3D de maneira rápida e acessível. Esse processo ocorre por meio do upload de uma única imagem 2D na plataforma, que utiliza algoritmos de inteligência artificial para gerar automaticamente um modelo

tridimensional. A imagem é analisada em seus contrastes, formas e contornos, e a ferramenta extrai uma malha volumétrica compatível com softwares de impressão 3D, dispensando o uso de múltiplas fotos ou scanners complexos. Esse processo contribui para a formação dos alunos, pois integra conceitos de digitalização, inspeção e análise dimensional, além de favorecer a compreensão de etapas importantes para o controle de qualidade e desenvolvimento de produtos.

A utilização da fotogrametria no ambiente acadêmico possibilita aos estudantes experimentar uma tecnologia amplamente empregada em setores como engenharia reversa, inspeção de peças, arqueologia, medicina, odontologia e levantamento topográfico. Para os futuros engenheiros de produção, a familiaridade com essa técnica amplia a capacidade de aplicar soluções digitais inovadoras em diferentes contextos industriais (Wachowicz et al., 2019).

Durante os experimentos, os alunos puderam comparar as geometrias digitais obtidas com modelos gerados em CAD, analisar desvios dimensionais e entender as limitações e vantagens do uso da fotogrametria. O processo se inicia com a modelagem 3D no software CAD, onde o objeto é projetado digitalmente. Em seguida, utiliza-se a fotogrametria para criar um modelo tridimensional a partir de imagens reais, permitindo verificar a fidelidade do modelo digital em relação ao objeto físico. Após essa etapa, os modelos são analisados em softwares de metrologia para identificar eventuais distorções, medir dimensões críticas e validar as tolerâncias. Essa vivência prática fortalece habilidades críticas, amplia a visão sobre ferramentas de metrologia e prepara os estudantes para lidar com demandas de digitalização, personalização e customização, cada vez mais presentes na Indústria 4.0 (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

As Figuras 5, 6 e 7 ilustram o processo completo de digitalização e preparação para impressão 3D, partindo de um objeto físico. A Figura 5 apresenta o modelo físico original utilizado como referência; A partir dessa digitalização, foi gerado um arquivo 3D que representa fielmente o objeto real como mostrado na Figura 6, o modelo foi importado para um software de fatiamento, onde foi convertido em um protótipo virtual, configurado com parâmetros específicos de impressão, como orientação, preenchimento e suporte. Essa sequência evidencia a conexão entre o mundo físico e o digital, demonstrando o fluxo prático de desenvolvimento de um produto com auxílio de tecnologias da Indústria 4.0.

Figura 5 — Objeto a ser digitalizado



Figura 6 — Protótipo virtual desenvolvido em software antes do processo de impressão 3D

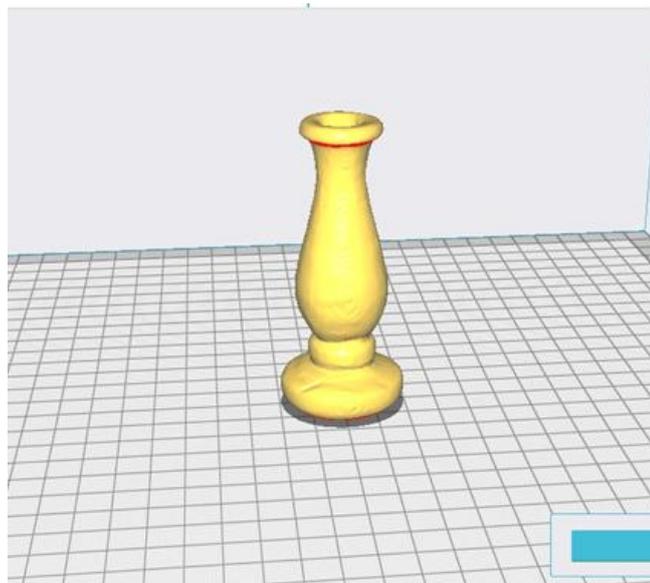
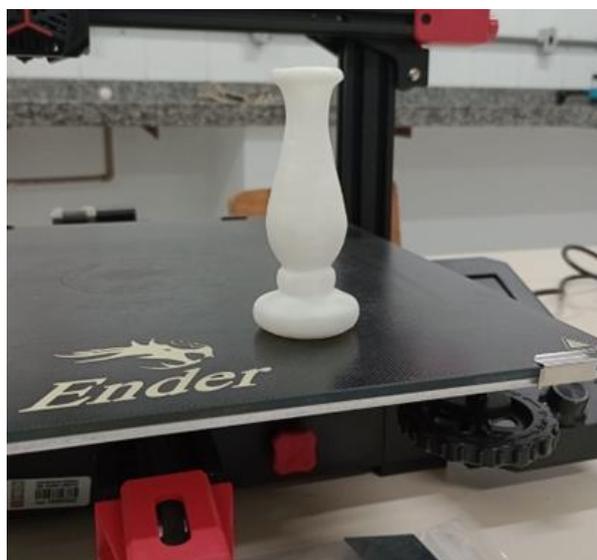


Figura 7 — Objeto após o processo de impressão



Do ponto de vista técnico, a qualidade da imagem 2D influencia diretamente a reconstrução 3D. Iluminação difusa e homogênea reduz sombras duras e realces especulares que confundem o algoritmo; resolução mais alta melhora a definição de bordas e detalhes finos; e o ângulo de captura deve favorecer a maior área visível possível do objeto, evitando o alinhamento raso (quase paralelo) ao plano da câmera. Texturas muito brilhantes ou translúcidas tendem a gerar artefatos em peças assim, o uso de spray fosqueante temporário e fundo neutro melhora a detecção de contornos. Sempre que possível, recomenda-se inserir marcador de escala (régua/coin) no enquadramento para ancorar a etapa de metrologia.

A integração com a manufatura aditiva mostrou-se especialmente vantajosa porque elimina boa parte da modelagem manual quando o objetivo é reproduzir rapidamente a geometria de referência: a malha gerada pela fotogrametria é retopologizada e “limpa” no CAD, passa pelo *slicing* e segue para impressão, encurtando o ciclo concepção → protótipo. No piloto, essa rota permitiu gerar versões de prova de conceito em um mesmo dia letivo, algo pouco exequível com modelagem paramétrica integral do zero.

Essa abordagem tem aplicações industriais claras: (i) engenharia reversa e digitalização de peças sem desenho técnico (por exemplo, componentes legados ou descontínuados); (ii) manutenção e gestão de sobressalentes sob demanda, quando é preciso reposição rápida com ajuste dimensional posterior; e (iii) personalização de produtos (ex.: bases ou cascos estéticos que partem da captura do objeto real do cliente). Em todos os casos, a possibilidade de imprimir

o protótipo imediatamente após a digitalização acelera a validação geométrica e o diálogo com o usuário.

É importante, contudo, reconhecer as limitações da técnica de foto única empregada nos testes. O método baseado em IA cria uma estimativa volumétrica coerente com a imagem, mas carece de informações de oclusão e profundidade real que a fotogrametria multivista (conjunto de fotos ao redor do objeto) ou o escaneamento 3D (laser/estrutural-luz) conseguem capturar. Em termos práticos, a foto única tende a suavizar reentrâncias, arredondar arestas vivas e inferir regiões não vistas; já a multivista melhora fidelidade e completude da malha, à custa de maior tempo de preparação e processamento. Os escâneres dedicados oferecem acurácia superior e dados métricos calibrados, porém com custo e curva de uso mais elevados. Assim, para uso didático e prototipagem rápida, a foto única mostrou-se suficiente; para tolerâncias estreitas ou peças funcionais, recomenda-se migrar para multivistas ou escaneamento.

Comparando-se a fidelidade geométrica das rotas, observa-se que a modelagem CAD pura atinge exatidão nominal (dimensões obedecem ao que foi parametrizado), mas exige esforço de reconstrução e conhecimento detalhado da peça; a fotogrametria entrega uma geometria “parecida” de forma muito mais rápida, sujeita, porém, a erros de malha e ruídos que precisam de correção. Como prática de laboratório, sugere-se medir 3 a 5 dimensões críticas do protótipo gerado por cada rota e calcular erro absoluto e relativo, além de repetir a captura/impressão três vezes para estimar repetibilidade.

