



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LEVI NATAN GONDIM LOPES

APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM BASEADA EM PROBLEMAS (PBL)
UTILIZANDO A MANUFATURA ADITIVA NO ENSINO DA METROLOGIA
DIMENSIONAL NA ENGENHARIA

RUSSAS

2026

LEVI NATAN GONDIM LOPES

APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM BASEADA EM PROBLEMAS (PBL) UTILIZANDO
A MANUFATURA ADITIVA NO ENSINO DA METROLOGIA DIMENSIONAL NA
ENGENHARIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Edvan Cordeiro de Miranda.

RUSSAS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L854a Lopes, Levi Natan Gondim.
Aplicação da aprendizagem baseada em problemas (PBL) utilizando a manufatura aditiva no ensino da metrologia dimensional na engenharia / Levi Natan Gondim Lopes. – 2026.
172 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Edvan Cordeiro de Miranda.
1. PBL. 2. manufatura aditiva. 3. impressão 3D. 4. metrologia. 5. ensino de engenharia. I. Título.
CDD 620.1
-

LEVI NATAN GONDIM LOPES

APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM BASEADA EM PROBLEMAS (PBL) UTILIZANDO
A MANUFATURA ADITIVA NO ENSINO DA METROLOGIA DIMENSIONAL NA
ENGENHARIA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 20/01/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edvan Cordeiro de Miranda (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido a vida, a saúde e a força necessária para superar os obstáculos e persistir até a conclusão desta importante etapa.

Aos meus pais, Cleudemarcos Lopes Feitoza e Adalrinete Maia Gondim, minha base e meus maiores exemplos. Obrigado por todo o amor incondicional, pelos sacrifícios feitos em prol da minha educação e por sempre acreditarem no meu potencial, mesmo nos momentos mais difíceis. Esta conquista também é de vocês.

Aos meus irmãos, Luann Marcos Gondim Lopes e Lucas Renan Gondim Lopes, pela amizade, pela torcida constante e por estarem sempre ao meu lado, compartilhando as alegrias e os desafios da vida.

Às minhas avós, Maria de Fátima Maia e Raimunda Lopes Feitoza, pelo carinho, pelas orações e pela sabedoria que sempre iluminaram o meu caminho.

Ao meu orientador, Prof. Edvan Cordeiro, pela oportunidade, pela confiança depositada em meu trabalho e pela orientação segura. Agradeço não apenas pelos ensinamentos técnicos sobre metrologia e engenharia, mas também pela paciência e pelo incentivo à pesquisa.

Um agradecimento especial ao bolsista do FabLab, Pedro Epfanio, pelo suporte técnico fundamental e pela parceria durante o processo de impressão dos projetos.

A todos os docentes do curso, que contribuíram para a minha formação profissional e ética, e aos meus colegas e amigos Abraão Levi, Pedro Cesário, Mateus Miguel, Sthefani Pereira e Joabe Andrade, que tornaram essa jornada acadêmica mais leve e colaborativa.

Obrigado a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta história.

"Consagra ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos." (Provérbios 16:3)

RESUMO

O ensino de Metrologia e Avaliação Dimensional, quando pautado predominantemente no modelo tradicional de aulas expositivas, enfrenta o desafio em transmitir normas técnicas e conceitos estatísticos abstratos em competências práticas tangíveis. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar uma metodologia de ensino ativa, integrando a Aprendizagem Baseada em Problemas (*Project-Based Learning* - PBL) e a Manufatura Aditiva como ferramentas didático-experimentais. A proposta metodológica consistiu na aplicação de um ciclo de atividades práticas onde os discentes realizaram a manufatura aditiva e a validação metrológica rigorosa de projetos de engenharia pré-selecionados, como mecanismos biela-manivela, roda de genebra, garfo escocês, engrenagem planetária e rotativo em linear. As intervenções abordaram a aplicação prática de conteúdos fundamentais, incluindo erros aleatórios, tendência, correção, repetitividade, cálculo de incerteza padrão e combinada, medidas indiretas, controle de qualidade e o sistema de tolerâncias e ajustes (ISO 286). Os resultados obtidos demonstraram que a materialização dos projetos atuou como um facilitador cognitivo determinante: 89,50% dos participantes afirmaram que o contato com as peças físicas tornou o conteúdo mais compreensível em comparação ao ensino expositivo. A eficácia da proposta foi corroborada não apenas pelos dados estatísticos, mas também por relatos voluntários dos discentes ao final do ciclo, confirmando que a metodologia permitiu concretizar o aprendizado teórico de forma superior aos métodos tradicionais. A aprovação da proposta foi ratificada por 100% dos alunos, que recomendaram sua continuidade, evidenciando que a integração entre fabricação e medição promove uma formação sistêmica e engajadora.

Palavras-chave: ensino de engenharia; metrologia; manufatura aditiva; PBL; impressão 3D.

ABSTRACT

The teaching of Metrology and Dimensional Evaluation, when predominantly based on the traditional model of expository classes, faces the challenge of translating technical standards and abstract statistical concepts into tangible practical competencies. Given this scenario, this work aimed to develop and validate an active teaching methodology, integrating Project-Based Learning (PBL) and Additive Manufacturing as didactic-experimental tools. The methodological proposal consisted of applying a cycle of practical activities where students performed the additive manufacturing and rigorous metrological validation of pre-selected engineering projects, such as slider-crank and Geneva drive mechanisms. The interventions addressed the practical application of fundamental contents, including random and systematic errors, correction and repeatability, calculation of standard and combined uncertainty, indirect measurements, quality control, and the system of limits and fits (ISO 286). The results obtained demonstrated that the materialization of projects acted as a determining cognitive facilitator: 91.7% of participants stated that contact with physical parts made the content more understandable. The effectiveness of the proposal was corroborated not only by statistical data but also by voluntary reports from students at the end of the cycle, confirming that the methodology allowed for the concretization of theoretical learning in a way superior to traditional methods. The approval of the proposal was ratified by 100% of the students, who recommended its continuity, evidencing that the integration between manufacturing and measurement promotes a systemic and engaging education.

Keywords: engineering education. dimensional metrology. additive manufacturing. PBL. measurement uncertainty.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de medida primitivas baseadas no corpo humano.....	25
Figura 2 – Exemplos de instrumentos utilizados na metrologia moderna.....	27
Figura 3 – Resultados dos disparos dos canhões avaliados.....	28
Figura 4 – Resultados dos disparos dos canhões avaliados.....	33
Figura 5 – Representação das zonas de rejeição, dúvida e aceitação.....	37
Figura 6 – Esquemática das zonas de tolerância em um sistema furo-eixo.....	38
Figura 7 – Esquemática para ajuste com folga, ajuste incerto e ajuste com interferência..	39
Figura 8 – Diferenças conceituais entre a remoção de material (MS) e a (MA).....	44
Figura 9 – Esquema de funcionamento juntamente com os componentes do processo de Estereolitografia (SLA).....	46
Figura 10 – Esquema de funcionamento do processo de impressão 3D por extrusão (FDM).	47
Figura 11 – Etapas da impressão 3D.....	50
Figura 12 – Exemplo de impressora FDM cartesiana.....	50
Figura 13 – Exemplo de impressora FDM Core XY.....	51
Figura 14 – Exemplo de impressora FDM do tipo delta.....	52
Figura 15 – Comparativo entre os sistemas de extrusão Bowden e Direct Drive.....	52
Figura 16 – Materiais usados na impressão 3D.....	53
Figura 17 – Comparativo de qualidade de impressão entre filamento úmido e seco	54
Figura 18 – Propriedade e desempenho do PLA, ABS e PETG.....	55
Figura 19 – Influência da altura de camada na qualidade superficial e no tempo de impressão	57
Figura 20 – Representação visual de diferentes densidades de preenchimento na impressão 3D	58
Figura 21 – Padrões de preenchimento no Ultimaker Cura.....	59
Figura 22 – Gráfico da influência da velocidade de impressão (mm/s) na qualidade superficial da peça.....	60
Figura 23 - Efeito da orientação na qualidade superficial e na precisão dimensional.....	63
Figura 24 - Aplicações do paquímetro analógico.....	66
Figura 25 - Componentes do micrômetro externo.....	67

Figura 26 - Balança digital de precisão.....	68
Figura 27 - Fluxograma do procedimento metodológico.....	70
Figura 28 – Vista interna do Laboratório de Informática utilizado para as aulas de modelagem CAD.....	72
Figura 29 – Infraestrutura do Laboratório do LACID com as impressoras 3D.....	73
Figura 30 – Bancadas do Laboratório de Física onde foram realizadas as práticas de metrologia.....	74
Figura 31 – Impressora 3D Creality Ender-3 S1 PRO utilizada na manufatura das peças.....	76
Figura 32 – Impressora 3D Creality Ender-3 VE KE utilizada na manufatura das peças.....	77
Figura 33 – Filamento utilizado na manufatura das peças.....	78
Figura 34 – Instrumentos de medição utilizados para a coleta de dados.....	79
Figura 35 – Protótipos de validação dos projetos mecânicos utilizados para verificação funcional.....	80
Figura 36 – Fluxograma da didática deste trabalho.....	81
Figura 37 – Fluxograma de desenvolvimento de um projeto de engenharia.....	81
Figura 38 – Peças impressas 3D apresentadas na aula.....	82
Figura 39 – Chaveiros personalizados no Solid Edge.....	83
Figura 40 – Acoplamentos utilizados na prática.....	89
Figura 41 – Sistema de ajuste furo-base impresso na impressora 3D e com as indicações coladas na peça.....	90
Figura 42 – Sistema de ajuste eixo-base impresso na impressora 3D e com as indicações coladas na peça.....	90
Figura 43 – Contato inicial dos alunos com exemplos de peças impressas em 3D.....	93
Figura 44 – Instrutor auxiliando alunos durante a modelagem no laboratório de informática	94
Figura 45 – Discente efetuando o comando de play na impressora 3D.....	95
Figura 46 – Alunos analisando os protótipos impressos previamente pelo autor e discutindo o funcionamento.....	96
Figura 47 – Cronograma de impressão dos projetos.....	97
Figura 48 – (a) Impressoras em funcionamento; (b) Peça finalizada.....	98
Figura 49 – Discentes realizando as medições.....	99

Figura 50 – Instrutor auxiliando os discentes.....	100
Figura 51 – Discente realizando as medições corretas.....	101
Figura 52 – Registro do discente nas redes sociais.....	102
Figura 53 – Discentes com dificuldades.....	103
Figura 54 – Intervenção do professor regente da disciplina.....	105
Figura 55 – Discentes realizando as medições.....	106
Figura 56 – Gráfico referente à Questão 1.....	107
Figura 57 – Gráfico referente à Questão 2.....	108
Figura 58 – Gráfico referente à Questão 3.....	109
Figura 59 – Gráfico referente à Questão 4.....	110
Figura 60 – Gráfico referente à Questão 5.....	111
Figura 61 – Gráfico referente à Questão 6.....	112
Figura 62 – Gráfico referente à Questão 7.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tolerâncias dimensionais.....	40
Tabela 2 - Temperatura de extrusão recomendada para PLA, PETG e ABS.....	61
Tabela 3 - Temperatura da mesa de impressão recomendada para PLA, PETG e ABS.....	62
Tabela 4 – Principais parâmetro de impressão.....	85
Tabela 5 – Parâmetro de velocidade de impressão.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Computer Aided Design
FDM	Fused Deposition Modeling
G-CODE	Código G
ISO	International Organization for Standardization
MA	Manufatura Aditiva
mm	Milímetro
NBR	Norma Brasileira
PBL	Problem-Based Learning
PETG	Tereftalato de Polietileno Glicol
PLA	Ácido Poli Láctico
SI	Sistema Internacional de unidades
SLA	Estereolitografia
STL	Standard Triangulation Language, Linguagem de Triangulação Padrão
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivos Geral</i>	18
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL): Conceitos e Características	20
<i>2.1.1</i>	<i>Importância pedagógica da PBL no ensino das engenharias</i>	21
<i>2.1.2</i>	<i>Métodos tradicionais de ensino comparados ao PBL</i>	23
2.2	Fundamentos da metrologia	24
<i>2.2.1</i>	<i>Contexto histórico da metrologia</i>	24
<i>2.2.2</i>	<i>Erros de medição</i>	28
<i>2.2.3</i>	<i>Erro sistemático</i>	29
<i>2.2.3.1</i>	<i>Tendência e correção</i>	29
<i>2.2.4</i>	<i>Erro aleatório</i>	30
<i>2.2.4.1</i>	<i>Incerteza-padrão e Repetitividade</i>	31
<i>2.2.5</i>	<i>Curva de erros</i>	33
<i>2.2.6</i>	<i>Medidas diretas e indiretas</i>	34
<i>2.2.7</i>	<i>Controle de qualidade</i>	35
<i>2.2.8</i>	<i>Tolerância e ajustes de furos</i>	38
<i>2.2.9</i>	<i>Aplicações da Metrologia</i>	43
2.3	Manufatura aditiva	44
<i>2.3.1</i>	<i>Tipos de manufatura aditiva</i>	45
<i>2.3.2</i>	<i>Modelagem por Deposição Fundida (FDM)</i>	47
<i>2.3.2.1</i>	<i>Tipos de impressoras FDM</i>	50
<i>2.3.2.2</i>	<i>Materiais de impressão FDM</i>	53
<i>2.3.2.3</i>	<i>Vantagens e desvantagens do processo FDM</i>	55
<i>2.3.3</i>	<i>Principais parâmetros de impressão na manufatura aditiva por FDM</i>	56
<i>2.3.3.1</i>	<i>Altura de camada</i>	57

2.3.3.2	<i>Densidade e tipos de preenchimento</i>	58
2.3.3.3	<i>Velocidade de impressão</i>	59
2.3.3.4	<i>Temperatura do bico de impressão</i>	60
2.3.3.5	<i>Temperatura da mesa de impressão</i>	61
2.3.3.6	<i>Orientação de impressão</i>	62
2.3.4	<i>Precisão dimensional na manufatura aditiva</i>	63
2.4	Instrumentos de medição	64
2.4.1	<i>Paquímetro analógico</i>	64
2.4.2	<i>Micrômetro</i>	66
2.4.3	<i>Balança de precisão digital</i>	68
3	MATERIAIS E METODOLOGIA	70
3.1	Classificação da Pesquisa	70
3.2	Ambiente de Execução	71
3.3	Participantes da Pesquisa	74
3.4	Materiais e Equipamentos	75
3.4.1	<i>Recursos de Hardware e Software</i>	75
3.4.2	<i>Equipamentos de Manufatura</i>	75
3.4.3	<i>Instrumentos Metrológicos</i>	78
3.4.4	<i>Caracterização dos Projetos Mecânicos</i>	79
3.5	Procedimentos Metodológicos	80
3.5.1	<i>Primeira Aula: Introdução ao Projeto e ao Ciclo de Engenharia</i>	81
3.5.2	<i>Segunda Aula: Prática de Modelagem CAD e Introdução à Manufatura</i>	82
3.5.3	<i>Terceira Aula: Distribuição e Análise dos Projetos Mecânicos</i>	83
3.5.4	<i>Etapa de Manufatura: Impressão dos Projetos pelas Equipes</i>	84
3.5.5	<i>Quarta Aula: Prática de Erros Aleatórios</i>	86
3.5.6	<i>Quinta Aula: Prática de Medidas Indiretas e Controle de Qualidade</i>	87
3.5.7	<i>Sexta Aula: Tolerâncias, Ajustes e Intercambiabilidade</i>	88
3.5.8	<i>Etapa Final: Seminário de Apresentação e Avaliação dos Projetos</i>	91
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	92

4.1	Análise Qualitativa das Intervenções Didáticas (Visão do Pesquisador)	92
4.2.1	<i>Introdução e Modelagem Digital</i>	92
4.2.2	<i>Preparação, Logística de Manufatura e Adequação ao Calendário Acadêmico</i>	95
4.2.3	<i>Primeira Prática: Desafios Operacionais e Confronto Instrumental</i>	98
4.2.4	<i>Segunda e Terceira Prática: Desafios Teóricos (Aula 5):</i>	102
4.2.5	<i>Quarta Prática: Intercambiabilidade (Aula 6):</i>	104
4.3	Avaliação da Metodologia de Ensino (Visão dos Participantes)	106
4.3.1	<i>Análise da Percepção Discente</i>	107
4.3.2	<i>Análise Qualitativa: Relatos Espontâneos e Validação da Aprendizagem</i>	114
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	116
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	118
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE A – ROTEIROS DA PRIMEIRA PRÁTICA	127
	APÊNDICE B – ROTEIROS DA SEGUNDA PRÁTICA	153
	APÊNDICE C – ROTEIROS DA TERCEIRA PRÁTICA	159
	APÊNDICE D – ROTEIROS DA QUARTA PRÁTICA	169

1 INTRODUÇÃO

A metrologia desempenha um papel fundamental na formação de profissionais da engenharia, uma vez que assegura a confiabilidade das medições, a padronização dos processos industriais e a qualidade dos produtos fabricados. Como ciência que trata das medições e das incertezas associadas, constitui elemento estruturante para a correta interpretação dimensional e para o desenvolvimento de habilidades técnicas essenciais ao exercício profissional. Nesse contexto, compreender os princípios metrológicos e sua aplicação prática é indispensável para acompanhar a evolução tecnológica e atender às exigências de setores produtivos cada vez mais competitivos (Silva *et al.*, 2021).

No ambiente acadêmico, entretanto, a disciplina de metrologia e avaliação dimensional frequentemente se apresenta como um desafio aos estudantes, tanto pela complexidade dos conceitos quanto pela dificuldade de visualizar e relacionar medidas, tolerâncias e desvios geométricos com situações reais de produção. Em cursos de engenharia, essa lacuna pode comprometer o desenvolvimento de competências práticas necessárias à formação profissional, reforçando a necessidade de metodologias que aproximem teoria e prática de forma dinâmica e significativa.

Aliada a esse cenário, a manufatura aditiva tem assumido papel crescente em instituições de ensino e ambientes industriais, permitindo a produção rápida, precisa e de baixo custo de protótipos e componentes tridimensionais. Essa tecnologia favorece a criação de modelos físicos capazes de auxiliar a compreensão geométrica e dimensional, tornando-se um recurso valioso para práticas didático-experimentais (Araújo, 2022). Sua aplicação no ensino de metrologia oferece a oportunidade de integrar conceitos teóricos com experiências concretas de medição, contribuindo para o desenvolvimento de competências operacionais e reflexivas (Brito e Lima, 2023).

Paralelamente, metodologias ativas de ensino, como a Aprendizagem Baseada em Problemas (*Problem-Based Learning* – PBL), vêm se consolidando como alternativas eficazes para potencializar o engajamento estudantil, estimular o raciocínio crítico e promover a autonomia na construção do conhecimento (Lim, 2023). Partindo desse ponto, ao colocar o estudante no centro do processo educativo, o PBL favorece a solução de problemas reais ou simulados e incentiva o aprendizado contextualizado, aspectos especialmente relevantes em áreas que exigem aplicação prática dos conceitos, como é o caso da metrologia.

A escolha desta temática também se justifica por uma motivação pessoal do autor, que observou que durante a formação acadêmica, dificuldades relacionadas à visualização de

medidas e interpretação dimensional tornaram mais complexa a compreensão dos conteúdos da disciplina de metrologia. A experiência prática demonstrou que a ausência de modelos físicos e de atividades aplicadas dificultava a assimilação dos conceitos, o que reforça a importância de estratégias pedagógicas que integrem teoria, experimentação e ferramentas tecnológicas. Assim, investigar uma abordagem capaz de suprir essas lacunas representa não apenas uma contribuição acadêmica, mas também a busca por alternativas que possam facilitar a aprendizagem de futuros estudantes enfrentando dificuldades semelhantes.

1.1 Objetivos

Os objetivos serão divididos em objetivo geral e objetivos específicos para um melhor entendimento do trabalho.

1.1.1 *Objetivos Geral*

Aplicar e avaliar o impacto da Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL) na disciplina de Metrologia e Avaliação Dimensional para alunos de engenharia, utilizando a manufatura aditiva como ferramenta didático-experimental para fabricação de protótipos utilizados em práticas de medição.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos necessários para o cumprimento das etapas que conduzem ao alcance do objetivo geral são:

- Implementar a metodologia de Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL) na disciplina de metrologia e avaliação dimensional;
- Selecionar e fabricar protótipos tridimensionais utilizando impressoras 3D para apoio às atividades práticas de medição;
- Aplicar atividades práticas de medição utilizando os protótipos produzidos;

- Investigar a influência dos protótipos fabricados na compreensão dimensional dos estudantes;
- Analisar a percepção dos alunos quanto à utilização da manufatura aditiva como ferramenta didático-experimental;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL): Conceitos e Características.

A Aprendizagem Baseada em Problemas (Problem-Based Learning – PBL) constitui uma metodologia ativa centrada no estudante, estruturada a partir da resolução de problemas reais ou simulados como eixo organizador do processo de ensino-aprendizagem (Vieira, Neta e Souza *et al.*, 2021). Diferentemente dos métodos tradicionais, que se fundamentam na transmissão direta de conteúdos, o PBL propõe que o estudante assuma o protagonismo da construção do conhecimento, desenvolvendo habilidades investigativas, colaborativas e reflexivas ao longo do percurso formativo (Vanin, Takeda e Lourenço *et al.*, 2024).

O conceito de PBL teve origem na década de 1960, principalmente na área da Medicina, quando a McMaster University, no Canadá, introduziu esta abordagem com o intuito de superar limitações do ensino expositivo, considerado pouco efetivo para a formação de profissionais capazes de tomar decisões complexas. Desde então, seu uso expandiu-se para diversas áreas, incluindo a engenharia, onde se mostrou altamente aplicável devido à natureza prática, interdisciplinar e orientada à resolução de problemas característicos da área tecnológica (Santos *et al.*, 2014).

A essência do PBL reside em apresentar ao estudante uma situação-problema que, embora cuidadosamente planejada, possui múltiplas dimensões conceituais, operacionais e práticas. O problema atua como estímulo para que os alunos identifiquem lacunas de conhecimento, investiguem fontes confiáveis, proponham hipóteses e desenvolvam soluções fundamentadas. Dessa forma, o conhecimento não é recebido de forma passiva, mas construído de modo ativo e contextualizado (Vanin, Takeda e Lourenço, 2024).

Entre suas características centrais, destaca-se a aprendizagem colaborativa, que ocorre a partir do trabalho em pequenos grupos. Essa organização favorece a negociação de ideias, a complementaridade de percepções e a tomada de decisões compartilhadas, aproximando o ambiente educacional de dinâmicas presentes em equipes profissionais. Além disso, o tutor ou instrutor assume o papel de facilitador, conduzindo o grupo por meio de questionamentos estratégicos, porém sem fornecer respostas prontas, estimulando assim o desenvolvimento da autonomia (Silveira *et al.*, 2021).

Os autores complementam que outra característica essencial do PBL é o incentivo à aprendizagem autorregulada. Ao serem expostos a um problema que não possui solução imediata, os estudantes são instigados a planejar suas ações, buscar referências, testar hipóteses e avaliar criticamente seu progresso. Esse processo fortalece competências cognitivas superiores, como pensamento crítico, capacidade analítica e raciocínio lógico, que se tornam fundamentais na resolução de situações complexas no ambiente profissional (Silveira *et al.*, 2021).

2.1.1 Importância pedagógica da PBL no ensino das engenharias.

A importância do PBL no contexto educacional contemporâneo relaciona-se à necessidade de formar indivíduos capazes de lidar com desafios imprevisíveis, adaptação constante e tomada de decisão fundamentada (Souza e Schimiguel, 2014). Em cursos de engenharia, a exigência por profissionais que compreendam sistemas, projetem soluções técnicas e avaliem riscos reforça a relevância de práticas pedagógicas que integrem conhecimento teórico e vivência prática. Assim, o PBL emerge como ferramenta que aproxima o estudante da realidade dos processos industriais e tecnológicos (Silva *et al.*, 2018).

Nos últimos anos, pesquisas têm demonstrado que o PBL contribui significativamente para o aumento do engajamento estudantil. A conexão entre teoria e aplicação prática desperta maior senso de utilidade no conteúdo aprendido, reduzindo a percepção de distanciamento entre as aulas e a atuação profissional. O envolvimento emocional e cognitivo com problemas reais intensifica a motivação intrínseca, tornando o aprendizado mais significativo e duradouro (Santos, Xavier e Silva, 2024).

A relevância do PBL na engenharia é ainda mais destacada quando se observa a necessidade crescente de profissionais capazes de integrar conhecimentos de diferentes áreas, operar ferramentas tecnológicas e compreender processos produtivos complexos. A engenharia, por natureza, envolve a identificação e resolução de problemas, o que torna o PBL especialmente apropriado como abordagem formativa. Esse alinhamento fortalece a transição entre o ambiente acadêmico e o mercado de trabalho (Furtado, Nascimento e Silva, 2018).

A aplicação do PBL em cursos de engenharia também favorece o desenvolvimento de competências técnicas, como interpretação de desenhos, modelagem tridimensional, análise de tolerâncias e verificação de conformidade, especialmente quando associada ao uso de tecnologias digitais ou laboratoriais. O contato direto com problemas reais permite que os estudantes compreendam a lógica dos processos produtivos, a interdependência entre as etapas e a relevância da precisão nas tomadas de decisão (Furtado, Nascimento e Silva, 2018).

De acordo com Noga (2021), a integração entre PBL e atividades experimentais, como a manufatura aditiva ou práticas de metrologia, potencializa o aprendizado ao promover vivências tangíveis e contextualizadas. A manipulação de objetos reais e o contato com instrumentos, softwares e equipamentos laboratoriais tornam o aprendizado mais concreto e reforçam o vínculo entre teoria e prática. Esse tipo de abordagem atende também estudantes com estilos de aprendizagem visual, espacial e cinestésica.

Além disso, o PBL contribui para a formação de engenheiros mais independentes intelectualmente. Ao serem expostos a desafios progressivos, os alunos desenvolvem resiliência cognitiva, capacidade de lidar com incertezas e habilidade para priorizar informações relevantes em meio a um grande volume de dados. Essas competências são fundamentais em ambientes industriais baseados na inovação, onde a resolução rápida e eficaz de problemas é diferencial competitivo (Noga, 2021).

Conforme destaca BorochoVICIUS e Tassoni (2021), o PBL também fortalece o trabalho em equipe, competência essencial no universo da engenharia. Projetos complexos raramente são desenvolvidos de forma individual, e o PBL, ao utilizar grupos colaborativos, simula dinâmicas reais de empresas e indústrias. A necessidade de comunicar ideias, negociar soluções e lidar com divergências torna-se parte intrínseca do aprendizado.

Os autores complementam que o PBL também estimula a integração entre teoria e prática por meio de projetos que exigem aplicação direta dos conteúdos aprendidos. Em cursos de engenharia, isso pode incluir análises de mecanismos, modelagem CAD, simulações computacionais, medições experimentais e avaliações de desempenho. Dessa forma, os conteúdos deixam de ser tratados de forma abstrata e passam a compor etapas concretas de um ciclo de engenharia, reforçando a compreensão sistêmica (BorochoVICIUS e Tassoni, 2021).

Além disso, o PBL oferece oportunidades para avaliação formativa, permitindo que o tutor acompanhe não apenas o resultado final, mas também o processo de construção do conhecimento. Esse tipo de acompanhamento reduz a distância entre professor e estudante e

permite identificar dificuldades específicas que, no método tradicional, poderiam passar despercebidas (Noga, 2021).

O uso do PBL também favorece a interdisciplinaridade, uma vez que problemas reais raramente se limitam a apenas um campo do conhecimento. Na engenharia, isso se expressa na articulação entre desenho técnico, física, materiais, processos de fabricação e metrologia. Essa integração permite uma compreensão mais profunda e articulada das relações entre teoria e aplicação (BorochoVICIUS e Tassoni, 2021)

Outro ponto relevante é que o PBL contribui para o desenvolvimento da criatividade, estimulando a proposição de soluções originais e inovadoras. Ao confrontar problemas sem solução única, os estudantes são incentivados a explorar alternativas, justificar suas escolhas e propor melhorias. Esse cenário favorece o pensamento divergente, altamente valorizado em ambientes industriais (BorochoVICIUS e Tassoni, 2021)

Para Furtado, Nascimento e Silva (2018), a consolidação do PBL como estratégia educacional no ensino de engenharia reforça a necessidade de métodos que acompanhem a evolução tecnológica e o dinamismo do setor produtivo. A resolução de problemas, quando integrada a tecnologias como a manufatura aditiva e a metrologia dimensional, consolida-se como uma abordagem eficaz para desenvolver competências essenciais ao futuro engenheiro, oferecendo um aprendizado profundo, contextualizado e alinhado às demandas reais da profissão.

2.1.2 Métodos tradicionais de ensino comparados ao PBL.

Comparado ao modelo de ensino tradicional, baseado predominantemente na exposição oral e na memorização de conteúdos, o PBL mostra-se mais eficiente para promover habilidades socioemocionais e competências transversais valorizadas no mercado de trabalho. Enquanto o modelo tradicional frequentemente posiciona o aluno como receptor de informações, o PBL demanda participação ativa, interpretação de dados, integração de múltiplos conhecimentos e desenvolvimento de soluções viáveis. Assim, a aprendizagem deixa de ser linear e passa a ser investigativa e aplicada (Borges *et al.*, 2022).

No método tradicional, os conteúdos são apresentados de forma fragmentada e dissociada de contextos reais, o que pode resultar na dificuldade de transferência dos conhecimentos para situações práticas. Em contraste, o PBL utiliza problemas contextualizados que demandam raciocínio interdisciplinar, permitindo que os alunos

compreendam a utilidade do que aprendem e desenvolvam uma visão sistêmica dos fenômenos. Isso contribui para uma formação mais holística e coerente com as demandas contemporâneas (Santos, Xavier e Silva, 2024).

Para Monaro *et al.* (2018), outra diferença importante entre os dois métodos refere-se ao papel institucional do erro. No ensino expositivo, situações de erro tendem a ser minimizadas ou tratadas como falhas individuais. No PBL, o erro é entendido como parte do processo investigativo e como oportunidade de revisão de premissas e estratégias. Isso cria um ambiente de aprendizagem mais saudável e realista, alinhado com práticas industriais e científicas, onde testar, errar e corrigir são elementos inerentes à inovação.

2.2 Fundamentos da metrologia

A etimologia da palavra metrologia está nos termos gregos “*metron*”, que significa medida, e “*lógos*”, associado ao conhecimento ou estudo sistemático, indicando desde sua concepção uma relação direta com a compreensão científica da mensuração. Nesse sentido, a metrologia é amplamente reconhecida como a ciência dedicada ao estudo das medições, englobando tanto os fundamentos teóricos quanto os procedimentos práticos envolvidos na obtenção de valores mensuráveis. Sua definição contempla todos os aspectos relacionados à determinação de grandezas físicas, independentemente do nível de incerteza associado ou da área de aplicação, configurando-se como disciplina essencial para o avanço da ciência, da tecnologia e dos processos industriais (Schirigatti, 2023).

2.2.1 Contexto histórico da metrologia

Embora hoje seja reconhecida como uma área altamente estruturada, com base teórica e rigor técnico, a história da metrologia remonta às primeiras civilizações. Registros indicam que os egípcios, por volta de 3000 a.C., desenvolveram padrões de medida como o côvado real, utilizado na construção das pirâmides. Nesse período inicial, as unidades de medida eram frequentemente baseadas em dimensões corporais, como o palmo, pé ou polegar (Figura 1), o que atendia a necessidades locais, mas mostrava-se inadequado para relações comerciais mais amplas (Sarmiento, 2019). Na Grécia Antiga, filósofos como Aristóteles (384–322 a.C.) já discutiam princípios de proporção, grandezas e mensuração. À medida que

diferentes povos passaram a interagir de forma mais intensa, a falta de padronização das medições tornou-se um obstáculo crescente, dificultando transações, negociações e o intercâmbio de bens entre regiões distintas (Moraes, 2019).

Figura 1 – Exemplos de medida primitivas baseadas no corpo humano.



Fonte: Borges (1991).

Com o avanço das atividades econômicas e o surgimento de demandas mais complexas, especialmente em decorrência do desenvolvimento tecnológico, tornou-se evidente a necessidade de um sistema unificado de medidas. O desenvolvimento moderno da metrologia, entretanto, ganha impulso a partir do século XVIII, especialmente com a criação do Sistema Métrico Decimal durante a Revolução Francesa, em 1795, com figuras como Antoine-Laurent Lavoisier e Jean-Charles de Borda participando das comissões que definiram padrões universais de medida. Em 1875, o Tratado do Metro (Convention du Mètre) formalizou a cooperação internacional, criando o Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), instituição fundamental para a padronização global das medições. Os esforços conduzidos por importantes estudiosos contribuíram para estabelecer fundamentos conceituais e experimentais que orientaram a padronização metrológica moderna, culminando na criação de um sistema global de unidades capaz de atender às crescentes exigências da ciência, da indústria e do comércio (Brandi, 2017).

A consolidação de padrões internacionais permitiu transformar a medição em uma linguagem científica comum, essencial para o desenvolvimento tecnológico e para a confiabilidade das atividades produtivas. A ideia de que o conhecimento sobre determinado fenômeno só se torna pleno quando expresso numericamente reflete a importância da quantificação como base para a compreensão objetiva da realidade. Medir torna-se, portanto, uma forma de traduzir propriedades físicas em valores comparáveis, assegurando precisão, repetibilidade e coerência nas diversas áreas do conhecimento humano (Schirigatti, 2023).

Com a evolução científico-tecnológica do século XX, a metrologia se consolidou como um campo abrangendo desde a definição de unidades fundamentais até a avaliação de incertezas, garantindo confiabilidade e comparabilidade dos resultados em diferentes áreas da ciência e da indústria. Assim, ela passou a englobar aspectos teóricos e práticos relacionados às medições, independentemente do nível de precisão exigido ou da área de aplicação (Moraes, 2019).

Para Brandi (2017), no contexto da metrologia moderna, diferentes elementos compõem o processo de medição. A grandeza a ser quantificada, denominada mensurando, constitui o objeto central dessa operação. Para determiná-la, utiliza-se um instrumento ou sistema de medição, responsável por fornecer a indicação — o valor numérico resultante. A interação entre esses elementos estabelece a estrutura fundamental da prática metrológica e orienta o desenvolvimento de instrumentos cada vez mais precisos e confiáveis (Figura 2).

Figura 2 – Exemplos de instrumentos utilizados na metrologia moderna para obtenção de valores mensuráveis.



Fonte: Manutenção NA (2025).

A importância da metrologia na sociedade contemporânea é imensa, uma vez que as medições permeiam praticamente todas as atividades humanas. Processos industriais, sistemas de produção, inspeções de qualidade, práticas comerciais, pesquisas científicas, serviços de saúde e monitoramento ambiental dependem diretamente de medições adequadas e rastreáveis. Além disso, a economia global é fortemente influenciada pela confiabilidade dos processos metrológicos, dado que uma parcela significativa das atividades produtivas envolve procedimentos de medição. Assim, a metrologia não apenas sustenta a padronização e a qualidade dos produtos e serviços, mas também contribui para a segurança, a competitividade e o desenvolvimento socioeconômico de países industrializados e em desenvolvimento (Schirigatti, 2023).

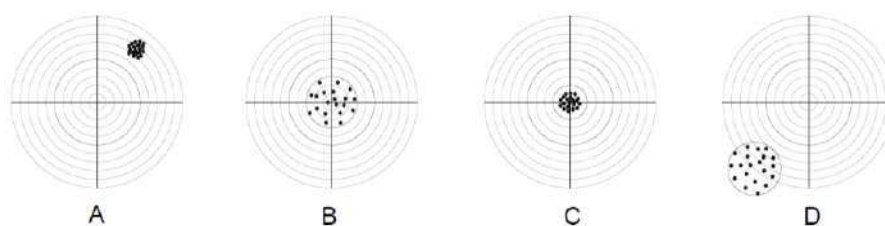
2.2.2 Erros de medição

De acordo com Rofatto, Matsuoka e Klein (2024), os erros de medição são impossíveis de serem evitados em qualquer processo metrológico e representam a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro ou convencionalmente verdadeiro de uma grandeza. Para os autores, só poderia haver uma medição sem erros, caso houvesse um sistema de medição perfeito, com um meio controlado e absolutamente estável, além de um operador perfeito e que a grandeza sob medição (mensurando) tivesse um valor único, perfeitamente definido e estável. No campo prático, é impossível ter essas variáveis ocorrendo simultaneamente, o que torna o erro uma variável presente em todo processo metrológico.

Os erros constituem uma das bases mais importantes para a confiabilidade dos resultados, pois é a partir da compreensão desses erros que se estabelecem métodos de controle, calibração e cálculo de incerteza. A literatura metrológica destaca três grandes categorias de erros: erros sistemáticos, erros aleatórios e erros grosseiros, cada qual associado a causas distintas e a impactos específicos sobre a qualidade da medição (Rofatto, Matsuoka e Klein, 2024).

No experimento feito por Albertazzi (2008), onde avaliou-se a qualidade de 4 canhões por meio do disparo de 20 projéteis em um alvo sob as mesmas condições (Figura 3), observou-se que os canhões A e D apresentaram um erro sistemático, onde os disparos do canhão A atingiram o alvo em uma região sempre acima e à direita do centro do alvo. Assim, não haveria dificuldade na previsão da posição aproximada do disparo de nº 21°. Os disparos do canhão D, por sua vez, se espalharam por uma grande área abaixo e à esquerda do centro do alvo, onde o erro sistemático está representado pela distância entre o centro da região de dispersão dos disparos e o centro do alvo. Vejamos:

Figura 3 – Resultados dos disparos dos canhões avaliados



Fonte: Albertazzi (2008, adaptado).

O canhão B, por sua vez, apresenta disparos em regiões relativamente aleatórias e em ambos os quadrantes, não sendo possível prever onde o 21º disparo atingiria. O canhão C demonstrou o melhor desempenho métrico, caracterizado por alta exatidão e alta precisão. A concentração dos impactos no centro do alvo evidencia um erro sistemático (viés) desprezível, enquanto a baixa dispersão dos disparos indica um erro aleatório reduzido (Albertazzi, 2008).

2.2.3 Erro sistemático

Os erros sistemáticos constituem um dos componentes mais relevantes da análise metrológica, pois representam desvios constantes ou previsíveis que afetam todas as medições de maneira semelhante. Esses erros não diminuem com a repetição e podem resultar tanto de imperfeições do instrumento quanto de condições ambientais ou procedimentos inadequados (Rofatto, Matsuoka e Klein, 2024).

Por apresentarem um padrão identificável, os erros sistemáticos são especialmente importantes no controle de qualidade, uma vez que podem deslocar todo o conjunto de medições em uma direção específica, gerando conclusões equivocadas quando não são detectados e corrigidos (Soratto e Brito, 2023).

2.2.3.1 Tendência e correção

Segundo Rofatto, Matsuoka e Klein (2024), a estimativa do erro sistemático de um sistema de medição pode ser realizada a partir da repetição de medições de um mesmo mensurando, desde que seu valor verdadeiro seja conhecido ou suficientemente bem aproximado. Conforme discutido por Albertazzi (2008), quando o valor exato do mensurando não é acessível, adota-se um valor de referência denominado valor verdadeiro convencional (VVC), o qual deve representar, com grau adequado de confiabilidade, o valor real da grandeza medida.

A realização de um número elevado de medições repetidas permite obter uma média das indicações do sistema de medição, tornando essa média uma estimativa mais representativa do comportamento do instrumento. A diferença entre essa média e o valor verdadeiro convencional caracteriza o erro sistemático do sistema, denominado tendência.

Dessa forma, a tendência expressa o desvio sistemático entre o valor indicado pelo instrumento e o valor de referência adotado para o mensurando, conforme equação 1 abaixo:

$$TT = I - VVV \quad (1)$$

Sendo:

TT Tendência

I Média de um número infinito de indicações

VVV Valor verdadeiro convencional do mensurando

Com base na determinação da tendência, é possível estabelecer a correção associada ao sistema de medição. A correção corresponde a uma constante que deve ser aplicada às indicações do instrumento com o objetivo de compensar o erro sistemático identificado. Assim, ao adicionar a correção ao valor indicado, obtém-se a indicação corrigida, reduzindo o efeito dos erros sistemáticos e aproximando o resultado da medição do valor verdadeiro convencional do mensurando. Assim, calcula-se a correção por meio da equação 2.

$$V = - TT = VVV - I \quad (2)$$

2.2.4 Erro aleatório

Os erros aleatórios constituem uma das categorias fundamentais dos desvios presentes no processo de medição e se caracterizam por sua natureza imprevisível e flutuante. Ao contrário dos erros sistemáticos, que apresentam comportamento constante e tendencioso, os erros aleatórios variam de forma irregular a cada repetição da medição, mesmo quando todas as condições aparentam ser idênticas. Essa variabilidade é consequência de pequenas perturbações inevitáveis que atuam sobre o sistema de medição, resultando em dispersões dos valores observados ao redor de um valor médio. Por esse motivo, os erros aleatórios influenciam diretamente a precisão das medições, uma vez que aumentam o grau de dispersão dos resultados e, por serem aleatórios, não há como prevê-los, tampouco, corrigi-los (Rofatto, Matsuoka e Klein, 2024).

Ainda com base no experimento de Albertazzi (2008), quando analisamos os disparos feitos pelo canhão B, onde há um grande espalhamento em todas as direções, porém,

a média das posições das marcas dos projéteis está muito próxima do centro do alvo, havendo disparos em ambos os quatro quadrantes. Desse modo, seria muito difícil prever em que posição o 21º disparo atingiria o alvo, podendo ser abaixo, acima, à direita ou à esquerda.

Os erros aleatórios são inevitáveis, mas podem ser parcialmente minimizados por boas práticas experimentais, incluindo o controle rigoroso do ambiente, a estabilização térmica de instrumentos e peças, a adoção de técnicas adequadas de manuseio e o uso de instrumentos com resolução compatível com o nível de precisão requerido. Entretanto, como não podem ser eliminados completamente, sua presença deve ser tratada por métodos estatísticos, o que confere ao estudo da incerteza de medição uma importância essencial. É justamente a variabilidade causada por esses erros que fundamenta o cálculo da incerteza padrão, elemento que expressa a qualidade quantitativa das medições realizadas (Rofatto, Matsuoka e Klein, 2024).

2.2.4.1 Incerteza-padrão e Repetitividade

A incerteza-padrão representa um dos parâmetros centrais na descrição da qualidade metrológica de um processo de medição, pois quantifica a intensidade da componente aleatória presente nos resultados. Ela corresponde ao desvio-padrão associado às flutuações inerentes às medições repetidas e expressa numericamente a dispersão dos valores que podem ser atribuídos ao mensurando. Como se trata de uma grandeza estimada a partir de um conjunto finito de dados experimentais, sua determinação exige a consideração dos graus de liberdade, que refletem a quantidade efetiva de informação disponível na amostra. Assim, quando a incerteza-padrão é calculada com base no desvio-padrão amostral, o número de graus de liberdade é dado pela diferença entre o número total de medições e a unidade, reforçando a ideia de que conjuntos maiores de dados geram estimativas mais confiáveis (Rofatto, Matsuoka e Klein, 2024).

No contexto das medições, a incerteza desempenha papel essencial por caracterizar a faixa de valores na qual o mensurando pode se situar com razoável nível de confiança. Trata-se, portanto, de um parâmetro associado ao resultado da medição que descreve a dispersão possível em torno do valor apresentado, sendo um indicador direto da qualidade e da credibilidade das medições (Gonçalves e Antoniassi, 2010). O valor do erro aleatório individual, isoladamente, apresenta pouca aplicabilidade prática justamente por sua

natureza imprevisível; o que realmente importa é a amplitude dentro da qual esse erro tende a ocorrer. Essa amplitude é denominada repetitividade e constitui uma informação crucial para estimar a incerteza global do processo, permitindo avaliar o comportamento estatístico da variabilidade inerente ao sistema de medição (Soratto e Brito, 2023).