No presente piloto, as principais limitações técnicas observadas foram: reflexos especulares (corrigidos com fundo fosco e ajuste de iluminação), perda de detalhes em regiões muito escuras (mitigada com exposição maior e balanço de branco adequado) e distorções em áreas finas, associadas ao ângulo de captura. As soluções incluíram recentralizar o enquadramento, usar distância focal maior para reduzir distorção da lente, ancorar a escala no CAD e aplicar suavização controlada seguida de estrangimentos dimensionais nas regiões críticas.

Em síntese, a fotogrametria mesmo na variante de foto única mostrou valor pedagógico ao conectar digitalização, metrologia e impressão 3D em um fluxo contínuo, reduzindo o tempo de obtenção de protótipos e abrindo espaço para discussões de acurácia, custo, tempo e escolha de processo. A explicitação das condições de captura e dos compromissos entre rapidez e precisão ajuda a formar o julgamento de engenharia que a Indústria 4.0 exige.

4.5. Desenvolvimento de Peças para Suporte e Análise no CEQ

Outra atividade prática desenvolvida no Laboratório de Estudos em Manufatura, Operações e Processos (LEMOP) consistiu na produção de peças para compor um suporte, utilizando a impressora 3D. Inicialmente, o modelo virtual foi criado em software CAD,

projetado para apresentar uma das dimensões nominais de 20 mm de comprimento e 9mm de diâmetro. Essa etapa de prototipagem digital permitiu o planejamento geométrico detalhado e a definição de parâmetros críticos de fabricação.

Após o desenvolvimento do protótipo virtual, o modelo foi convertido em código g por meio da integração entre os sistemas CAD/CAM possibilitando a comunicação com a impressora 3D. Em seguida, foram executadas as etapas de simulação e preparação do equipamento. Ao final do processo de manufatura aditiva, foram obtidas réplicas físicas que serviram de base para análises dimensionais.

Com o objetivo de verificar a precisão dimensional das peças produzidas, foi realizada uma coleta de dados no laboratório para posteriormente fazer um Controle Estatístico da Qualidade (CEQ). As peças passaram por medições com o uso de micrômetro, permitindo avaliar o diâmetro de cada amostra. No total, foram produzidas 25 réplicas da peça, e em cada uma foram realizadas 5 medições, distribuídas em diferentes posições ao longo do comprimento e do diâmetro, totalizando 125 registros para análise.

A figura 6 registra uma das etapas de coleta de dados dimensionais no laboratório, realizada para verificar a conformidade das réplicas com os valores nominais definidos no projeto (20 mm de comprimento e 9 mm de diâmetro), como parte do Controle Estatístico da Qualidade (CEQ).

Figura 8 — Medição dimensional da peça utilizando paquímetro digital.



Essa prática possibilitou compreender a importância do monitoramento dimensional e o impacto das variáveis do processo na qualidade final do produto (Juran; Gryna, 2017).

A figura 8 ilustra a réplica final utilizada nas medições. A peça serviu como base para a análise estatística de precisão dimensional no CEQ.

Figura 9 - Réplica da peça impressa em 3D utilizada na análise dimensional.



A aplicação do CEQ reforça conceitos como variabilidade de processo, repetibilidade e capacidade de produção, essenciais para o controle da qualidade na indústria. Além disso, proporciona experiência prática com ferramentas estatísticas e instrumentos de medição de alta precisão, competências fundamentais para o engenheiro de produção (Montgomery, 2020). A Tabela 1 representa os dados coletados referente ao planejamento do controle estatístico da qualidade para o comprimento do suporte. Já a tabela 2 representa a coleta de dados referente ao diâmetro.

Tabela 5 — Medidas do comprimento obtidas das amostras

Amostra/réplica	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Medida 5 (mm)
1	20,30	20,22	20,24	20,23	20,26
2	20,06	20,41	20,06	20,42	20,03
3	20,43	20,24	20,17	20,23	20,06

4	20,16	20,03	20,44	20,17	20,44
5	20,01	20,34	20,31	20,43	20,44
6	20,02	20,07	20,29	20,09	20,31
7	20,24	20,18	20,25	20,09	20,25
8	20,09	20,07	20,15	20,30	20,16
9	20,46	20,23	20,22	20,277	20,20
10	20,19	20,47	20,25	20,31	20,44
11	20,04	20,12	20,04	20,28	20,07
12	20,18	20,24	20,34	20,29	20,26
13	20,16	20,04	20,15	20,02	20,17
14	20,47	20,21	20,47	20,15	20,30
15	20,46	20,24	20,44	20,05	20,17
16	20,44	20,09	20,15	20,45	20,12
17	20,12	20,17	20,46	20,16	20,13
18	20,11	20,01	20,21	20,13	20,04
19	20,18	20,16	20,22	20,15	20,17
20	20,15	20,34	20,24	20,41	20,15
21	20,16	20,17	20,18	20,02	20,18

22	20,21	20,15	20,21	20,31	20,20
23	20,06	20,11	20,07	20,19	20,066
24	20,20	20,44	20,19	20,26	20,23
25	20,25	20,47	20,16	20,46	20,22

Tabela 6 — Medidas do diâmetro obtidas das amostras

Amostra/réplica	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Medida 5 (mm)
1	8,96	8,95	9,08	8,88	9,03
2	9,03	8,96	9,00	9,05	9,07
3	8,960	8,95	8,98	8,89	8,94
4	8,95	9,16	9,13	9,03	9,12
5	8,88	8,96	8,90	8,90	8,96
6	9,04	8,89	9,05	8,95	9,12
7	9,00	8,93	9,09	8,95	8,93
8	8,92	9,03	8,95	8,97	8,91
9	9,05	9,11	9,10	9,12	8,82
10	8,96	8,93	8,93	8,91	9,01
11	8,89	9,03	9,07	8,90	8,99
12	8,90	9,05	9,05	9,13	9,12

13	9,02	9,11	9,06	9,00	9,01
14	9,14	9,10	9,05	9,00	8,93
15	8,94	8,89	9,00	8,96	8,97
16	9,01	9,14	8,92	8,97	9,10
17	9,09	9,06	8,99	8,92	9,09
18	9,12	8,95	9,07	9,24	8,98
19	8,98	8,92	8,94	9,11	8,96
20	8,97	8,91	9,02	8,91	8,99
21	8,97	9,07	9,00	8,98	9,08
22	8,93	8,99	8,97	99,07	8,99
23	9,10	8,96	9,05	8,98	9,07
24	9,07	9,11	9,06	8,90	9,11
25	8,98	9,08	9,12	8,95	9,05

Os desvios dimensionais observados nas réplicas estão coerentes com a física do processo FDM e com as escolhas de parâmetros de impressão. Em especial, a altura de camada influencia diretamente o “efeito de escada” em superfícies inclinadas e o acabamento das faces, afetando o diâmetro aparente nas regiões curvas; velocidades mais elevadas tendem a ampliar a variabilidade entre camadas, enquanto temperatura de bico/mesa insuficiente aumenta a adesão deficiente e a retração, encurtando o comprimento útil. A orientação da peça no plano da mesa também é determinante: eixos paralelos às linhas de deposição preservam melhor a dimensão, ao passo que orientações com muitas mudanças de direção favorecem sobre-extrusão local e pequenas saliências. Em peças cilíndricas, o chamado “pé de elefante” nas primeiras

camadas pode elevar o diâmetro na base; chanfrar 0,2–0,5 mm nas bordas inferiores e ajustar *first-layer*/nivelamento mitigou esse efeito no laboratório.

Do ponto de vista metrológico, cada uma das 25 réplicas foi medida cinco vezes ao longo do comprimento e do diâmetro, o que permite tratar os dados como subgrupos de tamanho $n = 5$ para a análise do Controle Estatístico da Qualidade (CEQ).

A análise das medições sugere causas prováveis de variação: a retração térmica do filamento após o resfriamento (afetando o comprimento), pequenas variações de fluxo entre camadas (influenciando o diâmetro) e possíveis desvios de calibração de passos por milímetro ou de nivelamento da mesa. Essas hipóteses foram investigadas em laboratório com ajustes graduais de temperatura, velocidade de perímetros e orientação de impressão, registrando-se as mudanças na média e na amplitude por réplica procedimento que materializa o ciclo PDCA de melhoria contínua discutido em CEQ.

Em termos comparativos, a precisão obtida por FDM para protótipos plásticos mostrou-se adequada ao uso didático e à validação geométrica rápida, porém naturalmente mais dispersa do que a alcançada por processos convencionais como torneamento ou injeção, voltados a séries e tolerâncias mais estreitas. Essa constatação esteve alinhada com a literatura e foi útil para posicionar a manufatura aditiva como rota preferencial de prototipagem e produção sob demanda de baixa escala, reservando processos tradicionais quando o requisito principal é alta repetibilidade e acabamento.

Por fim, a atividade reforçou a conexão entre teoria e prática: a turma não apenas coletou dados reais e construiu as cartas \bar{X} -R, como também discutiu estabilidade do processo, capacidade e prioridades de ajuste à luz das medições. Relatos dos estudantes apontaram maior confiança na leitura de gráficos de controle, melhor compreensão do papel dos limites de especificação e um senso mais apurado de como parâmetros de impressão se traduzem em qualidade dimensional.

4.5.1. Análise via CEQ dos Resultados Dimensionais

Para avaliar a estabilidade do processo de manufatura aditiva utilizado na produção das peças, foram elaboradas cartas de controle \bar{X} -R e \bar{X} -S tanto para a dimensão de comprimento quanto para o diâmetro. A aplicação de cartas de controle estatístico constitui uma das principais ferramentas para monitorar a estabilidade de processos produtivos e assegurar a conformidade dimensional das peças fabricadas. Segundo Montgomery (2020), a utilização de cartas de controle é essencial para distinguir variações causadas por fatores comuns (inerentes

ao processo) daquelas oriundas de causas especiais, que podem comprometer a qualidade do produto final.

Além da verificação de estabilidade por meio das cartas $\bar{X}-R$ e $\bar{X}-S$, foi conduzida a avaliação de capacidade do processo frente às especificações de projeto. Adotando-se os limites de especificação definidos no desenho. A interpretação segue o padrão: C_p e C_{pk} próximos ou superiores a 1 indicam atendimento marginal às tolerâncias; valores acima de 1,33 sugerem margem confortável; e valores inferiores a 1 evidenciam risco de não conformidade, mesmo quando o processo se encontra estável estatisticamente.

Os resultados também evidenciaram diferenças entre dimensões lineares (comprimento) e cilíndricas (diâmetro). Como é característico da FDM, o controle do diâmetro mostrou-se mais crítico: superfícies curvas são mais sensíveis a largura real de extrusão, ao “pé de elefante” nas primeiras camadas e ao efeito de escada quando a altura de camada é elevada. Já o comprimento tende a responder principalmente à retração global e a desvios de calibração dos passos por milímetro. Assim, mesmo com cartas sob controle, é comum observar C_{pk} do diâmetro inferior ao do comprimento; a mitigação passa por reduzir altura de camada e velocidade nos perímetros, compensar a primeira camada, ajustar a largura/fluxo de extrusão e orientar a peça de modo a preservar a circularidade no plano XY.

Do ponto de vista funcional, a estabilidade e a capacidade foram relacionadas ao desempenho em uso por exemplo, à montagem do componente no conjunto de suporte. Quando C_{pk} do diâmetro se aproxima de 1 ou fica abaixo, surgem encaixes excessivamente justos (ou folgas indesejadas), comprometendo montagem e repetibilidade. Nesses casos, recomenda-se incluir compensação geométrica no CAD ou no *slicer* (ajuste de “horizontal expansion”), além de padronizar temperatura, velocidade e resfriamento para reduzir a variabilidade entre lotes. Quando C_{pk} do comprimento é satisfatório, a função global (posicionamento longitudinal) permanece preservada, ainda que pequenas variações no diâmetro exijam retrabalho leve (rebarbação) fato útil para discutir criticidade de características e planejamento de controle.

A relação entre parâmetros de impressão e estabilidade ficou clara ao comparar execuções com perfis diferentes de processo. Perfis com temperatura de extrusão ligeiramente maior (dentro da janela do material), velocidade de perímetros reduzida e altura de camada menor reduziram a amplitude média \bar{R} nas cartas e aumentaram C_{pk} , enquanto alterações de percentual de *infill* tiveram impacto limitado nas dimensões externas, desde que o número de perímetros permanecesse constante. A orientação com o eixo crítico no

plano XY e o uso de brim/compensação da primeira camada mitigaram variações sistemáticas na base das peças.

Para posicionar o desempenho obtido, vale notar que processos convencionais como usinagem CNC operam, em ambiente controlado, com dispersões muito menores e, portanto, com índices de capacidade elevados quando submetidos às mesmas tolerâncias. Já a FDM, especialmente em laboratório didático e com materiais como PLA, tende a apresentar maior variabilidade intrínseca; ainda assim, quando o objetivo é prototipagem e validação geométrica rápida, a estabilidade alcançada e C_{pk} próximos de 1 podem ser plenamente aceitáveis, desde que as exigências funcionais e os critérios de aceitação estejam alinhados ao propósito do protótipo.

Por fim, a comparação entre lotes/configurações reforçou boas práticas de controle na manufatura aditiva: secagem do filamento e controle de umidade, calibração periódica de passos por milímetro e nivelamento, manutenção preventiva do bico e das correias, padronização de perfis de *slicer* por tipo de material e registro em plano de controle (parâmetros-alvo, faixas de ajuste e responsáveis). A adoção sistemática desses elementos somada ao uso rotineiro das cartas \bar{X} -R/ \bar{X} -S e à verificação de C_p e C_{pk} em características críticas tende a elevar a repetibilidade entre turmas e a aproximar o desempenho do laboratório ao de ambientes industriais.

4.5.1.1. Comprimento

A ausência de pontos fora dos limites e de tendências sistemáticas evidencia que o processo se encontra sob controle estatístico, ou seja, operando de maneira estável e previsível (Montgomery, 2020). Além disso, os gráficos de amplitude e desvio padrão reforçam a consistência do processo, indicando que as variações observadas são pequenas e podem ser atribuídas apenas a causas comuns.

Nas cartas de controle \bar{X} -R e \bar{X} -S para o comprimento (valor nominal de 20 mm), observa-se que todas as médias amostrais permaneceram dentro dos limites de controle superior (UCL) e inferior (LCL). Esses limites foram calculados automaticamente pelo software Minitab, com base em modelos estatísticos padronizados que consideram a variabilidade das amostras e o tamanho do subgrupo. O software é utilizado como ferramenta de apoio, facilitando os cálculos matemáticos e a construção gráfica das cartas de controle, mas os parâmetros utilizados seguem fundamentos teóricos bem estabelecidos em estatística aplicada à qualidade.

A média geral obtida foi de aproximadamente 20,2154 mm, próxima ao valor nominal estabelecido. Os gráficos indicam uma distribuição homogênea dos pontos, sem tendências ou padrões sistemáticos que indiquem a presença de causas especiais de variação. Além disso, as cartas de amplitude (R) e de desvio padrão (S) também apresentaram os pontos dentro dos limites de controle, sugerindo uma variação natural e aceitável do processo.

Estes resultados confirmam que o processo de impressão 3D está sob controle estatístico, apresentando estabilidade e repetibilidade adequadas para a dimensão de comprimento.