A repetitividade pode ser compreendida como a faixa simétrica de valores dentro da qual o erro aleatório é esperado com determinada probabilidade estatística. Trata-se de uma medida que traduz de forma direta a estabilidade das medições quando realizadas sob condições rigorosamente controladas de instrumento, ambiente e operador. Quanto menor a variabilidade observada, maior a repetitividade e, conseqüentemente, menor será a incerteza associada ao resultado. A repetitividade, portanto, não apenas complementa a incerteza-padrão, mas também contribui para a interpretação do comportamento estatístico que fundamenta a estimativa do valor médio como aproximação do valor verdadeiro convencional (Rofatto, Matsuoka e Klein, 2024).

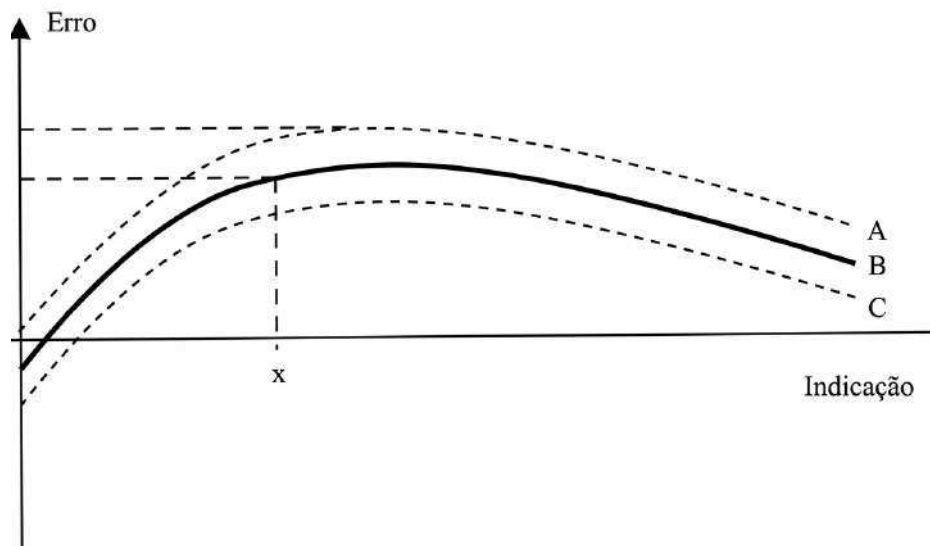
A qualidade da estimativa da incerteza-padrão depende fortemente da quantidade de medições realizadas. Amostras extensas oferecem maior representatividade estatística e reduzem a dispersão da estimativa, aumentando a confiabilidade dos resultados. Por outro lado, quando o número de medições é pequeno, a estimativa da incerteza torna-se menos robusta e mais sujeita a variações não representativas do processo real. Para corrigir essa limitação, utiliza-se um coeficiente de ajuste, comumente associado à distribuição t de Student, que amplia a incerteza estimada de modo proporcional ao grau de incerteza adicional decorrente do baixo número de dados. Assim, a repetitividade torna-se essencial para a determinação de um intervalo confiável, pois permite aplicar um fator de correção que adequa a estimativa da incerteza-padrão às limitações do conjunto de medidas disponível (Rofatto, Matsuoka e Klein, 2024).

Dessa forma, a relação entre incerteza-padrão e repetitividade revela-se fundamental para uma avaliação metrológica rigorosa. A primeira fornece a base estatística para quantificar a variabilidade, enquanto a segunda delimita o intervalo dentro do qual essa variabilidade tem maior probabilidade de se manifestar. Juntas, elas oferecem um panorama completo da dispersão dos resultados e sustentam a credibilidade das medições, sobretudo em contextos industriais e científicos que exigem precisão, rastreabilidade e confiabilidade dos processos de avaliação dimensional (Soratto e Brito, 2023; Rofatto, Matsuoka e Klein, 2024).

2.2.5 Curva de erros

A curva de erros é uma ferramenta gráfica utilizada para representar o comportamento dos desvios de medição ao longo de um intervalo específico (Figura 4). Ela permite visualizar como os erros se distribuem, identificar tendências e compreender se há padrões sistemáticos ou aleatórios afetando as medições (Rofatto, Matsuoka e Klein, 2024). Em geral, essa curva relaciona o valor medido e o erro observado, permitindo que o analista avalie a estabilidade do processo metrológico e a coerência dos resultados obtidos (Albertazzi, 2008).

Figura 4 – Resultados dos disparos dos canhões avaliados



Fonte: Albertazzi (2008, adaptado).

A construção da curva de erros envolve a coleta de múltiplas medições de um mesmo mensurando e o cálculo das diferenças entre os valores medidos e o valor de referência. A partir dessas diferenças, é possível plotar o erro em função da variável medida, evidenciando regiões em que o instrumento tende a subestimar ou superestimar os valores. Esse tipo de análise revela não apenas o comportamento da medição, mas também possíveis problemas com o instrumento ou com o operador (Rofatto, Matsuoka e Klein, 2024).

Muitos instrumentos apresentam erros sistemáticos que variam de forma linear ou não linear ao longo da faixa de medição, e a curva de erros é crucial para identificar esse

comportamento. Quando a curva revela uma tendência linear, por exemplo, é possível aplicar correções matemáticas ao instrumento, utilizando métodos de regressão para calcular fatores de compensação. Em casos mais complexos, em que a curva é irregular, pode ser necessário realizar calibrações mais profundas ou até substituir o equipamento (Schirigatti, 2023).

Segundo Albertazzi e Souza (2008), a curva de erros também desempenha papel importante na análise da incerteza. Ao compreender como os erros se distribuem, o avaliador pode estimar o grau de dispersão dos resultados e identificar se há flutuações que comprometem a repetitividade ou reprodutibilidade da medição. Esse entendimento é fundamental para assegurar que os resultados obtidos são confiáveis e que podem ser utilizados em processos industriais e científicos.

2.2.6 Medidas diretas e indiretas

As medições podem ser classificadas, quanto à forma de obtenção do resultado, em medidas diretas e medidas indiretas, sendo essa distinção fundamental para a compreensão dos processos metrológicos e para a correta interpretação dos resultados. Essa classificação influencia diretamente a análise de erros, a avaliação da incerteza e a confiabilidade das decisões tomadas a partir dos dados medidos (Schirigatti, 2023).

As medidas diretas são aquelas em que o valor do mensurando é obtido diretamente a partir da indicação de um instrumento de medição, sem a necessidade de cálculos intermediários. Exemplos típicos incluem a medição de comprimento com paquímetros e micrômetros, de massa com balanças e de temperatura com termômetros. Nesses casos, o resultado da medição está associado de forma imediata às características do instrumento, como resolução, exatidão e repetitividade, tornando mais evidente a identificação de erros sistemáticos e aleatórios por meio de ferramentas como a curva de erros (Schirigatti, 2023).

Por outro lado, as medidas indiretas são aquelas em que o valor do mensurando não é obtido diretamente, mas calculado a partir de outras grandezas medidas, por meio de uma relação funcional conhecida. Situações comuns envolvem o cálculo de área, volume, densidade ou velocidade, a partir de medições diretas de comprimento, massa e tempo. Nesse tipo de medição, os erros associados às grandezas de entrada propagam-se para o resultado final, tornando necessária a aplicação de métodos específicos de propagação de incerteza (Schirigatti, 2023).

A distinção entre medidas diretas e indiretas é particularmente relevante na análise metrológica, pois as medidas indiretas tendem a apresentar maior complexidade na avaliação da incerteza e na interpretação dos resultados. Pequenos desvios nas grandezas medidas diretamente podem resultar em variações significativas no valor calculado, especialmente quando a relação funcional é não linear. Dessa forma, a escolha adequada dos instrumentos e a correta modelagem matemática são essenciais para garantir a confiabilidade do resultado final (Schirigatti, 2023).

Nesse sentido, a compreensão das medidas diretas e indiretas complementa a análise da curva de erros, ao permitir identificar as fontes de desvio associadas tanto ao instrumento quanto ao modelo matemático empregado. Essa compreensão também fornece subsídios importantes para o controle de qualidade, uma vez que decisões sobre conformidade e aceitação de produtos dependem da confiabilidade das medições realizadas, sejam elas diretas ou indiretas (Schirigatti, 2023).

2.2.7 Controle de qualidade

O controle de qualidade está profundamente associado aos processos metrológicos, pois é por meio da medição que se obtém evidências objetivas sobre a conformidade de produtos ou serviços. Historicamente, o avanço da indústria, especialmente a partir da Revolução Industrial, consolidou a necessidade de padrões, instrumentos calibrados e métodos eficazes de inspeção, uma vez que a produção em larga escala exigia uniformidade e repetibilidade. Nesse contexto, a metrologia passou a ser um elemento essencial para a construção de sistemas robustos de qualidade, capazes de reduzir a variabilidade e garantir a satisfação dos requisitos especificados (Moraes *et al.*, 2019).

Do ponto de vista conceitual, o controle de qualidade consiste em um conjunto de atividades sistemáticas destinadas a monitorar, medir e ajustar processos, assegurando que o produto final atenda aos padrões estabelecidos. Essas atividades incluem inspeções dimensionais, verificações funcionais, calibrações periódicas, análise de erros e avaliação da incerteza de medição. A metrologia, portanto, fornece a base técnica para esses processos, promovendo confiabilidade nos resultados e permitindo intervenções precisas sempre que uma tendência de desvio é identificada (Schirigatti, 2023).

A estruturação do controle de qualidade depende fortemente da padronização metrológica. Normas como a ISO 9001, ISO/IEC 17025 e ISO 10360 direcionam o

estabelecimento de rotinas, critérios de aceitação e metodologias de verificação. Quando implementadas corretamente, essas normas não apenas garantem a qualidade das medições, mas também favorecem a rastreabilidade dos resultados até padrões internacionais. Sem essa rastreabilidade, qualquer processo de controle de qualidade fica comprometido, pois não há garantia de que o que está sendo medido está de fato sendo comparado a um valor confiável e universal (Silva *et al.*, 2021).

O papel do controle estatístico no controle de qualidade também é intimamente vinculado às práticas metrológicas. Ferramentas como cartas de controle, histogramas e análises de variância permitem identificar flutuações nos processos produtivos e distinguir entre variações comuns e causas especiais. Para que essas análises sejam válidas, as medições devem ser consistentes e realizadas com instrumentos adequados ao nível de precisão exigido. A ausência dessa consistência leva a interpretações equivocadas, tomando decisões baseadas em dados distorcidos ou ruidosos (Ribeiro e Caten, 2012).

Para Schirigatti (2023), o controle de qualidade possibilita ganhos significativos na produtividade industrial, reduzindo desperdícios, retrabalhos e reclamações. Empresas que investem em sistemas metrológicos eficientes apresentam processos mais estáveis e produtos mais previsíveis, fortalecimento da competitividade e atendimento às exigências do mercado globalizado. Assim, o controle de qualidade e a metrologia são áreas inseparáveis, pois a confiabilidade do processo de produção depende diretamente da confiabilidade das medições realizadas ao longo dele.

No âmbito do controle de qualidade, a tomada de decisão acerca da conformidade de um produto ou processo está diretamente associada à definição de zonas de aceitação, dúvida e rejeição (Figura 5). Essas zonas são estabelecidas a partir dos limites de tolerância especificados e da incerteza associada ao processo de medição. A correta delimitação dessas regiões é fundamental para assegurar decisões confiáveis, evitando tanto a aceitação de itens não conformes quanto a rejeição indevida de produtos que atendem aos requisitos técnicos (Ribeiro e Caten, 2012).

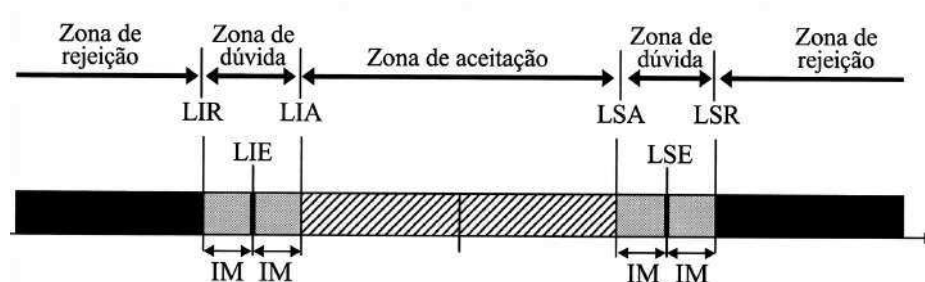
A zona de aceitação corresponde ao intervalo em que os resultados de medição se encontram claramente dentro dos limites de tolerância, considerando a incerteza de medição. Nessa região, há elevada confiança de que o item avaliado está conforme as especificações, permitindo sua liberação sem necessidade de análises adicionais. A confiabilidade dessa decisão depende diretamente da qualidade do sistema de medição, da rastreabilidade metrológica e do controle adequado das fontes de erro envolvidas no processo (INMETRO, 2012).

Por sua vez, a zona de rejeição compreende os resultados que se posicionam além dos limites de tolerância, mesmo quando considerada a incerteza de medição. Nesses casos, a probabilidade de não conformidade é suficientemente alta para justificar a reprovação do item avaliado. A existência dessa zona é essencial para a proteção do cliente e do processo produtivo, garantindo que produtos fora de especificação não avancem para etapas posteriores ou para o mercado (INMETRO, 2012).

Entre essas duas regiões situa-se a zona de dúvida, também conhecida como intervalo de segurança. Nessa faixa, os resultados de medição se sobrepõem aos limites de tolerância quando a incerteza é considerada, dificultando uma decisão conclusiva de aceitação ou rejeição. A presença dessa zona evidencia a importância de sistemas metrológicos com incertezas reduzidas, bem como da adoção de critérios adicionais, como medições complementares, uso de instrumentos mais precisos ou aplicação de regras de decisão conforme normas internacionais (INMETRO, 2012).

A integração dos conceitos de zonas de aceitação, dúvida e rejeição ao controle de qualidade reforça a necessidade de uma abordagem metrológica rigorosa. Ao considerar explicitamente a incerteza de medição no processo decisório, as organizações tornam suas avaliações mais consistentes e alinhadas às boas práticas normativas, reduzindo riscos técnicos, econômicos e legais. Dessa forma, o controle de qualidade deixa de ser apenas uma verificação de conformidade e passa a ser um processo decisório fundamentado em dados confiáveis e estatisticamente sustentados (INMETRO, 2012).

Figura 5 – Representação das zonas de rejeição, dúvida e aceitação.



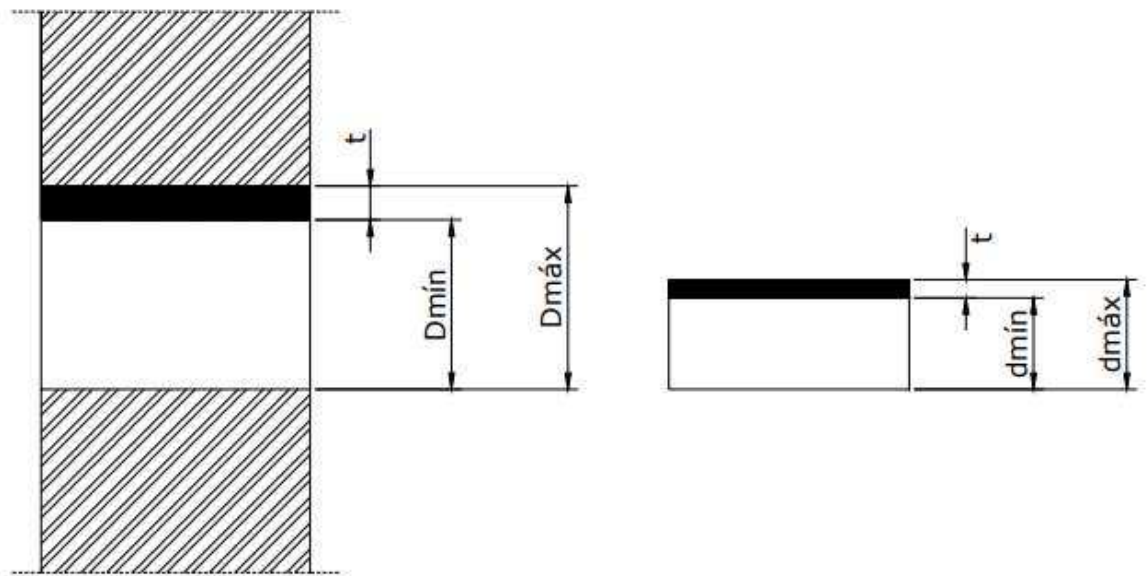
Fonte: INMETRO (2012, adaptado)

2.2.8 Tolerância e ajustes de furos

O estudo de tolerâncias e ajustes é um dos pilares da metrologia industrial, pois envolve a determinação das variações dimensionais aceitáveis para que peças mecânicas se encaixem e funcionem corretamente. No contexto da engenharia mecânica, os sistemas de tolerâncias e ajustes foram desenvolvidos para formalizar, de modo padronizado, a relação entre eixos e furos, reduzindo inconsistências na fabricação e facilitando a intercambiabilidade de componentes. O sistema ISO de tolerâncias, amplamente adotado, define classes e limites que orientam projetistas e fabricantes (Fanha, 2011).

As tolerâncias estabelecem limites dimensionais permitidos em uma peça, garantindo que ela cumpra sua função sem comprometer a segurança ou eficiência do conjunto. Um furo nominal de 10 mm, por exemplo, pode ter limites como 10,00 mm e 10,05 mm, variando conforme a necessidade do projeto. Esses limites são delimitados pelo desvio superior e inferior, calculados com base em normas como ISO 286 (Figura 6). A definição adequada das tolerâncias evita falhas decorrentes de folga excessiva ou interferência não planejada entre peças (Agostinho, Rodrigues e Lirani, 2020).

Figura 6 – Esquematização das zonas de tolerância em um sistema furo-eixo, onde Dimensões limites representado por ($D_{máx}$, $D_{mín}$, $d_{mín}$ e $d_{máx}$) e campo de tolerância por (t).



Fonte: Agostinho, Rodrigues e Lirani (2020)

Os ajustes, por sua vez, classificam a relação entre furos e eixos em três categorias: folga, incerto e interferência. No ajuste com folga, o eixo é sempre menor que o furo, permitindo movimento relativo; no ajuste incerto, a montagem pode ter folga mínima ou pequena interferência; no ajuste de interferência, o eixo é sempre maior, produzindo encaixe apertado (Figura 7). A definição precisa desse tipo de ajuste é fundamental para o desempenho esperado, como transmissões, engrenagens ou rolamentos (Agostinho, Rodrigues e Lirani, 2020).

Figura 7 – Esquematização para ajuste com folga, ajuste incerto e ajuste com interferência



Fonte: Tec Mecânico (2014, adaptado)

Segundo Agostinho, Rodrigues e Lirani (2020), os Sistemas de Tolerâncias e Ajustes, normalizados internacionalmente pela série de normas ISO, constituem a base para a definição de limites dimensionais admissíveis em componentes mecânicos, assegurando a intercambiabilidade, a funcionalidade e a qualidade dos produtos manufaturados. Esse sistema é aplicado a uma ampla faixa de dimensões nominais, organizadas em grupos padronizados de diâmetros que, no caso da engenharia mecânica, abrangem intervalos de 1 a 500 mm. A divisão em grupos de diâmetros permite a aplicação coerente das tolerâncias, considerando o comportamento dimensional dos processos de fabricação e a viabilidade técnica da usinagem.

No sistema ISO, as tolerâncias dimensionais são definidas por meio das chamadas tolerâncias fundamentais, expressas pelas qualidades de tolerância, conhecidas como graus IT (International Tolerance), (Tabela 1). Essas qualidades variam de IT01, correspondente às tolerâncias mais restritas, até IT16, associada às tolerâncias mais amplas. Cada grau IT representa um nível específico de precisão dimensional e está diretamente relacionado à capacidade do processo de fabricação empregado. Quanto menor o número do grau IT, maior é a exigência de precisão e, conseqüentemente, maior é a complexidade e o custo do processo de usinagem (Agostinho, Rodrigues e Lirani, 2020).

Tabela 1 – Tolerâncias dimensionais

Grupo de Dimensões em milímetros – Valores da Tabela (tolerâncias) em [µm]														
Qualidade	Até 1	De 1 até 3	De 3 até 6	De 6 até 10	De 10 até 18	De 18 até 30	De 30 até 50	De 50 até 80	De 80 até 120	De 120 até 180	De 180 até 250	De 250 até 315	De 315 até 400	De 400 até 500
IT 01	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8	1	1,2	2	2,5	3	4
IT 0	0,5	0,5	0,6	0,6	0,8	1	1	1,2	1,5	2	3	4	5	6
IT 1	0,8	0,8	1	1	1,2	1,5	1,5	2	2,5	3,5	4,5	6	7	8
IT 2	1,2	1,2	1,5	1,5	2	2,5	2,5	3	4	5	7	8	9	10
IT 3	2	2	2,5	2,5	3	4	4	5	6	8	10	12	13	15
IT 4	3	3	4	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20
IT 5	4	4	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27
IT 6	6	6	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40
IT 7	10	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63
IT 8	14	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97
IT 9	25	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155
IT 10	40	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250
IT 11	60	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400
IT 12	----	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630
IT 13	----	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970
IT 14	----	250	300	360	430	520	620	740	870	1000	1150	1300	1400	1550
IT 15	----	400	480	580	700	840	1000	1200	1400	1600	1850	2100	2300	2500
IT 16	----	600	750	900	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900	3200	3600	4000

Fonte: ISO (2010)

As qualidades de tolerância mais finas, como IT01, IT0, IT1 e IT2, são geralmente aplicadas em componentes de alta precisão, como instrumentos de medição, elementos de referência e peças submetidas a rigorosos requisitos funcionais. Já os graus intermediários, como IT5 a IT8, são amplamente utilizados em processos de usinagem convencionais, incluindo torneamento, fresamento e retificação, equilibrando precisão dimensional e viabilidade econômica. Por sua vez, as qualidades mais amplas, como IT9 a IT16, são típicas de processos menos precisos, como fundição, conformação ou usinagem bruta, nos quais grandes variações dimensionais são aceitáveis (Agostinho, Rodrigues e Lirani, 2020).

A definição das tolerâncias fundamentais no sistema ISO considera tanto o diâmetro nominal do elemento quanto o grau IT selecionado. Assim, para cada grupo de diâmetros entre 1 e 500 mm, são estabelecidos valores padronizados de tolerância que aumentam progressivamente com o diâmetro, refletindo as dificuldades crescentes de controle dimensional em peças de maior porte. Essa abordagem garante coerência entre projeto, fabricação e inspeção, permitindo que projetistas especifiquem tolerâncias compatíveis com os processos produtivos disponíveis (Agostinho, Rodrigues e Lirani, 2020).

A posição do campo de tolerância, por sua vez, constitui um conceito fundamental dentro dos sistemas ISO de tolerâncias e ajustes, pois define a localização do campo de variação dimensional em relação à linha zero, que corresponde à dimensão nominal do componente. Enquanto o grau IT determina a amplitude do campo de tolerância, ou seja, o quanto a dimensão pode variar, a posição do campo estabelece se essa variação ocorre acima, abaixo ou de forma simétrica em relação à dimensão nominal. Dessa forma, a posição do campo de tolerância influencia diretamente o tipo de ajuste obtido entre furo e eixo, sendo decisiva para o comportamento funcional do conjunto mecânico (ABNT, 1995).

De acordo com as normas técnicas, a posição do campo de tolerância é caracterizada pela distância entre a dimensão limite mais próxima da linha zero e a própria linha zero. Essa posição é indicada por letras padronizadas: letras minúsculas para eixos (a, b, c, d, e, ..., z) e letras maiúsculas para furos (A, B, C, D, E, ..., Z). Essa convenção permite a identificação imediata da posição do campo de tolerância no sistema furo–eixo, facilitando a comunicação entre projetistas, fabricantes e inspetores de qualidade. A normalização dessas posições assegura coerência na aplicação das tolerâncias e contribui para a intercambiabilidade dos componentes (ABNT, 1995).

Além das posições básicas, a norma ABNT NB-86 prevê a existência de classes especiais de campos de tolerância, como cd, ef, fg, js, za, zb e zc para eixos, e CD, EF, FG,

JS, ZA, ZB e ZC para furos. Essas classes intermediárias ampliam as possibilidades de combinação entre furos e eixos, permitindo ajustes mais específicos para determinadas aplicações industriais. Ressalta-se que a letra “i” não é utilizada nessa nomenclatura, a fim de evitar confusão com a unidade fundamental de tolerância, representada pela letra i no sistema ISO (ABNT, 1995).

A análise das posições dos campos de tolerância em relação à linha zero evidencia padrões importantes. Eixos posicionados entre as letras “a” e “g” apresentam afastamentos negativos, o que significa que suas dimensões efetivas são sempre menores que a dimensão nominal. Em contrapartida, furos posicionados entre “A” e “G” possuem afastamentos positivos, sendo suas dimensões maiores que a nominal. Essa distribuição sistemática dos campos de tolerância permite a obtenção controlada de ajustes com folga, incertos ou de interferência, conforme a combinação adotada no projeto (ABNT, 1995).

Outro aspecto relevante é que eixos e furos que compartilham a mesma letra de posição apresentam afastamentos simétricos em relação à linha zero, situando-se à mesma distância da dimensão nominal, porém em lados opostos. Essa característica reforça a lógica do sistema ISO, no qual a combinação entre posição do campo e grau IT define de forma precisa o comportamento dimensional do conjunto. Destacam-se ainda as posições “h” para eixos e “H” para furos, amplamente utilizadas na prática industrial. No caso dos eixos “h”, o desvio superior é igual a zero, fazendo com que a dimensão máxima coincida com a dimensão nominal, caracterizando o sistema eixo-base. De forma análoga, os furos “H” apresentam desvio inferior igual a zero, com a dimensão mínima coincidente com a nominal, caracterizando o sistema furo-base, o mais empregado em projetos mecânicos (ABNT, 1995).

A aplicação de tolerâncias e ajustes requer domínio metrológico avançado, pois implica controle dimensional rigoroso durante a fabricação. Ferramentas como micrômetros, projetores de perfil, tridimensionais por coordenadas (CMM) e calibradores são essenciais para verificar se o componente produzido respeita os limites especificados. Sem esse controle, mesmo peças aparentemente corretas podem causar falhas mecânicas graves, principalmente em sistemas de alta exigência, como turbinas, motores e mecanismos de precisão (Fanha, 2011).

Para Agostinho, Rodrigues e Lirani (2020) a aplicação de tolerâncias e ajustes têm impactos diretos nos custos industriais. Tolerâncias mais rígidas exigem processos mais sofisticados e equipamentos mais precisos, o que aumenta o custo de produção. Por outro lado, tolerâncias excessivamente amplas podem comprometer a funcionalidade do conjunto. Assim, o engenheiro deve encontrar o equilíbrio entre qualidade e viabilidade econômica,

estabelecendo tolerâncias adequadas à aplicação sem elevar desnecessariamente os custos de fabricação.

2.2.9 Aplicações da Metrologia

A metrologia encontra aplicação em praticamente todos os setores industriais, científicos e tecnológicos, desempenhando papel fundamental na padronização, no controle de qualidade e na inovação. Em ambientes industriais, ela é utilizada para garantir que peças, componentes e sistemas sejam produzidos dentro das especificações exigidas, assegurando que haja intercambiabilidade e funcionalidade adequada. Setores como automotivo, aeroespacial, metalmecânico e eletroeletrônico dependem de medições precisas para evitar falhas e maximizar o desempenho (Schirigatti, 2023).

Além disso, a metrologia tem impacto direto na pesquisa científica, pois qualquer experimento precisa ser baseado em medições reproduzíveis e rastreáveis. A ausência de precisão comprometeria a validade dos resultados, levando a conclusões equivocadas e dificuldades na replicação de estudos. Assim, a metrologia é reconhecida como a base da ciência experimental, sustentando avanços tecnológicos e contribuindo para a evolução do conhecimento (Borges, Rocha e Brito, 2016).

Conforme destaca Schirigatti (2023), a importância da metrologia está diretamente ligada à necessidade de garantir precisão, confiabilidade e rastreabilidade nas medições que sustentam processos industriais, científicos e sociais. Em um mundo globalizado, a harmonização de padrões metrológicos permite que produtos fabricados em diferentes países sejam compatíveis, assegurando qualidade e competitividade no mercado internacional. Sem a padronização promovida pela metrologia, o comércio global seria inviável, pois não haveria confiança na equivalência dimensional, funcional ou qualitativa dos produtos.

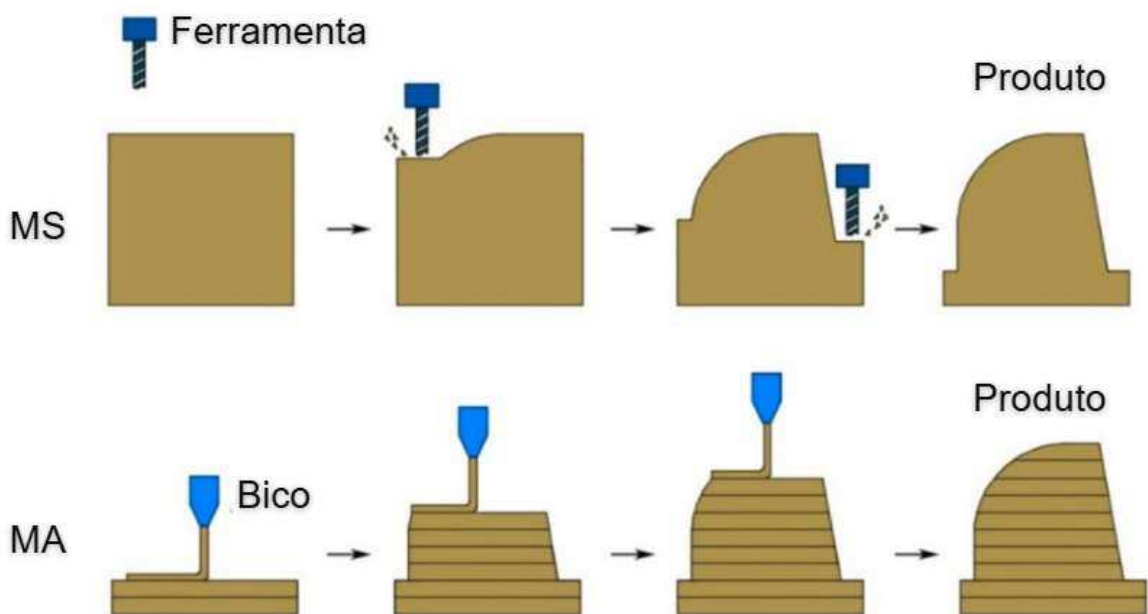
A metrologia contribui ainda para a segurança em diversos setores. Em aviação, por exemplo, medições incorretas podem resultar em falhas catastróficas. Na área da saúde, erros de medição podem comprometer diagnósticos e tratamentos. Na construção civil, dimensões incorretas podem comprometer a integridade estrutural de edifícios e pontes. Assim, a metrologia funciona como um pilar de segurança, assegurando que processos e produtos atendam aos requisitos estabelecidos (Schirigatti, 2023).

Outro aspecto importante é a redução de custos industriais. A medição precisa permite detectar problemas ainda na fase de fabricação, evitando retrabalhos, desperdícios e devoluções de produtos. Empresas que utilizam boas práticas metrológicas apresentam maior produtividade, menores índices de defeitos e maior confiabilidade perante seus clientes. Isso torna a metrologia não apenas uma exigência técnica, mas também uma ferramenta estratégica para competitividade (Schirigatti, 2023; Rofatto, Matsuoka e Klein, 2024).

2.3 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva pode ser compreendida como um conjunto de tecnologias de fabricação nas quais um objeto tridimensional é construído a partir da deposição sucessiva de camadas de material. Diferentemente dos processos tradicionais de manufatura subtrativa, que operam pela remoção de material, a manufatura aditiva conforma a geometria final mediante a adição contínua de matéria (Figura 8). Essa característica permite a criação de peças complexas, com geometrias internas detalhadas e estruturas otimizadas que seriam inviáveis por métodos convencionais (Prado, Mattos e Rodrigues, 2019).

Figura 8 – Diferenças conceituais entre a remoção de material (MS) e a deposição por camadas (MA)



Fonte: Adaptado de KDM (2025.)

Sua fundamentação conceitual está apoiada na conversão de modelos digitais em objetos físicos, sendo o arquivo tridimensional transformado em instruções que orientam a deposição do material. Esse percurso digital-físico confere ao processo uma elevada flexibilidade, uma vez que ajustes no design não demandam alterações mecânicas ou ferramental específico. Tais características têm consolidado a manufatura aditiva como uma tecnologia promissora no contexto industrial, educacional e de pesquisa (Araújo, 2021).

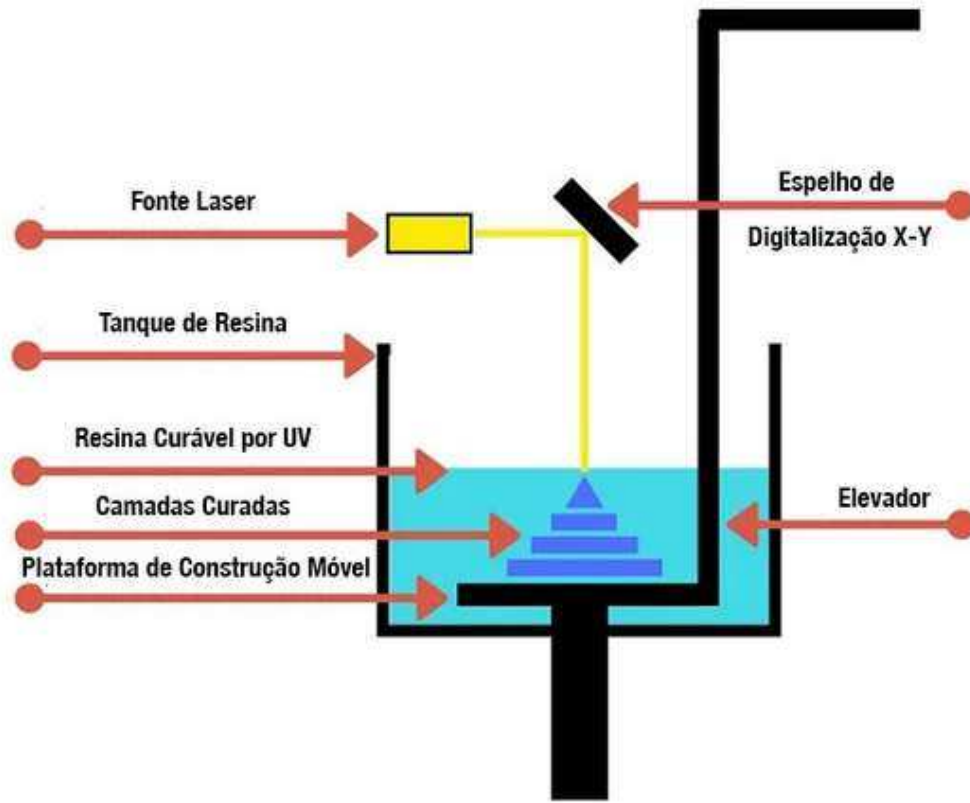
Desde sua origem na década de 1980, a manufatura aditiva evoluiu significativamente. Inicialmente voltada para prototipagem rápida, hoje ela abrange também a produção funcional de peças finais, incluindo componentes metálicos, polímeros de engenharia e compósitos. Essa expansão de aplicações tem impulsionado o desenvolvimento de novos materiais, sistemas de automação e softwares de modelagem cada vez mais precisos (Braga, 2017).

A natureza aditiva da técnica também contribui para práticas sustentáveis, reduzindo o desperdício de insumos em comparação a métodos convencionais. Do mesmo modo, possibilita a fabricação descentralizada e sob demanda, o que diminui custos logísticos e prazos de produção. Dessa forma, a manufatura aditiva se estabelece como uma alternativa vantajosa para setores que buscam personalização, flexibilidade e agilidade produtiva (Prado, Mattos e Rodrigues, 2019).

2.3.1 Tipos de manufatura aditiva

Os tipos de manufatura aditiva são classificados com base na forma como o material é processado e solidificado durante a construção do objeto. A estereolitografia (SLA), que utiliza resinas fotossensíveis curadas por um feixe de luz ultravioleta (Figura 9), é um método bastante utilizado na manufatura aditiva. A alta precisão e o acabamento superficial desse processo o tornam adequado para aplicações que exigem detalhamento fino, embora o custo mais elevado das resinas limite seu uso em algumas áreas de produção (Coelho, Araújo e Thiré, 2018).

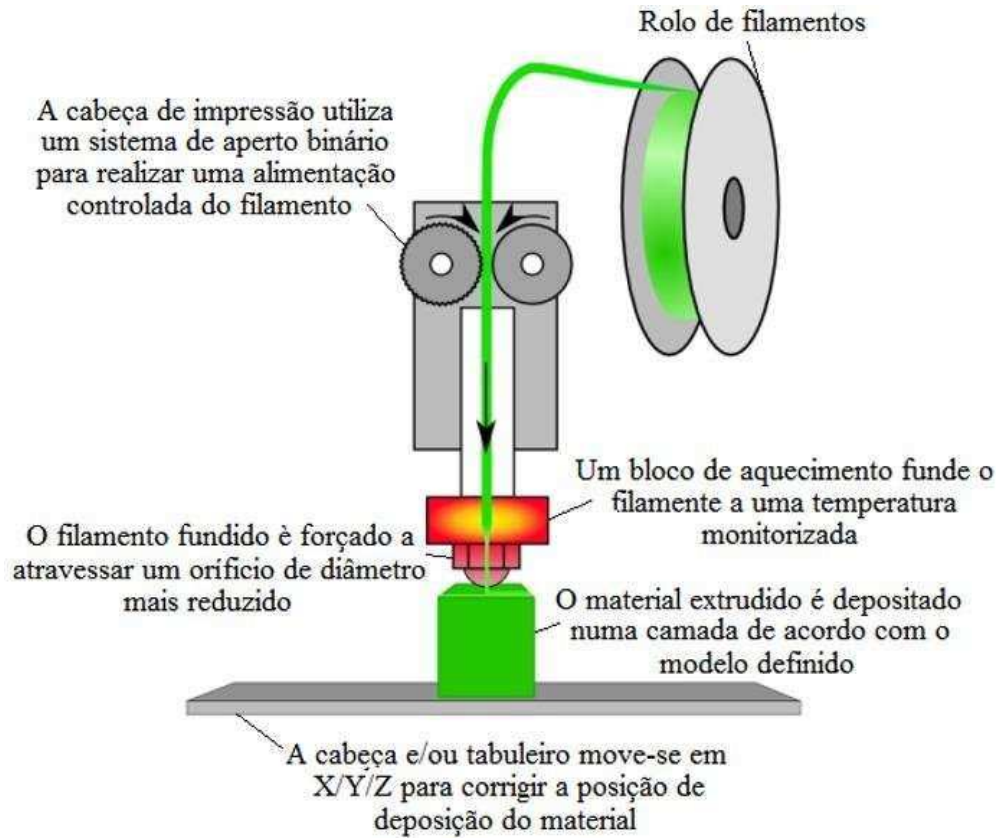
Figura 9 – Esquema de funcionamento juntamente com os componentes do processo de Estereolitografia (SLA).



Fonte: EngiPrinters (s.d.).

A modelagem por deposição fundida (FDM), (Figura 10), por sua vez, consolidou-se como a técnica mais acessível e mais utilizada, principalmente em ambientes acadêmicos e laboratórios de engenharia. Seu funcionamento simples, aliado ao baixo custo dos equipamentos, favorece o uso em atividades didático-experimentais e na fabricação de protótipos funcionais. A versatilidade dessa técnica contribui para sua disseminação entre profissionais, estudantes e pesquisadores (Santos, 2021).

Figura 10 – Esquema de funcionamento do processo de impressão 3D por extrusão (FDM).



Fonte: Moreira (2016).

Por fim, observa-se que cada tipo de manufatura aditiva apresenta particularidades que influenciam precisão, acabamento, materiais disponíveis e custo operacional. A escolha do método apropriado depende, portanto, do objetivo da aplicação, das características geométricas do projeto e das exigências mecânicas da peça.

2.3.2 Modelagem por Deposição Fundida (FDM)

A modelagem por deposição fundida, conhecida internacionalmente como FDM (Fused Deposition Modeling), é uma das tecnologias mais populares dentro da manufatura aditiva. Seu princípio de funcionamento consiste no aquecimento de um filamento termoplástico até que ele alcance o estado semilíquido, sendo extrudado por um bico aquecido que deposita o material de forma controlada. Essa deposição ocorre camada a camada, criando progressivamente o objeto tridimensional (Barbosa e Peruchi, 2024).

A simplicidade do processo, associada ao baixo custo dos equipamentos, foi um dos principais fatores para a ampla disseminação da tecnologia após a expiração das patentes originais no início da década de 2010. Desde então, o FDM tem sido amplamente empregado em ambientes educacionais, laboratórios de engenharia, pequenas indústrias e até mesmo no uso doméstico. Tal acessibilidade favorece a experimentação, o desenvolvimento de habilidades técnicas e a integração de conceitos teóricos com práticas laboratoriais (Camilo e Oliveira, 2015).

Outro aspecto importante do FDM é sua capacidade de imprimir com uma grande variedade de polímeros, incluindo materiais rígidos, flexíveis e compósitos. Esse fator permite a fabricação de protótipos funcionais, peças de engenharia e modelos didáticos capazes de facilitar o entendimento geométrico e dimensional de componentes mecânicos. Isso reforça a relevância do FDM como tecnologia de apoio à aprendizagem em disciplinas como metrologia, desenho técnico e processos de fabricação (Barbosa e Peruchi, 2024).

O processo de manufatura aditiva por FDM inicia-se com a elaboração ou obtenção de um modelo tridimensional em ambiente computacional. Para isso, utiliza-se um software de modelagem 3D (CAD), no qual o objeto é desenhado com todas as dimensões e características geométricas necessárias. Uma vez concluído, o arquivo deve ser exportado, geralmente no formato STL ou 3MF, que são extensões amplamente compatíveis com softwares de fatiamento. Nessa etapa, é fundamental garantir que o modelo esteja sem falhas geométricas, tais como faces invertidas, arestas abertas ou intersecções indevidas, pois tais imperfeições podem comprometer diretamente o resultado final da impressão (Volpato, 2017; Reis, Costa e Santos, 2024).

Após a obtenção do arquivo, o próximo passo consiste no fatiamento do modelo tridimensional por meio de um software específico, conhecido como *slicer*. O *slicer* converte o modelo digital em um conjunto de instruções organizadas em código G, detalhando cada movimento que a impressora deverá executar durante o processo de fabricação. É neste momento que são definidos os parâmetros de impressão, como altura da camada, densidade e padrão de preenchimento, temperatura do bico extrusor, temperatura da mesa aquecida, velocidade de impressão e orientação do objeto. Esses ajustes influenciam diretamente na precisão dimensional, na resistência mecânica da peça e no tempo total de fabricação (Volpato, 2017; Reis, Costa e Santos, 2024).