Figura 10: Carta de controle \bar{X} -R para o comprimento

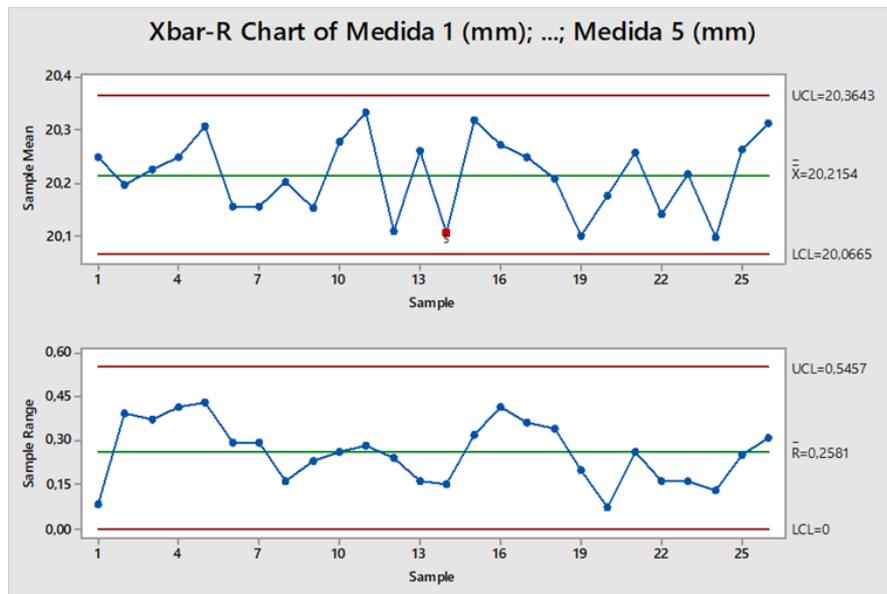
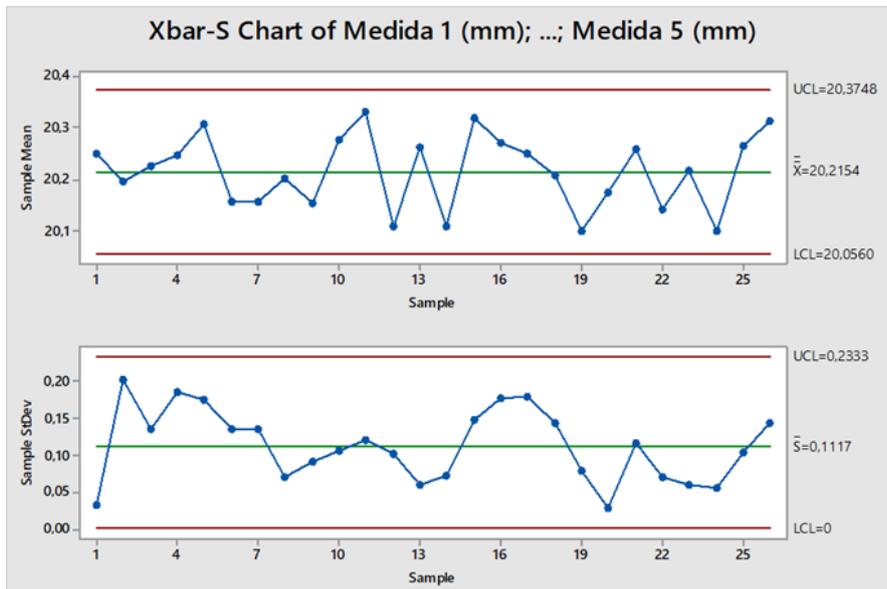


Figura 11: Carta de controle \bar{X} -S para o comprimento



4.5.1.2. Diâmetro

Para o diâmetro, com valor nominal de 9 mm, as cartas de controle Xbar-R e Xbar-S também apresentaram comportamento satisfatório. A média geral obtida foi de 9,0056 mm, mantendo-se muito próxima do valor de projeto, enquanto os limites de controle ficaram em $UCL = 9,1023$ mm e $LCL = 8,9089$ mm. O UCL (Upper Control Limit) e o LCL (Lower Control Limit) representam os limites superiores e inferiores de controle estatístico, respectivamente, calculados com base nas médias amostrais e na variabilidade do processo. Quando os dados permanecem dentro desses limites, considera-se que o processo está sob controle estatístico, sem ocorrência de causas especiais.

A estabilidade do processo para esta variável, confirmada pela inexistência de pontos fora de controle e pela uniformidade na dispersão, reforça a eficácia da configuração dos parâmetros de impressão 3D. Este resultado é particularmente relevante considerando que superfícies curvas, como diâmetros, tendem a apresentar maior complexidade no controle dimensional, devido a fenômenos como retração térmica e sobreposição de camadas.

A capacidade de manter o processo estável, mesmo em dimensões mais críticas, demonstra a adequação da tecnologia para fins didáticos e industriais. De acordo com Gibson, Rosen e Stucker (2015), a manufatura aditiva proporciona grande flexibilidade de design, mas exige um controle rigoroso para assegurar a qualidade e repetibilidade das peças produzidas.

Figura 12: Carta de controle Xbar-R para o diâmetro

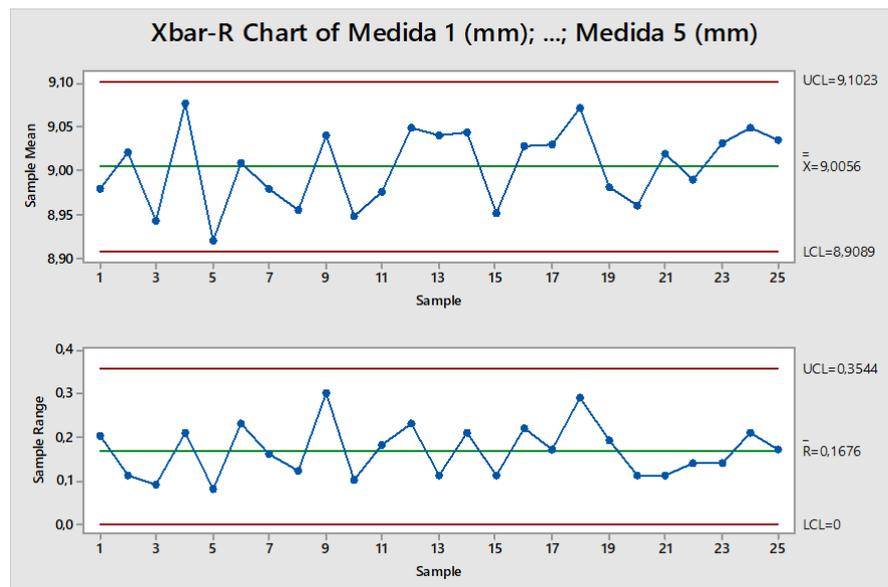
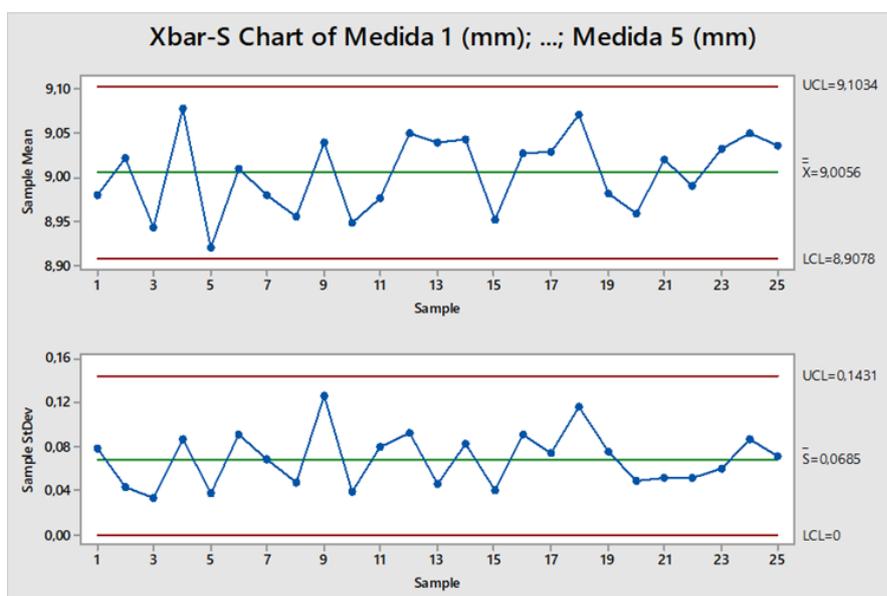


Figura 13: Carta de controle Xbar-S para o diâmetro



4.5.2. Conclusão da Análise Dimensional

A análise conjunta das cartas de controle Xbar-R e Xbar-S para as dimensões de comprimento e diâmetro evidencia que o processo de manufatura aditiva está operando sob controle estatístico, garantindo estabilidade e previsibilidade. Esses resultados confirmam a viabilidade da tecnologia como ferramenta de apoio ao ensino, favorecendo o desenvolvimento de competências essenciais para a Engenharia de Produção, tais como monitoramento de processos, análise crítica e aplicação de estatística na qualidade.

A integração entre manufatura aditiva e controle estatístico, além de alinhar a formação acadêmica com as exigências da Indústria 4.0, prepara os futuros engenheiros para atuarem de forma mais analítica e orientada a dados.

Os resultados das cartas Xbar-R e Xbar-S para comprimento e diâmetro indicam um processo estável sob causas comuns, com médias próximas ao alvo e variações compatíveis com o esperado para FDM. A estimativa de capacidade do processo (índices C_p e C_{pk}) mostrou atendimento às tolerâncias de prototipagem e montagem, ainda que com maior criticidade no diâmetro comportamento coerente com a literatura sobre manufatura aditiva, que aponta maior sensibilidade das superfícies cilíndricas a altura de camada, largura de extrusão e efeitos da primeira camada (cf. autores já citados). A adoção de ajustes simples (temperatura e velocidade de perímetros, compensação da primeira camada, orientação da peça e padronização de perfis do *slicer*) reduziu a amplitude das medições e melhorou a centralização, reforçando o papel do CEQ como guia de melhoria contínua (Montgomery, 2020).