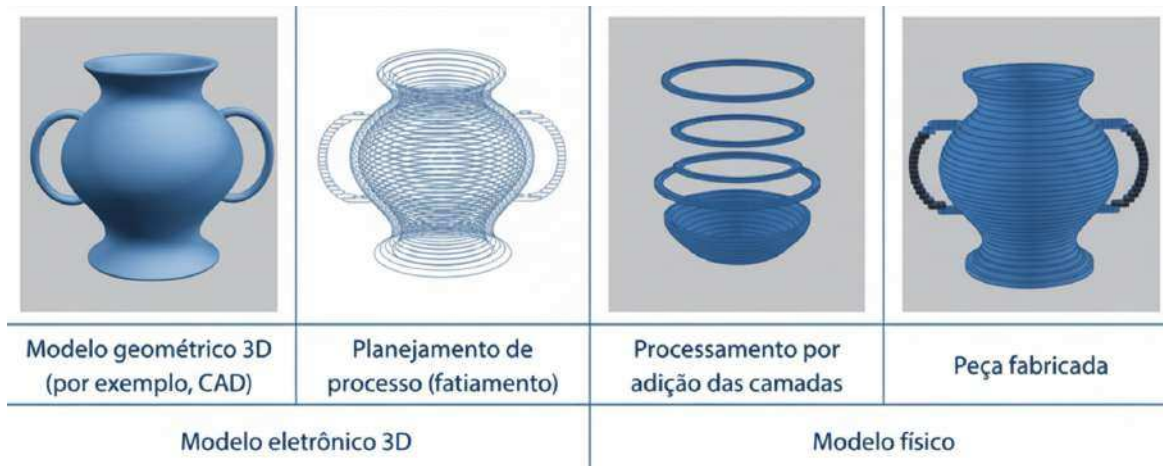
Com o arquivo fatiado e devidamente configurado, inicia-se a preparação física da impressora FDM. Essa preparação envolve a calibração da mesa de impressão, procedimento essencial para garantir a correta adesão da primeira camada. A mesa deve estar perfeitamente

nivelada e a distância entre o bico extrusor e a superfície deve ser cuidadosamente ajustada, utilizando-se normalmente um calibrador ou uma folha de papel como referência. Além disso, o operador deve verificar o alinhamento dos eixos, o estado do bico extrusor, a presença de filamento suficiente para a produção e a integridade geral do equipamento, minimizando riscos de falhas durante o processo (Volpato, 2017; Reis, Costa e Santos, 2024).

A etapa seguinte refere-se à extrusão e deposição do material. O filamento termoplástico é conduzido até o extrusor, onde passa por um mecanismo de tracionamento antes de ser aquecido no *hotend*. Ao atingir a temperatura apropriada, o material funde-se e é depositado camada a camada sobre a mesa de impressão, seguindo as instruções sequenciais registradas no código G (Figura 11). Cada camada é cuidadosamente posicionada de forma que o material depositado se funda parcialmente com a camada anterior, consolidando gradualmente a geometria tridimensional planejada. Esse processo segue repetitivamente até que todas as camadas tenham sido completadas, dando origem à peça física (Volpato, 2017; Reis, Costa e Santos, 2024).

Por fim, após a conclusão da impressão, inicia-se a etapa de resfriamento e de pós-processamento. É necessário aguardar que a peça atinja uma temperatura segura antes de ser removida da mesa, evitando deformações decorrentes de tensões térmicas residuais. Dependendo do modelo impresso, podem ser necessários procedimentos adicionais, como a remoção de suportes, lixamento, tratamento térmico, coloração ou aplicação de revestimentos superficiais. O pós-processamento contribui significativamente para a melhoria estética e funcional da peça final, além de possibilitar ajustes dimensionais mais precisos quando requerido pela aplicação (Volpato, 2017; Reis, Costa e Santos, 2024).

Figura 11 – Etapas da impressão 3D



Fonte: Volpato (2017, adaptado).

2.3.2.1 Tipos de impressoras FDM

As impressoras FDM podem ser classificadas conforme sua arquitetura mecânica, a forma de transmissão de movimento e o posicionamento do extrusor. O modelo cartesiano (Figura 12) é o mais comum, baseado em três eixos lineares que movimentam o bico ou a mesa de impressão. Essa configuração oferece precisão aceitável e boa estabilidade, sendo amplamente utilizada em instituições de ensino e ambientes domésticos (Pinheiro *et al.*, 2018).

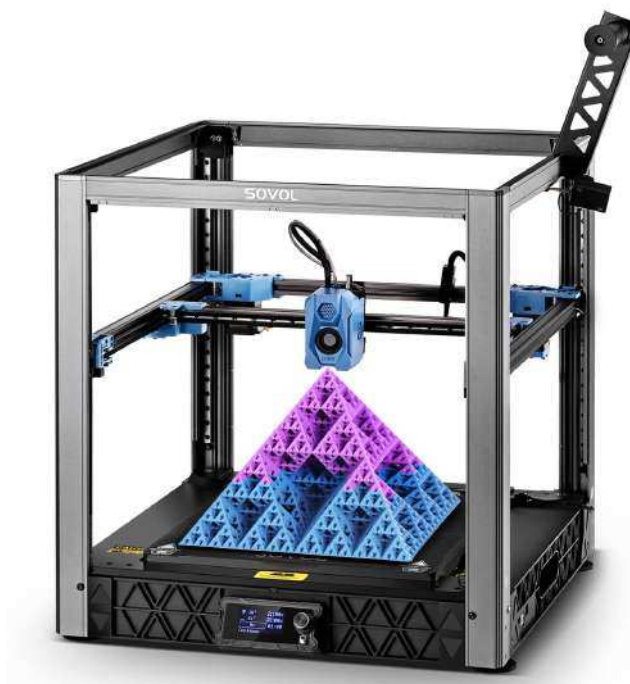
Figura 12 – Exemplo de impressora FDM cartesiana



Fonte: Eletrogate (2021).

Outra variação importante é o sistema CoreXY (Figura 13), que utiliza uma combinação de movimentos síncronos para reduzir vibrações e aumentar a velocidade de impressão. A arquitetura CoreXY melhora o desempenho mecânico da máquina, garantindo maior repetibilidade, precisão e uniformidade nos movimentos. Essa tecnologia é particularmente interessante para impressões em alta velocidade, mantendo a qualidade superficial da peça (Pinheiro *et al.*, 2018).

Figura 13 – Exemplo de impressora FDM Core XY



Fonte: Sovol (s.d.).

As impressoras do tipo delta (Figura 14) representam outra categoria relevante. Estas máquinas utilizam três braços articulados que movimentam o bico em um volume cilíndrico de impressão. A principal vantagem desse sistema é a velocidade de operação, sendo muito utilizado para impressões rápidas ou volumosas. Contudo, a calibração mais complexa e a menor rigidez estrutural em determinadas situações podem limitar sua precisão quando comparadas às arquiteturas cartesianas (Pinheiro *et al.*, 2018).

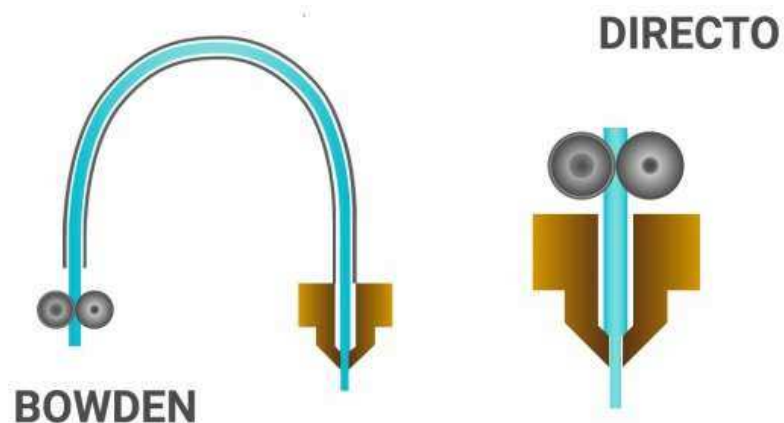
Figura 14 – Exemplo de impressora FDM do tipo delta



Fonte: eMotion Tech (s.d.).

Além da arquitetura mecânica, as impressoras FDM podem se diferenciar pelo tipo de extrusor. Extrusores do tipo bowden, nos quais o motor empurrador fica afastado do bico, permitem maior leveza no conjunto móvel, resultando em impressões mais rápidas. Já os extrusores diretos oferecem melhor controle de extrusão, especialmente ao imprimir materiais flexíveis, e reduzem falhas relacionadas ao fluxo do filamento (Barbosa e Peruchi, 2024). Conforme a comparação da Figura 15.

Figura 15 – Comparativo entre os sistemas de extrusão Bowden e Direct Drive.



Fonte: Recreus (apud FILAMENT2PRINT, 2020).

2.3.2.2 Materiais de impressão FDM.

Os materiais de impressão utilizados em tecnologias FDM desempenham papel determinante na qualidade, desempenho mecânico e precisão dimensional das peças produzidas. Cada polímero termoplástico apresenta propriedades físico-químicas específicas, como temperatura de fusão, resistência térmica, elasticidade e comportamento sob tensões. A escolha correta do material não apenas influencia a viabilidade técnica da impressão, mas também define a aplicabilidade da peça na engenharia, prototipagem ou em contextos industriais. Dessa forma, compreender as características dos filamentos disponíveis no mercado é fundamental para garantir resultados consistentes (Volpato, 2017; Reis, Costa e Santos, 2024).

Entre os materiais mais utilizados destacam-se os polímeros PLA, ABS, PETG, TPU, TPE e Nylon (Figura 16), que representam uma ampla gama de propriedades e finalidades. Esses filamentos diferenciam-se pela facilidade de extrusão, estabilidade dimensional, resistência a impactos, durabilidade e processamento térmico. Assim, o conhecimento detalhado de suas características permite ao operador determinar o material adequado para cada tipo de projeto, evitando falhas como empenamentos, delaminações ou deformações, comum em materiais sensíveis à variação térmica (Volpato, 2017; Reis, Costa e Santos, 2024).

Figura 16 – Materiais usados na impressão 3D



Fonte: Guey (2020).

Além das propriedades intrínsecas de cada polímero, fatores como condições ambientais, calibragem da impressora e compatibilidade com o *hotend* influenciam diretamente o comportamento desses materiais durante a impressão (Figura 17). A umidade relativa do ambiente, por exemplo, pode afetar significativamente termoplásticos higroscópicos como PETG e Nylon, que tendem a absorver água e apresentam formação de bolhas durante a extrusão quando armazenados inadequadamente. Portanto, práticas como secagem prévia e armazenamento hermético são essenciais para garantir boa qualidade (Volpato, 2017; Reis, Costa e Santos, 2024).

Figura 17 – Comparativo de qualidade de impressão entre filamento úmido e seco.



Fonte: Nuuneoi (2019, adaptado).

Outro ponto fundamental refere-se às temperaturas ideais de extrusão e de mesa aquecida, que variam consideravelmente entre os diferentes materiais. O PLA, por exemplo, permite impressão em temperaturas mais baixas e com menor tendência a deformações, tornando-se um dos materiais mais amigáveis ao usuário. Em contraste, o ABS exige temperaturas mais elevadas e ambientes controlados, como câmaras fechadas, para evitar contração excessiva. O PETG, por sua vez, combina boa resistência mecânica com menor suscetibilidade a empenamentos, situando-se como alternativa intermediária entre PLA e ABS

(Volpato, 2017; Reis, Costa e Santos, 2024). Conforme a Figura 18, onde temos as diferentes propriedades/desempenho para esses três tipos de materiais.

Figura 18 – Propriedade e desempenho do PLA, ABS e PETG

PROPRIEDADE/DESEMPENHO	MENOR	MÉDIO	MAIOR
BRILHO	ABS	PLA	PETG
TRANSPARÊNCIA	ABS	PLA	PETG
RIGIDEZ/DUREZA	PETG	ABS	PLA
RESISTÊNCIA A IMPACTOS	PLA	ABS	PETG
FLEXIBILIDADE	PLA	ABS	PETG
CONTRAÇÃO/WARP	PLA	PETG	ABS
PRECISÃO EM DETALHES	ABS	PETG	PLA
QUALIDADE DE SUPERFÍCIE DA PEÇA	ABS	PETG	PLA
RESISTÊNCIA A ATRITOS	ABS	PETG	PLA
RESISTÊNCIA QUÍMICA	ABS	PLA	PETG
RESISTÊNCIA A ALTAS TEMPERATURAS	PLA	PETG	ABS
FACILIDADE DE PÓS PROCESSAMENTO	PLA	PETG	ABS
DENSIDADE	ABS	PLA	PETG

Fonte: 3D Lab (2018).

Por fim, o domínio das características dos materiais utilizados na impressão FDM é um elemento central para a eficiência do processo e para a qualidade das peças fabricadas. A seleção criteriosa do filamento, associada ao ajuste apropriado dos parâmetros de impressão e ao controle das condições ambientais, resulta em maior confiabilidade e desempenho. Dessa forma, o estudo aprofundado dos principais materiais empregados em FDM é indispensável para o avanço de projetos em engenharia e para a consolidação da manufatura aditiva como tecnologia de fabricação robusta e precisa (Volpato, 2017; Reis, Costa e Santos, 2024).

2.3.2.3 Vantagens e desvantagens do processo FDM

O processo FDM apresenta diversas vantagens que justificam sua ampla utilização. Entre elas está o baixo custo operacional, tanto no que se refere aos equipamentos quanto aos materiais empregados. Essa característica torna o FDM uma opção acessível para estudantes, pesquisadores e pequenas empresas. Outro aspecto positivo é a facilidade de operação, que permite rápida aprendizagem e integração com atividades didáticas ou processos de prototipagem (Camilo e Oliveira, 2015).

Além disso, o processo permite a fabricação de peças com geometrias complexas e personalizadas, sem a necessidade de ferramentas ou moldes específicos. Essa flexibilidade facilita o desenvolvimento de protótipos funcionais e modelos experimentais, contribuindo para a compreensão dimensional e estrutural de componentes mecânicos em cursos de engenharia. A diversidade de materiais disponíveis também amplia as possibilidades de aplicação, incluindo polímeros rígidos, flexíveis e reforçados (Volpato, 2017).

Contudo, o processo FDM apresenta limitações inerentes à sua natureza. A deposição camada a camada tende a produzir anisotropia mecânica, o que significa que as propriedades da peça variam conforme a orientação das camadas. Essa característica exige atenção no planejamento da impressão, especialmente quando a peça deverá suportar cargas estruturais. Além disso, problemas como warping, stringing ou delaminação podem comprometer a qualidade da peça, principalmente quando não há controle adequado da temperatura ou da adesão inicial (Volpato, 2017).

Outro ponto relevante é o acabamento superficial, que geralmente apresenta marcas visíveis das camadas, exigindo pós-processamentos para aplicações que demandam alto nível estético. Também há limitações de precisão dimensional quando comparado a processos baseados em laser ou resina, os quais alcançam tolerâncias mais reduzidas. Em ambientes industriais, essas diferenças podem influenciar a escolha da tecnologia mais adequada (Volpato, 2017).

Volpato (2017) destaca, ainda, que embora apresente algumas limitações, o processo FDM continua sendo uma das tecnologias de manufatura aditiva mais acessíveis e versáteis, oferecendo excelente custo-benefício para atividades educacionais, experimentais e de desenvolvimento de protótipos.

2.3.3 Principais parâmetros de impressão na manufatura aditiva por FDM

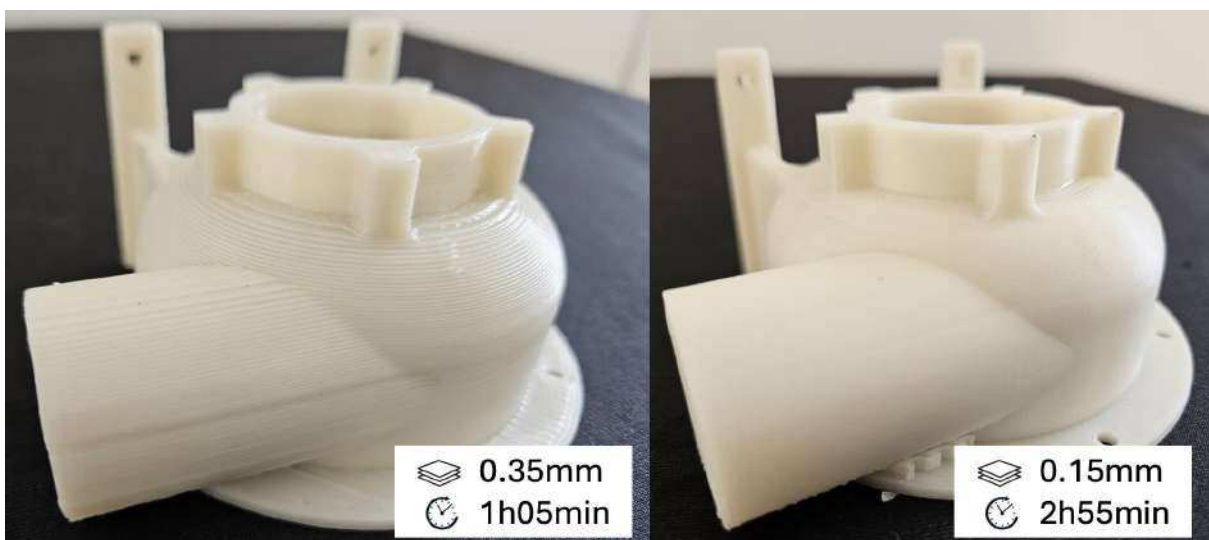
Os parâmetros de impressão na manufatura aditiva por FDM exercem influência direta sobre a qualidade superficial, a resistência mecânica e a precisão dimensional das peças fabricadas. O correto ajuste desses parâmetros é fundamental para garantir a repetibilidade do processo e reduzir variações indesejadas entre peças produzidas sob as mesmas condições. No contexto educacional e experimental, a padronização desses parâmetros também permite a comparação dos resultados metrológicos obtidos, tornando o processo mais confiável e cientificamente válido (Reis, Costa e Santos, 2024).

Para Volpato (2017), cada parâmetro atua de forma integrada no comportamento do material durante a deposição das camadas. Alterações aparentemente simples, como a modificação da altura de camada ou da velocidade de impressão, podem gerar impactos significativos na aderência entre camadas, na formação de defeitos geométricos e na estabilidade dimensional da peça final. Dessa forma, compreender os principais parâmetros de impressão é essencial para o uso consciente da manufatura aditiva em aplicações de engenharia.

2.3.3.1 Altura de camada

A altura de camada corresponde à espessura de cada camada depositada durante o processo de impressão e é um dos parâmetros mais relevantes para a qualidade superficial e o tempo total de fabricação (Figura 19). Camadas mais finas, geralmente entre 0,1 mm e 0,2 mm, proporcionam melhor acabamento superficial e maior fidelidade geométrica, pois reduzem o efeito de degraus nas superfícies inclinadas. No entanto, esse ajuste implica maior tempo de impressão, uma vez que o número total de camadas aumenta significativamente (Camilo e Oliveira, 2015; Volpato, 2017).

Figura 19 – Influência da altura de camada na qualidade superficial e no tempo de impressão



Fonte: Rodriguez (2024).

Por outro lado, alturas de camada maiores, como 0,3 mm ou superiores, reduzem o tempo de fabricação, mas comprometem o detalhamento geométrico e a precisão dimensional, especialmente em regiões curvas ou com pequenas tolerâncias. Assim, a escolha da altura de camada deve considerar o equilíbrio entre qualidade, tempo de produção e finalidade da peça, sendo comum a adoção de valores intermediários em aplicações didáticas e experimentais (Camilo e Oliveira, 2015; Volpato, 2017).

2.3.3.2 Densidade e tipos de preenchimento

A densidade de preenchimento, conhecida como infill, refere-se à quantidade de material presente no interior da peça e é expressa geralmente em porcentagem (Figura 20). Valores baixos de preenchimento, entre 10% e 20%, são suficientes para protótipos visuais e peças que não serão submetidas a esforços significativos. Já densidades mais elevadas aumentam a resistência mecânica, a rigidez estrutural e a estabilidade dimensional, sendo indicadas para peças funcionais (Camilo e Oliveira, 2015; Volpato, 2017).

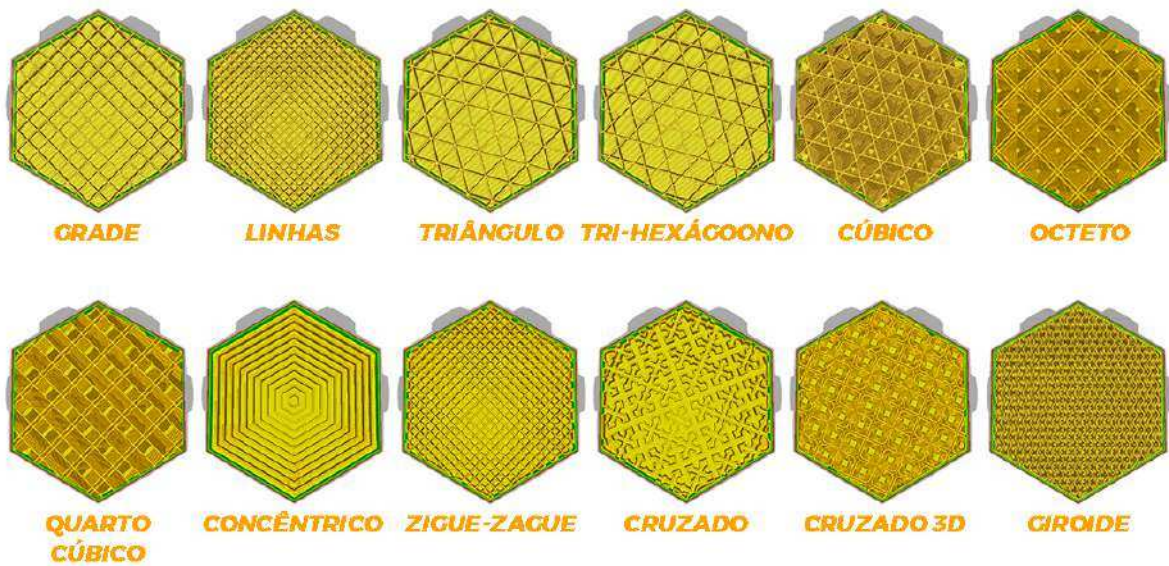
Figura 20 – Representação visual de diferentes densidades de preenchimento na impressão 3D



Fonte: 3D Lab (2019).

Além da densidade, o tipo de padrão de preenchimento (Figura 21) também influencia o comportamento mecânico da peça. Estruturas como grade, triangular, cúbica ou giroide oferecem diferentes distribuições de tensão e consumo de material. A escolha adequada do padrão permite otimizar a relação entre resistência e peso, além de contribuir para uma melhor absorção de esforços e redução de falhas estruturais durante o uso da peça (Camilo e Oliveira, 2015; Volpato, 2017).

Figura 21 – Padrões de preenchimento no Ultimaker Cura

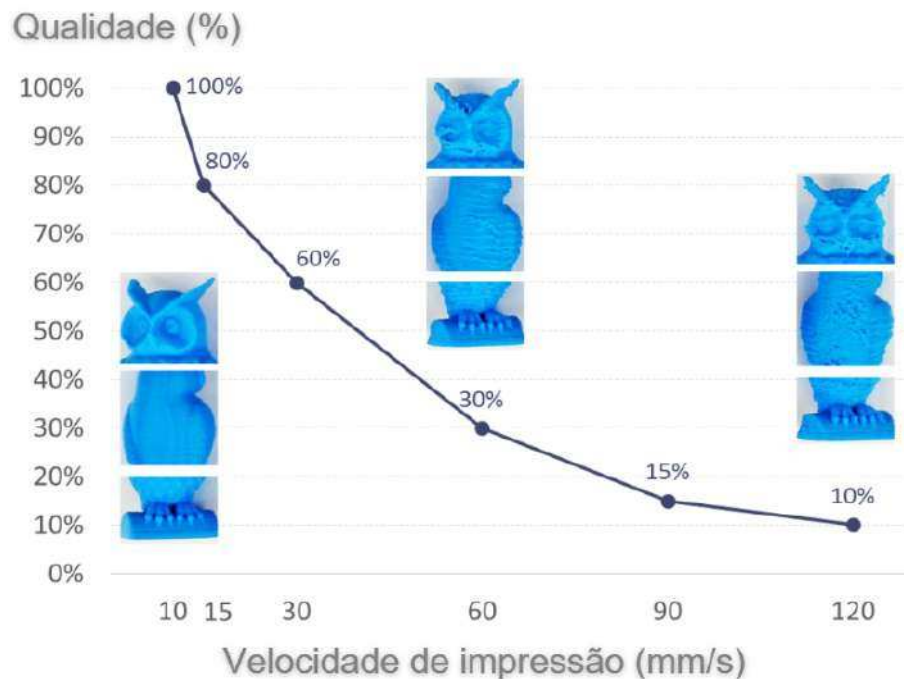


Fonte: 3D Lab (2019).

2.3.3.3 *Velocidade de impressão*

A velocidade de impressão define a taxa de deslocamento do extrusor durante a deposição do material e influencia diretamente a qualidade da peça e a confiabilidade do processo (Figura 22). Velocidades mais baixas favorecem a deposição uniforme do material, melhorando a adesão entre camadas e reduzindo falhas como subextrusão e vibrações mecânicas. Por essa razão, são frequentemente adotadas em impressões que exigem maior precisão dimensional (Camilo e Oliveira, 2015; Volpato, 2017).

Figura 22 – Gráfico da influência da velocidade de impressão (mm/s) na qualidade superficial da peça.



Fonte: Bitfab (2025, adaptado).

Velocidades elevadas, embora reduzam o tempo de fabricação, podem comprometer a qualidade superficial e a estabilidade geométrica da peça, especialmente em impressoras de menor rigidez estrutural. O excesso de velocidade pode gerar falhas de posicionamento, variações dimensionais e imperfeições na deposição do material. Assim, a velocidade deve ser ajustada conforme o material utilizado, a complexidade geométrica da peça e os limites mecânicos do equipamento (Camilo e Oliveira, 2015; Volpato, 2017).

2.3.3.4 Temperatura do bico de impressão

A temperatura do bico de impressão determina o grau de fusão do filamento e afeta diretamente a fluidez do material durante a extrusão. Temperaturas adequadas garantem uma deposição contínua e homogênea, favorecendo a aderência entre camadas e a resistência mecânica da peça. Cada material possui uma faixa ideal de temperatura, definida pelo fabricante, que deve ser respeitada para evitar defeitos de impressão (Camilo e Oliveira, 2015;

Volpato, 2017). Na tabela 2 mostra as faixas de temperaturas recomendadas para três materiais diferentes.

Tabela 2 - Temperatura de extrusão recomendada para PLA, PETG e ABS

	Faixa de Temperatura de extrusão	Temperatura utilizada
PLA	Entre 190° e 220°C	215°C
PETG	Entre 235° e 255°C	245°C
ABS Premium	Entre 220° e 240°C	235°C

Fonte: 3D Lab (2025, adaptado).

Temperaturas excessivamente baixas podem resultar em subextrusão, falhas de adesão e camadas frágeis. Em contrapartida, temperaturas muito altas podem causar degradação térmica do polímero, perda de propriedades mecânicas e formação de rebarbas ou escorrimientos. Portanto, o correto ajuste da temperatura do bico é essencial para assegurar a qualidade dimensional e estrutural das peças produzidas por FDM (Camilo e Oliveira, 2015; Volpato, 2017).

2.3.3.5 Temperatura da mesa de impressão

A temperatura da mesa de impressão tem como principal função garantir a adesão da primeira camada ao leito de impressão, reduzindo o risco de descolamento e empenamento da peça durante o processo. Materiais como ABS e PETG exigem mesas aquecidas a temperaturas mais elevadas, enquanto o PLA pode ser impresso com temperaturas mais baixas ou até mesmo sem aquecimento (Tabela 3), dependendo das condições ambientais (Camilo e Oliveira, 2015; Volpato, 2017).

Tabela 3 - Temperatura da mesa de impressão recomendada para PLA, PETG e ABS

	Temperatura da mesa de impressão
PLA	20 °C a 70°C
ABS	80°C a 110 °C
PETG	50°C a 75°C

Fonte: ALL3DP (2025, adaptado).

Além da adesão inicial, a mesa aquecida contribui para o controle do gradiente térmico durante o resfriamento da peça. Uma temperatura inadequada pode provocar tensões internas, resultando em deformações dimensionais e falhas estruturais. Dessa forma, o ajuste correto da temperatura da mesa é fundamental para assegurar estabilidade geométrica e repetibilidade do processo de impressão (Camilo e Oliveira, 2015; Volpato, 2017).

2.3.3.6 Orientação de impressão

A orientação de impressão refere-se à posição da peça em relação ao plano da mesa durante o processo de fabricação. Essa escolha influencia diretamente a resistência mecânica, a qualidade superficial (Figura 23) e a precisão dimensional, uma vez que o processo FDM apresenta comportamento anisotrópico. Camadas depositadas em direções diferentes respondem de forma distinta aos esforços aplicados (Camilo e Oliveira, 2015; Volpato, 2017).

Figura 23 - Efeito da orientação na qualidade superficial e na precisão dimensional



Fonte: Additive-X (2022).

Além do aspecto mecânico, a orientação também impacta a necessidade de suportes, o acabamento superficial e o tempo de impressão. Uma orientação inadequada pode aumentar a quantidade de material de suporte, gerar marcas indesejadas e comprometer superfícies funcionais. Assim, a definição da orientação deve considerar simultaneamente critérios geométricos, funcionais e metrológicos da peça (Camilo e Oliveira, 2015; Volpato, 2017).

2.3.4 Precisão dimensional na manufatura aditiva

A precisão dimensional na manufatura aditiva por FDM está relacionada à capacidade do processo em reproduzir fielmente as dimensões definidas no modelo CAD. No entanto, diversos fatores inerentes ao processo, como retração térmica do material, resolução dos motores de passo e variabilidade na deposição do filamento, contribuem para desvios dimensionais. Esses desvios tornam indispensável a avaliação metrológica das peças impressas, especialmente em aplicações de engenharia (Andrade, 2023).

Nesse contexto, a manufatura aditiva deve ser compreendida como um processo que exige validação dimensional sistemática, sobretudo quando aplicada à fabricação de componentes funcionais. A análise da precisão dimensional permite identificar limitações do processo, ajustar parâmetros de impressão e estabelecer tolerâncias compatíveis com a tecnologia utilizada. Assim, a integração entre manufatura aditiva e metrologia torna-se essencial para garantir confiabilidade, qualidade e aplicabilidade industrial das peças produzidas (Andrade, 2023).

2.4 Instrumentos de medição

Os instrumentos de medição constituem elementos centrais no processo metrológico, pois são responsáveis por estabelecer a interface entre o mensurando e o sistema de medição. A confiabilidade dos resultados obtidos depende diretamente das características construtivas do instrumento, de sua resolução, de seu estado de calibração e da forma como é utilizado pelo operador. No contexto da engenharia, a correta seleção e aplicação dos instrumentos de medição são fundamentais para garantir a qualidade dimensional de componentes e a validade técnica das decisões tomadas a partir dos dados coletados (Kobayoshi, 2012).

Em atividades didáticas e experimentais, como aquelas desenvolvidas em laboratórios acadêmicos, o uso adequado dos instrumentos contribui não apenas para a obtenção de resultados precisos, mas também para a formação das competências técnicas dos estudantes. O contato direto com instrumentos analógicos e digitais permite a compreensão prática de conceitos como erro, incerteza e repetitividade, reforçando a importância da metrologia no ciclo de desenvolvimento de produtos e processos industriais (Marques e Dutra, 2025).

2.4.1 Paquímetro analógico

O paquímetro analógico é um dos instrumentos de medição linear mais utilizados na engenharia, devido à sua versatilidade, robustez e facilidade de operação. Ele permite a realização de medições externas, internas, de profundidade e de ressaltos (Figura 24), sendo amplamente empregado em inspeções dimensionais de peças mecânicas. Seu princípio de

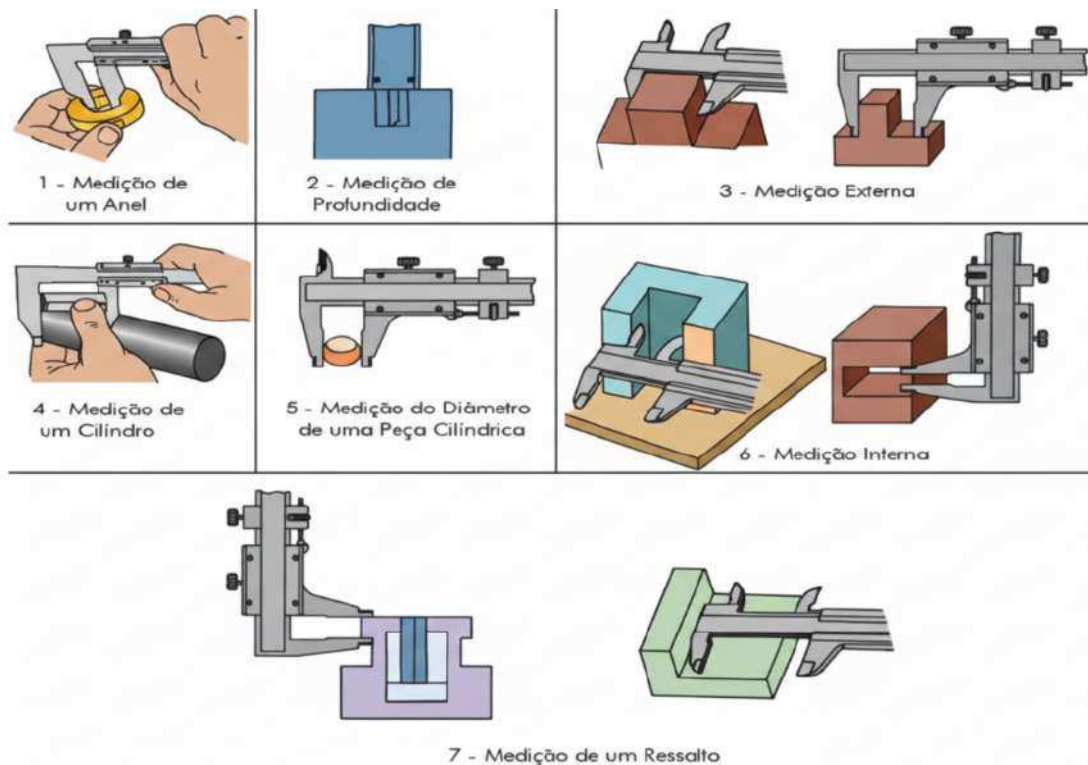
funcionamento baseia-se na combinação de uma escala principal e um nônio, que possibilita a leitura de frações de milímetro com resolução típica de 0,05 mm ou 0,02 mm (Silva e Soares, 2019).

A leitura correta do paquímetro analógico exige atenção e prática por parte do operador, especialmente na interpretação do alinhamento entre as marcas do nônio e da escala principal. Erros de paralaxe, pressão excessiva durante a medição e desalinhamento do instrumento em relação à peça são causas comuns de desvios nos resultados. Dessa forma, o uso adequado do paquímetro requer treinamento prévio e cuidados operacionais para garantir medições confiáveis (Silva e Soares, 2019).

Do ponto de vista metrológico, o paquímetro apresenta limitações quanto à precisão quando comparado a instrumentos mais específicos, como o micrômetro. No entanto, sua ampla faixa de medição e capacidade de realizar diferentes tipos de leitura o tornam indispensável em ambientes industriais e acadêmicos. Em atividades experimentais, ele é frequentemente utilizado para análises preliminares e medições que não exigem tolerâncias extremamente restritas (Silva e Soares, 2019).

Outro aspecto relevante do paquímetro analógico é sua sensibilidade às condições ambientais e ao desgaste mecânico. Impactos, sujeira e falta de manutenção podem comprometer a linearidade da escala e a repetitividade das medições. Por esse motivo, é fundamental que o instrumento seja periodicamente verificado e calibrado, garantindo a rastreabilidade metrológica dos resultados obtidos (Silva e Soares, 2019).

Figura 24 - Aplicações do paquímetro analógico



Fonte: Silva e Soares (2019, adaptado).

No contexto educacional, o uso do paquímetro analógico contribui significativamente para o desenvolvimento da percepção dimensional dos estudantes. A necessidade de interpretar escalas graduadas e compreender as fontes de erro associadas ao instrumento favorece a assimilação prática dos conceitos fundamentais da metrologia, fortalecendo a formação técnica em engenharia (Silva e Soares, 2019).

2.4.2 Micrômetro

O micrômetro é um instrumento de medição de alta precisão, utilizado para a determinação de dimensões lineares pequenas, como espessuras e diâmetros externos. Seu funcionamento baseia-se no princípio do parafuso micrométrico, no qual um pequeno deslocamento axial resulta de uma rotação controlada do tambor, permitindo medições com resolução típica de 0,01 mm ou inferior (Figura 25). Essa característica torna o micrômetro especialmente adequado para aplicações que exigem maior rigor dimensional (Souza e Arencibia, 2011).

Figura 25 - Componentes do micrômetro externo



Fonte: Souza e Arencibia (2011, adaptado).

A utilização correta do micrômetro requer cuidados específicos, como a aplicação de força de medição constante, geralmente assegurada por um dispositivo de catraca. O uso inadequado, com força excessiva ou insuficiente, pode introduzir erros sistemáticos e comprometer a confiabilidade dos resultados. Além disso, a correta interpretação das escalas do corpo e do tambor é essencial para evitar erros de leitura (Souza e Arencibia, 2011).

Do ponto de vista metrológico, o micrômetro apresenta elevada repetitividade e menor influência do operador quando comparado ao paquímetro, desde que utilizado corretamente. Entretanto, sua faixa de medição é limitada, sendo necessário o uso de diferentes micrômetros para cobrir intervalos dimensionais distintos. Essa limitação reforça a importância da escolha adequada do instrumento conforme o mensurando (Souza e Arencibia, 2011).

A calibração do micrômetro é um aspecto crítico para garantir sua precisão ao longo do tempo. Variações térmicas, desgaste das faces de medição e desalinhamentos podem afetar o desempenho do instrumento. Assim, sua utilização em ambientes controlados e a verificação periódica com padrões de referência são práticas recomendadas (Souza e Arencibia, 2011).

2.4.3 Balança de precisão digital

A balança digital de precisão (Figura 26) é um instrumento utilizado para a medição de massa com elevado grau de resolução e confiabilidade. Seu princípio de funcionamento baseia-se em sensores eletrônicos que convertem a força exercida pelo objeto em sinais elétricos, posteriormente processados e exibidos em formato digital. Esse tipo de instrumento é amplamente utilizado em laboratórios de engenharia, controle de qualidade e pesquisa científica (Schirigatti, 2023).

Figura 26 - Balança digital de precisão



Fonte: F. Soler (2025).

Do ponto de vista metrológico, a balança digital permite a obtenção de dados com elevada repetitividade, desde que sejam seguidos procedimentos adequados de pesagem. A tara correta do recipiente, o posicionamento central da amostra e o tempo de estabilização da leitura são práticas essenciais para minimizar erros e incertezas associadas à medição de massa (Schirigatti, 2023)

A calibração periódica da balança é indispensável para assegurar a rastreabilidade dos resultados e a confiabilidade das medições. A utilização de massas-padrão permite verificar a exatidão do instrumento e identificar possíveis desvios ao longo do tempo. Essa prática é especialmente importante em contextos industriais e acadêmicos, onde os dados

obtidos servem de base para análises quantitativas e decisões técnicas (Andrade e Custódio, 2020).

No contexto da manufatura aditiva e da metrologia aplicada, a balança digital de precisão desempenha papel relevante na verificação da massa das peças produzidas, permitindo avaliar variações de material, densidade de preenchimento e consistência do processo de fabricação. Assim, sua integração às práticas laboratoriais contribui para uma análise mais abrangente da qualidade e confiabilidade dos componentes manufaturados (Schirigatti, 2023).

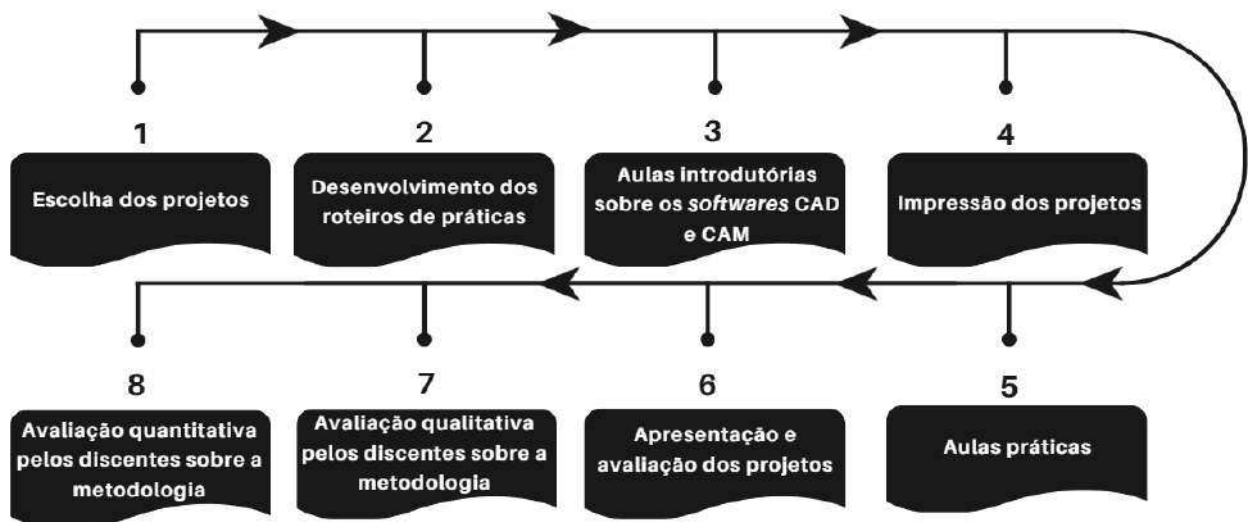
3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 Classificação da Pesquisa

Com o intuito de embasar o desenvolvimento deste trabalho e garantir o rigor científico necessário à engenharia, a pesquisa foi classificada quanto à sua natureza, aos seus objetivos e à sua abordagem.

Do ponto de vista da natureza, este estudo caracteriza-se como pesquisa aplicada, uma vez que busca solucionar um problema concreto do ensino de engenharia: a dificuldade de assimilação de conceitos abstratos relacionados à metrologia. Mais do que produzir conhecimento teórico, o estudo propõe a aplicação de técnicas de manufatura aditiva e de estratégias pedagógicas baseadas na Aprendizagem Baseada em Problemas (Figura 27), visando gerar resultados práticos e imediatos na formação dos estudantes.

Figura 27 – Fluxograma do procedimento metodológico



Fonte: Autor (2025).

Em relação aos objetivos, a pesquisa apresenta um caráter exploratório e descritivo. É exploratória pois investiga a integração de tecnologias de impressão 3D com metodologias ativas em um contexto específico (o curso de Engenharia Mecânica da UFC – Campus Russas), buscando familiarizar-se com o fenômeno do engajamento discente frente a

essas novas ferramentas. Simultaneamente, é descritiva, pois detalha as características dos projetos mecânicos fabricados, registra os procedimentos de medição adotados e expõe as variáveis observadas durante as práticas laboratoriais.

Quanto à abordagem, optou-se por um método misto, ou quali-quantitativo. O viés quantitativo está presente na etapa de metrologia pura, onde ocorre a coleta numérica de dados (dimensões, massas, desvios e incertezas), exigindo tratamento estatístico rigoroso para a validação das peças. Por outro lado, o viés qualitativo manifesta-se na análise do processo de ensino-aprendizagem, observando-se a interação dos alunos com os softwares de CAD, o manuseio dos instrumentos e a evolução da autonomia das equipes frente aos desafios propostos pela Aprendizagem Baseada em Problemas.

Por fim, quanto aos procedimentos técnicos, o trabalho adota contornos de pesquisa experimental e estudo de caso. A parte experimental refere-se à manipulação das variáveis de impressão e medição em ambiente laboratorial controlado. Já o estudo de caso refere-se à aplicação dessa metodologia com um grupo delimitado de discentes, permitindo uma análise aprofundada da eficácia da proposta pedagógica naquele ambiente específico.

3.2 Ambiente de Execução

As atividades práticas e experimentais desta pesquisa foram realizadas nas dependências da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus de Russas. A infraestrutura física foi utilizada de forma estratégica para atender às diferentes fases do projeto, garantindo os recursos necessários para a modelagem, fabricação e medição.

O Laboratório de Informática (Figura 28) sediou a etapa inicial de familiarização com as ferramentas digitais. Neste ambiente, equipado com computadores e o software *Solid Edge*, foi realizada a aula demonstrativa de CAD e a modelagem de um objeto introdutório, especificamente um chaveiro personalizado. Essa atividade teve como objetivo integrar os alunos ao fluxo de trabalho digital e prepará-los para o entendimento do processo de manufatura dos projetos mecânicos mais complexos que seriam abordados nas etapas seguintes.

Figura 28 – Vista interna do Laboratório de Informática utilizado para as aulas de modelagem CAD



Fonte: Autor (2025).

Para a materialização das peças, utilizou-se o Laboratório do LACID, (Figura 29). O espaço dispõe das impressoras 3D utilizadas tanto para a confecção dos chaveiros quanto para a fabricação dos cinco projetos mecânicos selecionados para o estudo, cujos modelos foram obtidos em repositórios digitais e processados neste laboratório. O ambiente ofereceu o suporte técnico necessário para o fatiamento dos arquivos e a operação segura dos equipamentos.

Figura 29 – Infraestrutura do Laboratório do LACID com as impressoras 3D



Fonte: Autor (2025).

Por fim, as práticas de avaliação dimensional foram conduzidas no Laboratório de Física (Figura 30). O local conta com bancadas adequadas para experimentação e iluminação apropriada, permitindo que as equipes realizem as medições e a coleta de dados com os instrumentos metrológicos de forma estável e organizada.

Figura 30 – Bancadas do Laboratório de Física onde foram realizadas as práticas de metrologia



Fonte: Autor (2025).

3.3 Participantes da Pesquisa

O estudo envolveu um total de 34 discentes dos cursos de Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas, regularmente matriculados na disciplina de Metrologia e Avaliação Dimensional no semestre de 2025.2. As atividades foram conduzidas semanalmente às sextas-feiras, distribuídas em duas turmas distintas para garantir o melhor aproveitamento da infraestrutura laboratorial e o acompanhamento próximo do instrutor.

A amostragem foi dividida da seguinte forma:

- Turma 1 (08:00 às 10:00): Composta por 20 alunos;
- Turma 2 (10:00 às 12:00): Composta por 14 alunos.

Para a execução das práticas baseadas em PBL, os participantes foram organizados em equipes de trabalho. O planejamento inicial previa a formação de grupos padronizados com cinco integrantes cada. No entanto, devido à variação no número de matriculados e à ocorrência de desistências ao longo da disciplina, a composição das equipes foi ajustada para refletir a realidade da turma, mantendo-se a funcionalidade das atividades.

Dessa forma, na primeira turma, formaram-se cinco equipes, uma equipe com 5 alunos, três com 4 alunos e uma com 3 alunos). Já na segunda turma, também foram constituídas cinco equipes (quatro equipes com 3 alunos e uma com 2 alunos). Independentemente do número de integrantes, cada equipe ficou responsável por um dos projetos mecânicos propostos, garantindo que todos os discentes tivessem a oportunidade de manusear as peças e realizar as medições individualmente.

3.4 Materiais e Equipamentos

Para a execução das etapas de projeto, manufatura e validação metrológica, foram utilizados recursos de *hardware*, *software* e equipamentos laboratoriais específicos, detalhados a seguir.

3.4.1 Recursos de Hardware e Software

As atividades de modelagem e preparação de arquivos foram realizadas nos computadores do laboratório de informática da instituição. Como ferramenta de projeto assistido por computador (CAD), utilizou-se o *software* Solid Edge (versão educacional/acadêmica), escolhido por ser a ferramenta padrão de ensino na grade curricular do curso.

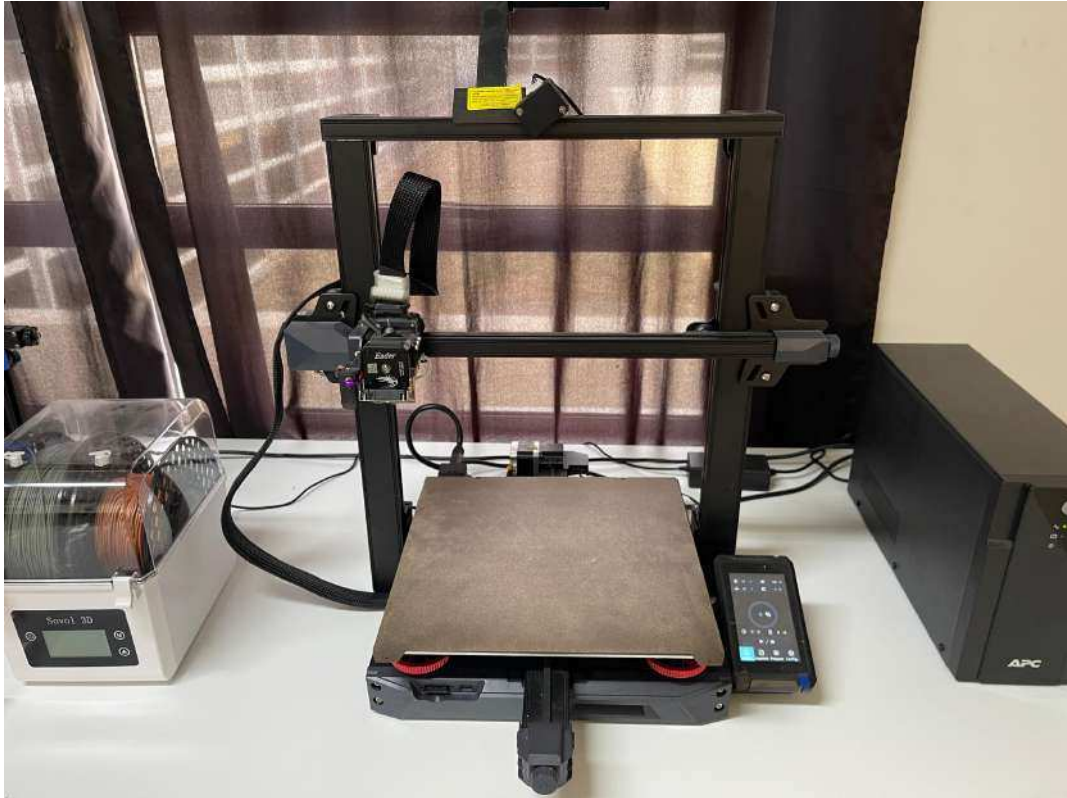
Para o processamento da manufatura aditiva (MA), adotou-se o *software* fatiador Orca Slicer. Este *software* foi responsável pela conversão dos modelos tridimensionais (arquivos .STL) em código de máquina (G-Code), permitindo o ajuste de parâmetros críticos como altura de camada, densidade de preenchimento e geração de suportes.

3.4.2 Equipamentos de Manufatura

A materialização dos protótipos e peças didáticas foi realizada utilizando a tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida (FDM). Foram empregadas impressoras 3D da marca Creality, modelo Ender-3 S1 PRO (Figura 31) e Ender-3 V3 KE (Figura 32). Estes equipamentos foram selecionados por oferecer volume de impressão adequado aos projetos

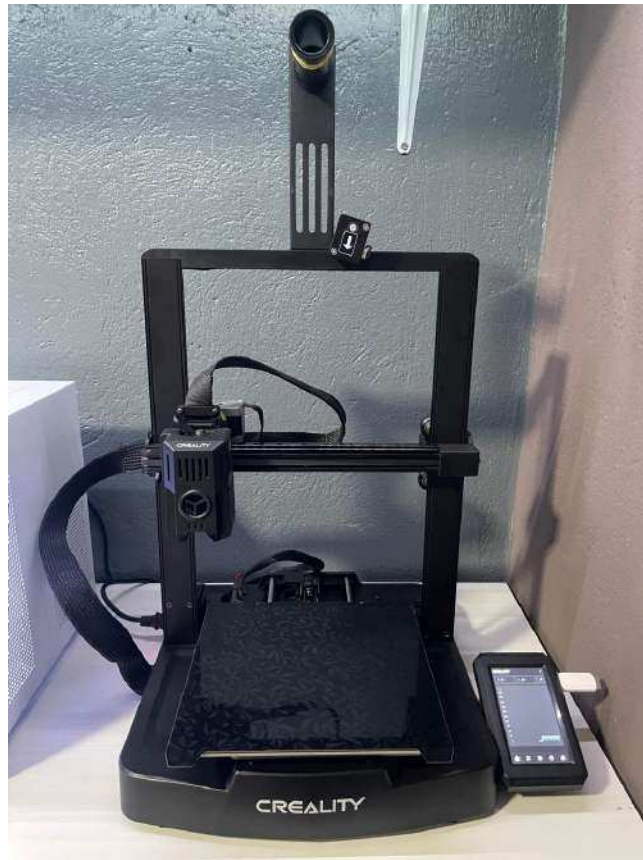
propostos, mesa aquecida e nivelamento automático, recursos que favorecem a estabilidade dimensional das peças.

Figura 31 – Impressora 3D Creality Ender-3 S1 PRO utilizada na manufatura das peças



Fonte: Autor (2025).

Figura 32 – Impressora 3D Creality Ender-3 VE KE utilizada na manufatura das peças



Fonte: Autor (2025).

Como matéria-prima, utilizou-se filamento de Políácido Láctico (PLA) da marca Voolt 3D (Figura 33), na cor cinza, com diâmetro de 1,75 mm. A escolha pela cor cinza e pela marca visou padronizar o aspecto visual das peças e facilitar a leitura dos instrumentos de medição sobre a superfície, além de garantir a reprodutibilidade das propriedades do material entre os diferentes grupos.

Figura 33 – Filamento utilizado na manufatura das peças.



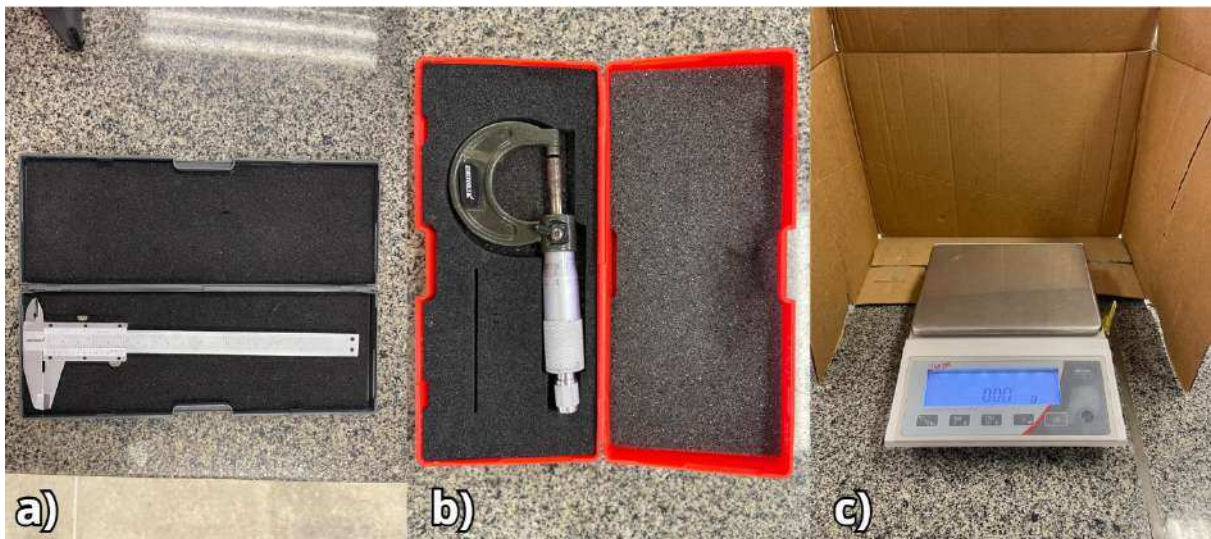
Fonte: Autor (2025).

3.4.3 Instrumentos Metrológicos

Para a coleta de dados e validação dimensional das peças impressas, foram utilizados instrumentos de medição calibrados e adequados às tolerâncias do processo FDM (Figura 34). O kit de metrologia disponibilizado para cada equipe foi composto por:

- Paquímetro Analógico Universal: Marca Kingtools, com capacidade de medição de 150 mm (6") e resolução de 0,05 mm. Utilizado para medições externas, internas, de ressalto e de profundidade.
- Micrômetro Externo Analógico: Marca Kingtools, com faixa de medição de 0 a 25 mm e resolução de 0,01 mm. Empregado para medições de espessuras e diâmetros pequenos que exigiam maior precisão comparativa.
- Balança de Precisão: Marca Marte, modelo AD3300-CAL, com capacidade máxima de 3300 g e resolução de 0,01 g. Utilizada para a verificação da massa das peças.

Figura 34 – Instrumentos de medição utilizados para a coleta de dados: (a) Paquímetro analógico universal; (b) Micrômetro externo; (c) Balança de precisão.



Fonte: Autor (2025).

3.4.4 Caracterização dos Projetos Mecânicos

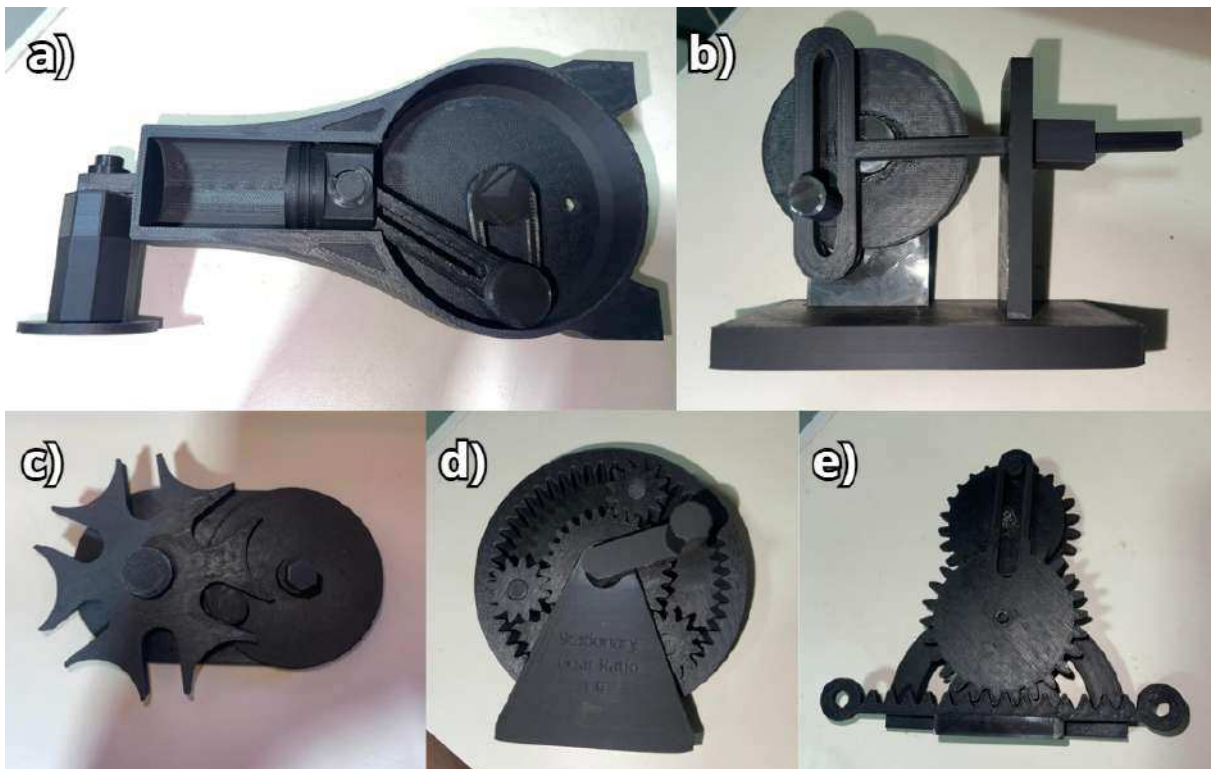
Como objetos de estudo para as práticas de metrologia baseadas em problemas, foram selecionados cinco projetos mecânicos distintos. Os modelos digitais foram obtidos em repositórios de compartilhamento de arquivos 3D na internet e escolhidos com base em critérios de complexidade geométrica (presença de furos, eixos, encaixes e superfícies planas) e funcionalidade mecânica, permitindo a exploração de diferentes tipos de medição com paquímetro e micrômetro.

A Figura 35 apresenta os protótipos de validação dos cinco mecanismos. Estes modelos foram impressos preliminarmente pelo autor para verificação da funcionalidade e dos encaixes antes da aplicação com os alunos. Abaixo, uma breve descrição de cada um:

1. Biela-Manivela: Mecanismo clássico de transformação de movimento rotativo em linear alternado.
2. Garfo Escocês (Scottish Yoke): Mecanismo para conversão de movimento circular em linear harmônico.
3. Roda de Genebra (Cruz de Malta): Dispositivo para gerar movimento rotativo intermitente a partir de um movimento rotativo contínuo.
4. Engrenagem Planetária: Dispositivo de movimento intermitente

5. Mecanismo Rotativo-Linear: Sistema que utiliza um fuso ou came para converter rotação em deslocamento linear.

Figura 35 – Protótipos de validação dos projetos mecânicos utilizados para verificação funcional: (a) Biela-Manivela; (b) Garfo Escocês; (c) Roda de Genebra; (d) Engrenagem Planetária; (e) Mecanismo Rotativo-Linear.

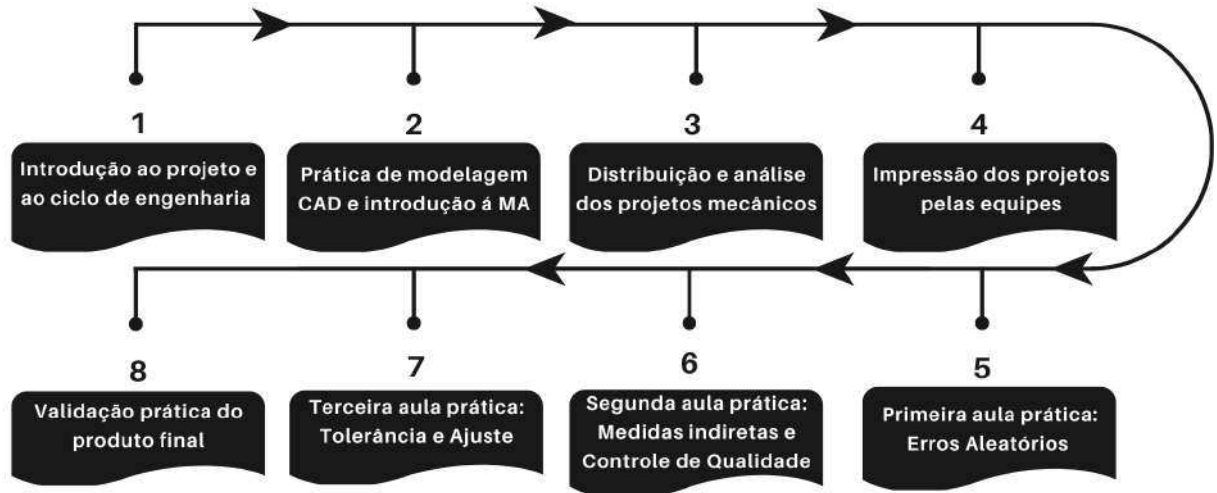


Fonte: Autor (2025).

3.5 Procedimentos Metodológicos

A aplicação da metodologia foi estruturada em etapas sequenciais e progressivas, desenhadas para guiar os discentes desde a concepção teórica do projeto de engenharia até a validação prática do produto final. A seguir, são descritos os procedimentos realizados em cada encontro, objetivos e detalhamento das atividades. A Figura 36 mostra um fluxograma das etapas utilizadas na didática deste trabalho.

Figura 36 – Fluxograma da didática deste trabalho



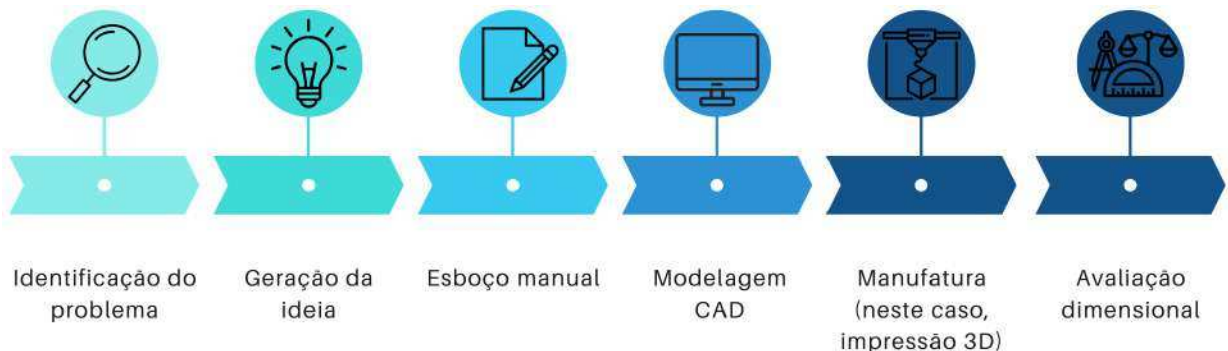
Fonte: Autor (2025).

3.5.1 Primeira Aula: Introdução ao Projeto e ao Ciclo de Engenharia

A primeira aula introdutória foi ministrada no dia 03 de outubro de 2025, em sala de aula convencional, com auxílio de recursos audiovisuais. O objetivo central foi apresentar o projeto do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) e contextualizar a metrologia como etapa crítica no ciclo de vida de um produto.

Inicialmente, o pesquisador apresentou-se à turma, detalhando sua atuação profissional como projetista mecânico, o que contribuiu para validar a aplicabilidade dos conceitos que seriam abordados. Em seguida, foi exposto um fluxograma de desenvolvimento de um projeto de engenharia, dividido em seis fases (Figura 37):

Figura 37 – Fluxograma de desenvolvimento de um projeto de engenharia

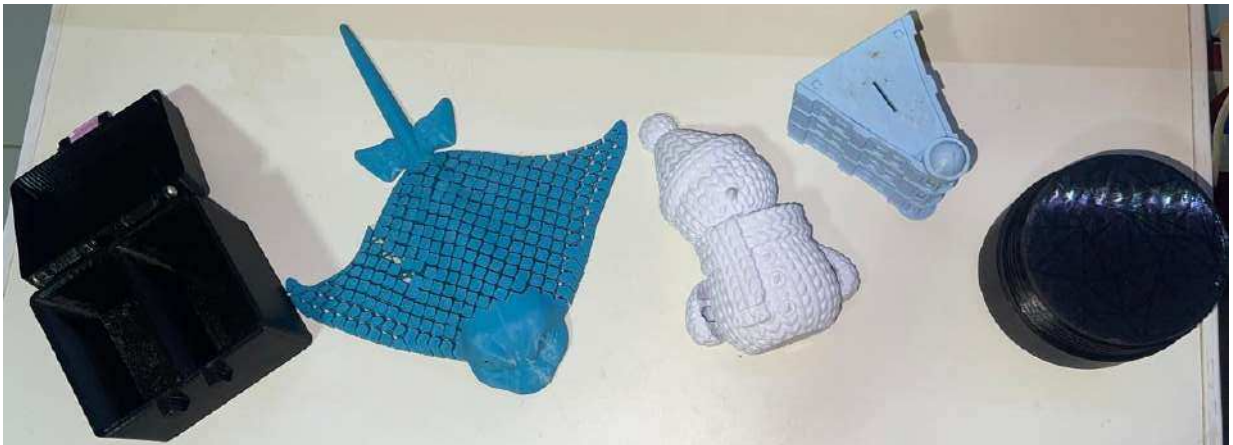


Fonte: Autor (2025).

Para demonstrar a interligação dessas fases, realizou-se uma demonstração prática de modelagem no *software Solid Edge*, criando-se um chaveiro para exemplificar comandos de extrusão, corte e filete. Na sequência, o modelo foi exportado para o fatiador *Orca Slicer*, onde foram explicados os parâmetros de impressão (altura de camada, preenchimento e suportes).

Para materializar os conceitos, foram apresentadas aos alunos peças impressas de alta complexidade de impressão (como mecanismos articulados, caixas com tolerâncias finas, cofres e sistema de rosca), trazidas como exemplos de aplicação, conforme a Figura 38.

Figura 38 – Peças impressas 3D apresentadas na aula



Fonte: Autor (2025).

3.5.2 Segunda Aula: Prática de Modelagem CAD e Introdução à Manufatura

Realizada no dia 10 de outubro de 2025, no Laboratório de Informática e no LACID, esta etapa teve como foco a aplicação prática dos conceitos digitais. O objetivo foi introduzir os alunos na modelagem e fabricação de um chaveiro personalizado com seus nomes, utilizando o *software Solid Edge* e o *Orca Slicer*.

A atividade prática foi desenvolvida mediante uma abordagem guiada, na qual os comandos demonstrados pelo ministrante via projeção multimídia eram replicados simultaneamente pelos discentes em suas respectivas estações de trabalho. Para a aplicação destes comandos, utilizou-se como referência um chaveiro medindo 50 mm de comprimento, 20 mm de largura e 3 mm de espessura, variando assim o os nomes que iam ser extrudados

(Figura 39). A dinâmica incluiu suporte técnico individualizado por parte do instrutor, garantindo modelagem correta.

Figura 39 – Chaveiros personalizados no Solid Edge



Fonte: Autor (2025).

Dando continuidade ao procedimento, a turma foi conduzida ao laboratório LACID para a materialização das peças. A metodologia incluiu a preparação do *software* de fatiamento (Orca Slicer), e a impressão 3D dos chaveiros, com suporte técnico do bolsista do Fablab (Laboratório de Fabricação) durante todo o ciclo de fabricação (calibração e impressão). Posteriormente, a mesma infraestrutura foi utilizada para a manufatura das peças funcionais dos projetos finais.

3.5.3 Terceira Aula: Distribuição e Análise dos Projetos Mecânicos

Ocorrida em 24 de outubro de 2025, esta aula marcou a transição para a fase principal do estudo. Foram apresentados e distribuídos os cinco projetos mecânicos selecionados: Roda de Genebra, Garfo Escocês, Biela-Manivela, Engrenagem Planetária e Mecanismo Rotativo-Linear, (Figura 35).

As equipes foram formadas e receberam kits contendo os protótipos de validação impressos previamente pelo autor. Foi definido o cronograma de impressão das peças definitivas pelas próprias equipes durante a aula, estabelecendo-se um sistema de rodízio no laboratório do LACID (manhã e tarde), garantindo o acesso de todos aos equipamentos.

3.5.4 Etapa de Manufatura: Impressão dos Projetos pelas Equipes

Após a definição das equipes e distribuição dos temas na terceira aula, iniciou-se a fase de fabricação das peças definitivas que seriam objeto de estudo metrológico. Esta etapa ocorreu no intervalo entre a terceira e a quarta aula, seguindo um cronograma de rodízio organizado no laboratório LACID para atender aos turnos da manhã e da tarde.

Nesta fase, os alunos operaram as impressoras 3D com a supervisão do instrutor e dos bolsistas. Vale salientar que, visando garantir a padronização do experimento e a comparabilidade dos resultados entre as diferentes geometrias, os parâmetros de processo foram fixados para todos os projetos. Todas as equipes configuraram o *software Orca Slicer* utilizando os mesmos valores de altura de camada, densidade de preenchimento (*infill*), padrão de preenchimento, número de perímetros e velocidade, conforme mostra a Tabela 4 e Tabela 5.

Conforme os parâmetros pré-definidos pelo software para a impressora e material selecionado, padronizou-se a temperatura de extrusão em 200 °C e a de mesa de impressão em 65 °C para todos os projetos. A única variável ajustável foi a geração de suportes, aplicada apenas quando a geometria específica da peça exigia sustentação de partes em balanço.

Tabela 4 – Principais parâmetro de impressão

	Altura de camada	Padrão de preenchimento	Densidade de preenchimento	Número de perímetros	Suporte
Biela Manivela	0,2 mm	Giroide	10 %	2	Sim
Garfo Escocês	0,2 mm	Giroide	10%	2	Não
Roda de genebra	0,2 mm	Giroide	10%	2	Não
Rotativo linear	0,2 mm	Giroide	10%	2	Sim
Engrenagem planetária	0,2 mm	Giroide	10%	2	Não

Fonte: Autor (2025).

Tabela 5 – Parâmetro de velocidade de impressão

	Primeira camada	Parede interna	Parede externa	Preenchimento
Biela Manivela	30 mm/s	300 mm/s	200 mm/s	200 mm/s
Garfo Escocês	30 mm/s	300 mm/s	200 mm/s	200 mm/s
Roda de	30 mm/s	300 mm/s	200 mm/s	200 mm/s

genebra				
Rotativo linear	30 mm/s	300 mm/s	200 mm/s	200 mm/s
Engrenagem planetária	30 mm/s	300 mm/s	200 mm/s	200 mm/s

Fonte: Autor (2025).

O processo envolveu 3 etapas: O Setup Padronizado, que compreendeu a configuração do fatiamento seguindo o perfil técnico pré-definido pelo Software; a Preparação da Máquina, onde foi feito o nivelamento da mesa, carregamento do filamento e limpeza do bico; e, por fim, o Monitoramento, onde foi feito o acompanhamento das primeiras camadas para garantir a adesão correta.

3.5.5 Quarta Aula: Prática de Erros Aleatórios

Realizada nos dias 12 e 14 de novembro de 2025, no Laboratório de Física, esta etapa consolidou a primeira coleta de dados. Cada equipe recebeu um Roteiro de Prática específico para o seu projeto, desenvolvido pelo autor e validado pelo professor regente (Apêndice A), contendo as instruções e tabelas para registro das medidas, com o objetivo de aplicar conceitos de erro aleatório, tendência, correção e calibração utilizando as peças fabricadas pelas equipes. A metodologia exigiu que cada integrante realizasse 10 medições repetidas de uma mesma cota, gerando dados para análise estatística de repetitividade e desvio padrão.

Os alunos realizaram medições repetidas utilizando paquímetros analógicos, micrômetros e balanças digitais. Na qual serviram de dados para a resolução das questões propostas no roteiro.

3.5.6 Quinta Aula: Prática de Medidas Indiretas e Controle de Qualidade

Realizada no dia 05 de dezembro de 2025, no Laboratório de Física, esta etapa envolveu novamente duas turmas da disciplina e representou a continuidade direta das atividades iniciadas na prática anterior. A aula foi estruturada para utilizar os dados brutos coletados na aula dos dias 12/11/2025 e 14/11/2025 como base para análises matemáticas mais complexas e tomadas de decisão industrial. As atividades foram divididas em dois momentos distintos, a Prática de Medidas Indiretas (Apêndice B) e a Prática de Controle de Qualidade (Apêndice C).

Na Prática de Medidas Indiretas objetivou-se demonstrar que grandezas físicas nem sempre são obtidas diretamente de um instrumento. As equipes foram desafiadas a calcular o volume da peça principal do seu mecanismo (considerando o corpo sólido simplificado) conforme o Apêndice B, utilizando as médias de diâmetro e espessura obtidas na prática anterior.

No roteiro de prática foi proposto a aplicação do conceito de propagação de incertezas. Os alunos precisaram combinar as incertezas dos instrumentos e a repetitividade das medições anteriores para determinar a incerteza final do volume calculado.

A Prática de Controle de Qualidade, por sua vez, dedicou-se aos fundamentos do Controle de Qualidade, com ênfase na análise de aceitação ou rejeição de componentes mecânicos dos projetos produzidos, baseada em suas características dimensionais. O objetivo central foi simular um cenário de inspeção industrial, onde decisões críticas devem ser tomadas considerando a variabilidade inerente ao processo produtivo.

Para a execução desta atividade, os discentes utilizaram novamente como referência o banco de dados estatístico gerado na prática anterior (médias e desvios padrão dos diâmetros). Uma parte do procedimento metodológico (Apêndice C) solicitou que cada equipe realizasse apenas uma medição adicional com o paquímetro na peça física. Essa abordagem teve como propósito pedagógico confrontar dois cenários distintos:

1. Medição Isolada: Representando uma inspeção rápida de chão de fábrica, porém suscetível a erros aleatórios momentâneos;
2. Análise Estatística Consolidada: Utilizando o histórico de medições repetidas para garantir maior confiabilidade ao processo de inspeção dimensional.

Com base nos dados pretéritos, os alunos calcularam os Limites de Aceitação e os Limites de Rejeição. A análise de conformidade não se limitou a uma decisão binária

(aprovado/reprovado); introduziu-se o conceito de Zona de Dúvida (superior e inferior), sempre seguindo o roteiro específicos desenvolvidos para cada projeto mecânico, contendo as instruções para a prática (Apêndice C). Dessa forma, os estudantes puderam classificar as peças em quatro categorias, conforme os critérios de tolerância estabelecidos:

- Seguramente dentro da tolerância (Conforme);
- Seguramente fora da tolerância (Não Conforme);
- Dentro da zona de dúvida (Incerteza de medição impede decisão conclusiva).

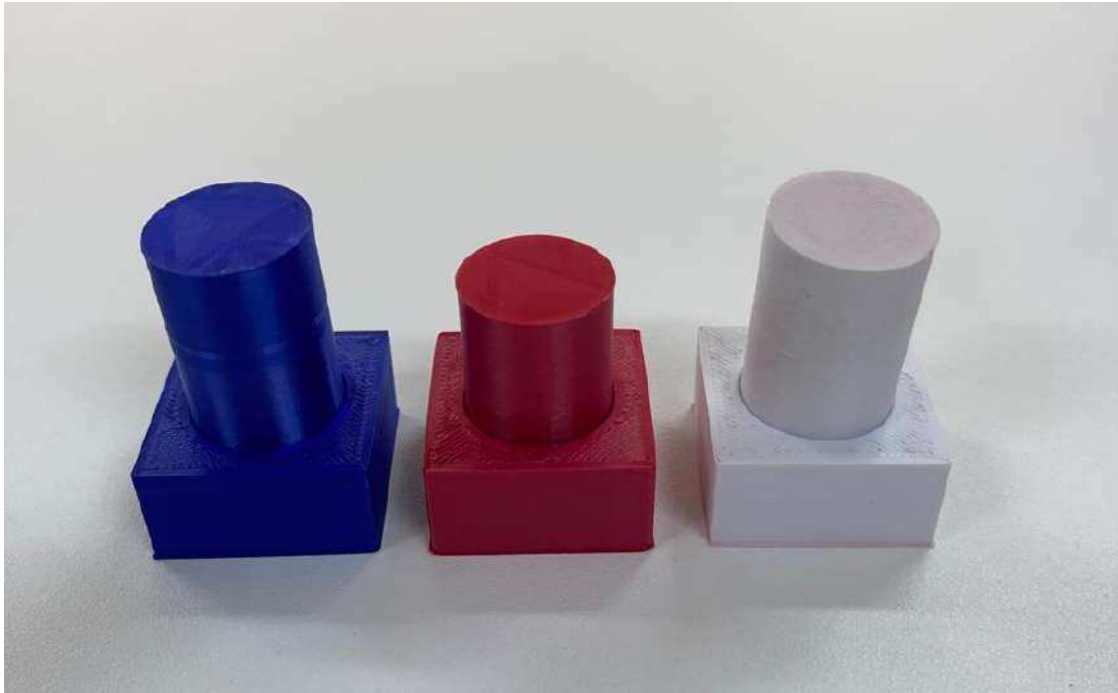
3.5.7 Sexta Aula: Tolerâncias, Ajustes e Intercambiabilidade

Realizada no dia 17 de dezembro de 2025, no laboratório LACID, esta etapa marcou o encerramento das intervenções práticas conduzidas pelo pesquisador. O foco temático foi o estudo de Tolerâncias e Ajustes, conceitos fundamentais para garantir a intercambiabilidade de componentes mecânicos.

Diferentemente das práticas anteriores, onde cada equipe manipulava seu projeto específico (Biela, Roda de Genebra, etc.), nesta aula optou-se por utilizar kits didáticos padronizados desenvolvidos e fabricados pelo próprio autor. Essa decisão metodológica foi tomada pois os componentes dos projetos originais possuíam dimensões reduzidas, o que poderia mascarar os fenômenos de ajuste devido à incerteza de medição e à rugosidade superficial característica da impressão 3D.

Para contornar essa limitação e facilitar a visualização dos conceitos, foram utilizados modelos impressos em uma máquina Creality Ender-3 V3 KE (propriedade do autor), utilizando filamentos de cores distintas (azul, branco e vermelho) para diferenciar os tipos de ajuste, conforme a figura 40.

Figura 40 – Acoplamentos utilizados na prática.



Fonte: Autor (2025).

A aula foi estruturada em três momentos:

A) Fundamentação Teórica e Cálculo de Afastamentos

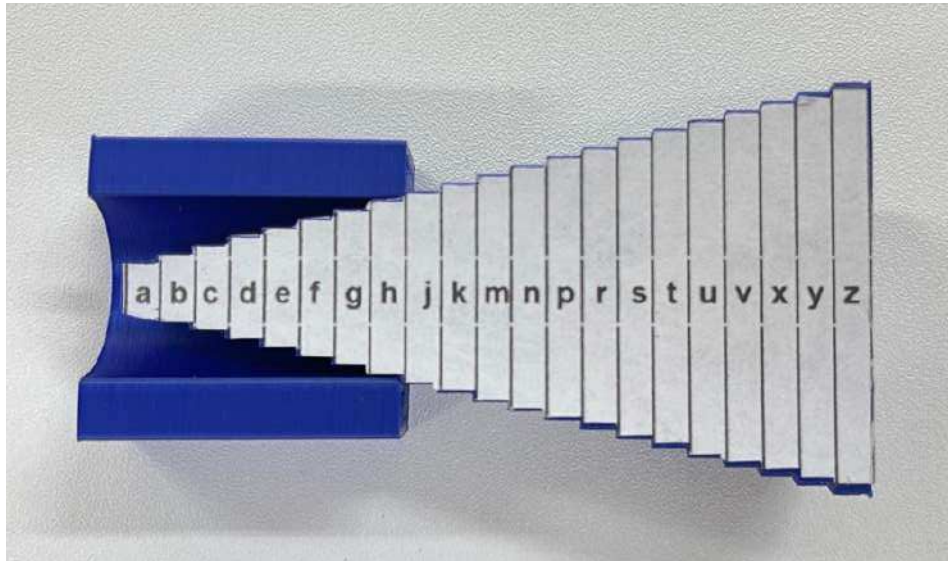
Inicialmente, os alunos foram desafiados a realizar os cálculos teóricos de dimensionamento baseados na norma ISO R-286. Utilizando o roteiro de prática (Apêndice D) e as tabelas de tolerância fornecidas, as equipes determinaram as dimensões máximas, mínimas e os afastamentos para três tipos de acoplamento nominais de $\text{Ø}20 \text{ mm}$:

- H11/c11: Previsão de ajuste com folga (acoplamento vermelho);
- H8/zb7: Previsão de ajuste com interferência (acoplamento branco);
- H5/m4: Previsão de ajuste incerto (transição), (acoplamento azul).

B) Visualização dos Campos de Tolerância

Para auxiliar na compreensão abstrata de que a tolerância é a variação permitida, o instrutor apresentou modelos físicos do sistema Furo-Base (Figura 41) e Eixo-Base (Figura 42) impressos com desvios dimensionais extrapolados (exagerados). Como os afastamentos reais da norma são da ordem de micrômetros (μm) — invisíveis a olho nu — essa estratégia de transposição didática foi empregada com o objetivo de materializar os conceitos teóricos, possibilitando a visualização física da relação entre os campos de tolerância e as condições resultantes de folga e interferência.

Figura 41 – Sistema de ajuste furo-base impresso na impressora 3D e com as indicações coladas na peça.



Fonte: Autor (2025).

Figura 42 – Sistema de ajuste eixo-base impresso na impressora 3D e com as indicações coladas na peça.



Fonte: Autor (2025).

C) Verificação Metrológica e Combinações Cruzadas

Na etapa final, as equipes receberam os acoplamentos coloridos e realizaram a inspeção dimensional utilizando paquímetros analógicos. O objetivo primordial desta atividade foi verificar a conformidade dimensional: com o auxílio do instrumento, os alunos

seriam capazes de constatar se os diâmetros reais dos eixos e furos fabricados estavam contidos nos intervalos de tolerância (entre a dimensão mínima e a máxima) calculados teoricamente na etapa anterior.

Apenas após essa validação numérica é que os conjuntos foram classificados funcionalmente em Ajuste com Folga (eixo menor que o furo), Ajuste com Interferência (eixo maior que o furo) ou Ajuste Incerto.

Além da análise dos pares originais, foi realizada uma atividade prática de intercambiabilidade e combinações. Os alunos foram instruídos a realizar trocas cruzadas entre os componentes, montando, por exemplo, o eixo do acoplamento azul no furo do acoplamento de outra cor. O objetivo foi verificar experimentalmente como a combinação de peças de "lotes" diferentes altera o comportamento da montagem.

3.5.8 Etapa Final: Seminário de Apresentação e Avaliação dos Projetos

Esta etapa marcou o encerramento do ciclo de intervenções e foi conduzida pelo docente regente da disciplina, integrando a pesquisa ao sistema avaliativo formal do curso. A dinâmica consistiu na apresentação final dos trabalhos, onde cada grupo foi avaliado pelo docente com base em três entregáveis:

1. Relatório Técnico: Documento compilando os dados coletados nas quatro práticas de medição, contendo o tratamento estatístico dos erros, cálculos de incerteza e a justificativa para as tolerâncias selecionadas (ISO 286).
2. Defesa Oral: Apresentação expositiva (via *slides*) onde os discentes detalharam a trajetória do projeto, as dificuldades encontradas na metrologia e as soluções adotadas.
3. Validação do Protótipo: Demonstração prática do funcionamento do mecanismo (Biela-Manivela, Roda de Genebra, etc.). Neste momento, o docente e o pesquisador verificaram *in loco* a funcionalidade da montagem, analisando se os componentes apresentavam o ajuste correto conforme projetado, ou se havia travamentos decorrentes de erros dimensionais.

Além da atribuição de nota para a disciplina, esta sessão funcionou como um fórum de *feedback* qualitativo. Durante as apresentações, os alunos relataram voluntariamente suas experiências, correlacionando a teoria vista em sala com a prática vivenciada na fabricação e medição dos componentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Qualitativa das Intervenções Didáticas (Visão do Pesquisador)

Este tópico apresenta a análise qualitativa do ciclo de intervenções didáticas realizado junto às turmas de Metrologia. A discussão a seguir baseia-se nos registros observacionais coletados pelo pesquisador durante as seis aulas ministradas entre outubro e dezembro de 2025. O objetivo desta seção é detalhar a evolução da turma, destacando os desafios operacionais e teóricos enfrentados pelos discentes, a eficácia da mediação docente e o impacto motivacional da introdução da Manufatura Aditiva no processo de ensino-aprendizagem. A narrativa segue a ordem cronológica das atividades, permitindo visualizar a progressão da complexidade e a adaptação dos alunos à metodologia PBL.

4.2.1 Introdução e Modelagem Digital

As duas primeiras aulas do ciclo de atividades serviram como base para a implementação da metodologia PBL, atuando como fase de ambientação e nivelamento técnico. A análise dessas etapas iniciais revelou contrastes importantes entre a recepção teórica e a execução técnica por parte dos discentes.

Na primeira intervenção, de caráter introdutório, a estratégia de apresentar artefatos físicos complexos onde a precisão e tolerância se fazem necessários (caixas articuladas, mecanismos de encaixe e cofres) mostrou-se eficaz para tangibilizar os objetivos da disciplina. Observou-se que o contato tátil com peças que exigem precisão dimensional atuou como um "gatilho" motivacional, despertando a curiosidade técnica da turma (Figura 43). O ambiente da aula transcorreu de forma tranquila, cumprindo o objetivo de contextualizar a interdependência entre projeto, fabricação e metrologia, preparando o terreno conceitual para as práticas subsequentes.

Figura 43 – Contato inicial dos alunos com exemplos de peças impressas em 3D.