Do ponto de vista formativo, a integração entre manufatura aditiva e controle estatístico se mostrou pedagógica e tecnicamente pertinente: os estudantes vivenciaram o ciclo completo projeto–fabricação–metrologia–análise, aplicando cartas de controle, capacidade e investigação de causas, competências valorizadas nas DCNs de Engenharia e alinhadas às demandas da Indústria 4.0 (análise de dados, tomada de decisão baseada em evidências e otimização de processos). Em termos práticos, a abordagem fornece insumos para definir tolerâncias realistas em protótipos, selecionar parâmetros de impressão com base em dados e estabelecer planos de controle aplicáveis tanto a laboratórios acadêmicos quanto a células industriais de prototipagem/produção sob demanda. Assim, os achados corroboram a viabilidade da impressão 3D como ferramenta educacional e profissional, ao mesmo tempo em que evidenciam caminhos objetivos de aprimoramento do processo e de aprofundamento futuro (MSA/Gage R&R, DOE para mapeamento de parâmetros e comparação entre processos).

4.6. Aplicação Prática na Disciplina de Engenharia de Processos Mecânicos

Como parte das propostas de integração da modelagem 3D e da manufatura aditiva na matriz curricular do curso de Engenharia de Produção do ICEA, destaca-se a aplicação prática desenvolvida na disciplina ENP 701 – Engenharia de Processos Mecânicos, realizada no Laboratório de Manufatura (LEMOP). A atividade consistiu na fabricação de peças como uma biela e uma shuriken por meio das tecnologias de manufatura aditiva (impressão 3D com filamento PLA) e corte a laser em chapas de fibras de madeira (Eucatex).

Durante essa prática, os alunos percorreram as etapas de desenvolvimento do produto, desde a modelagem em software CAD, passando pela simulação (CAE), até a preparação do código G para a fabricação (CAM). Cada uma dessas etapas representa uma parte essencial da cadeia produtiva digital integrada pela Indústria 4.0:

- CAD (Computer-Aided Design): nesta etapa inicial, os estudantes projetaram as peças em ambiente tridimensional, utilizando softwares de desenho técnico para criar modelos detalhados e parametrizados. Essa fase é fundamental para a visualização e análise prévia da geometria do produto, permitindo alterações rápidas e assertivas ainda no ambiente digital.
- CAE (Computer-Aided Engineering): a simulação computacional viabiliza a verificação do comportamento da peça sob determinadas condições operacionais, como esforços e deformações. Embora a etapa de simulação tenha sido limitada na atividade prática, seu conceito foi apresentado, demonstrando como essa análise contribui para a

prevenção de falhas e para a otimização do projeto. Esse tipo de validação digital é uma prática-chave da Indústria 4.0 por permitir decisões mais rápidas e seguras.

- CAM (Computer-Aided Manufacturing): com a peça final modelada e validada, os alunos utilizaram softwares de fatiamento (slicers) para converter o modelo 3D em código G, linguagem que comanda a impressora 3D durante o processo de fabricação. Essa automação do processo de produção, sem a necessidade de intervenção humana constante, é um dos pilares da manufatura inteligente e conectada.

Essa integração entre CAD, CAE e CAM não apenas evidencia a interdisciplinaridade do conteúdo, como também conecta diretamente o ensino às competências exigidas pela Indústria 4.0, como digitalização, automação, conectividade e tomada de decisão baseada em dados.

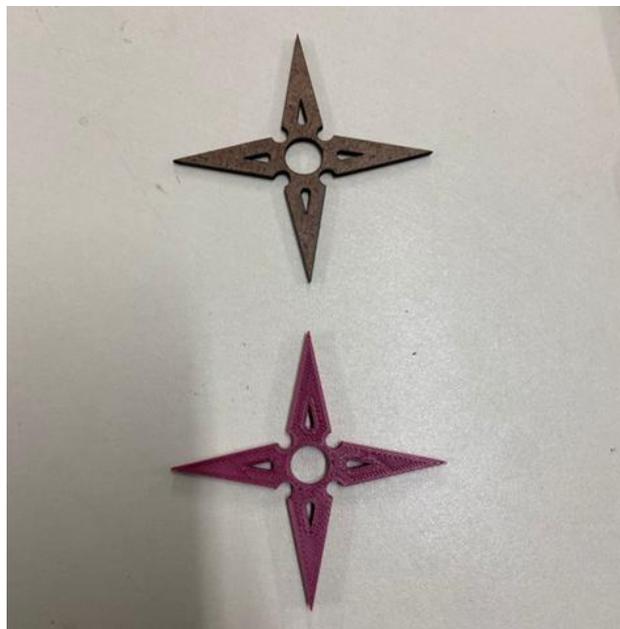
Além do domínio técnico dos softwares e dos equipamentos, a atividade ainda promoveu o aprendizado sobre materiais e propriedades mecânicas, bem como sobre processos de fabricação digital. Os estudantes também foram incentivados a classificar os processos segundo critérios industriais, como volume de produção, variedade de produtos, flexibilidade e capacidade ociosa, ampliando o entendimento prático dos conceitos teóricos.

A impressão da peça “biela” (conforme a imagem registrada no laboratório) simboliza um dos principais resultados da atividade, demonstrando a aplicabilidade da manufatura aditiva na prototipagem funcional de componentes mecânicos. Este tipo de experiência reforça a importância de metodologias ativas de ensino, como o *learning by doing*, para o desenvolvimento de competências alinhadas às necessidades do mercado industrial contemporâneo.

Figura 14 – Peça "Biela" impressa em 3D utilizando filamento PLA, como parte da atividade prática da disciplina ENP 701 – Engenharia de Processos Mecânicos.



Figura 15 – Peça "Shuriken" impressa em 3D com filamento PLA, representando a diversidade geométrica explorada na disciplina ENP 701 – Engenharia de Processos Mecânicos.



A atividade foi realizada no Laboratório de Manufatura (LEMOP) da UFOP, permitindo que os alunos percorressem todas as etapas do processo de fabricação digital: modelagem em software CAD, geração de código G (CAM) e produção final na impressora 3D. Essa prática integra conceitos de manufatura aditiva e Indústria 4.0 ao ensino de Engenharia de Produção.

Além da biela, outra peça fabricada durante a atividade prática foi a shuriken, que apresentou uma geometria distinta, exigindo atenção especial quanto aos detalhes, simetria e acabamento. A primeira versão da peça foi produzida em chapa de eucatex, utilizando o processo de corte a laser. Em seguida, foi realizada a reprodução do mesmo modelo por meio da impressão 3D com filamento PLA. Essa duplicação permitiu aos alunos compararem dois processos distintos de fabricação, um subtrativo e outro aditivo, evidenciando suas diferenças quanto à precisão, acabamento e tempo de produção.

A impressão dessa peça contribuiu para demonstrar a versatilidade da manufatura aditiva na reprodução de formas complexas e detalhadas, evidenciando sua aplicabilidade em projetos de design mecânico com alto nível de personalização. O exercício proporcionou aos alunos a oportunidade de comparar diferentes geometrias e desafios de impressão, aprimorando sua capacidade de adaptação às exigências de cada projeto e desenvolvendo a percepção crítica sobre a escolha do processo mais adequado conforme o material e o objetivo de fabricação.

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015), a manufatura aditiva permite maior flexibilidade de design e personalização de peças, contribuindo para o aprendizado prático e o domínio de tecnologias emergentes. Assim, atividades como essa representam uma estratégia pedagógica eficaz para o ensino de Engenharia de Produção, promovendo uma formação mais completa e atualizada dos futuros engenheiros.

A vivência permitiu aos estudantes relacionar materiais, processos e desempenho. No modelo de biela, por exemplo, ficou explícito que espessura de paredes, número de perímetros e padrão de preenchimento (infill) condicionam a rigidez e a resistência do protótipo; simultaneamente, altura de camada, largura de extrusão e temperatura de bico/mesa influenciam acabamento superficial, precisão dimensional e presença de defeitos (marcas de resfriamento, *stringing*, *elephant foot*). Essa leitura técnica foi reforçada pelo encadeamento CAD–CAE–CAM: a partir da modelagem, simulou-se o comportamento para ajustar raios de concordância e espessuras mínimas, e, na etapa de preparação (*slicer*), traduziu-se o projeto em parâmetros de manufatura (orientação, suportes, trajetórias e velocidade), alinhando intenção de projeto e capacidade do processo.