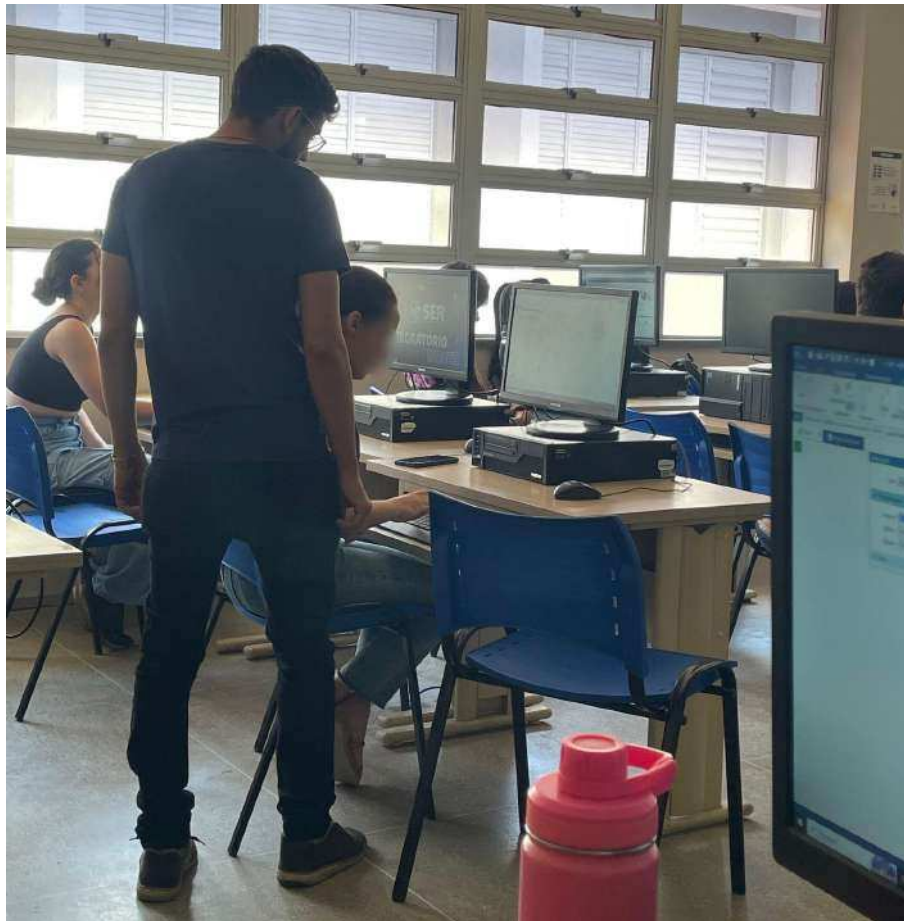


Fonte: Autor (2025).

Já na segunda aula, focada na competência digital, a aplicação da atividade de modelagem do chaveiro permitiu diagnosticar o nível de proficiência da turma, revelando uma heterogeneidade significativa baseada na formação de origem. Enquanto os discentes de Engenharia Mecânica, que possuem disciplinas específicas de CAD na grade curricular, demonstraram dificuldades associadas à falta de prática ou esquecimento de comandos, os alunos de Engenharia de Produção enfrentaram barreiras maiores devido à carga horária reduzida de desenho técnico em sua formação.

Os dados observados indicam que a maior barreira comum foi a visão espacial necessária para definir planos de esboço (*sketch*) e aplicar comandos tridimensionais. O tempo médio de execução da atividade foi de 1 hora e 20 minutos para uma peça de geometria simples, um dado quantitativo que reflete essa disparidade de conhecimentos prévios. Para o grupo da Mecânica, a atividade funcionou como uma revisão técnica necessária, para a Produção, atuou como preenchimento de uma lacuna formativa. A metodologia de acompanhamento individual em tempo real (Figura 44) mostrou-se, portanto, indispensável para nivelar a turma.

Figura 44 – Instrutor auxiliando alunos durante a modelagem no laboratório de informática



Fonte: Autor (2025).

Em contrapartida às dificuldades no CAD, a etapa de manufatura gerou o maior índice de engajamento observado nesta fase inicial. Ao serem convidados a executar o comando de impressão e visualizarem a materialização de seus modelos digitais (Figura 45), os alunos demonstraram entusiasmo imediato. Essa reação valida a premissa da Manufatura Aditiva como ferramenta pedagógica. Ela fecha o ciclo de abstração, permitindo que o estudante compreenda, de forma aplicada, a conexão direta entre o rigor da modelagem (software) e a qualidade do produto final (peça física).

Figura 45 – Discente efetuando o comando de play na impressora 3D



Fonte: Autor (2025).

4.2.2 Preparação, Logística de Manufatura e Adequação ao Calendário Acadêmico

A terceira etapa do ciclo didático, focada na distribuição dos projetos e no planejamento da manufatura, revelou-se fundamental para o engajamento das equipes. A estratégia de disponibilizar protótipos de validação (impressos previamente em polímero preto) para manuseio em sala de aula gerou um impacto positivo imediato.

Qualitativamente, observou-se que o contato físico com os mecanismos funcionais permitiu aos discentes uma compreensão instantânea da cinemática e das geometrias envolvidas (Figura 46). A aula foi marcada por alto nível de interação, com as equipes testando os movimentos e sanando dúvidas técnicas sobre o processo de impressão, demonstrando alta motivação para iniciarem a produção de seus próprios conjuntos.

Figura 46 – Alunos analisando os protótipos impressos previamente pelo autor e discutindo o funcionamento



Fonte: Autor (2025).

O cronograma para a impressão das peças (Figura 47) definitivas foi estipulado pelas próprias equipes em sala de aula. Para tanto, instituiu-se um sistema de rodízio no laboratório LACID, compreendendo os turnos matutino e vespertino, de modo a assegurar o acesso equitativo aos equipamentos para todos os participantes.

Figura 47 – Cronograma de impressão dos projetos



Fonte: Autor (2025).

No entanto, essa etapa de manufatura expôs os desafios reais de implementar metodologias ativas, que demandam tempo extraclasse, em concorrência com o calendário acadêmico rígido. O procedimento técnico exigido era breve: as equipes precisavam apenas configurar o fatiamento e iniciar a impressão (processo de setup), uma vez que o tempo de máquina era em torno de 6 horas, transcorreria sem a necessidade de supervisão constante.

O planejamento inicial previa um sistema de rodízio para impressão entre os dias 24/10 e 30/10, visando a realização da primeira prática metrológica no dia 31/10/2025.

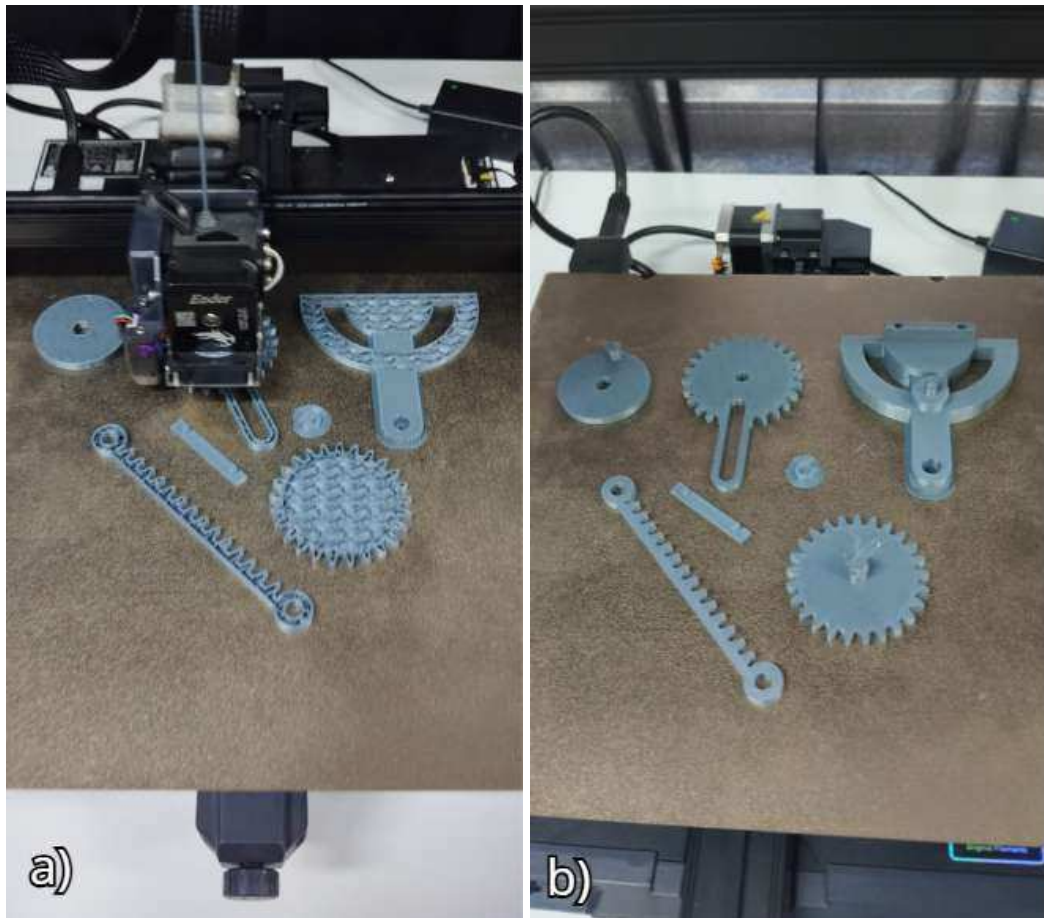
Dois fatores externos que impactaram esse cronograma:

A. Conflito com Avaliações: Algumas equipes não conseguiram comparecer aos horários de impressão estipulados devido a provas e seminários de outras disciplinas, atrasando a finalização das peças até o dia 30/10.

B. Eventos Institucionais: As datas subsequentes disponíveis para a prática (05/11 e 07/11) coincidiram com a semana dos Encontros Universitários no campus, inviabilizando o uso dos laboratórios para aulas regulares.

Embora esses fatores tenham impedido a prática na data original, o intervalo forçado pelos Encontros Universitários acabou se tornando benéfico para a logística do projeto, pois concedeu o tempo necessário para que as equipes atrasadas finalizassem suas impressões (Figura 48). Dessa forma, a primeira prática metrológica pôde ser realizada nos dias 12 e 14 de novembro com 100% das peças fabricadas, evidenciando a importância da flexibilidade no planejamento de atividades baseadas em projetos (PBL).

Figura 48 – (a) Impressoras em funcionamento; (b) Peça finalizada.



Fonte: Autor (2025).

4.2.3 Primeira Prática: Desafios Operacionais e Confronto Instrumental

A quarta intervenção didática, realizada nos dias 12 e 14 de novembro de 2025, representou o primeiro contato sistemático dos discentes com a coleta de dados metrológicos nas peças fabricadas. A análise desta etapa permitiu identificar barreiras operacionais típicas de estudantes em formação e validou a estratégia de utilizar múltiplos instrumentos para autoverificação.

Durante a execução das medições (Figura 49), observou-se uma dificuldade inicial significativa no manuseio dos instrumentos analógicos. Os erros mais frequentes relacionaram-se à aplicação da força de medição (pressão excessiva das mandíbulas sobre a peça polimérica, deformando-a levemente) e, principalmente, à interpretação da escala do nônio.

Figura 49 – Discentes realizando as medições



Fonte: Autor (2025).

Um dos resultados qualitativos mais relevantes desta prática foi o "confronto instrumental". Em diversos momentos, as equipes relataram discrepâncias acentuadas entre o valor medido com o paquímetro e o valor obtido com o micrômetro para a mesma cota. Essa divergência numérica atuou como um mecanismo de alerta: ao solicitarem a intervenção do instrutor (Figura 50) para analisar o "erro do instrumento", constatou-se, na realidade, um erro de leitura. Os alunos estavam interpretando incorretamente os traços de coincidência do nônio.

Figura 50 – Instrutor auxiliando os discentes



Fonte: Autor (2025).

Esse incidente foi explorado pedagogicamente em tempo real. A contradição entre os instrumentos serviu como oportunidade para corrigir vícios de leitura e reforçar conceitos de resolução e incerteza. Após a orientação individual, os estudantes foram capazes de refazer as medições com correção (Figura 51), compreendendo na prática a diferença entre precisão (repetitividade) e exatidão.

Figura 51 – Discente realizando as medições corretas



Fonte: Autor (2025).

Apesar da curva de aprendizado inicial, o clima da aula foi marcado por alto engajamento. A motivação discente transcendeu o ambiente do laboratório, evidenciada pelo registro espontâneo de fotografias das peças e instrumentos e sua publicação em redes sociais, marcando a localização da universidade (Figura 52). Esse comportamento digital reforça que a integração entre tecnologias modernas (impressão 3D) e metrologia clássica torna o aprendizado mais atrativo e contextualizado, transformando uma disciplina tradicionalmente árida em uma experiência valorizada pelos alunos.

Figura 52 – Registro do discente nas redes sociais



Fonte: Instagram (2025).

4.2.4 Segunda e Terceira Prática: Desafios Teóricos (Aula 5):

A quinta intervenção didática, realizada em 05 de dezembro de 2025, marcou uma mudança significativa no perfil das competências exigidas. Enquanto a prática anterior revelou obstáculos predominantemente operacionais (manuseio de instrumentos), esta etapa expôs barreiras teóricas e analíticas, evidenciando lacunas na fundamentação matemática e estatística dos discentes (Figura 53).

Figura 53 – Discentes com dificuldades



Fonte: Autor (2025).

Na primeira atividade, focada em Medidas Indiretas, o objetivo era determinar o volume das peças. Embora o cálculo geométrico fosse trivial, o desafio central residiu na aplicação do conceito de propagação de incertezas. Os alunos precisavam combinar a incerteza de uma medida com a incerteza de outra medida para determinar a incerteza combinada do resultado final (volume). Observou-se uma insegurança generalizada na manipulação algébrica das equações de sensibilidade e na conversão de unidades (mm para cm^3), exigindo intervenções constantes do instrutor para retomar conceitos de cálculo diferencial e estatística básica.

O mesmo cenário repetiu-se na atividade de Controle de Qualidade. Ao serem desafiados a definir os Limites de Aceitação e analisar as Zonas de Dúvida, as dificuldades não estiveram na medição em si, mas na interpretação dos critérios estatísticos para tomada de decisão. A abstração necessária para compreender que uma peça pode estar "dimensionalmente na zona de dúvida" (nem aprovada, nem reprovada) exigiu um esforço cognitivo maior do que a simples leitura do paquímetro.

Essa "virada de chave" nas dificuldades comprova que a metodologia PBL aplicada não se limitou ao treinamento técnico de uso de instrumentos, mas forçou os alunos a mobilizarem conhecimentos teóricos profundos de engenharia para resolverem o problema proposto, cumprindo o objetivo integrador do TCC.

Contudo a prática possibilitou que os alunos visualizassem, de forma prática, como a metrologia apoia a tomada de decisões em engenharia. Ao final, evidenciou-se que a utilização de medições repetidas e o conhecimento da incerteza do sistema de medição são indispensáveis para reduzir riscos de falsas aprovações ou rejeições em lotes de produção.

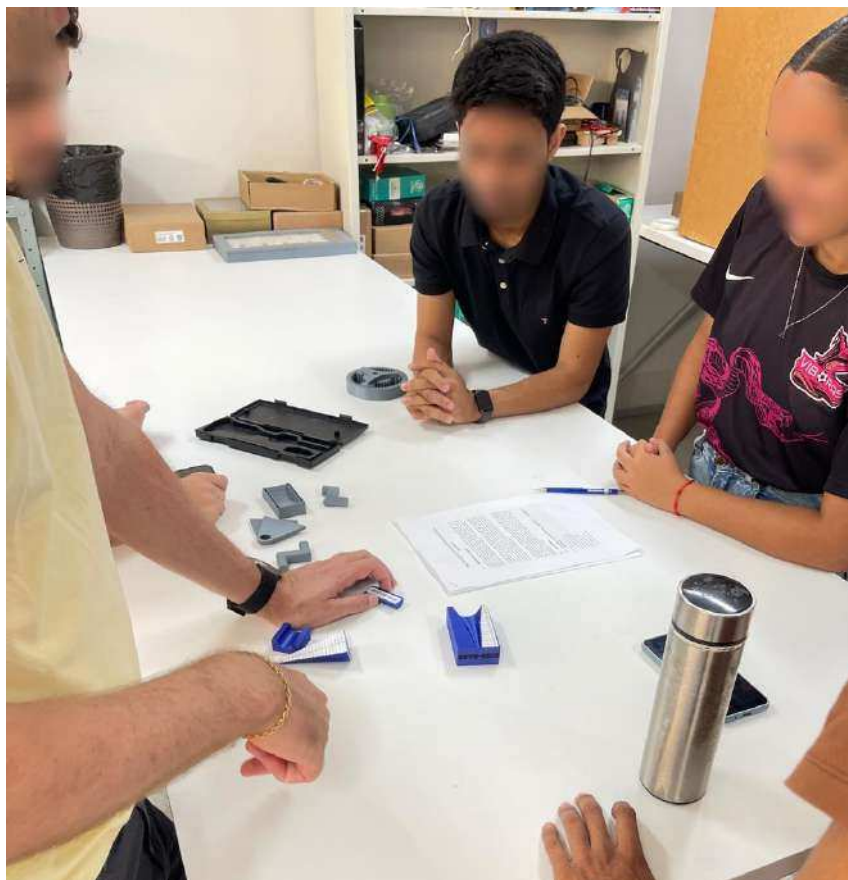
4.2.5 Quarta Prática: Intercambiabilidade (Aula 6):

A última intervenção do ciclo prático, realizada em 17 de dezembro de 2025, encerrou as atividades abordando o tema Tolerâncias e Ajustes. A análise desta aula revelou desafios pedagógicos distintos, evidenciando a necessidade de mediação entre a teoria normativa e a realidade física da peça.

Inicialmente, a etapa de fundamentação teórica demandou um tempo de execução superior ao planejado. Observou-se uma dificuldade significativa dos discentes na interpretação das tabelas da norma ISO (Qualidades de Trabalho - IT e Posições de Tolerância - letras). A abstração necessária para extrair os afastamentos micrométricos a partir de códigos alfanuméricos provou-se uma barreira cognitiva que exigiu suporte.

Um ponto crítico ocorreu durante a apresentação dos modelos didáticos dos campos de tolerância. Contrariando a expectativa inicial de que a visualização física garantiria o entendimento imediato, notou-se que os alunos não compreenderam o conceito de forma autônoma apenas observando as peças. Foi determinante, neste momento, a intervenção do professor regente da disciplina. A mediação docente, conectando o conteúdo teórico previamente ministrado (slides) com o artefato físico em mãos, foi o elo necessário para que a turma finalmente consolidasse o conceito de Campo de Tolerância, conforme mostra a Figura 54.

Figura 54 – Intervenção do professor regente da disciplina



Fonte: Autor (2025).

O momento de maior riqueza analítica, contudo, surgiu durante a classificação do Acoplamento Azul (projetado como Ajuste Incerto). Houve um conflito cognitivo na turma:

1. Pelo tato: Ao tentarem montar o conjunto, os alunos sentiram uma resistência mecânica (interferência), o que os levava a querer classificá-lo intuitivamente como "Ajuste com Interferência".
2. Pelo projeto: O acoplamento havia sido projetado como "Incerto" (H5/m4), mas a variabilidade da impressão 3D resultou em uma peça física com dimensões que causaram travamento.

Diante desse impasse, se deveriam confiar no que sentiam ou no que mediam, foi necessária uma intervenção metodológica do pesquisador. Explicou-se a cronologia lógica da prática: como eles já haviam calculado as dimensões limites (máximas e mínimas) para os três casos teóricos na primeira questão, o procedimento correto seria medir o acoplamento azul e verificar em qual dos intervalos calculados ele se encaixava.

Ao realizarem a medição (Figura 55), os alunos constataram que as dimensões do acoplamento azul, embora gerassem travamento físico naquele exemplar específico, correspondiam à faixa dimensional do projeto de "Ajuste Incerto". Esse episódio foi extremamente valioso para a formação dos estudantes, pois ensinou que a classificação de engenharia baseia-se em parâmetros metrológicos e de projeto, e não apenas na sensação tátil de montagem, além de evidenciar como a variabilidade do processo de fabricação (impressão 3D) atua dentro do conceito de ajuste incerto.

Figura 55 – Discentes realizando as medições



Fonte: Autor (2025).

4.3 Avaliação da Metodologia de Ensino (Visão dos Participantes)

Para validar a eficácia da proposta didática, foi realizado um levantamento quantitativo junto aos discentes das duas turmas da disciplina. O *link* para o formulário eletrônico (*Google Forms*) foi disponibilizado nos grupos de comunicação (*WhatsApp*) das turmas, sendo respondido voluntariamente pelos alunos que participaram do ciclo completo de práticas. O instrumento utilizou a escala Likert de 5 pontos, onde 1 representa "Discordo

Totalmente" e 5 representa "Concordo Totalmente". A análise a seguir discute os resultados obtidos, correlacionando os dados estatísticos com os objetivos pedagógicos do TCC.

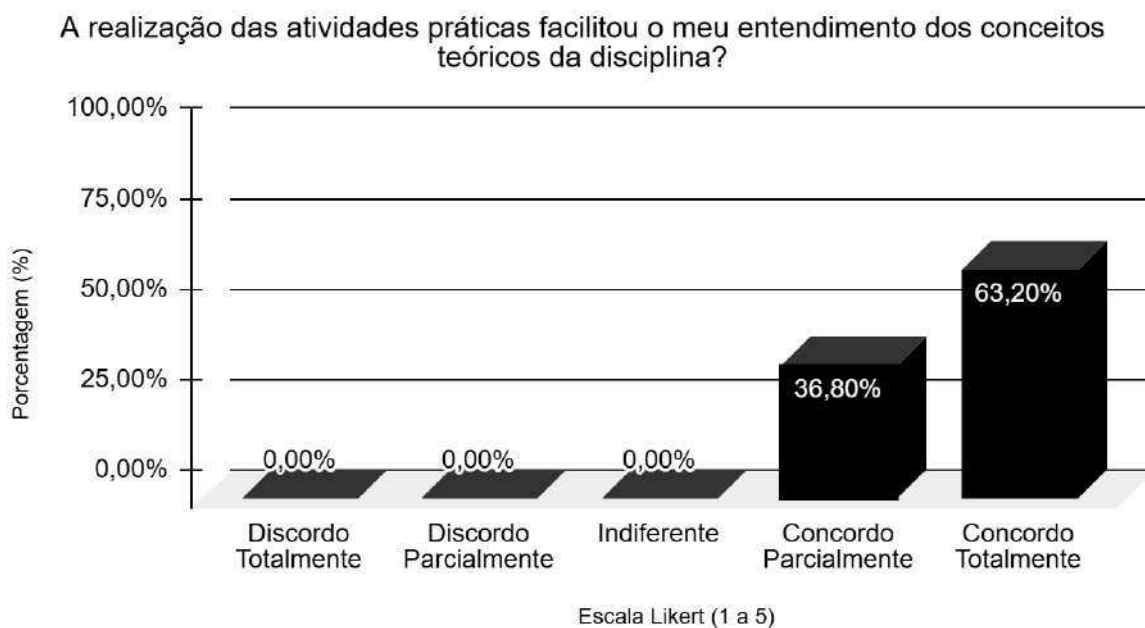
4.3.1 Análise da Percepção Discente.

Questão 1: Contribuição para o Aprendizado Teórico

"A realização das atividades práticas facilitou o meu entendimento dos conceitos teóricos da disciplina?"

Neste quesito, 63,2% dos alunos concordaram totalmente e 36,8% concordaram parcialmente (Figura 56). A soma expressiva de 100% de aprovação evidencia que a metodologia cumpriu um papel fundamental na fixação do conteúdo. A Metrologia é uma ciência repleta de conceitos abstratos (como incerteza, tendência e tolerâncias) que, muitas vezes, tornam-se herméticos em aulas puramente expositivas. O resultado indica que a vivência prática serviu como um "alicerce cognitivo", permitindo que os alunos visualizassem a aplicação real das equações e normas vistas em sala, transformando a informação teórica em conhecimento consolidado.

Figura 56 – Gráfico referente à Questão 1

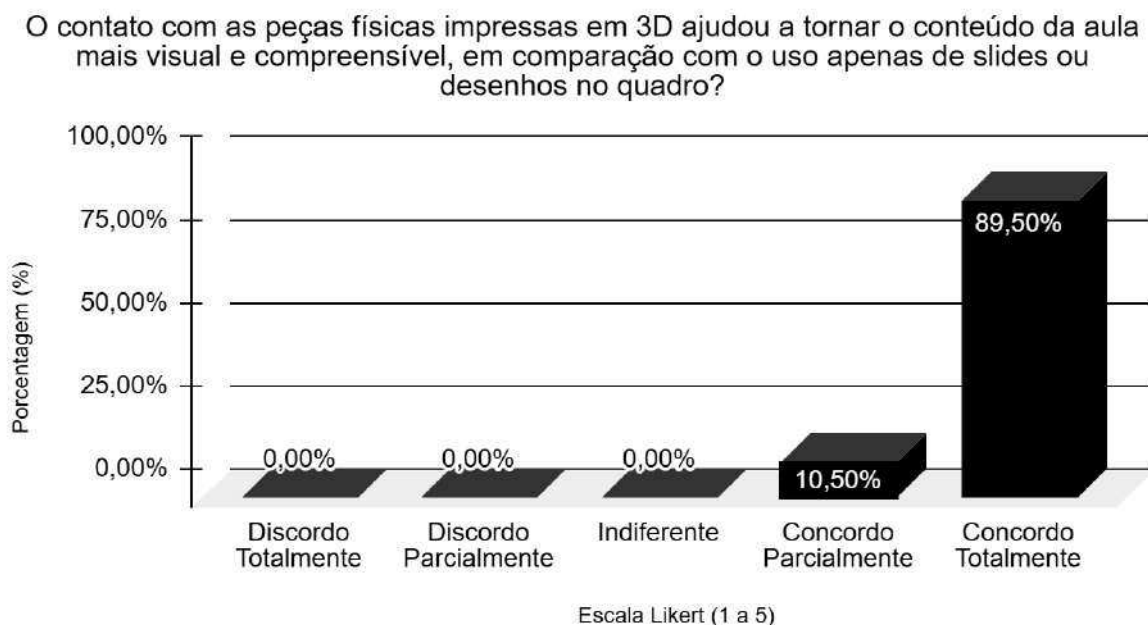


Questão 2: O Recurso da Impressão 3D (Visualização)

"O contato com as peças físicas impressas em 3D ajudou a tornar o conteúdo da aula mais visual e compreensível, em comparação com o uso apenas de slides ou desenhos no quadro?"

Este foi o maior ponto de convergência de toda a pesquisa. 89,5% dos discentes concordaram totalmente com a afirmação e 10,5% parcialmente (Figura 57). A unanimidade na concordância total valida a hipótese central deste trabalho: a materialização dos projetos através da Manufatura Aditiva elimina a barreira da abstração. Ao manusear peças físicas, o aluno deixa de imaginar o erro geométrico e passa a senti-lo tátil e visualmente. Esse dado confirma que a Impressão 3D não atuou apenas como uma ferramenta acessória, mas como o elemento diferencial que garantiu a compreensibilidade do conteúdo.

Figura 57 – Gráfico referente à Questão 2



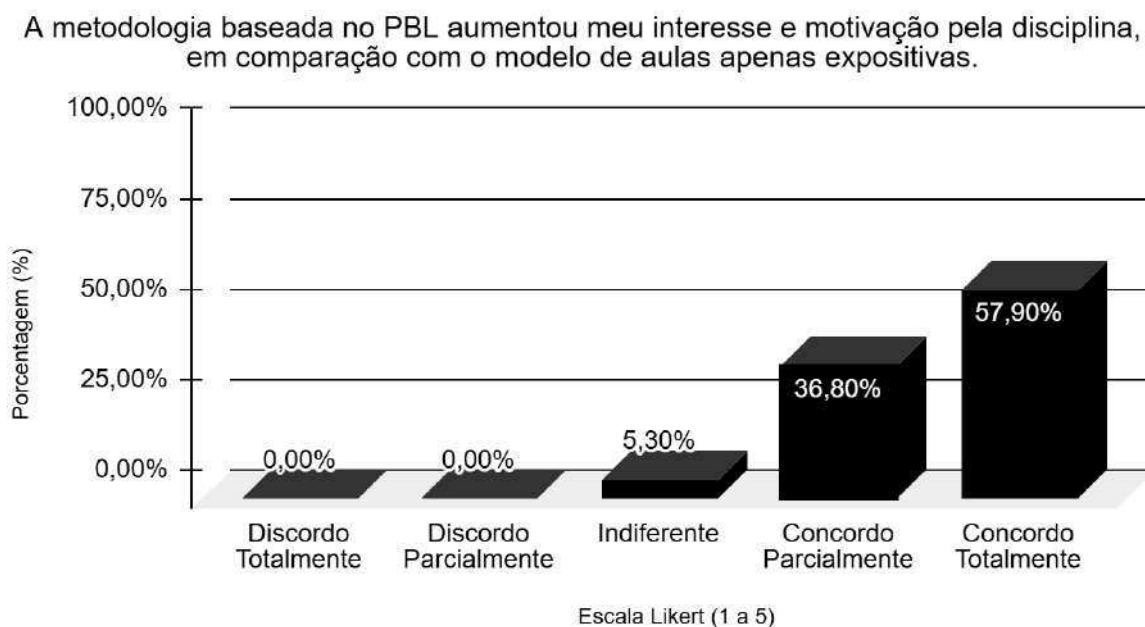
Fonte: Autor (2025).

Questão 3: Motivação e Metodologia Ativa (PBL)

"A metodologia baseada no PBL aumentou meu interesse e motivação pela disciplina, em comparação com o modelo de aulas apenas expositivas?"

Observou-se que 57,9% concordaram totalmente e 36,8% concordaram parcialmente (Figura 58). Sendo a motivação um pré-requisito essencial para a aprendizagem profunda, este resultado é um dos indicadores mais importantes da pesquisa. Ele demonstra que a estratégia de colocar o aluno como protagonista de um "projeto real" (PBL) rompe com a passividade tradicional. Ao verem sentido naquilo que estavam produzindo (um mecanismo funcional), os discentes desenvolveram um interesse intrínseco pela disciplina, provando que a integração entre projeto e manufatura é um motor eficaz para o engajamento acadêmico.

Figura 58 – Gráfico referente à Questão 3



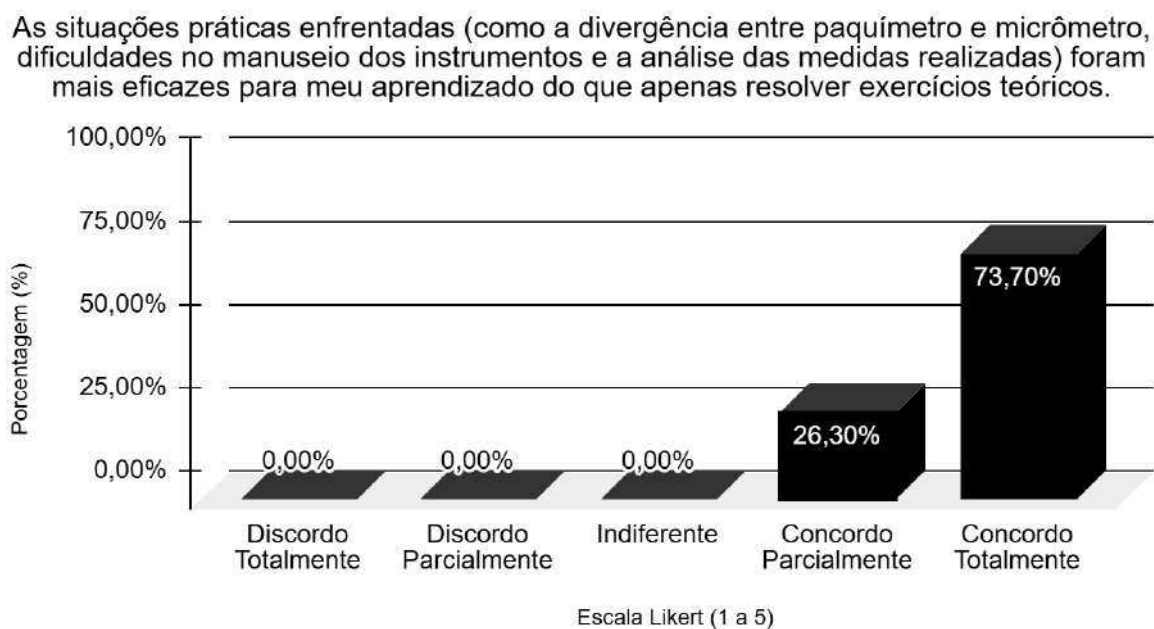
Fonte: Autor (2025).

Questão 4: Eficácia das Situações Práticas (Resolução de Problemas Reais)

"As situações práticas enfrentadas (como a divergência entre paquímetro e micrômetro, dificuldades no manuseio e análise das medidas) foram mais eficazes para meu aprendizado do que apenas resolver exercícios teóricos?"

A totalidade da turma (100%) validou essa afirmação, sendo 73,7% concordando totalmente e 26,3% parcialmente (Figura 59). Este dado reforça a essência do PBL: o aprendizado através da resolução de problemas. As dificuldades relatadas durante as aulas, como a divergência de leituras entre instrumentos ou dúvidas na zona de incerteza, não foram falhas pedagógicas, mas sim simulações fiéis da realidade industrial. O resultado mostra que os alunos valorizaram a oportunidade de enfrentar desafios típicos de "chão de fábrica", desenvolvendo um pensamento crítico e analítico que a simples resolução de exercícios de livro não seria capaz de proporcionar.

Figura 59 – Gráfico referente à Questão 4



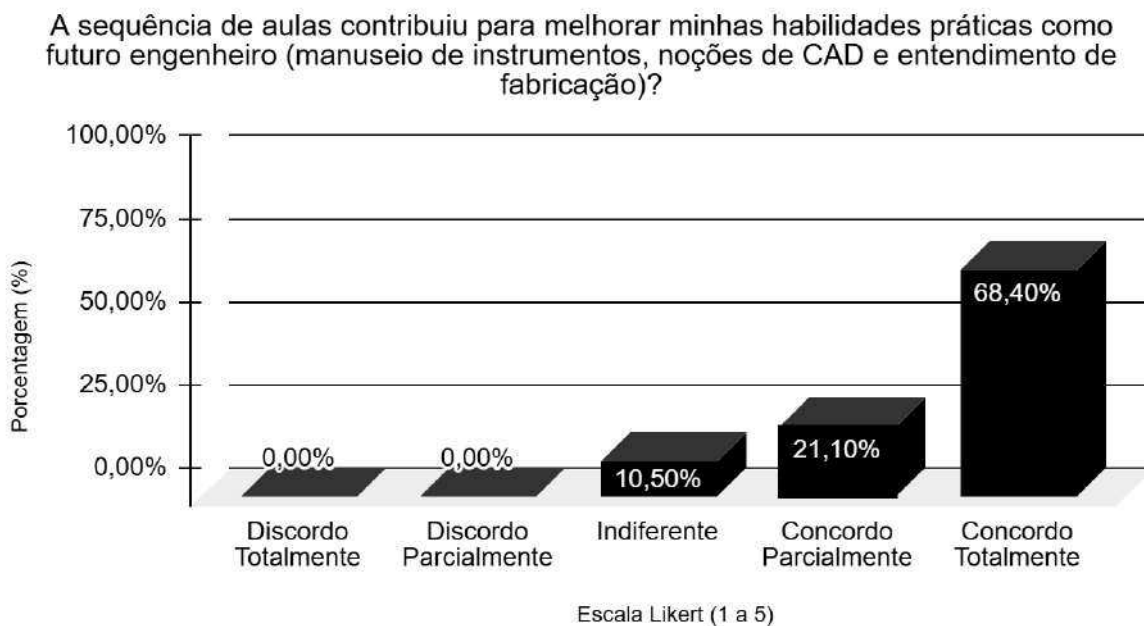
Fonte: Autor (2025).

Questão 5: Desenvolvimento de Habilidades Práticas

"A sequência de aulas contribuiu para melhorar minhas habilidades práticas como futuro engenheiro (manuseio de instrumentos, noções de CAD e entendimento de fabricação)?"

Os resultados mostram que 68,4% concordaram totalmente e 21,1% parcialmente. Contudo, 10,5% dos respondentes declararam-se "Indiferentes" (Figura 60). Uma análise do perfil das turmas permite inferir que essa indiferença provém dos alunos de Engenharia de Produção. Diferentemente da Engenharia Mecânica, onde o CAD e a manufatura são competências centrais, para a Produção o foco tende a ser gerencial. Esse dado aponta a oportunidade de, em aplicações futuras, adaptar a linguagem para evidenciar a importância da metrologia também no controle de processos e gestão da qualidade.

Figura 60 – Gráfico referente à Questão 5



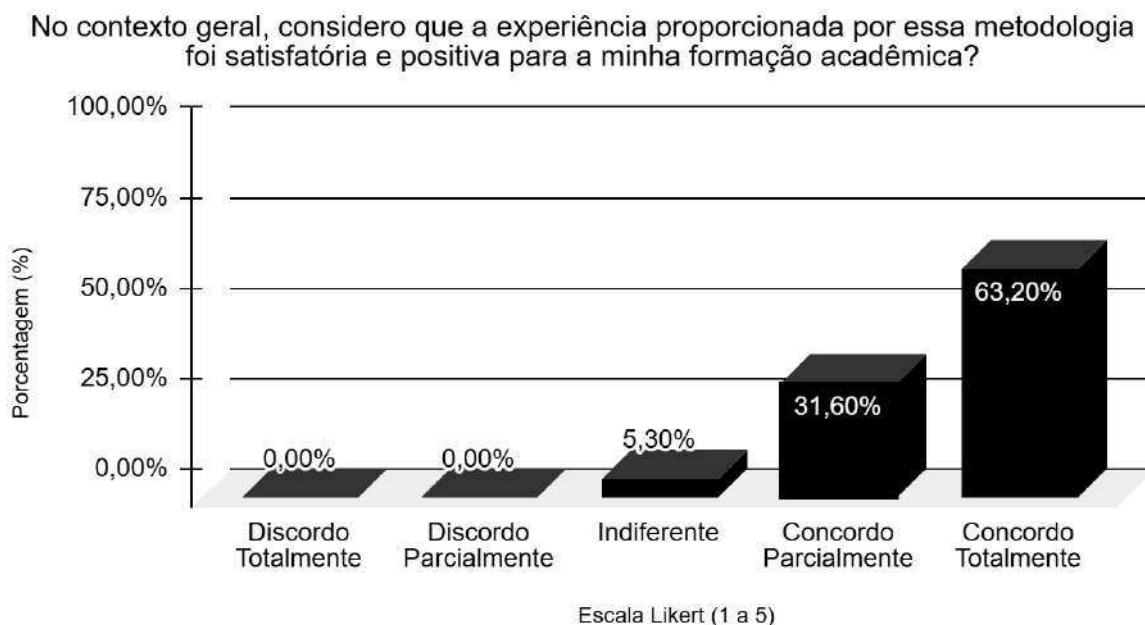
Fonte: Autor (2025).

Questão 6: Impacto na Formação Acadêmica (Satisfação Global)

"No contexto geral, considero que a experiência proporcionada por essa metodologia foi satisfatória e positiva para a minha formação acadêmica?"

A avaliação geral foi altamente positiva: 63,2% concordaram totalmente, 31,6% parcialmente e apenas 5,3% mantiveram-se indiferentes (Figura 61). A relevância deste indicador reside no fato de os alunos reconhecerem que a metodologia contribuiu para sua formação acadêmica ampla, transcendendo os limites da disciplina de Metrologia. A experiência integrou conhecimentos de desenho, fabricação, estatística e instrumentação, oferecendo uma visão sistêmica da engenharia. O feedback discente confirma que o projeto agregou valor ao currículo, preparando-os melhor para os desafios multidisciplinares da profissão.

Figura 61 – Gráfico referente à Questão 6



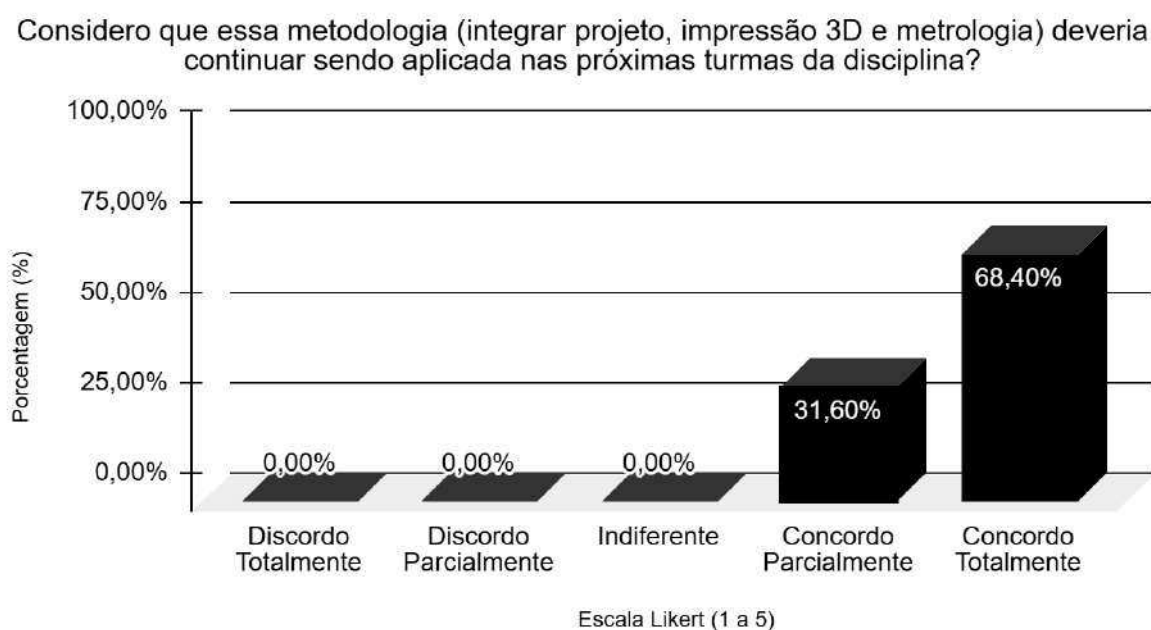
Fonte: O autor (2025).

Questão 7: Continuidade e Recomendação

"Considero que essa metodologia deveria continuar sendo aplicada nas próximas turmas da disciplina?"

Finalizando a avaliação, 68,4% dos alunos concordaram totalmente e 31,6% concordaram parcialmente (Figura 62). O fato de 100% da turma recomendar a continuidade da metodologia é o indicador definitivo de sucesso e sustentabilidade da proposta. Esse consenso absoluto funciona como um "selo de qualidade" conferido pelos próprios discentes, atestando que a substituição ou complementação das aulas tradicionais por práticas com impressão 3D e PBL é não apenas viável, mas desejável para a evolução do ensino de engenharia na instituição.

Figura 62 – Gráfico referente à Questão 7



Fonte: O autor (2025)

4.3.2 Análise Qualitativa: Relatos Espontâneos e Validação da Aprendizagem.

Durante o seminário de encerramento, além da avaliação formal realizada pelo docente, observou-se um fenômeno relevante de validação espontânea da metodologia. O ambiente de discussão fomentou relatos onde os discentes externaram a evolução de sua percepção ao longo do semestre.

A. A Ressignificação do Processo de Medição: Um dos pontos mais citados foi a mudança de postura em relação ao rigor metodológico. Relatos indicaram que, inicialmente (Prática 1), houve resistência e incompreensão por parte de alguns alunos quanto à necessidade de realizar múltiplas medições na mesma peça, tarefa interpretada naquele momento como "repetitiva" ou "perda de tempo". Contudo, com o avanço das práticas e a introdução dos conceitos teóricos de incerteza e estatística, os discentes relataram ter compreendido a real necessidade da amostragem para garantir a confiabilidade do processo final. Essa evolução ficou evidente na seguinte fala registrada:

"No começo, quando o senhor mandou medir 40 vezes a mesma peça, eu achei que era besteira, perda de tempo. Mas depois, vendo os gráficos e os erros aparecendo, eu entendi que se medir só uma vez a gente não confia no resultado"
— (Ronald Clímaco, 2026).

B. A Concretização da Teoria: Um segundo ponto de convergência foi a capacidade da Manufatura Aditiva de tornar tangíveis os conceitos abstratos. Diversos alunos enfatizaram que a visualização física das peças facilitou a compreensão de temas complexos, que antes pareciam apenas "números no quadro". Um relato significativo que ilustra essa percepção foi:

"Nas aulas teóricas era difícil visualizar, mas pegando na peça impressa eu entendi o que é uma zona de tolerância, por exemplo. Se torna mais produtivo o aprendizado e entendimento do conteúdo" — (Maria Júlia, 2026).

C. Engajamento e Comparação com o Ensino Tradicional: Por fim, confirmando os dados quantitativos sobre motivação, houve manifestações expressas sobre a dinâmica da metodologia PBL em comparação ao modelo tradicional. Os discentes valorizaram o desafio de lidar com um "projeto de engenharia" completo, como evidenciado na seguinte fala:

"Foi muito melhor ter esse desafio prático do que fazer prova. Na prática a gente consegue aplicar com mais facilidade e entender o que estamos vendo na teoria. enquanto na prova só aplicamos a fórmula e pronto" — (Antonio Ismael, 2026).

Esses registros qualitativos corroboram os indicadores estatísticos apresentados anteriormente, confirmando que a metodologia proposta não apenas transmite o conteúdo técnico, mas também desenvolve a percepção crítica e a maturidade científica dos estudantes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho atingiu seu objetivo geral ao desenvolver e avaliar o impacto da Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL) na disciplina de Metrologia e Avaliação Dimensional. A investigação confirmou que a utilização da manufatura aditiva como ferramenta didático-experimental foi o elemento viabilizador para que os discentes vivenciassem o ciclo completo de engenharia. A proposta de substituir ou complementar o modelo tradicional expositivo por práticas de projeto, fabricação e medição de mecanismos reais mostrou-se não apenas viável, mas pedagogicamente eficaz.

A implementação do PBL promoveu uma mudança estrutural na dinâmica de ensino. Ao complementar a postura passiva tradicional pela resolução de um problema real, os alunos assumiram o protagonismo do aprendizado. Esse resultado corrobora a visão de Borges et al. (2022), ao demonstrarem que, enquanto o modelo tradicional posiciona o aluno como receptor, a metodologia ativa aplicada demandou a integração de múltiplos conhecimentos para o desenvolvimento de soluções viáveis. Para viabilizar essa dinâmica, o objetivo de selecionar e fabricar protótipos tridimensionais foi cumprido com êxito, resultando na produção de kits didáticos funcionais.

O desafio de transformar um modelo digital (CAD) em um produto físico obrigou os estudantes a superarem a fragmentação do conhecimento. Conforme alertam Santos, Xavier e Silva (2024), métodos tradicionais tendem a dissociar conteúdos de contextos reais; em contraste, a prática proposta exigiu raciocínio interdisciplinar, permitindo que os discentes compreendessem a utilidade do que aprendiam ao conectar projeto, manufatura e metrologia. Com a aplicação das atividades práticas de medição utilizando os protótipos produzidos, a metodologia revelou-se um instrumento diagnóstico poderoso, expondo lacunas de formação (como visão espacial e leitura de nônio) que passariam despercebidas em aulas puramente teóricas.

Ao investigar a influência dos protótipos na compreensão dimensional, constatou-se que a manufatura aditiva desempenhou um papel central nesse ecossistema pedagógico. Mais do que uma tecnologia de produção, ela atuou como o agente de concretização do PBL. A análise da percepção discente revelou que, para 89,50% das turmas, a materialização dos projetos foi determinante para a compreensão de conceitos abstratos. Sem a impressão 3D, o "problema" do PBL permaneceria no campo teórico; com ela, tornou-se tátil, permitindo que erros de interpretação fossem confrontados e corrigidos na prática, simulando a realidade do chão de fábrica.

Quantitativamente, a metodologia obteve validação robusta, com 100% de recomendação por parte dos participantes e a alta taxa de motivação relatada confirmam que o modelo PBL gera um engajamento superior ao ensino convencional. Um ponto crucial observado foi a ressignificação das falhas operacionais. Alinhando-se ao que propõem Monaro et al. (2018), o erro deixou de ser tratado como falha individual e passou a ser entendido como parte do processo investigativo. As dificuldades enfrentadas pelos alunos, sejam operacionais ou de cálculo, configuraram-se como oportunidades de revisão de estratégias, criando um ambiente de aprendizagem realista, onde testar, errar e corrigir são elementos inerentes à inovação.

Conclui-se, portanto, que a integração entre PBL e Manufatura Aditiva cumpre com êxito o propósito de modernizar o ensino de Metrologia. A pesquisa demonstrou que é possível formar engenheiros mais preparados e conscientes da importância da qualidade dimensional, utilizando tecnologias acessíveis para transformar a sala de aula em um ambiente de experimentação real, onde medir não é apenas uma tarefa repetitiva, mas a etapa final de validação de um projeto de engenharia.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Para dar continuidade a esta linha de pesquisa e aprimorar a metodologia desenvolvida, sugerem-se as seguintes propostas:

- **Análise Comparativa de Processos:** Realizar um estudo comparativo entre peças impressas em diferentes tecnologias (FDM vs. Resina SLA) para que os alunos analisem como o processo de fabricação influencia a rugosidade superficial e a precisão dimensional das peças medidas.
- **Influência do Material na Exatidão Dimensional:** Investigar o comportamento de diferentes termoplásticos no contexto educacional, comparando o PLA (utilizado neste trabalho) com materiais de engenharia como o PETG ou ABS. Sugere-se estudar como a contração térmica e a estabilidade dimensional de cada polímero afetam os ajustes e tolerâncias dos mecanismos impressos.
- **Integração com Engenharia de Produção:** Adaptar os roteiros práticos para incluir conceitos de Controle Estatístico de Processo (CEP), fazendo com que os alunos produzam lotes maiores de peças para gerar cartas de controle, aproximando a prática da realidade de gestão da qualidade industrial.
- **Otimização Logística da Manufatura:** Expandir a capacidade produtiva utilizando outras máquinas disponíveis na instituição. A implementação de uma manufatura distribuída permitiria a impressão simultânea de múltiplos projetos, reduzindo significativamente o tempo de espera (*lead time*) para a entrega dos protótipos e mitigando eventuais conflitos com o calendário acadêmico.

REFERÊNCIAS

- 3D LAB. **29 principais erros de impressão e como resolvê-los: guia completo!**. 3D Lab, 6 ago. 2025. Disponível em: <https://3dlab.com.br/tag/erros-de-impressao/>. Acesso em: 13 dez. 2025.
- 3D LAB. **Como escolher e comprar uma impressora 3D: guia completo**. 3D Lab, 2025. Disponível em: <https://3dlab.com.br/comprar-uma-impressora-3d/>. Acesso em: 13 dez. 2025.
- 3D LAB. **Tipos de preenchimento na impressão 3D**. 3D Lab, 2025. Disponível em: <https://3dlab.com.br/tag/tipos-de-preenchimento/>. Acesso em: 13 dez. 2025.
- 3DNATIVES. **Micro Delta Rework: overview, specs & features**. 3DNatives, 2025. Disponível em: <https://www.3dnatives.com/3d-materials/en/3d-printers/micro-delta-rework/>. Acesso em: 13 dez. 2025.
- ADDITIVE-X. **6 effects of part orientation on 3D printed parts**. Additive-X, 2023. Disponível em: <https://www.additive-x.com/blog/6-effects-of-part-orientation-on-3d-printed-parts>. Acesso em: 13 dez. 2025.
- AGOSTINHO, Oswaldo Luiz; RODRIGUES, Antonio Carlos dos Santos; LIRANI, João. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões: princípios de engenharia de fabricação mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Blucher, 2020. ISBN 978-8521214632.
- ALBERTAZZI JR, ARMANDO; SOUSA, ANDRÉ R. **Metrologia Científica e Industrial - 2ª ed**. Manole: 2018.
- ANDRADE, João Carlos de.; CUSTÓDIO, Rogério. **O Uso da Balança Analítica**. Chemkeys, 2000.
- ANDRADE, Patrick Alan de Menezes. Efeito das dimensões na precisão dimensional de peças fabricadas por impressão 3D utilizando PLA. 2023. **Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica)** - Campus de Russas, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/75209>. Acesso em: 20 dez. 2025.
- ARAÚJO, Nuno Humberto Carvalho. O papel da manufatura aditiva na competitividade das empresas do setor metalúrgico e metalomecânico num contexto de mudança. **Tese (Doutorado)** - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, 2022. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/143658/1/Araujo_2022.pdf. Acesso em: 16 nov. 2025.
- ARAÚJO, Vinicius Cavalcante. Manufatura aditiva e suas aplicações na indústria: uma revisão de literatura. 2021. 94f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Engenharia

Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Russas, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/57827>. Acesso em: 16 dez. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6158: Sistema de tolerâncias e ajustes**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 79 p. Disponível em: <https://professor.luzerna.ifc.edu.br/charles-assuncao/wp-content/uploads/sites/33/2016/07/NBR-6158-Sistema-de-toler%C3%A2ncias-e-ajustes.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2025.

BARBOSA, Francisco Tiago Araújo; PERUCHI, Rogério Santana. Principais fatores e respostas utilizados na modelagem e otimização de impressão 3D utilizando modelagem por deposição fundida: revisão sistemática da literatura. In: **XII Simpósio de Engenharia de Produção (SIMEP)**, 12., 2024, Rio de Janeiro, RJ. Anais... Rio de Janeiro: Universidade Veiga de Almeida / SIMEP, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/380549383_PRINCIPAIS_FATORES_E_RESPOSTAS_UTILIZADOS_NA_MODELAGEM_E_OTIMIZACAO_DE_IMPRESSAO_3D_UTILIZANDO_MODELAGEM_POR_DEPOSICAO_FUNDIDA_REVISAO_SISTEMATICA_DA_LITERATURA. Acesso em: 19 dez. 2025.

BOROCHOVICIUS, Eli; TASSONI, Elvira Cristina Martins. Aprendizagem baseada em problemas: uma experiência no ensino fundamental. **Educação em Revista**, Belo Horizonte, v. 37, e20706, 2021. DOI: 10.1590/0102-469820706. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/edur/a/qWyNpVw94bycsjL9Qw6pZxC/>. Acesso em: 16 dez. 2025.

BITFAB. **Problemas comuns de impressão 3D e como resolvê-los**. Bitfab, 2025. Disponível em: <https://bitfab.io/pt-pt/blog/problemas-impresao-3d/>. Acesso em: 13 dez. 2025.

BORGES, Isabela da Rosa; FONTOURA, Luiz Guilherme Oliveira; RAMOS, Maria Júlia Arantes; NUNES, Maria do Carmo Holanda; CASTILHO-FERNANDES, Andrielle de; RIBEIRO, Juliane Aparecida Diniz; MORAES FILHO, Aroldo Vieira de. Metodologia ativa: um paralelo entre o método PBL e o tradicional para os cursos de medicina. **Conjecturas**, v. 22, n. 15, p. 876-883, nov./dez. 2022. DOI: 10.53660/conj-1952-2r01. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/365480910_Metodologia_ativa_um_paralelo_entre_o_metodo_PBL_e_o_tradicional_para_os_cursos_de_medicina. Acesso em: 16 dez. 2025.

BRAGA, Luísa Miranda. Manufatura aditiva: uma análise de aplicações atuais. 2017. **Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Mecânica)** – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/33323/33323.PDF>. Acesso em: 18 dez. 2025.

BRANDI, Humberto Siqueira. **Um passeio no tempo com as medições**: do cúbito ao metro. In: COSTA-FÉLIX, Rodrigo P. B.; BERNARDES, Américo T. (Orgs.). *Metrologia. Volume 1: fundamentos*. Rio de Janeiro: Brasport, 2017. cap. 1.

BRITO, Ronaldo Borges de. Aplicação da metrologia na manufatura aditiva. **Anuário de resumos expandidos apresentados no VIII SAPCT - SENAI CIMATEC**, 2023. Disponível em: <https://doity.com.br/anais/sapct/trabalho/280651>. Acesso em: 13 nov. 2025.

COELHO, Arthur Wilson Fonseca; ARAÚJO, Anna Carla; THIRÉ, Rossana Mara da Silva Moreira. Manufatura aditiva por estereolitografia: análise da geometria da peça e da influência da posição e orientação de fabricação. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 600-607, 2018. DOI: 10.1590/S1517-707620180004.0600. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/sqSrvrKyZztCfLhN67LQHMq/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 22 dez. 2025.

ELETRO GATE. **Impressoras 3D: como funcionam e quais os tipos existentes**. Eletro Gate, 2025. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/impressoras-3d-como-funcionam-e-quais-os-tipos-existent/>. Acesso em: 13 dez. 2025.

ENGIPRINTERS. **O que é e como funciona a impressão SLA (estereolitografia)**. EngiPrinters, 2025. Disponível em: <https://engiprinters.com.br/o-que-e-e-como-funciona-a-impressao-sla/>. Acesso em: 13 dez. 2025.

FANHA, Miryam Cardoso Alcobia. Estudo de estratégias de medição para controle do dimensionamento geométrico e toleranciamento (GD&T) em peças estampadas. 2011. 131 f. **Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica)** — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/388_apostilacep_2012.pdf. Acesso em: 16 dez. 2025.

FILAMENT2PRINT. **Extrusão direta vs. Bowden: o que é e quais as diferenças?** Filament2Print, 2024. Disponível em: <https://filament2print.com/pt/blog/extrusao-directa-bowden>. Acesso em: 13 dez. 2025.

FURTADO, Anderson Elias; NASCIMENTO, Denise Ferreira Laurito; SILVA, José Wilson de Jesus. Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL) aplicada simultaneamente para estudantes de engenharia de 3º e 7º períodos como ferramenta motivacional. **Revista Práxis**, Vol. 10, n. 19, 2018. DOI: 10.47385/praxis.v10.n19.788. Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/praxis/article/view/788>. Acesso em: 12 dez. 2025.

GONÇALVES, Elisabeth Borges.; ANTONIASSI, Rosemar. Incerteza em resultados analíticos e verificação de conformidade de qualidade de alimentos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos (Food Science and Technology)**, v. 30, n. 4, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000400013>. Acesso em: 16 dez. 2025.

GUEY, W. **Tipos de materiais de Impressão 3D e suas aplicações**. Disponível em: <https://www.printit3d.com.br/post/tipos-de-materiais-de-impress%C3%A3o-3d-e-suasaplica%C3%A7%C3%B5es>. Acesso em: 18 dez. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Avaliação de dados de medição — o papel da incerteza de medição na avaliação da conformidade**: suplemento 6 do “Guia para a expressão de incerteza de medição” (JCGM 106:2012). Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2022.

Disponível em:

<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/suplemento-6-do-guia-para-a-expressao-de-incerteza-de-medicao-gum/AvaliacaoConformidadeBaratto300622.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2025.

KDM FAB. **Manufatura aditiva e subtrativa**: o que são e quais as diferenças. KDM FAB. Disponível em: <https://kdmfab.com/pt/manufatura-aditiva-subtrativa/>. Acesso em: 21 dez. 2025.

KOBAYOSHI, Marcelo. **Calibração de instrumentos de medição**. São Paulo: SENAI-SP, 2012.

LANGARO, Diego Darci. **Equipamentos de controle dimensional e geométrico**. 49 p. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2017.

LIM, Thearath. Problem-Based Learning: Benefits, Challenges, and the Way Forward. In: K. Heng, K. Sol, S. Kaing, & S. Em (Eds.), Innovations and challenges. In: **Cambodian education: Youth’s perspectives. Cambodian Education Forum 2023**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/375671323_Problem-Based_Learning_Benefits_Challenges_and_the_Way_Forward. Acesso em: 11 nov. 2025.

MANUTENÇÃO NA. **Manutenção e calibração de equipamentos de medição**. Contagem, MG: Manutenção NA. Disponível em: <https://www.manutencaona.com.br/manutencao-calibracao-equipamentos-medicao>. Acesso em: 13 dez. 2025.

MARQUES, Nelson Luiz Reyes.; DUTRA, Graciela Garcia. Aprendizagem de medição: integração de conhecimentos espontâneos e científicos sob a perspectiva histórico-cultural. **RBECM**, Passo Fundo, v. 8, n. 1, p. 302 - 319, 2025.

MONARO, Renato Luis Garrido; BOECHAT, Fernando Oliveira; SANTOS, Flávio Lopes dos; SATOLO, Eduardo Guilherme; PAGANOTTO, Ellisa. Metodologias ativas no ensino de Engenharia de Produção: relato da aplicação dos métodos PBL e TBL em uma IES privada do Espírito Santo. In: **XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), Maceió, AL, Brasil, 16 – 19 out. 2018**. Disponível em: https://www.academia.edu/72015948/Metodologias_Ativas_No_Ensino_De_Engenharia_De_Producao_Relato_Da_Aplicacao_Dos_Metodos_PBL_E_TBL_Em_Uma_IES_Privada_Do_Espirito_Santo. Acesso em: 13 dez. 2025.

MORAES, Fernanda Carpintero de. Um passo de cada vez: conhecendo as unidades de medida através da sua história. 2019. 99 f. **Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional – PROFMAT)** – Universidade Federal de São Carlos, São

Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/1163020>. Acesso em: 15 dez. 2025.

MORAIS, Sávio Klemerson Alves de; MENDONÇA, Francisca Jeanne Sidrim de Figueiredo; SILVA, Antônio Luís Araújo; ANDRADE, Dalila Rayanne do Nascimento; FEITOSA, Amanda Duarte. A metrologia como ferramenta para o controle de qualidade em uma indústria de eletrodomésticos. In: **CONBRepro – Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2019**, Ponta Grossa, PR. Anais... Ponta Grossa: APREPRO, 2019. p. 1-12.

Disponível em:

https://aprepro.org.br/conbrepro/2019/anais/arquivos/09302019_210953_5d92991570089.pdf.

Acesso em: 16 dez. 2025.

MOREIRA, Rui. Conceiving a non-contact measurement system for the polymer temperature at the nozzle exit of a FDM 3D printer. 2016. 151 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)** — Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), Porto, 2016.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/321011096_Conceiving_a_non-contact_Measurement_System_for_the_Polymer_Temperature_at_the_Nozzle_Exit_of_a_FDM_3D_Printer.

Acesso em: 13 dez. 2025.

NOGA, Liliane. Desafios na formação do engenheiro-docente: novas DCNs, tecnologias da educação e da Indústria 4.0. 2021. 237 f. **Dissertação (Mestrado em Educação: Currículo)** – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em:

<https://tede.pucsp.br/bitstream/handle/23846/1/Liliane%20Noga.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2025.

PARMEGIANI, Roselice. O metro e seus submúltiplos. **Ensino de Matemática**. Disponível em: <https://www.ensinandomatematica.com/o-metro-e-seus-submultiplos>. Acesso em: 19 dez. 2025

PINHEIRO, Cristiano Max Pereira; MOTA, Gabriela Ehlers; STEINHAUS, Camilla; SOUZA, Mikaela de. Impressoras 3D: uma mudança na dinâmica do consumo. **Signos do Consumo**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 15-22, 2018. DOI:

10.11606/issn.1984-5057.v10i1p15-22. Disponível em:

<https://www.revistas.usp.br/signosdoconsumo/article/view/128758>. Acesso em: 19 dez. 2025

PRADO, Adolpho Nilson.; MATTOS, Eica Cristina do Amaral.; RODRIGUES, Fábio da Silva Adolpho. MANUFATURA ADITIVA: conceitos, aplicações e impactos na gestão. IN: **III Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação, Naviraí - MS, 2019**.

PRINT IT 3D. **Tipos de materiais de impressão 3D e suas aplicações**. Print It 3D.

Disponível em:

<https://www.printit3d.com.br/post/tipos-de-materiais-de-impress%C3%A3o-3d-e-suas-aplica%C3%A7%C3%B5es>. Acesso em: 21 dez. 2025.

REIS, Ricardo dos Santos; COSTA, Roberto Rogerio Santos; SILVA, Ruy Barbosa de Oliveira. Metodologia de impressão 3D. 2024. 29 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Curso Superior em Projeto de Estruturas Aeronáuticas) – Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos “Professor Jessen Vidal”, São José dos Campos, 2024. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/29956>. Acesso em: 19 dez. 2025.

RIBEIRO, José Luís Duarte; CATEN, Carla Schwengber ten. Controle estatístico do processo: cartas de controle para variáveis, cartas de controle para atributos, função de perda quadrática, análise de sistemas de medição. **Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2012. 172 p.** (Série Monográfica Qualidade). Disponível em: http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/388_apostilacep_2012.pdf. Acesso em: 15 dez. 2025.

ROCHA, Sammuel Henrique de Araújo; BORGES, Wênio Fhará Alencar; BRITO, Sthefanny Helena Rodrigues. A influência da metrologia nas ciências exatas, com foco no curso de Engenharia Mecânica. In: **XXIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica (CONEM), 2016**, Teresina, PI: CONEM, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328841986_A_influencia_da_metrologia_nas_ciencias_exatas_com_foco_no_curso_de_engenharia_mecanica. Acesso em: 19 dez. 2025.

ROFATTO, V. F.; MATSUOKA, M. T.; KLEIN, I. Precisão, Veracidade e Acurácia: Sobre Erros e Incertezas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 77, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv77n0a-74914>. Acesso em: 14 dez. 2025.

SANTOS, João Vitor Gomes dos. Reprojetor de impressora 3D de modelagem de deposição fundida. 2022. 51 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/32169/1/reprojetoimpressora3d.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2025.

SANTOS, Marcello Lopes dos. Aplicação do Problem Based Learning (PBL): uma percepção dos coordenadores dos cursos de Ciências Contábeis. 2014. 119 f. **Dissertação (Mestrado em Ciências Contábeis e Atuariais)** – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://repositorio.pucsp.br/bitstream/handle/1594/1/Marcello%20Lopes%20dos%20Santos.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2025.

SANTO, W. S.; XAVIER, P. H. F.; SILVA, L. M. B. A utilização da aprendizagem baseada em problemas (PBL) nas aulas de estatística em um curso superior. **CUADERNOS DE EDUCACIÓN Y DESARROLLO**, v.16, n.8, p. 01-16, 2024. DOI: 10.55905/cuadv16n8-136.

SARMENTO, Alan Kardec Carvalho. O desenvolvimento lógico-histórico do conceito de medida e o processo de significação na atividade pedagógica. 2019. **Tese (Doutorado em Educação)** – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. DOI:

10.11606/T.48.2020.tde-10122019-094300. Disponível em:
<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/48/48134/tde-10122019-094300/>. Acesso em: 12 dez. 2025

SCHIRIGATTI, Jackson Luis. **Metrologia**. 1. ed. [S. l.]: IESDE BRASIL S.A., 2023. 120 p. ISBN 978-65-5821-326-0.

SILVA, A. V.; VALENÇA, S. L.; SANTOS, C. P.; PEDRESCHI, O.; SANTOS, A. J. A metrologia como instrumento de controle do processo industrial / Metrology as an instrument of control Of the industrial process. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 7, n. 8, p. 83483–83493, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n8-518. Disponível em:
<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/34881>. Acesso em: 18 nov. 2025.

SILVA, F. P. da; OESTREICH, L. M.; MORENO, A. L. T. M.; AULER, G.; NASCIMENTO, B. P. do; JOHANN, T.; TISCHER, C. B.; MAROSTEGA, V. R.; ANDRADE, B. F. de; PADILLO, A. R. “Project-based learning” na engenharia: uma experiência prática de aprendizado lúdico em ambiente real. **Ciência e Natura**, [S. l.], v. 40, p. 98–106, 2019. DOI: 10.5902/2179460X35505. Disponível em:
<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/35505>. Acesso em: 12 dez. 2025.

SILVA, Vicente de Tarso Lobo de Macedo.; SOARES, Fred Carlo Moreira. **Desvio padrão e imprecisão de leitura**: paquímetro. Ciências exatas e tecnológicas, v. 5, n.3, p. 27-34, Outubro: 2019.

SILVEIRA, D. J. de A. S.; BOMFIM NETO, R.; SILVEIRA, K. M. de A. S.; DOS SANTOS JÚNIOR, E. L.; FERRO NETO, P. M.; PIMENTEL, D. Transtornos mentais e o impacto acadêmico em estudantes de medicina submetidos ao método de aprendizado baseado em problemas / Mental disorders and the academic impact on medical students submitted to the problem-based learning method. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 7, n. 8, p. 83040–83056, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n8-488. Disponível em:
<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/34785>. Acesso em: 09 dec. 2025.

SORATTO, Alexandre; BRITO, Márcio André Oliveira. Pequenos erros, grandes prejuízos. In: **Congresso Brasileiro de Metrologia – Metrologia 2023**, 28 nov. – 30 nov. 2023, Petrópolis, RJ. Petrópolis: METROLOGIA 2023. Disponível em:
https://metrologia2023.org.br/wp-content/uploads/2023/11/306340_pequenos-erros-grandes-prejuizos.pdf. Acesso em: 17 dez. 2025.

SOUZA, Cláudio Costa; ARENCIBIA, Rosenda Valdés. Adequação da calibração do micrômetro para externos à NBR ISO/IEC 17025. **Horizonte Científico**, Uberlândia, v. 5, n. 2, dez. 2011. Disponível em:
<https://seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/view/6350>. Acesso em: 12 dez. 2025.

SOUZA, R. E. de.; SCHIMIGUEL, J. **A importância da metodologia PBL- Aprendizagem Baseada em Problemas no aprendizado dos alunos e na formação dos professores.** Anais do Encontro de Produção Discente PUCSP/Cruzeiro do Sul. São Paulo. p. 1-10. 2014.

SOVOL SV08 3D PRINTER. **Impressora 3D CoreXY com nivelamento automático e conectividade Wi-Fi/Ethernet.** Amazon Brasil. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Sovol-SV08-imprensoras-nivelamento-independentes/dp/B0D5B1DM4N>. Acesso em: 11 dez. 2025.

TEC MECÂNICO. **Tolerância e ajustes.** Tec Mecânico, 10 jul. 2014. Disponível em: <https://tecmeccanico.blogspot.com/2014/07/tolerancia-e-ajustes.html>. Acesso em: 11 dez. 2025.

TRIDEO3D. **Guia completo sobre a altura de camadas na impressão 3D.** Trideo3D, 18 dez. 2024. Disponível em: <https://www.trideo3d.com/pt/blog-posts/guia-completa-sobre-la-altura-de-capas-en-la-impresion-3d>. Acesso em: 13 dez. 2025.

U/3DPRINTING. **Does moisture really effect your print quality?** Reddit, 1 maio 2022. Disponível em: https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/ed48ok/does_moisture_really_effect_your_print_quality/. Acesso em: 16. dez. 2025.

VANIN, C.; HISSASHI TAKEDA, H.; DA SILVA LOURENÇO, L. Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP): tabela periódica tradicional versus Ptable: Problem-Based Learning (PBL): traditional periodic table versus Ptable. **Revista Cocar**, [S. l.], v. 20, n. 38, 2024. Disponível em: <https://periodicos.uepa.br/index.php/cocar/article/view/7605>. Acesso em: 13 dez. 2025.

VIANA, Suzane Lins dos Santos; MEDEIROS NETA, Terezinha Neves de; SOUZA, Samir Cristino de. Aprendizagem baseada em problemas (ABP): cenários problemáticos aplicados à geografia no ensino médio. **Brazilian Journal of Development** [S. l.], 2021. Disponível em: https://cursosextensao.usp.br/pluginfile.php/772652/mod_folder/content/0/Aprendizagem%20baseada%20em%20problemas%20%28ABP%29%20cen%C3%A1rios%20problem%C3%A1ticosaplicados%20%C3%A0%20geografia%20no%20ensino%20m%C3%A9dio.pdf. Acesso em: 09 dez. 2025.

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D.** São Paulo: Blucher, 2017.

YEHIA, Hossam M.; HAMADA, Atef; SEBAEY, Tamer A.; ABD-ELAZIEM, Walaa. Selective laser sintering of polymers: process parameters, machine learning approaches, and future directions. **Journal of Manufacturing and Materials Processing, Basel**, v. 8, n. 5, p. 197, 2024. DOI: 10.3390/jmmp8050197. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-4494/8/5/197>. Acesso em: 22 dez. 2025.

APÊNDICE A – ROTEIROS DA PRIMEIRA PRÁTICA.

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

Classificação das peças 3D impressas no laboratório com paquímetro analógico e uma balança digital

BIELA MANIVELA

1. Apresentação

Quatro elementos serão necessários para a prática:

Paquímetro analógico

Balança digital

Peças 3D impressas no laboratório

Calculadora científica.

1.1. Paquímetro Analógico

O paquímetro analógico é um instrumento de medição de alta precisão utilizado para determinar dimensões lineares, como diâmetros externos, internos e profundidades. Ele possui uma escala fixa (em milímetros) e um nônio (ou vernier) que permite leituras com resolução geralmente de 0,02 mm. Seu funcionamento baseia-se no deslizamento do cursor sobre a haste principal, possibilitando medições rápidas e confiáveis sem necessidade de energia elétrica.

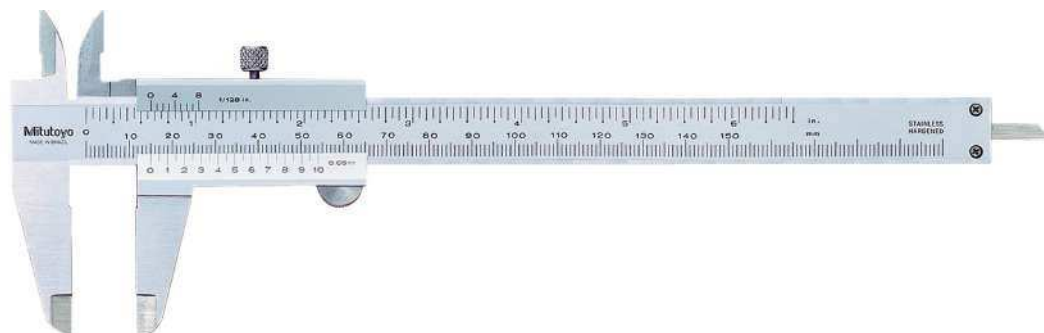


Figura 1 –Paquímetro analógico.

1.2. Balança digital

A balança digital é um instrumento utilizado para a medição precisa de massa. Nessa atividade de metrologia, ela foi empregada para verificar a massa de peças impressas em 3D, permitindo comparar valores teóricos e reais, além de avaliar possíveis variações decorrentes do processo de fabricação.



Figura 2 –Balança digital.

1.3. Peças 3D impressas no laboratório

As peças impressas em 3D foram desenvolvidas com o objetivo de proporcionar uma experiência prática de medição dimensional, permitindo que os alunos apliquem os conceitos estudados em Metrologia de forma concreta. Foram elaborados cinco projetos distintos, cada um voltado para diferentes tipos de medições e características geométricas, simulando situações reais de fabricação. Cada modelo foi projetado considerando tolerâncias, superfícies de referência e dimensões críticas. A utilização da manufatura aditiva possibilita a produção de geometrias complexas com baixo custo e rápida execução,



Figura 3 – Projeto: Roda de Genebra.

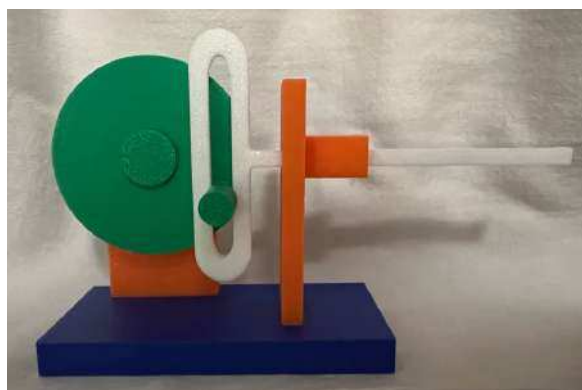


Figura 4 – Projeto: Garfo Escocês.



Figura 5 – Projeto: Engrenagem Planetária.



Figura 6 – Projeto de movimento rotativo em linear.



Figura 7 – Projeto: Biela Manivela.

1.4. Calculadora científica

A calculadora científica é uma ferramenta essencial para a realização de cálculos estatísticos e metrológicos, como média aritmética, desvio padrão e variância. Seu uso permite agilizar o tratamento dos dados obtidos nas medições, reduzindo erros de cálculo e garantindo maior precisão nos resultados. Durante as práticas, ela auxilia na análise e interpretação dos valores medidos.



Figura 8 - Exemplo de uma calculadora científica.

Comprimento

(b) Com base no desvio padrão das indicações obtidas e no respectivo coeficiente “t” de Student calcule a repetitividade para 95% de nível de confiança de todas as medidas.

(c) O erro aleatório para cada indicação pode ser calculado subtraindo a indicação do valor médio de todas as indicações. Verifique que pelo menos em 95% das indicações obtidas o erro aleatório está dentro da faixa delimitada pela repetitividade ($\pm Re$).

2.2. Tendência e correção

(a) Utilize o mesmo conjunto de 20 indicações resultantes das medições repetidas a respeito do pistão, realizada na questão 2.1.(a). Utilize o valor médio e calcule a tendência da balança e do paquímetro analógico para a massa de 5,63 g, do diâmetro externo de 30 mm e do comprimento de 27 mm. Calcule também a correção.

(b) Agora faça 20 medições repetidas do suporte da base. Calcule a tendência e a correção para a massa de 7,23 g, do diâmetro externo de 40 mm e comprimento de 54,8 mm. Compare com os valores obtidos para o pistão. Por que são diferentes?

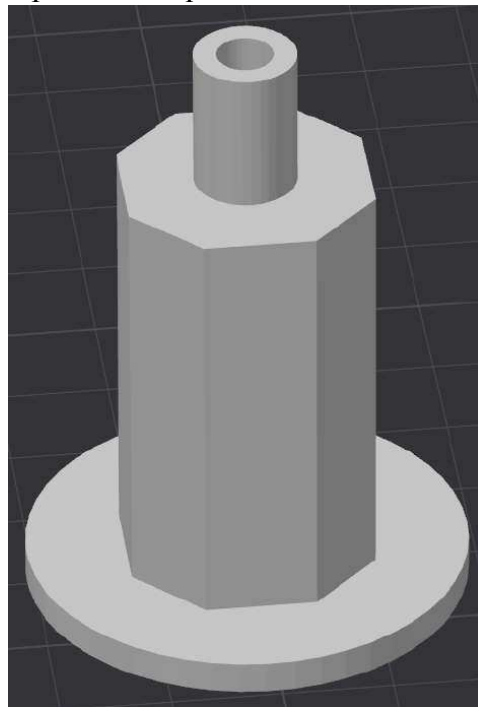


Figura 10 - Suporte da base.

Massa

Diâmetro

Comprimento

2.3. Calibração da balança e do paquímetro

Faça uma calibração da balança e do paquímetro com a intenção de compensar erros sistemáticos em futuras medições. Planeje detalhadamente a calibração seguindo os passos do roteiro abaixo:

- 1 - Identifique claramente os objetivos da calibração.
- 2 - Caracterize o sistema de medição a calibrar.
- 3 - Selecione o conjunto de padrões a usar.
- 4 - Defina os pontos de calibração e o número de repetições a serem realizadas para cada ponto de calibração. Use pelo menos dez pontos de calibração bem distribuídos ao longo da faixa de medição. Planeje passo a passo o experimento. Prepare as planilhas que conterão os dados brutos da calibração.
- 5 - Execute a calibração conforme o roteiro planejado.
- 6 - Processe e documente os resultados. Trace a curva de erros da balança contendo a linha da tendência e as linhas que delimitam a região dentro do qual o erro de medição é esperado.
- 7 - Analise os resultados da calibração e estime o erro máximo.

8 - Apresente tudo no relatório de calibração.

2.4. Determinação da soma de massas

(a) Pese individualmente, por 10 vezes, cada uma das seguintes peças: Base (41,82 g) + Pistão (5,63 g) + Biela (3,13 g). Em seguida, pese a combinação das três peças juntas também por 10 vezes. Utilize esses dados para calcular a incerteza individual de cada peça, a incerteza combinada das peças por método analítico e compare com a incerteza obtida ao medir o conjunto diretamente na balança.

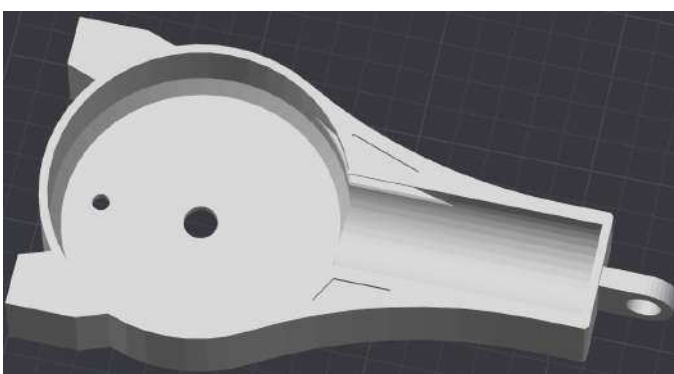


Figura 11 – Base.

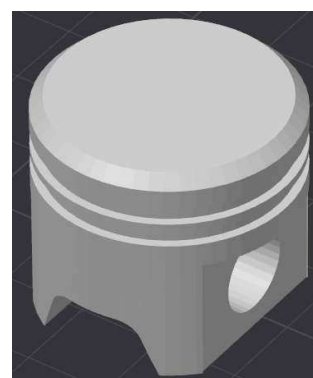


Figura 12 – Pistão.

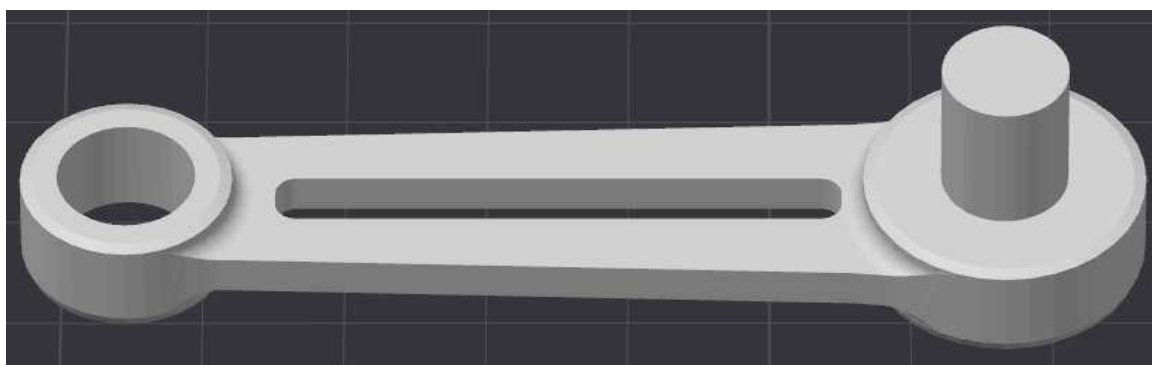


Figura 13 – Biela.

(b) Remova as massas da etapa anterior e pese individualmente, por 10 vezes, cada uma das seguintes peças: Virabrequim (3,17 g) + Haste da Manivela (3,44 g) + Pino da Biela (1,01 g) + Suporte da base (7,23 g). Em seguida, pese a combinação dessas quatro peças juntas também por 10 vezes. Utilize esses dados para calcular a incerteza individual de cada peça, a incerteza combinada por método analítico e compare com a incerteza obtida ao medir o conjunto diretamente na balança.

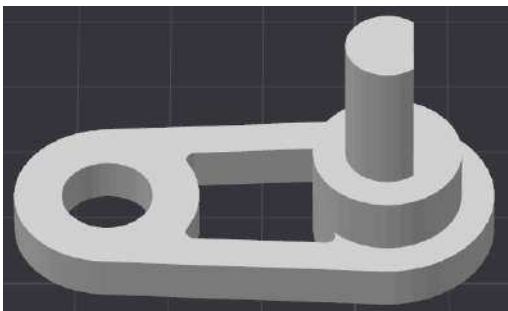


Figura 14 – Virabrequim.

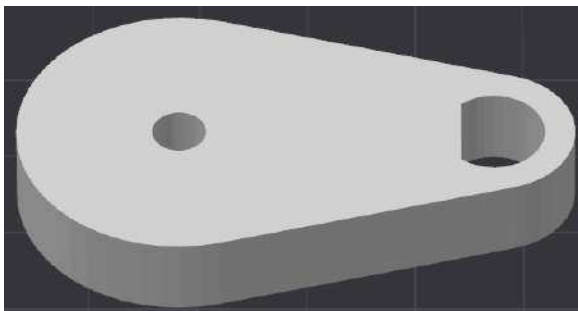


Figura 15 – Haste da Manivela.

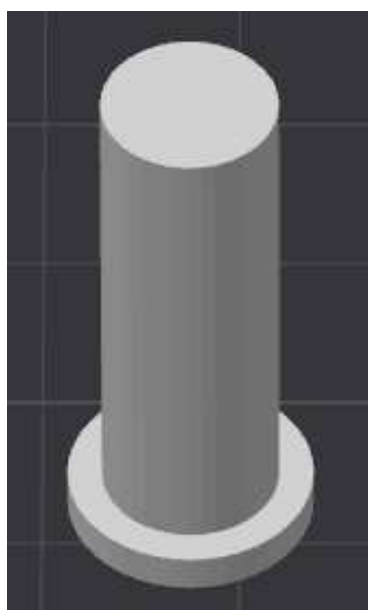


Figura 16 – Pino da Biela.

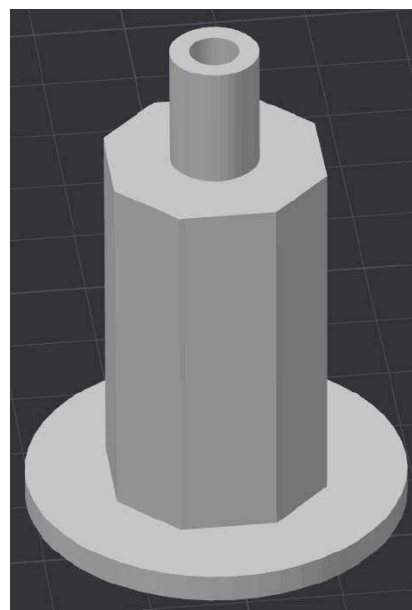


Figura 17 – Suporte da Base.

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

Classificação das peças 3D impressas no laboratório com paquímetro analógico e uma balança digital

ENGRENAGEM PLANETÁRIA

2. Atividades

2.1. Erro aleatório

(a) Meça repetidamente a massa as medidas do planeta 20 vezes. Verifique que há variações nas indicações obtidas em função do erro aleatório. Analise todo o conjunto de indicações e faça uma contagem do número de vezes repetidas que cada indicação aparece no conjunto. Com estes dados trace um histograma, isto é, um gráfico em que os valores das indicações são representados no eixo horizontal e as respectivas contagens do número de vezes que cada indicação aparece são representadas no eixo vertical. Compare a forma do gráfico obtido com

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Diâmetro

Espessura

2.3. **Calibração da balança e do paquímetro**

Faça uma calibração da balança e do paquímetro com a intenção de compensar erros sistemáticos em futuras medições. Planeje detalhadamente a calibração seguindo os passos do roteiro abaixo:

- 1 - Identifique claramente os objetivos da calibração.
- 2 - Caracterize o sistema de medição a calibrar.
- 3 - Selecione o conjunto de padrões a usar.
- 4 - Defina os pontos de calibração e o número de repetições a serem realizadas para cada ponto de calibração. Use pelo menos dez pontos de calibração bem distribuídos ao longo da faixa de medição. Planeje passo a passo o experimento. Prepare as planilhas que conterão os dados brutos da calibração.
- 5 - Execute a calibração conforme o roteiro planejado.
- 6 - Processe e documente os resultados. Trace a curva de erros da balança contendo a linha da tendência e as linhas que delimitam a região dentro do qual o erro de medição é esperado.
- 7 - Analise os resultados da calibração e estime o erro máximo.
- 8 - Apresente tudo no relatório de calibração.