Embora a prática tenha utilizado majoritariamente PLA, discutiu-se em sala o comparativo conceitual entre filamentos: o PLA oferece maior facilidade de impressão, boa estabilidade dimensional e acabamento, mas menor resistência térmica; o PETG equilibra ductilidade e resistência química, com bom desempenho para peças sujeitas a impactos moderados; o ABS amplia resistência térmica e tenacidade, porém exige controle mais rígido de temperatura/ambiente para evitar *warping* e *cracking*. Do ponto de vista pedagógico, essa comparação ajuda a justificar escolhas de material conforme requisito de uso (prova de conceito geométrica, protótipo funcional de baixa carga ou componente submetido a temperatura).

A análise também evidenciou diferenças entre processos aditivos e subtrativos. O corte a laser em Eucatex mostrou-se vantajoso em tempo de ciclo e custo unitário para geometrias planas e produção de múltiplas unidades, com bordas limpas condicionadas ao kerf e à carbonização do material; em contrapartida, limita-se a peças 2D/2,5D e requer compensação de folgas em encaixes. Já a impressão 3D (FDM/PLA) viabilizou formas tridimensionais complexas e personalização, a custo e tempo maiores por unidade, porém sem necessidade de ferramental. Essa comparação, realizada pelos próprios alunos, consolidou o entendimento de que a escolha do processo depende de geometrias, lotes, tolerâncias e requisitos de desempenho.

Do ponto de vista metrológico, a orientação de impressão e o contato da primeira camada com a mesa mostraram-se críticos para dimensões externas: orientar a peça para reduzir saliências e aplicar compensação de primeira camada (ou chanfro) melhorou o controle de

variação e a qualidade do acabamento. Ajustes adicionais – secagem de filamento, padronização de velocidades de perímetro/infill e estabilização térmica do equipamento – foram incorporados ao plano de processo, conectando a cultura de melhoria contínua discutida no CEQ com a prática de oficina.

Quanto às limitações, registraram-se desafios de simetria e detalhes finos no *shuriken* em PLA quando a espessura se aproximou de uma a duas larguras de extrusão; a solução foi aumentar perímetros e reduzir altura de camada, aceitando incremento de tempo de impressão em troca de fidelidade geométrica. No corte a laser, as variações de *kerf* exigiram compensação no CAD para garantir encaixes sem folga excessiva, evidenciando a importância do feedback projeto→processo→projeto.

Em termos de aplicação, as peças produzidas são adequadas como protótipos funcionais de baixa solicitação (verificação de montagem, ergonomia e cinemática simples) e como artefatos didáticos para experimentação de parâmetros, não devendo ser empregadas em ambientes com cargas dinâmicas elevadas ou temperaturas acima do limite do material. Essa distinção, debatida com a turma, reforça a noção de especificação de uso e de engenharia de requisitos.

Finalmente, a atividade aproxima o ensino das práticas industriais em que se alternam processos aditivos e subtrativos para otimizar custo, prazo e personalização – realidade de setores como bens de consumo, dispositivos médicos, automotivo e *tooling* (gabaritos, *jigs* e *fixtures*). Ao conduzir os alunos pelo ciclo completo CAD–CAE–CAM–metrologia–análise, o exercício desenvolve competências previstas nas DCNs (raciocínio crítico, trabalho em equipe, uso de tecnologias digitais e decisão baseada em dados) e alinhadas à Indústria 4.0, consolidando o laboratório como ambiente de aprendizagem ativa com forte transferência para a prática profissional.

4.7. Aplicação Prática: Modelagem 3D de personalidade pública

Como parte das atividades práticas envolvendo modelagem e manufatura aditiva, foi desenvolvido um modelo tridimensional do artista Michael Jackson, a partir de uma imagem 2D. A conversão da imagem para modelo digital foi realizada na plataforma **MakerWorld** (<https://makerworld.com/pt/makerlab/imageTo3d>), que permite transformar fotografias planas em arquivos 3D imprimíveis.

O site MakerWorld utiliza um algoritmo baseado em mapeamento de escala de cinza, que interpreta os diferentes níveis de brilho da imagem para gerar um relevo tridimensional. As

áreas mais claras da imagem original são transformadas em superfícies mais elevadas, enquanto as áreas escuras resultam em regiões mais profundas. Essa técnica permite a criação de modelos com volume a partir de imagens bidimensionais, sendo bastante utilizada para bustos, medalhões e relevos artísticos.

Após a geração do arquivo em formato STL, o modelo foi processado em software de fatiamento para ajustar parâmetros de impressão, como altura de camada, preenchimento e temperatura do bico extrusor. A impressão foi realizada em filamento PLA em impressora 3D disponível no laboratório, resultando em um busto estilizado do cantor.

A realização desta atividade proporcionou o contato com ferramentas de criação digital acessíveis, além de reforçar o entendimento sobre as etapas envolvidas no processo de manufatura aditiva desde a concepção do modelo até a fabricação da peça física. O exercício também demonstrou o potencial da impressão 3D em contextos educacionais e artísticos, explorando a integração entre tecnologia, criatividade e prática de laboratório.

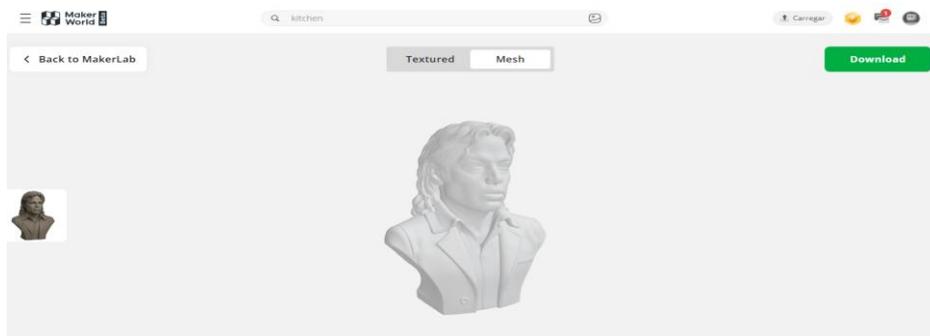
A Figura 16 apresenta a imagem original utilizada como referência para a criação do modelo tridimensional do cantor Michael Jackson. Essa imagem foi selecionada por conter bom contraste de luz e sombra, facilitando a interpretação automática de relevo pelo sistema da plataforma **MakerWorld**.

Figura 16 — Imagem 2D de referência utilizada na conversão para modelo 3D.



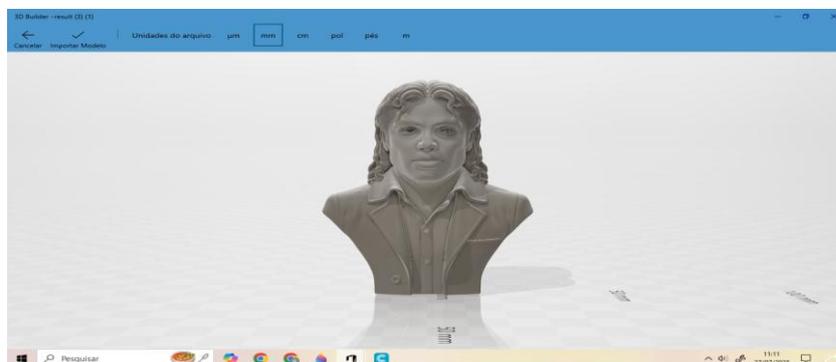
A partir da imagem inserida no site, como ilustrado na Figura 17, foi gerado automaticamente um modelo tridimensional com base no mapeamento em escala de cinza. O algoritmo do MakerWorld interpreta áreas claras como superfícies elevadas e áreas escuras como regiões mais profundas, criando um relevo que simula as proporções da imagem original.

Figura 17 — Visualização do modelo gerado automaticamente na plataforma MakerWorld



Em seguida, conforme mostrado na Figura 18, o arquivo STL gerado foi importado para o software de fatiamento **Creality Slicer**, onde foi possível ajustar os parâmetros de impressão, como altura de camada, preenchimento e temperatura de extrusão. A visualização do modelo no slicer permitiu verificar a integridade do objeto, além de simular o processo de deposição camada por camada.

Figura 18 — Modelo 3D importado no software Creality Slicer para configuração dos parâmetros de impressão.



A Figura 19 mostra a visualização final do modelo já preparado para impressão, com destaque para os planos de suporte e a orientação da peça. O busto foi posteriormente impresso em filamento PLA no laboratório, evidenciando a possibilidade de transformar uma simples imagem 2D em um objeto tridimensional físico por meio da integração de softwares e da manufatura aditiva.