2.4. **Determinação da soma de massas**

(a) Pese individualmente, por 10 vezes, cada uma das seguintes peças: Planeta (49,00 g) + Engrenagem Central (13,64 g) + Engrenagem (4,43 g). Em seguida, pese a combinação das três peças juntas também por 10 vezes. Utilize esses dados para calcular a incerteza individual

de cada peça, a incerteza combinada das peças por método analítico e compare com a incerteza obtida ao medir o conjunto diretamente na balança.

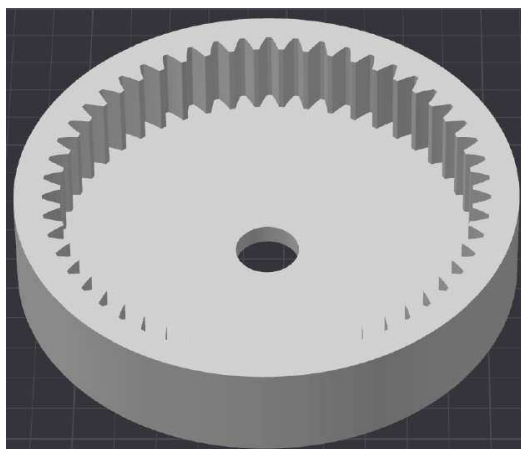


Figura 11 – Planeta.

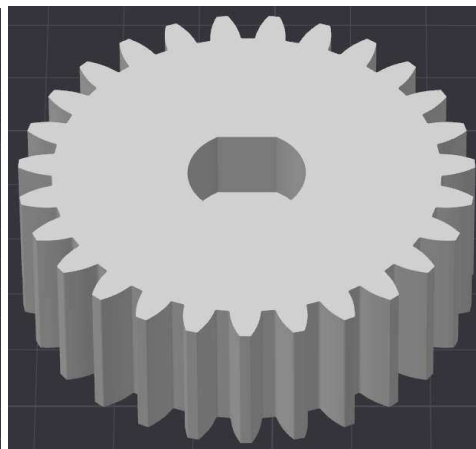


Figura 12 – Engrenagem Central.

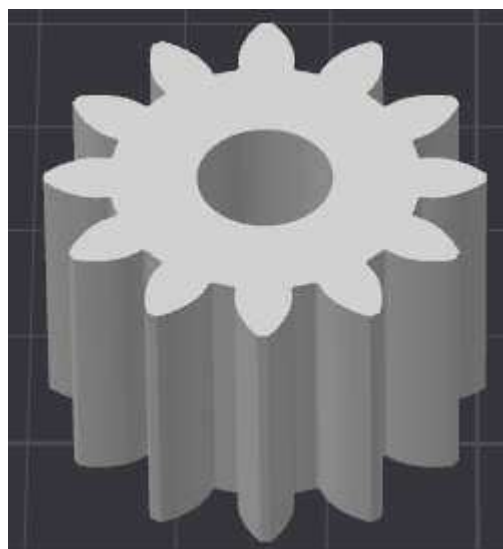


Figura 13 – Engrenagem.

(b) Remova as massas da etapa anterior e pese individualmente, por 10 vezes, cada uma das seguintes peças: Base (26,54 g) + Porta Engrenagens (7,48 g) + Eixo 1 (4,57 g) + Eixo 2 (5,19 g). Em seguida, pese a combinação dessas quatro peças juntas também por 10 vezes. Utilize esses dados para calcular a incerteza individual de cada peça, a incerteza combinada por método analítico e compare com a incerteza obtida ao medir o conjunto diretamente na balança.



Figura 14 – Base.

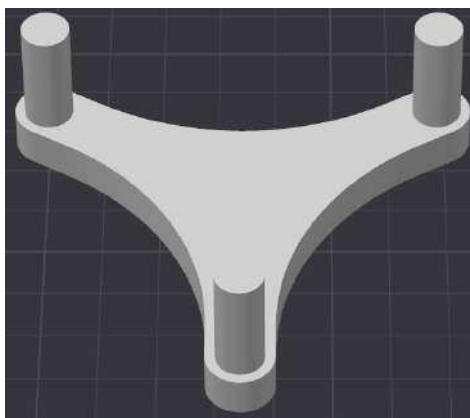


Figura 15 – Porta Engrenagens.

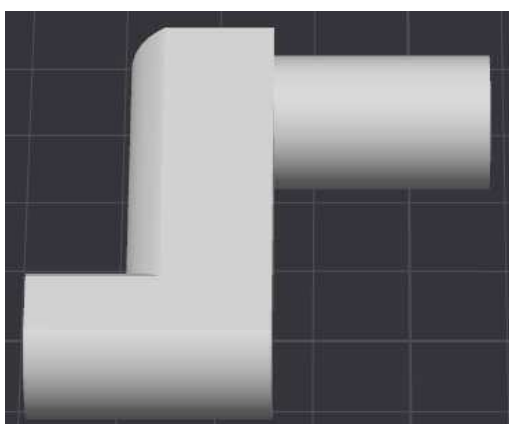


Figura 16 – Eixo 1.

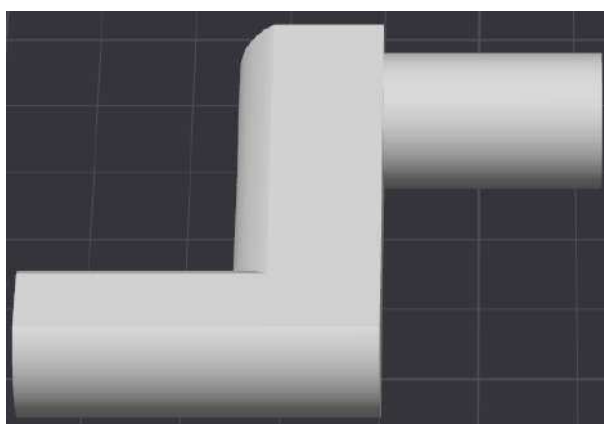


Figura 17 – Eixo 2.

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

Classificação das peças 3D impressas no laboratório com paquímetro analógico e uma balança digital

GARFO ESCOCÊS

2. Atividades

2.1. Erro aleatório

(a) Meça repetidamente a massa e as medidas do disco da manivela 20 vezes. Verifique que há variações nas indicações obtidas em função do erro aleatório. Analise todo o conjunto de indicações e faça uma contagem do número de vezes repetidas que cada indicação aparece no conjunto. Com estes dados trace um histograma, isto é, um gráfico em que os valores das indicações são representados no eixo horizontal e as respectivas contagens do número de vezes que cada indicação aparece são representadas no eixo vertical. Compare a forma do gráfico obtido com o da distribuição normal. **(Faça isso tanto para a massa como o diâmetro externo e espessura do disco)**

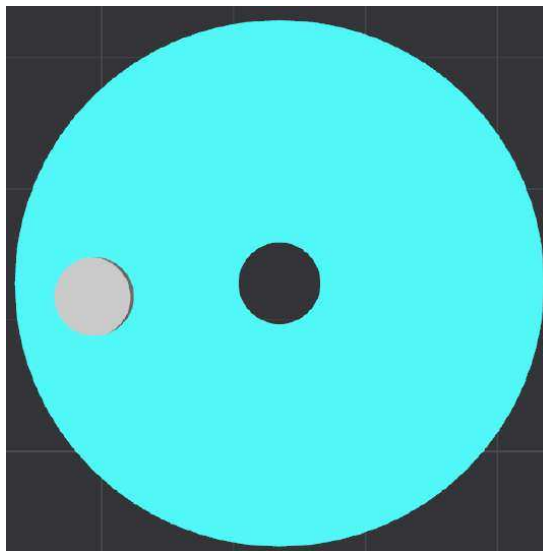


Figura 9 - Disco da manivela.

Massa

Diâmetro

Espessura

(b) Com base no desvio padrão das indicações obtidas e no respectivo coeficiente “t” de Student calcule a repetitividade para 95% de nível de confiança de todas as medidas.

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Espessura

2.3. Calibração da balança e do paquímetro

Faça uma calibração da balança e do paquímetro com a intenção de compensar erros sistemáticos em futuras medições. Planeje detalhadamente a calibração seguindo os passos do roteiro abaixo:

- 1 - Identifique claramente os objetivos da calibração.
- 2 - Caracterize o sistema de medição a calibrar.
- 3 - Selecione o conjunto de padrões a usar.
- 4 - Defina os pontos de calibração e o número de repetições a serem realizadas para cada ponto de calibração. Use pelo menos dez pontos de calibração bem distribuídos ao longo da faixa de medição. Planeje passo a passo o experimento. Prepare as planilhas que conterão os dados brutos da calibração.
- 5 - Execute a calibração conforme o roteiro planejado.
- 6 - Processe e documente os resultados. Trace a curva de erros da balança contendo a linha da tendência e as linhas que delimitam a região dentro do qual o erro de medição é esperado.
- 7 - Analise os resultados da calibração e estime o erro máximo.
- 8 - Apresente tudo no relatório de calibração.

2.4. Determinação da soma de massas

(a) Pese individualmente, por 10 vezes, cada uma das seguintes peças: Base (28,57 g), Guia (9,11 g) e Pino (2,86 g). Em seguida, pese a combinação das três peças juntas também por 10 vezes. Utilize esses dados para calcular a incerteza individual de cada peça, a incerteza combinada das peças por método analítico e compare com a incerteza obtida ao medir o conjunto diretamente na balança.

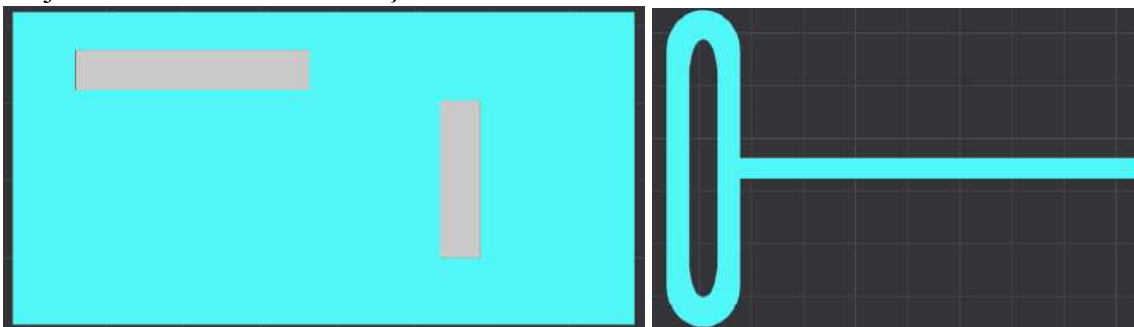


Figura 11 – Base.

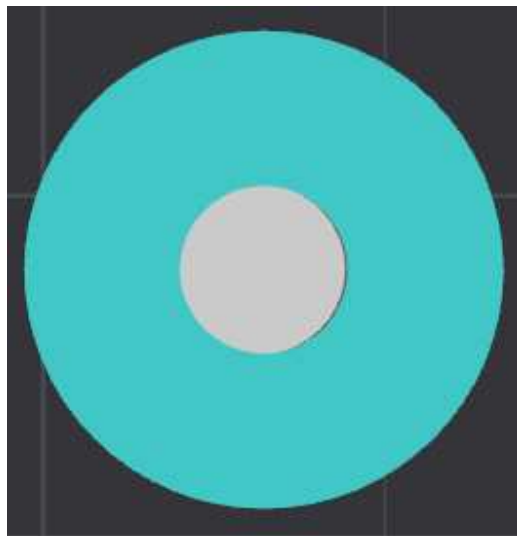


Figura 12 – Guia.

Figura 13 – Pino.

(b) Remova as massas da etapa anterior e pese individualmente, por 10 vezes, cada uma das seguintes peças: Suporte dos Discos (12,58 g), Guia do Disco (11,48 g), Encaixe do Pino (3,30 g) e Disco de Sustentação do Guia (18,00 g). Em seguida, pese a combinação dessas quatro peças juntas também por 10 vezes. Utilize esses dados para calcular a incerteza individual de cada peça, a incerteza combinada por método analítico e compare com a incerteza obtida ao medir o conjunto diretamente na balança.

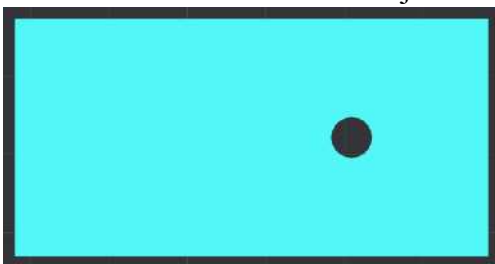


Figura 14 – Suporte dos Discos.



Figura 15 – Guia do Disco.

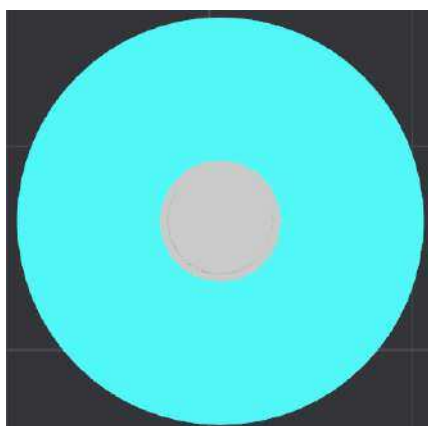


Figura 16 – Encaixe do Pino.

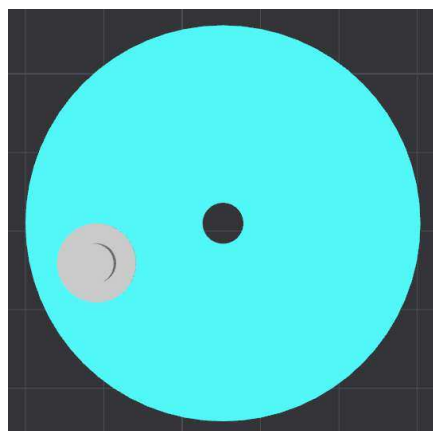


Figura 17 – Disco de Sustentação do Guia.

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

Classificação das peças 3D impressas no laboratório com paquímetro analógico e uma balança digital

RODA DE GENEVRA

2. Atividades

2.1. Erro aleatório

(a) Meça repetidamente a massa e as medidas da Engrenagem da Roda de Genevra 20 vezes. Verifique que há variações nas indicações obtidas em função do erro aleatório. Analise todo o conjunto de indicações e faça uma contagem do número de vezes repetidas que cada indicação aparece no conjunto. Com estes dados trace um histograma, isto é, um gráfico em que os valores das indicações são representados no eixo horizontal e as respectivas contagens do número de vezes que cada indicação aparece são representadas no eixo vertical. Compare a forma do gráfico obtido com o da distribuição normal. **(Faça isso tanto para a massa como o diâmetro externo e espessura da engrenagem)**

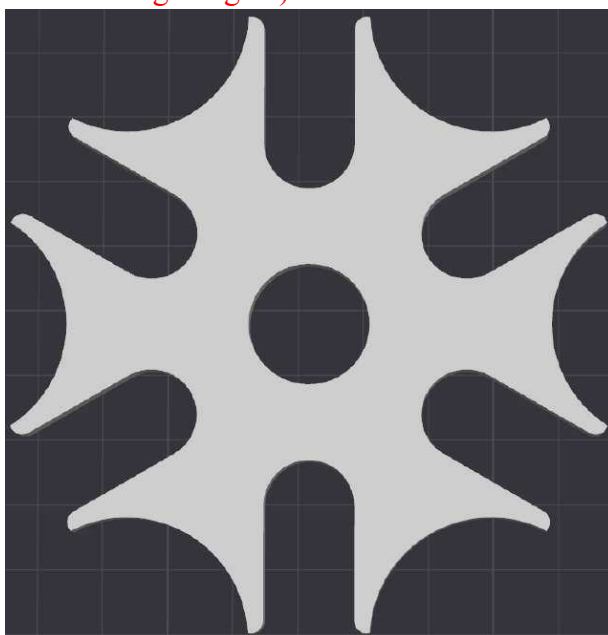


Figura 9 - Engrenagem da Roda de Genevra.

Massa

Diâmetro

Espessura

(b) Com base no desvio padrão das indicações obtidas e no respectivo coeficiente “t” de Student calcule a repetitividade para 95% de nível de confiança de todas as medidas.

(c) O erro aleatório para cada indicação pode ser calculado subtraindo a indicação do valor médio de todas as indicações. Verifique que pelo menos em 95% das indicações obtidas o erro aleatório está dentro da faixa delimitada pela repetitividade ($\pm Re$).

2.2. Tendência e correção

(a) Utilize o mesmo conjunto de 20 indicações resultantes das medições repetidas a respeito da engrenagem da Roda de Genebra, realizada na questão 2.1.(a). Utilize o valor médio e calcule a tendência da balança e do paquímetro analógico para a massa de 12,42 g, do diâmetro externo de 94,40 mm e da espessura de 8,30 mm. Calcule também a correção.

(b) Agora faça 20 medições repetidas do disco. Calcule a tendência e a correção para a massa de 14,12 g, do diâmetro externo de 74 mm e da espessura de 5,5 mm. Compare com os valores obtidos para a engrenagem. Por que são diferentes?

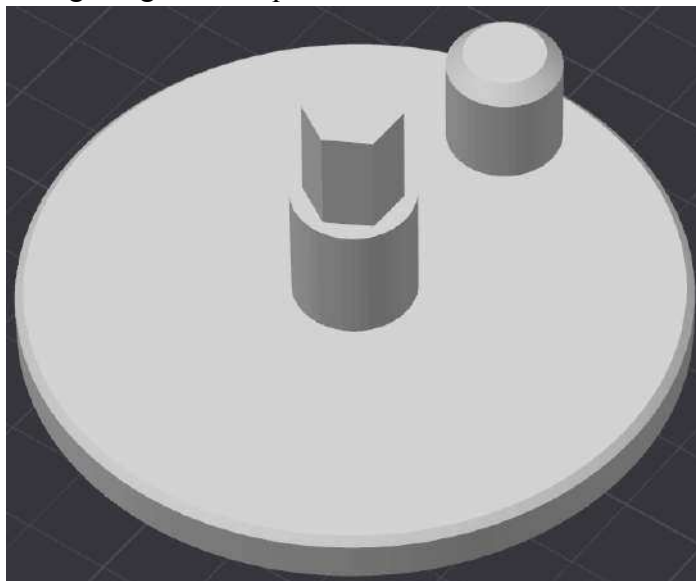


Figura 10 - Disco.

Massa

Diâmetro

Espessura

2.3. Calibração da balança e do paquímetro

Faça uma calibração da balança e do paquímetro com a intenção de compensar erros sistemáticos em futuras medições. Planeje detalhadamente a calibração seguindo os passos do roteiro abaixo:

- 1 - Identifique claramente os objetivos da calibração.
- 2 - Caracterize o sistema de medição a calibrar.
- 3 - Selecione o conjunto de padrões a usar.
- 4 - Defina os pontos de calibração e o número de repetições a serem realizadas para cada ponto de calibração. Use pelo menos dez pontos de calibração bem distribuídos ao longo da faixa de medição. Planeje passo a passo o experimento. Prepare as planilhas que conterão os dados brutos da calibração.
- 5 - Execute a calibração conforme o roteiro planejado.
- 6 - Processe e documente os resultados. Trace a curva de erros da balança contendo a linha da tendência e as linhas que delimitam a região dentro do qual o erro de medição é esperado.
- 7 - Analise os resultados da calibração e estime o erro máximo.

8 - Apresente tudo no relatório de calibração.

2.4. Determinação da soma de massas

(a) Pese individualmente, por 10 vezes, cada uma das seguintes peças: Engrenagem (12,42 g) + Disco (14,12 g). Em seguida, pese a combinação das duas peças juntas também por 10 vezes. Utilize esses dados para calcular a incerteza individual de cada peça, a incerteza combinada das peças por método analítico e compare com a incerteza obtida ao medir o conjunto diretamente na balança.

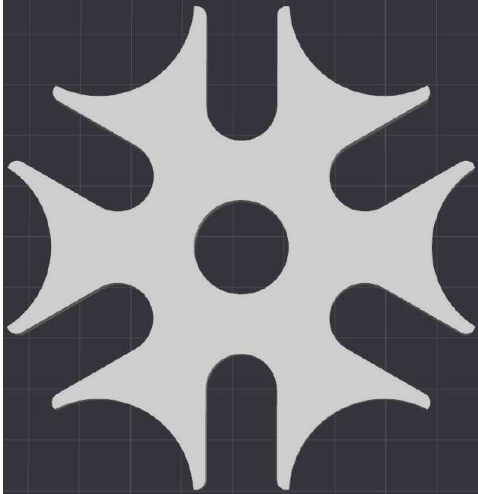


Figura 11 – Engrenagem.

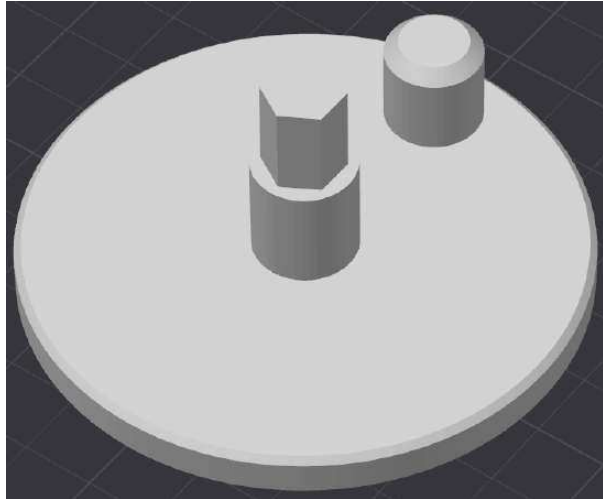


Figura 12 – Disco.

(b) Remova as massas da etapa anterior e pese individualmente, por 10 vezes, cada uma das seguintes peças: Engrenagem (12,42 g) + Disco (14,12 g) + Base. (30,48 g). Em seguida, pese a combinação dessas três peças juntas também por 10 vezes. Utilize esses dados para calcular a incerteza individual de cada peça, a incerteza combinada por método analítico e compare com a incerteza obtida ao medir o conjunto diretamente na balança.

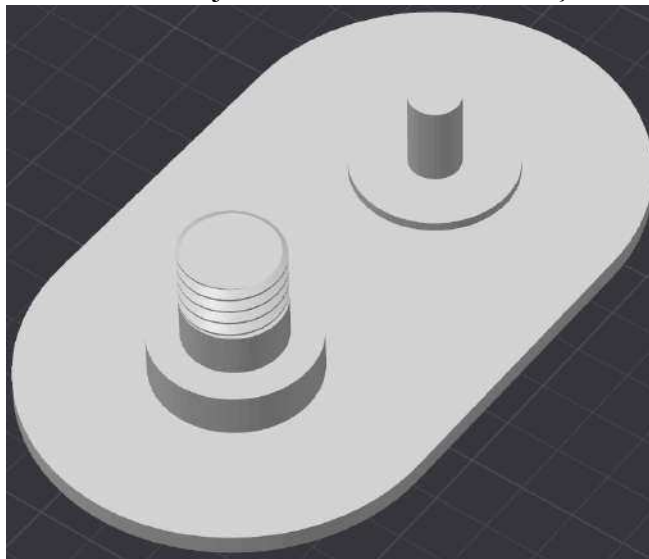


Figura 13 – Base.

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

Classificação das peças 3D impressas no laboratório com paquímetro analógico e uma balança digital

ROTATIVO EM LINEAR

2. Atividades

2.1. Erro aleatório

(a) Meça repetidamente a massa e as medias da engrenagem de impulso 20 vezes. Verifique que há variações nas indicações obtidas em função do erro aleatório. Analise todo o conjunto de indicações e faça uma contagem do número de vezes repetidas que cada indicação aparece no conjunto. Com estes dados trace um histograma, isto é, um gráfico em que os valores das indicações são representados no eixo horizontal e as respectivas contagens do número de vezes que cada indicação aparece são representadas no eixo vertical. Compare a forma do gráfico obtido com o da distribuição normal. **(Faça isso tanto para a massa como o diâmetro externo e espessura da engrenagem de impulso)**

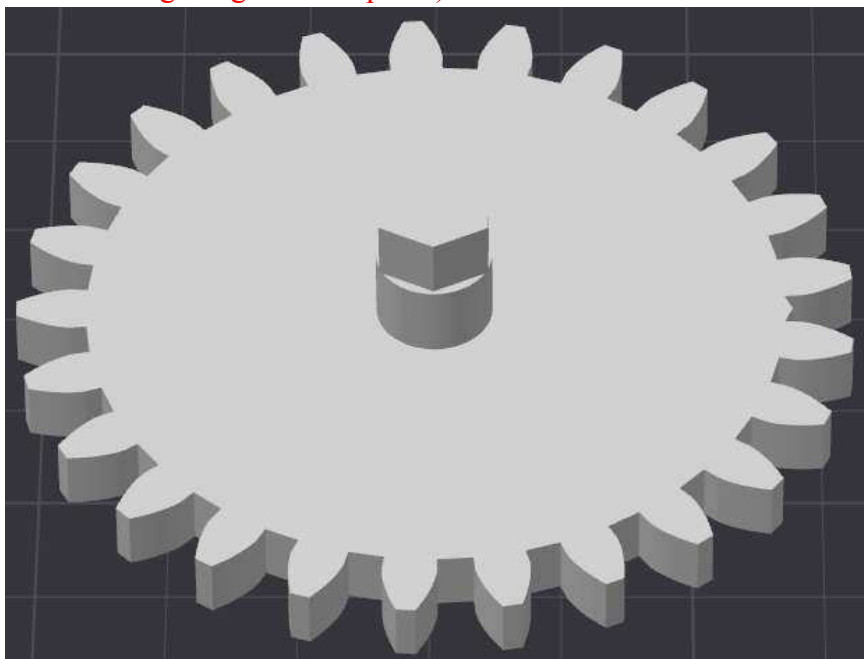


Figura 9 - Engrenagem de Impulso.

Massa

Diâmetro

Espessura

(b) Com base no desvio padrão das indicações obtidas e no respectivo coeficiente “t” de Student calcule a repetitividade para 95% de nível de confiança de todas as medidas.

(c) O erro aleatório para cada indicação pode ser calculado subtraindo a indicação do valor médio de todas as indicações. Verifique que pelo menos em 95% das indicações obtidas o erro aleatório está dentro da faixa delimitada pela repetitividade ($\pm Re$).

2.2. Tendência e correção

(a) Utilize o mesmo conjunto de 20 indicações resultantes das medições repetidas a respeito da engrenagem de impulso, realizada na questão 2.1.(a). Utilize o valor médio e calcule a tendência da balança e do paquímetro analógico para a massa de 7,25 g, do diâmetro externo de 64,62 mm e da espessura de 4,8 mm. Calcule também a correção.

(b) Agora faça 20 medições repetidas do disco. Calcule a tendência e a correção para a massa de 4,73 g, do diâmetro externo de 50,4 mm e da espessura de 4,8 mm. Compare com os valores obtidos para a engrenagem de impulso. Por que são diferentes?

2.3. *Calibração da balança e do paquímetro*

Faça uma calibração da balança e do paquímetro com a intenção de compensar erros sistemáticos em futuras medições. Planeje detalhadamente a calibração seguindo os passos do roteiro abaixo:

- 1 - Identifique claramente os objetivos da calibração.
- 2 - Caracterize o sistema de medição a calibrar.
- 3 - Selecione o conjunto de padrões a usar.
- 4 - Defina os pontos de calibração e o número de repetições a serem realizadas para cada ponto de calibração. Use pelo menos dez pontos de calibração bem distribuídos ao longo da faixa de medição. Planeje passo a passo o experimento. Prepare as planilhas que conterão os dados brutos da calibração.
- 5 - Execute a calibração conforme o roteiro planejado.
- 6 - Processe e documente os resultados. Trace a curva de erros da balança contendo a linha da tendência e as linhas que delimitam a região dentro do qual o erro de medição é esperado.
- 7 - Analise os resultados da calibração e estime o erro máximo.
- 8 - Apresente tudo no relatório de calibração.

2.4. *Determinação da soma de massas*

(a) Pese individualmente, por 10 vezes, cada uma das seguintes peças: Engrenagem de Impulso (7,25 g) + Disco (4,73 g) + Engrenagem de Movimento (8,09 g). Em seguida, pese a combinação das três peças juntas também por 10 vezes. Utilize esses dados para calcular a incerteza individual de cada peça, a incerteza combinada das peças por método analítico e compare com a incerteza obtida ao medir o conjunto diretamente na balança.

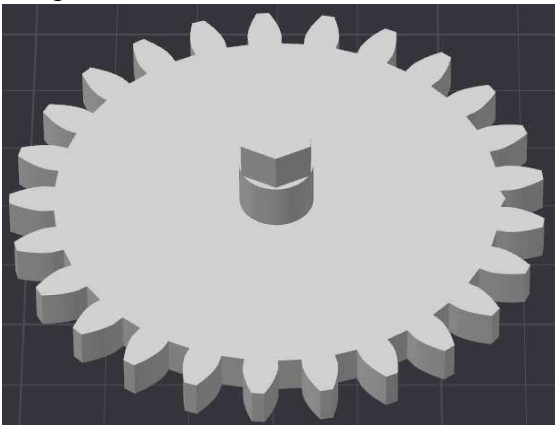


Figura 11 – Engrenagem de Impulso.

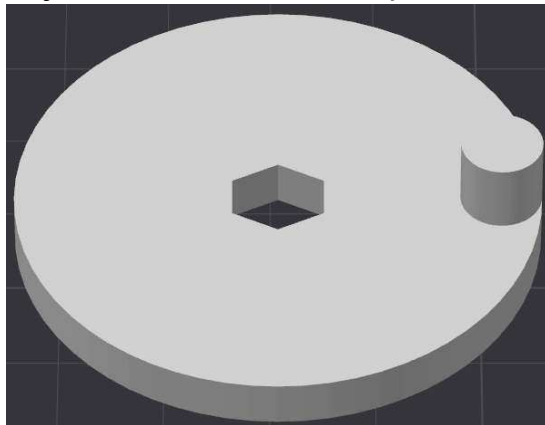


Figura 12 – Disco.

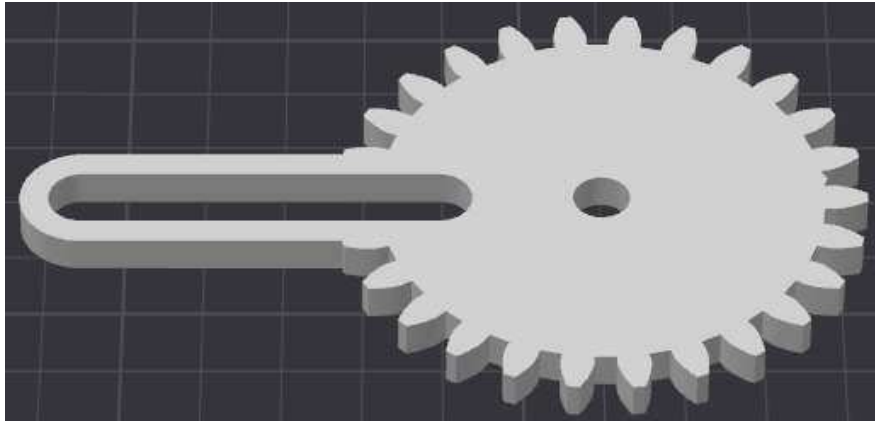


Figura 13 – Engrenagem de Movimento.

(b) Remova as massas da etapa anterior e pese individualmente, por 10 vezes, cada uma das seguintes peças: Base (19,78 g) (17,46 g) + Cremalheira (3,69 g) + Trava da Cremalheira (0,82 g). Em seguida, pese a combinação dessas três peças juntas também por 10 vezes. Utilize esses dados para calcular a incerteza individual de cada peça, a incerteza combinada por método analítico e compare com a incerteza obtida ao medir o conjunto diretamente na balança.

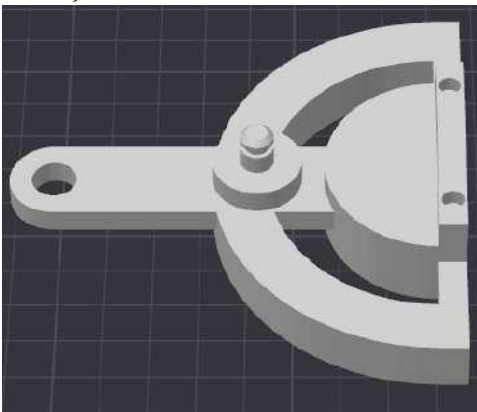


Figura 14 – Base.

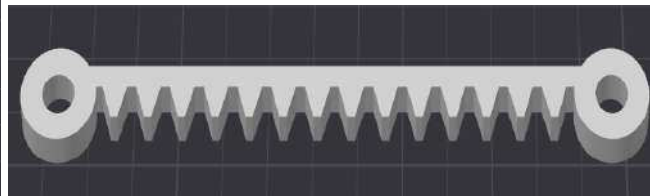


Figura 15 – Cremalheira.

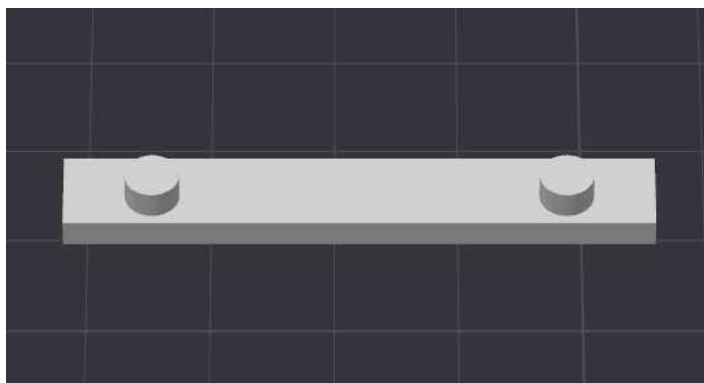


Figura 16 – Trava da Cremalheira.

APÊNDICE B – ROTEIROS DA SEGUNDA PRÁTICA.

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

BIELA MANIVELA

1. Medidas indiretas

Medidas indiretas são aquelas em que o valor de interesse não é obtido diretamente pelo instrumento, mas sim calculado a partir de outras medições. Nesse caso, o instrumento mede grandezas intermediárias, e o resultado final é determinado por meio de fórmulas matemáticas.

Exemplos comuns incluem:

- Determinar a densidade calculando massa e volume.
- Calcular a soma de massas a partir de medições individuais.
- Determinar a área ou volume a partir de dimensões lineares medidas com paquímetro.

Esse tipo de medição exige cuidado na propagação das incertezas, pois cada grandeza medida influencia o resultado final.

2. Atividades

2.1. Volume

Com base nos valores obtidos na primeira prática referente a erros aleatórios, precisamente no item 2.2 b), calcule o volume do disco do suporte da base levando em consideração a incerteza combinada das medidas. (Obs: calcule o volume só do disco da base desconsiderando o restante do suporte).

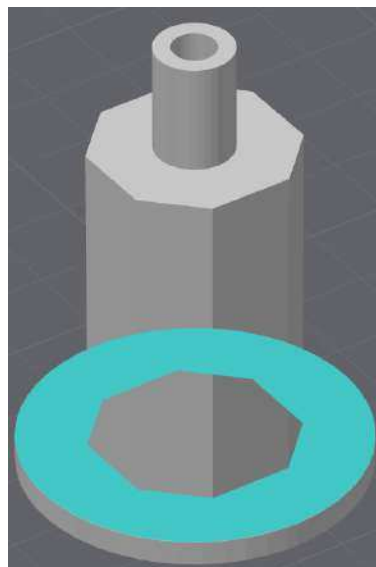


Figura 1 - Suporte da Base.

Espessura

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

ENGRENAGEM PLANETÁRIA

1. Medidas indiretas

Medidas indiretas são aquelas em que o valor de interesse não é obtido diretamente pelo instrumento, mas sim calculado a partir de outras medições. Nesse caso, o instrumento mede grandezas intermediárias, e o resultado final é determinado por meio de fórmulas matemáticas.

Exemplos comuns incluem:

- Determinar a densidade calculando massa e volume.
- Calcular a soma de massas a partir de medições individuais.
- Determinar a área ou volume a partir de dimensões lineares medidas com paquímetro.

Esse tipo de medição exige cuidado na propagação das incertezas, pois cada grandeza medida influencia o resultado final.

2. Atividades

2.1. Volume

Com base nos valores obtidos na primeira prática referente a erros aleatórios, precisamente no item 2.2 b), calcule o volume da engrenagem central levando em consideração a incerteza combinada das medidas. (Obs: calcule o volume só da engrenagem, desconsiderando o furo central).

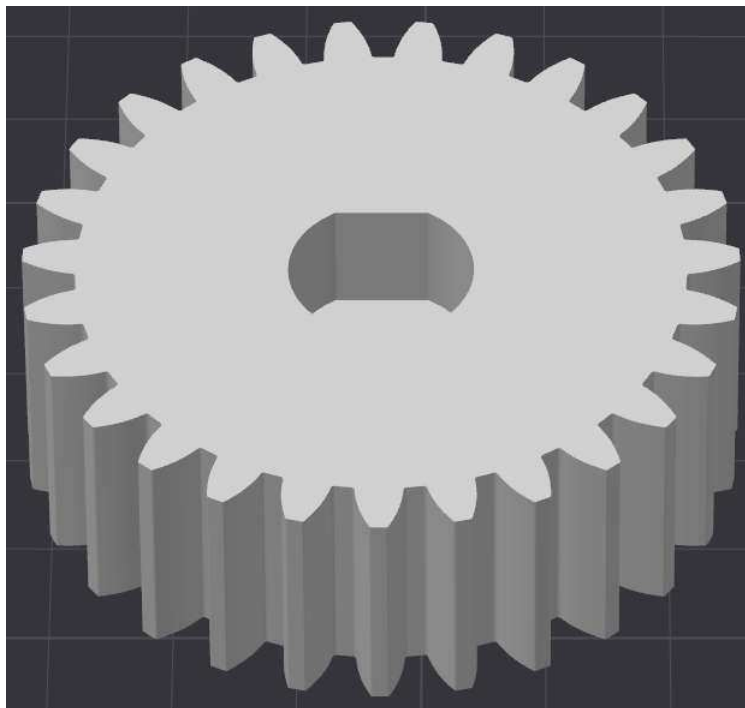


Figura 1 - Engrenagem Central.

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

GARFO ESCOCÊS

1. Medidas indiretas

Medidas indiretas são aquelas em que o valor de interesse não é obtido diretamente pelo instrumento, mas sim calculado a partir de outras medições. Nesse caso, o instrumento mede grandezas intermediárias, e o resultado final é determinado por meio de fórmulas matemáticas.

Exemplos comuns incluem:

- Determinar a densidade calculando massa e volume.
- Calcular a soma de massas a partir de medições individuais.
- Determinar a área ou volume a partir de dimensões lineares medidas com paquímetro.

Esse tipo de medição exige cuidado na propagação das incertezas, pois cada grandeza medida influencia o resultado final.

2. Atividades

2.1. Volume

Com base nos valores obtidos na primeira prática referente a erros aleatórios, precisamente nos itens 2.1 e 2.2 b), calcule o volume do disco da manivela e do disco de sustentação do

guia, levando em consideração a incerteza combinada das medidas. (Obs: calcule o volume só do disco, ou seja da base)

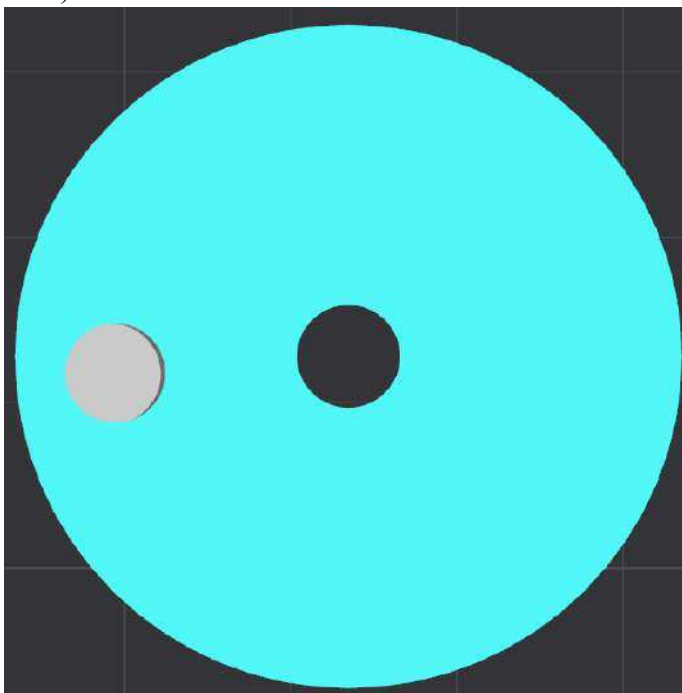


Figura 1 - Disco da manivela.

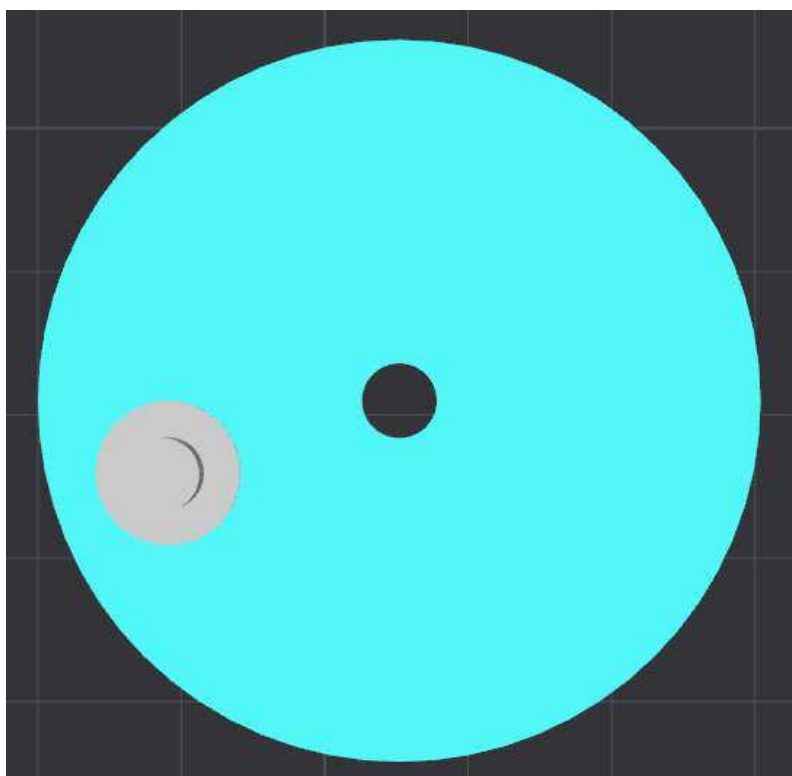


Figura 2 - Disco de sustentação do guia.

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

RODA DE GENEVRA

1. Medidas indiretas

Medidas indiretas são aquelas em que o valor de interesse não é obtido diretamente pelo instrumento, mas sim calculado a partir de outras medições. Nesse caso, o instrumento mede grandezas intermediárias, e o resultado final é determinado por meio de fórmulas matemáticas.

Exemplos comuns incluem:

- Determinar a densidade calculando massa e volume.
- Calcular a soma de massas a partir de medições individuais.
- Determinar a área ou volume a partir de dimensões lineares medidas com paquímetro.

Esse tipo de medição exige cuidado na propagação das incertezas, pois cada grandeza medida influencia o resultado final.

2. Atividades

2.1. Volume

Com base nos valores obtidos na primeira prática referente a erros aleatórios, precisamente no item 2.2 b), calcule o volume do disco abaixo levando em consideração a incerteza combinada das medidas. (Obs: calcule o volume só do disco, ou seja da base)

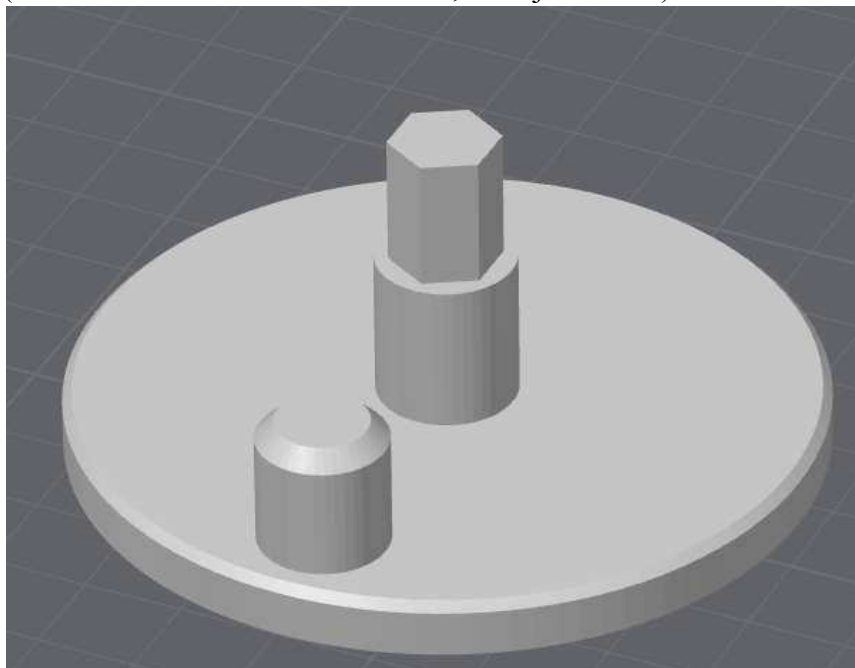


Figura 1 - Disco.

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

ROTATIVO LINEAR

1. Medidas indiretas

Medidas indiretas são aquelas em que o valor de interesse não é obtido diretamente pelo instrumento, mas sim calculado a partir de outras medições. Nesse caso, o instrumento mede grandezas intermediárias, e o resultado final é determinado por meio de fórmulas matemáticas.

Exemplos comuns incluem:

- Determinar a densidade calculando massa e volume.
- Calcular a soma de massas a partir de medições individuais.
- Determinar a área ou volume a partir de dimensões lineares medidas com paquímetro.

Esse tipo de medição exige cuidado na propagação das incertezas, pois cada grandeza medida influencia o resultado final.

2. Atividades

2.1. Volume

Com base nos valores obtidos na primeira prática referente a erros aleatórios, precisamente no item 2.1, calcule o volume da engrenagem de impulso levando em consideração a incerteza combinada das medidas. (Obs: calcule o volume só da engrenagem)

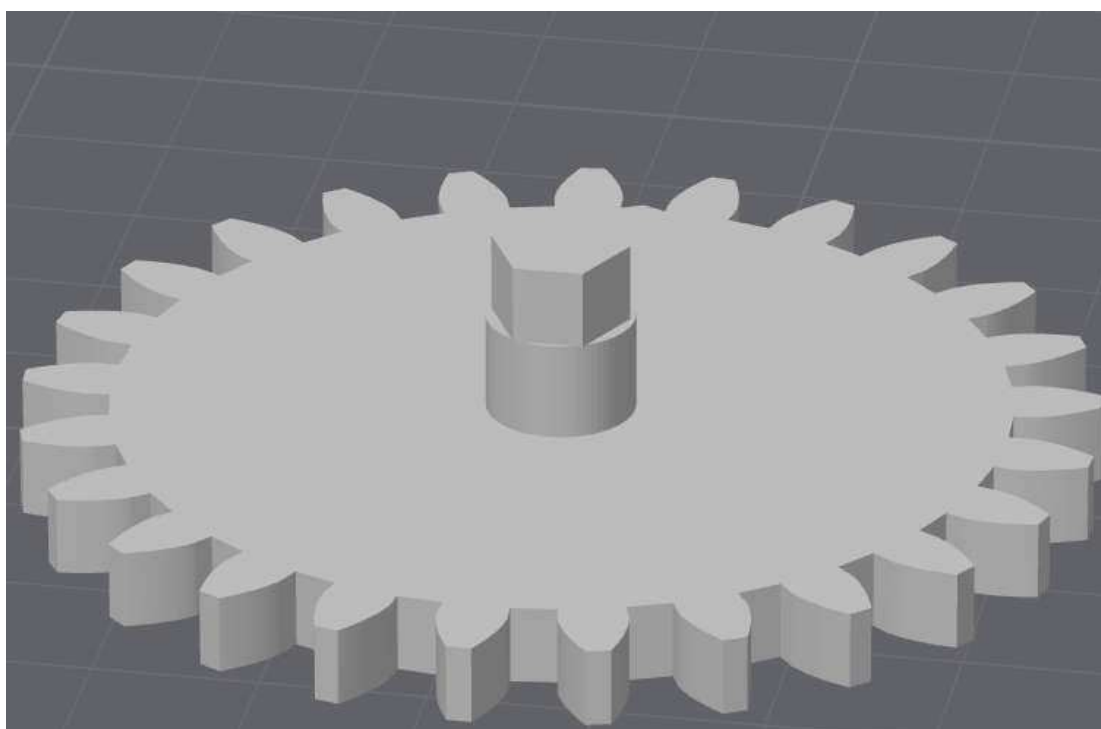


Figura 1 - Engrenagem de Impulso.

APÊNDICE C – ROTEIROS DA TERCEIRA PRÁTICA.

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

BIELA MANIVELA

1. Classificação de peças

A classificação das peças consiste em organizar ou agrupar componentes com base em suas características dimensionais, comparando os valores medidos com referências ou tolerâncias previamente estabelecidas. Esse processo permite identificar peças conformes (dentro das tolerâncias), não conformes (fora das tolerâncias) ou classificá-las em faixas dimensionais específicas, conforme os critérios adotados.

A atividade de classificação é essencial para avaliar a qualidade dimensional de um lote, compreender os efeitos da variabilidade do processo produtivo e apoiar a tomada de decisões em controle de qualidade.

2. Atividades

2.1. Determinação do diâmetro

- (a) Determine o resultado da medição das peças a partir de uma única medição. É possível afirmar que o pistão obedece a tolerância de $(30,00 \pm 0,20)$ mm? A partir de uma única medição também, é possível afirmar que o suporte da base obedece a tolerância de $(40,00 \pm 0,20)$ mm?
- (b) Use os valores da repetitividade, tendência e correção determinados na primeira prática referente a erros aleatórios precisamente nos itens 2.1 e 2.2 b). E agora é possível afirmar que o pistão obedece a tolerância de $(30,00 \pm 0,20)$ mm e o suporte da base de $(40,00 \pm 0,20)$ mm?

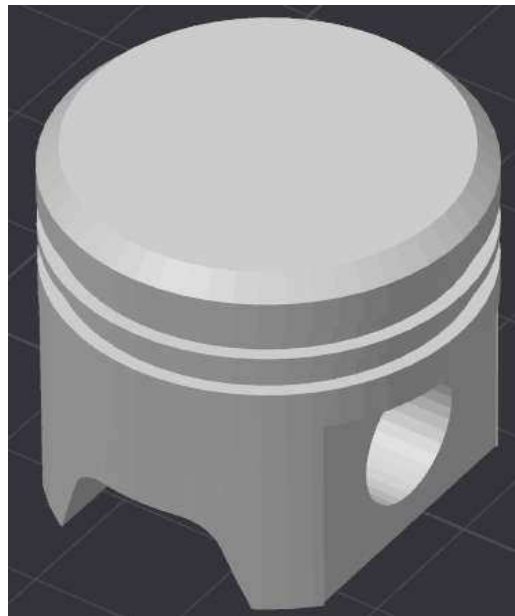


Figura 1 - Pistão.

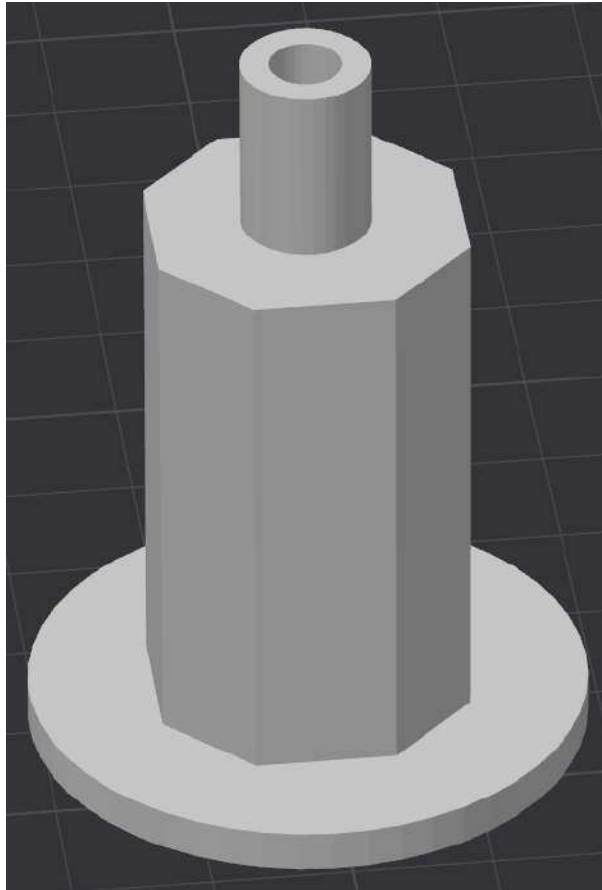


Figura 2 - Suporte da base.

2.2. Classificação das peças

(a) Defina claramente os limites de aceitação e de rejeição.

(b) Classifique o pistão:

- O pistão está dentro da zona de dúvida superior?
- O pistão está seguramente dentro da tolerância?
- O pistão está dentro da zona de dúvida inferior?
- O pistão está seguramente abaixo do limite inferior da tolerância?

(c) Classifique do suporte da base:

- O suporte da base está dentro da zona de dúvida superior?
- O suporte da base está seguramente dentro da tolerância?
- O suporte da base está dentro da zona de dúvida inferior?
- O suporte da base está seguramente abaixo do limite inferior da tolerância?

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

ENGRENAGEM PLANETÁRIA

1. Classificação de peças

A classificação das peças consiste em organizar ou agrupar componentes com base em suas características dimensionais, comparando os valores medidos com referências ou tolerâncias previamente estabelecidas. Esse processo permite identificar peças conformes (dentro das tolerâncias), não conformes (fora das tolerâncias) ou classificá-las em faixas dimensionais específicas, conforme os critérios adotados.

A atividade de classificação é essencial para avaliar a qualidade dimensional de um lote, compreender os efeitos da variabilidade do processo produtivo e apoiar a tomada de decisões em controle de qualidade.

2. Atividades

2.1. Determinação do diâmetro das peças

- (a) Determine o resultado da medição das peças a partir de uma única medição. É possível afirmar que a engrenagem central obedece a tolerância de $(57,90 \pm 0,20)$ mm? A partir de uma única medição também, é possível afirmar que o planeta obedece a tolerância de $(123,00 \pm 0,20)$ mm?
- (b) Use os valores da repetitividade, tendência e correção determinados na primeira prática referente a erros aleatórios precisamente nos itens 2.1 e 2.2 b). E agora é possível afirmar que a engrenagem central obedece a tolerância de $(57,90 \pm 0,20)$ mm e o planeta de $(123,00 \pm 0,20)$ mm?

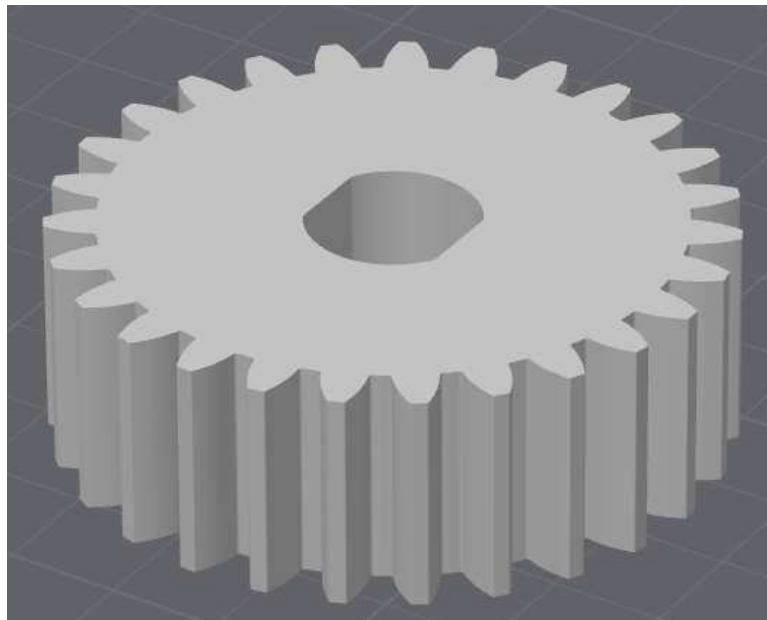


Figura 1 - Engrenagem central.

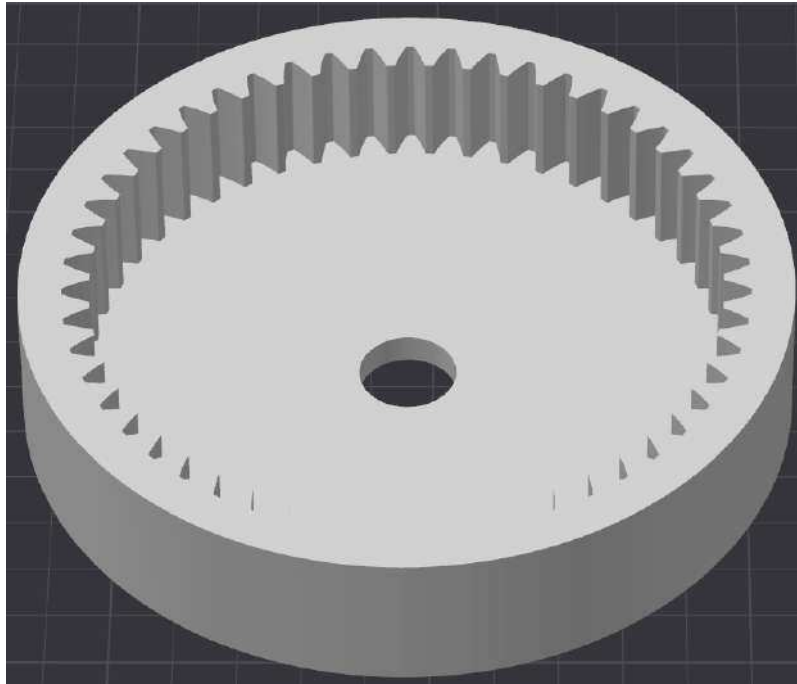


Figura 2 - Planeta.

2.2. Classificação das peças

(a) Defina claramente os limites de aceitação e de rejeição.

(b) Classifique a engrenagem central:

- A engrenagem está dentro da zona de dúvida superior?
- A engrenagem está seguramente dentro da tolerância?
- A engrenagem está dentro da zona de dúvida inferior?
- A engrenagem está seguramente abaixo do limite inferior da tolerância?

(c) Classifique o planeta:

- O planeta está dentro da zona de dúvida superior?
- O planeta está seguramente dentro da tolerância?
- O planeta está dentro da zona de dúvida inferior?
- O planeta está seguramente abaixo do limite inferior da tolerância?

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

GARFO ESCOCÊS

1. Classificação de peças

A classificação das peças consiste em organizar ou agrupar componentes com base em suas características dimensionais, comparando os valores medidos com referências ou tolerâncias previamente estabelecidas. Esse processo permite identificar peças conformes (dentro das tolerâncias), não conformes (fora das tolerâncias) ou classificá-las em faixas dimensionais específicas, conforme os critérios adotados.

A atividade de classificação é essencial para avaliar a qualidade dimensional de um lote, compreender os efeitos da variabilidade do processo produtivo e apoiar a tomada de decisões em controle de qualidade.

2. Atividades

2.1. Determinação do diâmetro dos discos

- Determine o resultado da medição do disco a partir de uma única medição. É possível afirmar que o disco da manivela obedece a tolerância de $(64,80 \pm 0,20)$ mm? A partir de uma única medição também, é possível afirmar que o disco de sustentação do guia obedece a tolerância de $(81,00 \pm 0,20)$ mm?
- Use os valores da repetitividade, tendência e correção determinados na primeira prática referente a erros aleatórios precisamente nos itens 2.1 e 2.2 b). E agora é possível afirmar que o disco da manivela obedece a tolerância de $(64,80 \pm 0,20)$ mm e o disco de sustentação do guia de $(81,00 \pm 0,20)$ mm?

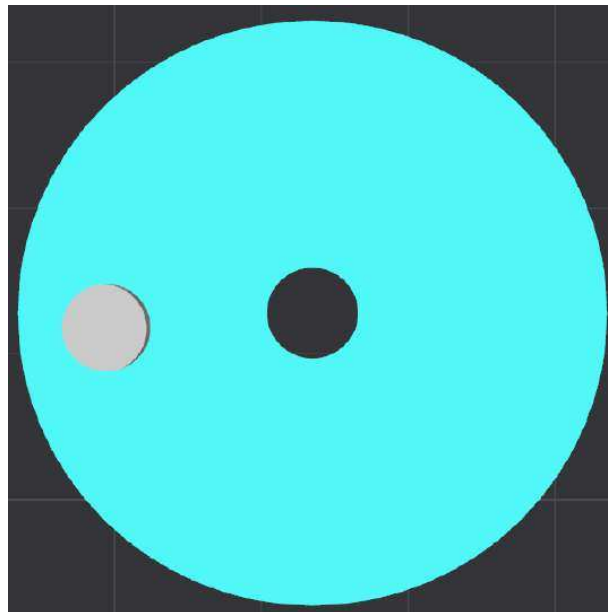


Figura 1 - Disco da manivela.

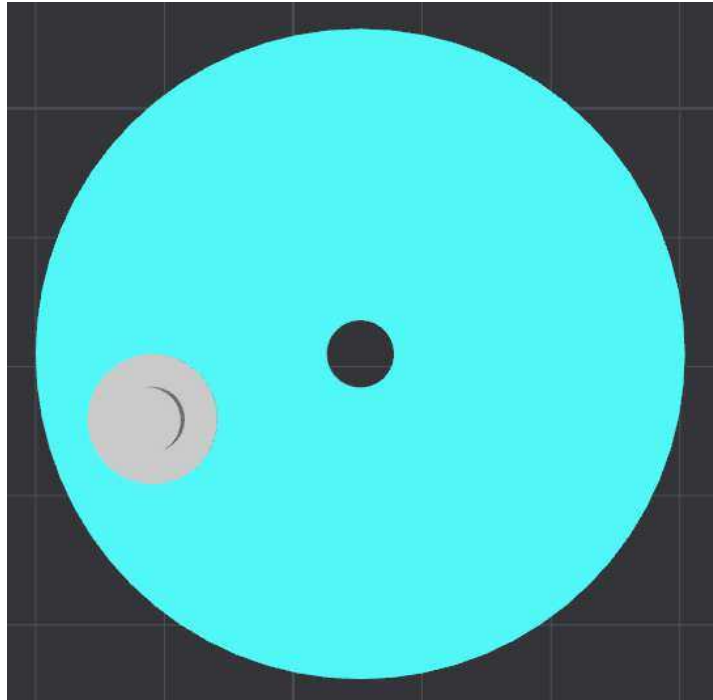


Figura 2 - Disco de sustentação do guia.

2.2. Classificação dos discos

(a) Defina claramente os limites de aceitação e de rejeição.

(b) Classifique o disco da manivela:

- O disco está dentro da zona de dúvida superior?
- O disco está seguramente dentro da tolerância?
- O disco está dentro da zona de dúvida inferior?
- O disco está seguramente abaixo do limite inferior da tolerância?

(c) Classifique o disco de sustentação do guia:

- O disco está dentro da zona de dúvida superior?
- O disco está seguramente dentro da tolerância?
- O disco está dentro da zona de dúvida inferior?
- O disco está seguramente abaixo do limite inferior da tolerância?

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

RODA DE GENEBRA

1. Classificação de peças

A classificação das peças consiste em organizar ou agrupar componentes com base em suas características dimensionais, comparando os valores medidos com referências ou tolerâncias previamente estabelecidas. Esse processo permite identificar peças conformes (dentro das tolerâncias), não conformes (fora das tolerâncias) ou classificá-las em faixas dimensionais específicas, conforme os critérios adotados.

A atividade de classificação é essencial para avaliar a qualidade dimensional de um lote, compreender os efeitos da variabilidade do processo produtivo e apoiar a tomada de decisões em controle de qualidade.

2. Atividades

2.1. Determinação do diâmetro das peças

- (a) Determine o resultado da medição das peças a partir de uma única medição. É possível afirmar que o disco obedece a tolerância de $(74,00 \pm 0,20)$ mm? A partir de uma única medição também, é possível afirmar que a engrenagem da roda de genebra obedece a tolerância de $(94,40 \pm 0,20)$ mm?
- (b) Use os valores da repetitividade, tendência e correção determinados na primeira prática referente a erros aleatórios precisamente nos itens 2.1 e 2.2 b). E agora é possível afirmar que o disco obedece a tolerância de $(74,00 \pm 0,20)$ mm e a engrenagem da roda de genebra de $(94,40 \pm 0,20)$ mm?

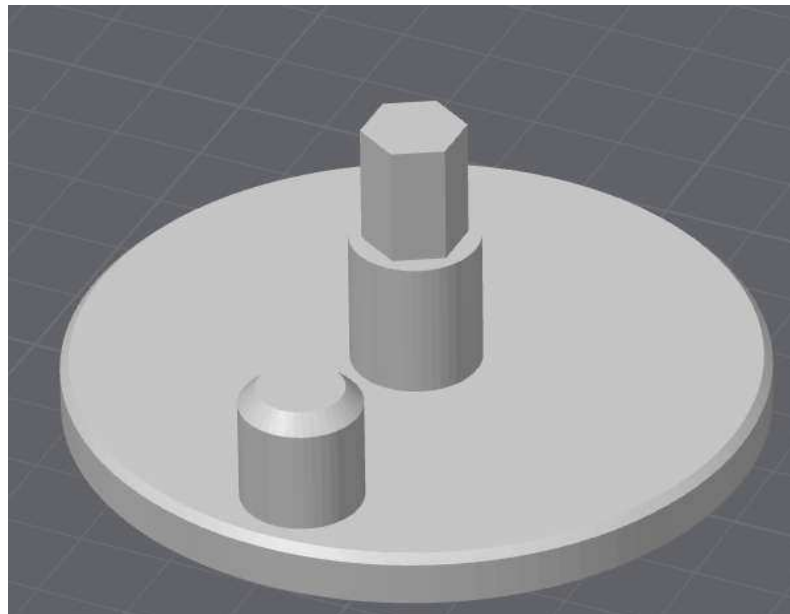


Figura 1 - Disco.

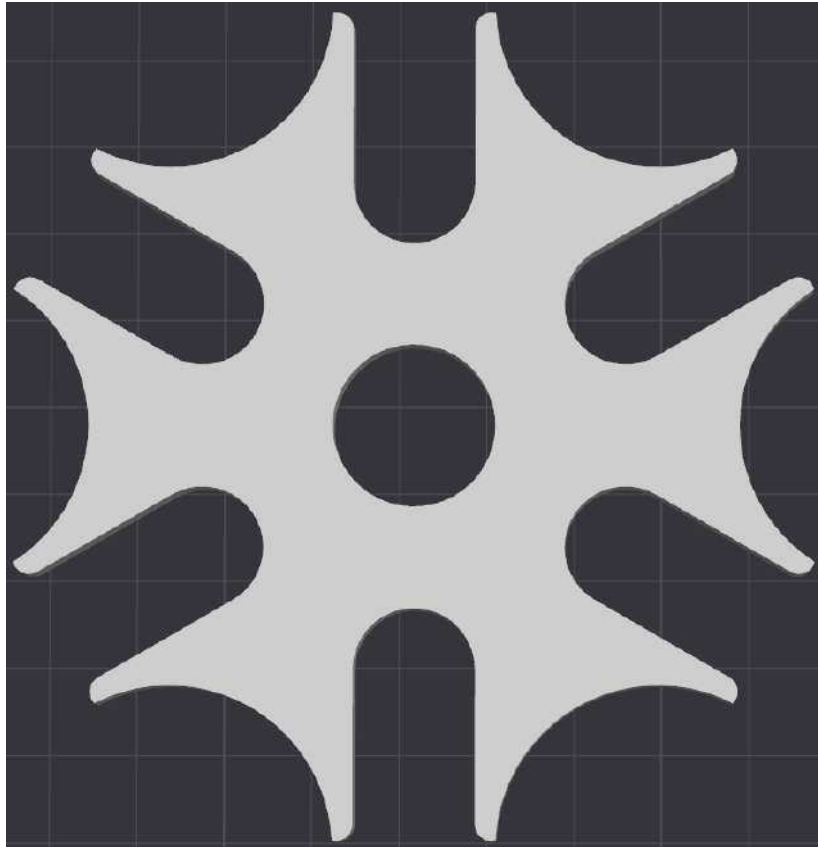


Figura 2 - Engrenagem da Roda de Genebra.

2.2. Classificação das peças

(a) Defina claramente os limites de aceitação e de rejeição.

(b) Classifique o disco:

- O disco está dentro da zona de dúvida superior?
- O disco está seguramente dentro da tolerância?
- O disco está dentro da zona de dúvida inferior?
- O disco está seguramente abaixo do limite inferior da tolerância?

(c) Classifique a engrenagem:

- A engrenagem está dentro da zona de dúvida superior?
- A engrenagem está seguramente dentro da tolerância?
- A engrenagem está dentro da zona de dúvida inferior?
- A engrenagem está seguramente abaixo do limite inferior da tolerância?

METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

ROTATIVO LINEAR

1. Classificação de peças

A classificação das peças consiste em organizar ou agrupar componentes com base em suas características dimensionais, comparando os valores medidos com referências ou tolerâncias previamente estabelecidas. Esse processo permite identificar peças conformes (dentro das tolerâncias), não conformes (fora das tolerâncias) ou classificá-las em faixas dimensionais específicas, conforme os critérios adotados.

A atividade de classificação é essencial para avaliar a qualidade dimensional de um lote, compreender os efeitos da variabilidade do processo produtivo e apoiar a tomada de decisões em controle de qualidade.

2. Atividades

2.1. Determinação do diâmetro do disco

- Determine o resultado da medição do disco a partir de uma única medição. É possível afirmar que o disco obedece a tolerância de $(50,40 \pm 0,20)$ mm? A partir de uma única medição também, é possível afirmar que a engrenagem de impulso obedece a tolerância de $(64,62 \pm 0,20)$ mm?
- Use os valores da repetitividade, tendência e correção determinados na primeira prática referente a erros aleatórios precisamente nos itens 2.1 e 2.2 b). E agora é possível afirmar que o disco obedece a tolerância de $(50,40 \pm 0,20)$ mm e a engrenagem de impulso de $(64,62 \pm 0,20)$ mm?

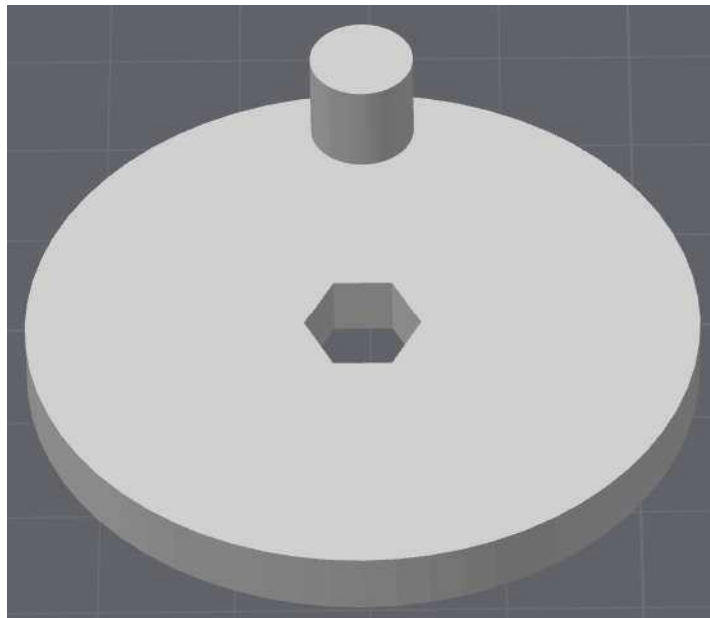


Figura 1 - Disco.

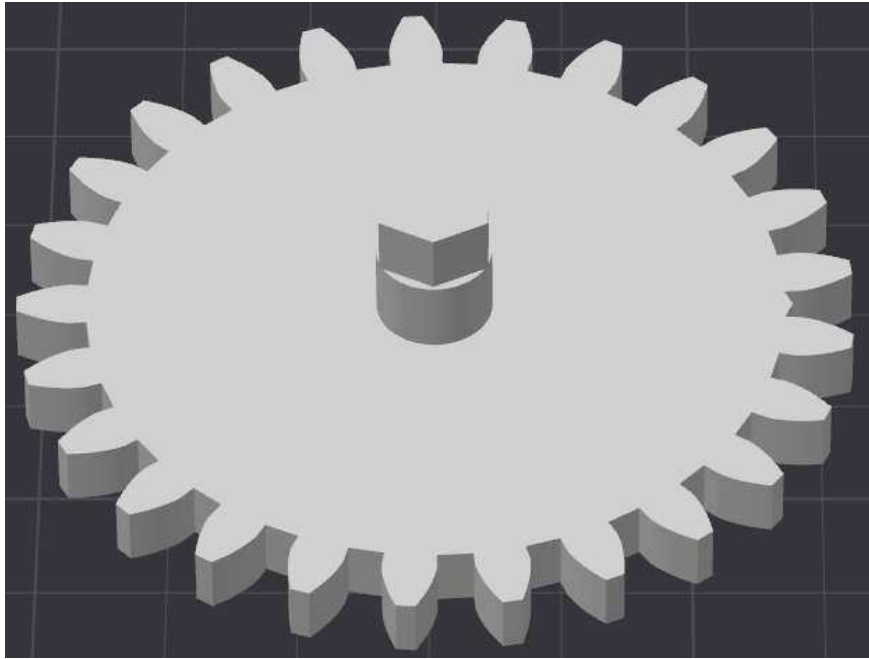


Figura 2 - Engrenagem de Impulso.

2.2. Classificação das peças

(a) Defina claramente os limites de aceitação e de rejeição.

(b) Classifique o disco:

- O disco está dentro da zona de dúvida superior?
- O disco está seguramente dentro da tolerância?
- O disco está dentro da zona de dúvida inferior?
- O disco está seguramente abaixo do limite inferior da tolerância?

(c) Classifique a engrenagem:

- A engrenagem está dentro da zona de dúvida superior?
- A engrenagem está seguramente dentro da tolerância?
- A engrenagem está dentro da zona de dúvida inferior?
- A engrenagem está seguramente abaixo do limite inferior da tolerância?

APÊNDICE D – ROTEIROS DA QUARTA PRÁTICA.**METROLOGIA E AVALIAÇÃO DIMENSIONAL
PRÁTICA 4****1. Tolerância e Ajuste**

A tolerância é a variação permitida nas dimensões de uma peça em relação ao valor nominal estabelecido no projeto. Como nenhum processo de fabricação é capaz de produzir dimensões absolutamente exatas, a tolerância define os limites máximo e mínimo aceitáveis para que a peça continue cumprindo sua função. Esses limites garantem que, mesmo com pequenas variações inevitáveis do processo produtivo, as peças possam ser montadas, funcionar corretamente e manter a qualidade especificada.

Os ajustes referem-se à relação dimensional entre duas peças que serão montadas, normalmente um eixo e um furo. O ajuste determina se haverá folga, interferência ou encaixe preciso entre esses elementos. Existem três tipos principais: ajuste com folga, quando o eixo é sempre menor que o furo, permitindo movimento livre; ajuste com interferência, quando o eixo é maior que o furo, resultando em montagem mais rígida ou permanente; e ajuste incerto, quando ora pode haver folga, ora interferência, dependendo da variação dentro das tolerâncias. A combinação das tolerâncias do eixo e do furo é o que determina o tipo e a qualidade do ajuste.

A aplicação correta de tolerâncias e ajustes está diretamente ligada ao conceito de intercambiabilidade, que é a capacidade de qualquer peça fabricada dentro das tolerâncias especificadas funcionar adequadamente quando montada com outra peça também dentro das tolerâncias, independentemente de quando, onde ou por quem foi produzida. Em outras palavras, a intercambiabilidade garante que peças substitutas possam ser usadas sem a necessidade de retrabalho, seleção manual ou ajustes durante a montagem. Isso é fundamental na indústria moderna, pois reduz custos, agiliza processos e aumenta a confiabilidade dos produtos.

2. Atividades**2.1. Considere os acoplamentos $\varnothing 20H11/c11$, $\varnothing 20H8/zb7$ e $\varnothing 20H5/m4$.**

- Determine para furo:
 - (a) Tolerância do furo;
 - (b) Afastamento superior;
 - (c) Afastamento inferior;
 - (d) Dimensão mínima;
 - (e) Dimensão máxima;
- Determine para eixo:
 - (a) Tolerância do eixo;
 - (b) Afastamento superior;
 - (c) Afastamento inferior;
 - (d) Dimensão mínima;

- (e) Dimensão máxima;
- Determine para o acoplamento
 - (a) Folga mínima
 - (b) Folga máxima
 - (c) Caracterize o acoplamento

2.2. **Classificação dos acoplamentos impressões 3D**

- (a) Ao observar e manusear as peças, classifique os acoplamentos de acordo com:
 - Ajuste com folga;
 - Ajuste com interferência;
 - Ajuste incerto.
- (b) Faça medições reais dos furos e eixos das peças e de acordo com os cálculos anteriores do item 2.1 verifique se as peças estão dentro dos padrões de projeto.
- (c) Agora analise as peças impressas e faça a combinações entre elas e veja qual tipo de ajuste é possível.

Ex: O acoplamento azul que de acordo com o projeto é um acoplamento com ajuste com folga, ao colocar o eixo desse conjunto junto com o furo do acoplamento da cor preto já dar um ajuste com interferência.

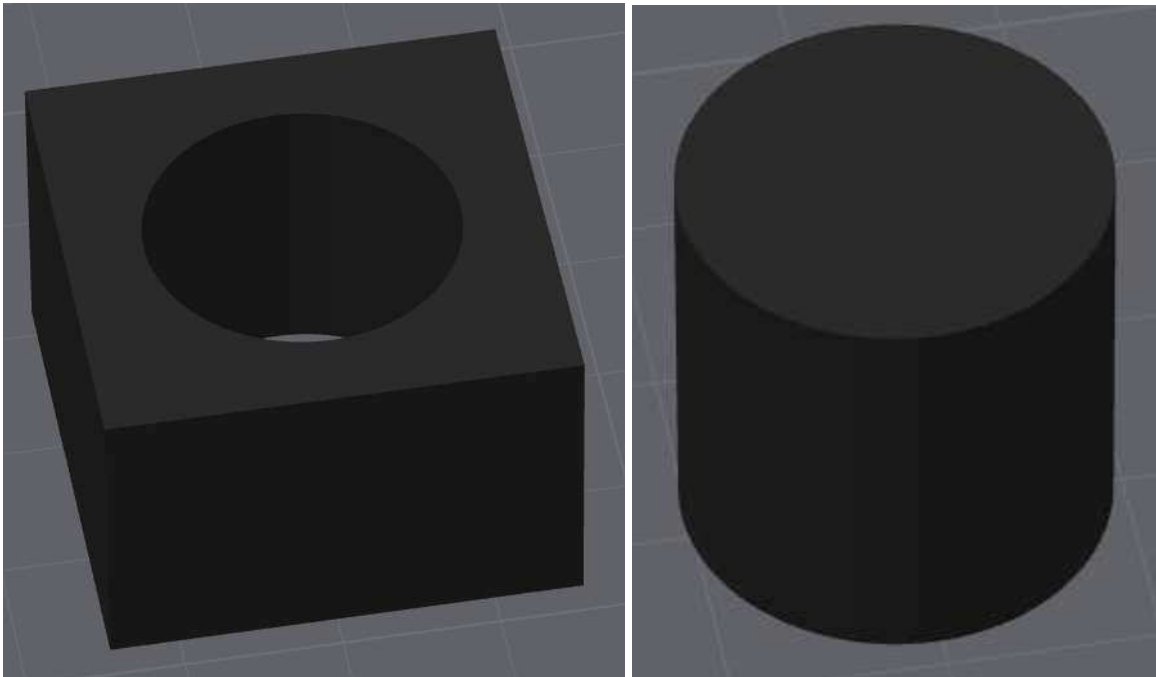


Figura 1 - Furo e eixo.

Tabela 2.3: Tolerâncias dimensionais

Grupo de Dimensões em milímetros – Valores da Tabela (tolerâncias) em [µm]														
Quali- dade	Até 1	De 1 até 3	De 3 até 6	De 6 até 10	De 10 até 18	De 18 até 30	De 30 até 50	De 50 até 80	De 80 até 120	De 120 até 180	De 180 até 250	De 250 até 315	De 315 até 400	De 400 até 500
IT 01	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8	1	1,2	2	2,5	3	4
IT 0	0,5	0,5	0,6	0,6	0,8	1	1	1,2	1,5	2	3	4	5	6
IT 1	0,8	0,8	1	1	1,2	1,5	1,5	2	2,5	3,5	4,5	6	7	8
IT 2	1,2	1,2	1,5	1,5	2	2,5	2,5	3	4	5	7	8	9	10
IT 3	2	2	2,5	2,5	3	4	4	5	6	8	10	12	13	15
IT 4	3	3	4	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20
IT 5	4	4	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27
IT 6	6	6	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40
IT 7	10	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63
IT 8	14	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97
IT 9	25	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155
IT 10	40	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250
IT 11	60	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400
IT 12	----	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630
IT 13	----	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970
IT 14	----	250	300	360	430	520	620	740	870	1000	1150	1300	1400	1550
IT 15	----	400	480	580	700	840	1000	1200	1400	1600	1850	2100	2300	2500
IT 16	----	600	750	900	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900	3200	3600	4000

Obs: Os valores "de" são exclusivos, e os valores "até" são inclusivos

Tabela 2.4: Afastamento de Referências para Eixos
Afastamentos Superiores (µm)

Dimensões (mm) > <	a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h
de 0 a 1	X	X	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0
de 1 a 3	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0
de 3 a 6	-270	-140	-70	-46	-30	-20	-14	-10	-6	-4	0
de 6 a 10	-280	-150	-80	-56	-40	-25	-18	-13	-8	-5	0
de 10 a 14	-290	-150	-95	X	-50	-32	X	-16	X	-6	0
de 14 a 18	-290	-150	-95	X	-50	-32	X	-16	X	-6	0
de 18 a 24	-300	-160	-110	X	-65	-40	X	-20	X	-7	0
de 24 a 30	-300	-160	-110	X	-65	-40	X	-20	X	-7	0
de 30 a 40	-310	-170	-120	X	-80	-50	X	-25	X	-9	0
de 40 a 50	-320	-180	-130	X	-80	-50	X	-25	X	-9	0
de 50 a 65	-340	-180	-140	X	-100	-60	X	-30	X	-10	0
de 65 a 80	-360	-200	-150	X	-100	-60	X	-30	X	-10	0
de 80 a 100	-380	-220	-170	X	-120	-72	X	-36	X	-12	0
de 100 a 120	-410	-240	-180	X	-120	-72	X	-36	X	-12	0
de 120 a 140	-460	-260	-200	X	-145	-85	X	-43	X	-14	0
de 140 a 160	-520	-280	-210	X	-145	-85	X	-43	X	-14	0
de 160 a 180	-580	-310	-230	X	-145	-85	X	-43	X	-14	0
de 180 a 200	-660	-340	-240	X	-170	-100	X	-50	X	-15	0
de 200 a 225	-740	-380	-260	X	-170	-100	X	-50	X	-15	0
de 225 a 250	-820	-420	-280	X	-170	-100	X	-50	X	-15	0
de 250 a 280	-920	-480	-300	X	-190	-110	X	-56	X	-17	0
de 280 a 315	-1050	-540	-330	X	-190	-110	X	-56	X	-17	0
de 315 a 355	-1200	-600	-360	X	-210	-125	X	-62	X	-18	0
de 355 a 400	-1350	-680	-400	X	-210	-125	X	-62	X	-18	0
de 400 a 450	-1500	-760	-440	X	-230	-135	X	-68	X	-20	0

Tab. 2.4: Afastamentos Inferiores (µm)

(mm) > <	j5 e j6	J7	J8	k4 à k7	k=3 k>7	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
de 0 a 1	-2	-4	-6	0	0	2	4	6	10	14	X	18	X	20	X	26	32	40	60
de 1 a 3	-2	-4	-6	0	0	2	4	6	10	14	X	18	X	20	X	26	32	40	60
de 3 a 6	-2	-4	X	1	0	4	8	12	15	19	X	23	X	28	X	35	42	50	80
de 6 a 10	-2	-5	X	1	0	6	10	15	19	23	X	28	X	34	X	42	52	67	97
de 10 a 14	-3	-6	X	1	0	7	12	18	23	28	X	33	X	40	X	50	64	90	130
de 14 a 18	-3	-6	X	1	0	7	12	18	23	28	X	33	39	45	X	60	77	108	150
de 18 a 24	-4	-8	X	2	0	8	15	22	28	35	X	41	47	54	63	73	98	136	188
de 24 a 30	-4	-8	X	2	0	8	15	22	28	35	41	48	55	64	75	88	118	160	218
de 30 a 40	-5	-10	X	2	0	9	17	26	34	43	48	60	68	80	94	112	148	200	274
de 40 a 50	-5	-10	X	2	0	9	17	26	34	43	54	70	81	97	114	136	180	242	325
de 50 a 65	-7	-12	X	2	0	11	20	32	41	53	66	87	102	122	144	172	226	300	405
de 65 a 80	-7	-12	X	2	0	11	20	32	43	59	75	102	120	146	174	210	274	360	480
de 80 a 100	-9	-15	X	3	0	13	23	37	51	71	91	124	146	178	214	258	335	445	585
de 100 a 120	-9	-15	X	3	0	13	23	37	54	79	104	144	172	210	254	310	400	525	690
de 120 a 140	-11	-18	X	3	0	15	27	43	63	92	122	170	202	248	300	365	470	620	800
de 140 a 160	-11	-18	X	3	0	15	27	43	65	100	134	190	228	280	340	415	535	700	900
de 160 a 180	-11	-18	X	3	0	15	27	43	68	108	146	210	252	310	380	465	600	780	1000
de 180 a 200	-13	-21	X	4	0	17	31	50	77	122	166	236	284	350	425	520	670	880	1150
de 200 a 225	-13	-21	X	4	0	17	31	50	80	130	180	258	310	385	470	575	740	960	1250
de 225 a 250	-13	-21	X	4	0	17	31	50	84	140	196	284	340	425	520	640	820	1050	1350
de 250 a 280	-16	-26	X	4	0	20	34	56	94	158	218	315	385	475	580	710	920	1200	1550
de 280 a 315	-16	-26	X	4	0	20	34	56	98	170	240	350	425	525	650	790	1000	1300	1700
de 315 a 355	-18	-28	X	4	0	21	37	62	108	190	268	390	475	590	730	900	1150	1500	1900
de 355 a 400	-18	-28	X	4	0	21	37	62	114	208	294	435	530	660	820	1000	1300	1650	2100
de 400 a 450	-20	-32	X	5	0	23	40	68	126	232	330	490	595	740	920	1000	1450	1850	2400
de 450 a 500	-20	-32	X	5	0	23	40	68	132	252	360	530	660	820	1000	1250	1600	2100	2800

De: Exclusive. – a: Inclusive