Figura 19 — Pré-visualização do modelo fatiado, pronto para impressão 3D.

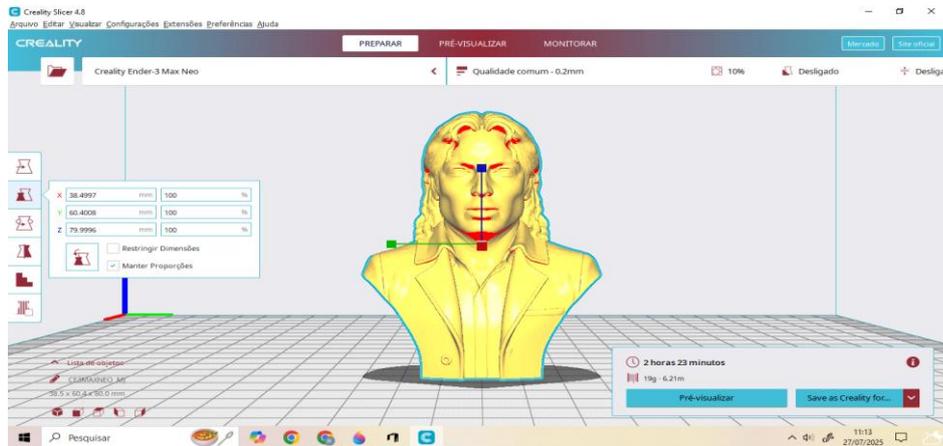


Figura 20 — Busto final impresso em 3D a partir da imagem modelada digitalmente.



Do ponto de vista formativo, a atividade potencializou competências criativas e digitais: os estudantes vivenciaram a curadoria da imagem de referência, compreenderam o impacto de variáveis de captura (luz, resolução, enquadramento) na fidelidade do 3D, praticaram edição geométrica básica e tomaram decisões de processo no fatiamento. Além disso, o exercício favoreceu discussões sobre ética e direitos de uso de imagem, reforçando o caráter acadêmico e não comercial do protótipo.

A pertinência industrial desse fluxo foi explorada em sala: técnicas de conversão imagem→modelo são empregadas na digitalização rápida de relevos, personalização de produtos (medalhões, placas comemorativas), conservação digital/museologia, e no registro de geometrias sem documentação técnica, servindo como etapa inicial para engenharia reversa. Quando a aplicação exige maior acurácia volumétrica, comparou-se criticamente essa abordagem de “relevo 2,5D” com métodos multivista de fotogrametria e com o escaneamento 3D a laser/luz estruturada, destacando vantagens (custo baixo, rapidez, simplicidade) e limitações (menor precisão e profundidade real).

Como desdobramento metodológico, recomenda-se, em futuras edições, aplicar questionários breves de percepção e rubricas de avaliação (critérios: fidelidade geométrica percebida, acabamento, planejamento de processo e justificativa técnica das escolhas) para mensurar o impacto didático da atividade. Também é pertinente integrar o caso a outras disciplinas por exemplo, Gestão da Produção (planejamento de lote piloto e *lead time*), ou Planejamento de Processos (análise de *trade-offs* entre parâmetros de impressão, custo e qualidade) e propor casos inspirados em demandas reais (digitalização de um componente sem desenho para reposição rápida).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa buscou analisar o potencial da modelagem 3D e da manufatura aditiva como recursos pedagógicos no curso de Engenharia de Produção do ICEA, alinhando ensino e práticas da Indústria 4.0. A partir da revisão teórica, da análise da matriz curricular e da realização de atividades laboratoriais, foi possível demonstrar caminhos concretos para integrar CAD–CAE–CAM, fotogrametria e impressão 3D a componentes curriculares já existentes, fortalecendo a aprendizagem ativa e a formação por competências.

No que se refere ao mapeamento das disciplinas com potencial de integração, identificaram-se oportunidades claras em Expressão Gráfica, Engenharia de Processos Mecânicos e Controle Estatístico da Qualidade (CEQ). Essas disciplinas apresentam aderência natural às tecnologias digitais (modelagem, prototipagem e metrologia), permitindo a transição do projeto virtual para a materialização e análise de peças, em consonância com as DCNs (Res. CNE/CES nº 2/2019).

Quanto ao desenvolvimento e teste de atividades práticas, as ações implementadas no LEMOP evidenciaram a viabilidade técnica e didática do uso de softwares CAD e slicers, bem como da operação de impressoras 3D FDM com PLA. Projetos como a “biela” e o “shuriken” permitiram comparar processos aditivo e subtrativo, discutir escolhas de parâmetros (altura de camada, orientação, preenchimento) e relacioná-los a acabamento, tempo de fabricação e resistência — promovendo integração efetiva entre teoria e prática.

O objetivo de empregar fotogrametria/digitalização foi atendido com a criação de modelos 3D a partir de imagens 2D (MakerWorld) e posterior preparação no Creality Slicer. A atividade mostrou potencial para acelerar a etapa de concepção e ampliar a criatividade dos estudantes, ao mesmo tempo em que revelou limitações inerentes à conversão 2D→3D (dependência de iluminação, contraste e resolução), que foram discutidas criticamente pelos alunos.

Em relação ao CEQ, procedeu-se à coleta de dados dimensionais de réplicas (25 peças, cinco medições por peça) para comprimento e diâmetro, totalizando 125 registros. As cartas \bar{X} -R e \bar{X} -S indicaram processo sob controle estatístico, sem pontos fora dos limites e sem padrões de instabilidade; a média do comprimento ficou próxima ao nominal ($\approx 20,2154$ mm). Esses resultados, aliados à repetibilidade observada, confirmam a estabilidade do processo de impressão nas condições utilizadas e reforçam o potencial da manufatura aditiva como contexto autêntico para aplicação de ferramentas de qualidade. Ainda que a capacidade (C_p/C_{pk}) não tenha sido formalmente calculada, os indícios apontam aderência às especificações didáticas trabalhadas.

O objetivo de avaliar impactos didáticos foi alcançado de forma qualitativa: a participação nas etapas CAD–CAE–CAM, a comparação entre processos e a validação metrológica favoreceram engajamento, autonomia, pensamento crítico e compreensão conceitual (geometria, tolerâncias, variabilidade e tomada de decisão baseada em dados). A experiência também aproximou os estudantes de práticas usuais na indústria (prototipagem rápida, integração digital do desenvolvimento de produto, controle de processo).

Do ponto de vista acadêmico-pedagógico, a principal contribuição é um modelo replicável de integração curricular que articula metodologias ativas com tecnologias acessíveis, oferecendo trilhas de aprendizagem que conectam projeto, fabricação e análise da qualidade. No âmbito técnico, o estudo valida o uso de impressão 3D como ambiente controlado para experimentação de parâmetros de processo e para aplicação de ferramentas estatísticas, criando uma ponte efetiva entre sala de aula e chão de fábrica. Para a Engenharia de Produção, os achados reforçam a pertinência de formar egressos capazes de operar cadeias digitais, analisar dados de processo e propor soluções com agilidade e responsabilidade.

Limitações do estudo. Os resultados decorreram de um conjunto específico de condições: uma tecnologia de impressão (FDM) e um material (PLA), parque de equipamentos limitado, amostra modesta (25 peças), janela temporal restrita e ausência de grupo de comparação formal (sem instrumentos padronizados de avaliação de aprendizagem). Na fotogrametria, trabalhou-se majoritariamente com imagem única, o que reduz fidelidade de relevo. Não foram conduzidas análises de custo/tempo/energia nem cálculos de capacidade (C_p/C_{pk}) e DOE para quantificar a influência de parâmetros.

Trabalhos futuros. Recomenda-se: (i) ampliar a integração para outras disciplinas (Gestão de Projetos, Simulação), instituindo eletivas como Laboratório de Prototipagem Rápida e Manufatura Aditiva & Sustentabilidade; (ii) diversificar processos e materiais (SLA, SLS, compósitos, reciclados), com estudos de capacidade de processo (C_p/C_{pk}) e planejamentos experimentais (DOE); (iii) instrumentar impressoras com sensores/IoT para monitoramento em tempo real e análise energética/pegada de carbono (LCA); (iv) adotar rubricas e questionários pré- e pós-atividade para medir ganhos de aprendizagem e soft skills; (v) explorar fotogrametria multivista e compará-la à modelagem CAD pura quanto à precisão; (vi) consolidar parcerias com empresas para projetos integradores e validação externa dos protótipos.

Em síntese, a integração estruturada de modelagem 3D, fotogrametria, impressão 3D e CEQ mostrou-se viável e pertinente para o ICEA: fortalece competências técnicas e gerenciais demandadas pela Indústria 4.0, promove aprendizagem baseada em dados e sustenta uma evolução curricular orientada por evidências. Com a mitigação das limitações apontadas e a

expansão proposta, a iniciativa tende a consolidar-se como referência institucional em formação prática e inovadora na Engenharia de Produção.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, Eliza Tala Moura; RAMALHO, Rayane Fernandes; SANTOS, Vanessa Érica da Silva. **Responsabilização do empregador quanto ao fornecimento de Equipamentos de Proteção Individual (EPI)**. *Revista Brasileira de Direito e Gestão Pública*, v. 7, n. 3, p. 50-63, 2019.

ARAÚJO, Marcelly Pereira. **Performance de DDS como reflexo nos resultados de Segurança**. Disponível em: <<http://www.ipog.edu.br/revista-especialize-online>>. Acesso em: 5 ago. 2025.

BARBOZA, Eliezio Nascimento et al. **Higiene e Segurança no Trabalho: Uma análise acerca da importância dos EPIs e EPAs na construção civil**. *Informativo Técnico do Semiárido*, v. 14, n. 2, p. 115-118, 2020.

BARRIONUEVO, Vanessa; DAGA, Evelyn; OLIVEIRA, Roger Fernandes de. **Importância do uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) por profissionais de saúde**. *Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc Xanxerê*, v. 5, p. e24339, 2020.

BLÖDORN, M.; SOARES, M. **Qualidade: uma questão de sobrevivência para as organizações**. *Acadêmica do 7º semestre do curso de Administração da Universidade Luterana do Brasil*, 2011. Disponível em: <<http://www.bancodedadoszonasul.com.br/htmlarea/midia/artigos/68922112011112554.pdf>>. Acesso em: 5 ago. 2025.

BUTIERRES, M. C., & MENDES, J. M. R. (2016). **A Discriminação de Vítimas de Acidente do Trabalho ou de Doença Ocupacional: Uma Situação de Invisibilidade Social Potencializada**. *Sociedade Em Debate*, 22(1), 237-260. Disponível em: <https://revistas.ucpel.edu.br/rsd/article/view/1337>. Acesso em: 05 ago 2025

CARDOSO, Adalberto; LAGE, Telma. **A inspeção do trabalho no Brasil**. *DADOS - Revista de Ciências Sociais*, v. 48, n. 3, 2005.

CHACON, Daniel Cesar Franklin. **A Relação Entre o Direito do Trabalhador ao Bem-Estar e o Seu Meio Ambiente do Trabalho**. 2008. Disponível em: <<https://www.direitonet.com.br/artigos/exibir/4584/A-relacao-entre-o-direito-do-trabalhador-ao-bem-estar-e-o-seu-meio-ambiente-do-trabalho>>. Acesso em 05 ago 2025.

CHIAVENATO, Idalberto. **Comportamento organizacional: a dinâmica do sucesso das organizações**. São Paulo: Manole, 2005.

CÔRTEZ, Diego Alves et al. **A importância do EPI na construção civil**. *Humanidades e Tecnologia. Revista Multidisciplinar FINOM*, v. 18, n. 1, p. 109-118, 2019.

DARÓZ, Carlos. **O Brasil na Primeira Guerra Mundial: a longa travessia**. São Paulo: Contexto, 2016.

DE SOUZA, Luiz Carlos; DE MELO, Fabio Xavier. **A importância do uso de EPI na prevenção de acidentes**. *Diálogos Interdisciplinares*, v. 9, n. 1, p. 200-215, 2020.

ESTEVES, Álvaro Eduardo Ferreira. **Mediação e arbitragem: perspectivas na administração dos conflitos, em relacionamentos estratégicos interorganizacionais**. *Humanidades e Tecnologia: Revista Multidisciplinar FINOM*, v. 10, n. 1, p. 54-59, 2015.

FERNANDES, Sara Andreia Silva. **Ferramentas de gestão e desenvolvimento de competências na transição para a Indústria 4.0: o caso de uma empresa na indústria automóvel**. São Paulo: LIMA, 2019.

FILATRO, Andrea. **Design instrucional 4.0**. São Paulo: Saraiva Educação SA, 2019.

GROOVER, M. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. São Paulo: Pearson, 2011.

HASS, Sérgio et al. **O sofrimento psíquico do técnico de segurança do trabalho frente à organização do trabalho pós-fordista**. *Revista Brasileira de Direito e Gestão Pública*, v. 1, n. 1, p. 25-40, 2012.

LIMA, Tomas. **O que é DDS – Entenda sua importância e veja dicas de segurança**. 2017. Disponível em: <<https://www.sience.com.br/blog/dds-importancia-dicas-de-seguranca/>>. Acesso em: 5 ago. 2025.

LOBO, Rafael. **O que é DDS – Diálogo Diário de Segurança**. 2019. Disponível em: <<https://www.conceitozen.com.br/o-que-e-dds-dialogo-diario-de-seguranca.html>>. Acesso em: 5 ago. 2025.

MACHADO, Felipe. **Segurança do trabalho através do mural digital – a importância da comunicação**. 2016. Disponível em: <<https://endomarketing.tv/seguranca-do-trabalho/>>. Acesso em: 5 ago. 2025.

MANCIO, Vagner Gerhardt; SELLITTO, Miguel Afonso. **Sistemas flexíveis de manufatura: definições e quadro de trabalho para futura pesquisa**. *Revista GEINTEC – Gestão, Inovação e Tecnologias*, v. 7, n. 2, p. 3760-3773, 2017.

MEDEIROS, Camila Marinho Costa de. **Programa Trabalho Seguro: suas ações e arranjos institucionais**. *Monografia (Bacharelado em Gestão de Políticas Públicas)*—Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

NACARATTI, Paulo Roberto Agrizzi et al. **Automação industrial: CLP e robótica industrial**. *Revista de Trabalhos Acadêmicos – Universo Belo Horizonte*, v. 1, n. 2, 2017.

NAKAYAMA, Ruy Somei. **Oportunidades de atuação na cadeia de fornecimento de sistemas de automação para indústria 4.0 no Brasil**. São Paulo: Ediusp, 2017.

NATALE, Ferdinando. **Automação industrial – Série Brasileira de Tecnologia**. São Paulo: Saraiva Educação SA, 2018.

- PEREIRA, Claudinei Aducio. **A importância da utilização de EPI e EPC em obras civis em vias públicas.** *MBA Gestão de Obras e Projetos* – Florianópolis, 2018.
- PISTONO, Federico. **Os robôs vão roubar seu trabalho, mas tudo bem: como sobreviver ao colapso econômico e ser feliz.** São Paulo: Companhia das Letras, 2017.
- PONCHIROLLI, Osmar et al. **O capital humano como elemento estratégico na economia da sociedade do conhecimento sob a perspectiva da teoria do agir comunicativo.** São Paulo: Companhia das Letras, 2016.
- RIBEIRO, José Flavio Matos. **Indicadores de qualidade em campo para o gerenciamento de melhorias no processo celular.** *Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará,* Belém, 2016.
- ROSÁRIO, João Maurício. **Automação industrial.** São Paulo: Editora Baraúna. Editora Baraúna, São Paulo, 2012.
- SILVA, Celso Nunes da. **Segurança e saúde no trabalho no contexto da UnB.** *Monografia (especialização)—Universidade de Brasília, Especialização em Gestão Universitária,* Brasília, 2012.
- GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing.** 2. ed. New York: Springer, 2015.
- JURAN, J. M.; GRZYNA, F. M. **Juran's Quality Handbook.** 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1999.
- ANDERSON, Chris. **Makers: a nova revolução industrial.** São Paulo: Elsevier, 2012.
- KOREN, Yoram. **The global manufacturing revolution: product-process-business integration and reconfigurable systems.** New Jersey: Wiley, 2018.
- ROSA, S. D.; OLIVEIRA, G. F.; MACHADO, L. S. **Laboratórios inteligentes e o ensino de engenharia na era digital.** *Revista Brasileira de Ensino de Engenharia,* 2020.
- GERSHENFELD, N. **Fab: a revolução da fabricação digital.** São Paulo: Blucher, 2012.
- CRESWELL, J. W. **Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches.** 4. ed. Thousand Oaks: Sage, 2014.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações.** 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.