

MATHEUS MACHADO TALONE

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DE PEÇA  
FABRICADA VIA MANUFATURA ADITIVA EM UMA CERVEJARIA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2025

MATHEUS MACHADO TALONE

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DE PEÇA  
FABRICADA VIA MANUFATURA ADITIVA EM UMA CERVEJARIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato

Uberlândia

2025

**MATHEUS MACHADO TALONE**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DE PEÇA  
FABRICADA VIA MANUFATURA ADITIVA EM UMA CERVEJARIA**

Trabalho de conclusão de curso Engenharia  
Mecânica pela Faculdade de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal de  
Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos  
de Fabricação.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato

FEMEC - UFU - Orientador

---

Prof. Jose Jean Paul Zanlucchi de Souza Tavares

---

Eng. Luiz Eduardo dos Santos Paes

**Uberlândia, 06 de maio de 2025.**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais por constituírem minha base durante a graduação, meus colegas de curso por fazerem o tempo na graduação leve e gratificante, meu orientador, Alexandre Zuquete, por viabilizar esse trabalho que tenho grande apreço e a todos que de alguma maneira contribuíram para que chegasse até aqui.

## RESUMO

A manufatura aditiva (MA) tem emergido como uma tecnologia promissora na Indústria 4.0, oferecendo soluções inovadoras para a produção de peças sob demanda e a otimização de processos industriais. No setor alimentício, essa tecnologia apresenta potencial significativo para reduzir custos operacionais e aumentar a eficiência na manutenção de equipamentos. Este trabalho analisa a viabilidade técnica e financeira da aplicação da manufatura aditiva em uma fábrica de cerveja, com foco na produção do componente chamado "pente" do pasteurizador. A metodologia envolveu a modelagem tridimensional da peça, seguida pela fabricação em diferentes materiais por meio da impressão 3D, como PLA, ABS e Tritan, utilizando parâmetros específicos para cada material. Além disso, foram realizadas análises comparativas de custos e testes de desempenho das peças fabricadas em relação às originais fornecidas pelo fabricante. Os resultados indicaram que o uso do Tritan foi tecnicamente superior, apresentando maior resistência térmica e mecânica, com vida útil equivalente à peça original em campo. Financeiramente, a produção por manufatura aditiva representou 18% do custo das peças adquiridas do fornecedor, destacando-se como uma alternativa viável e economicamente vantajosa.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva; Impressão 3D; Cerveja; Setor alimentício.

## ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) has emerged as a promising technology in Industry 4.0, offering innovative solutions for on-demand production and optimizing industrial processes. In the food industry, this technology presents significant potential to reduce operational costs and increase efficiency in equipment maintenance. This study analyzes the technical and financial feasibility of additive manufacturing in a brewery, focusing on producing a component called the "comb" of the pasteurizer. The methodology involved the three-dimensional modeling of the part, followed by its fabrication using different materials through 3D printing, such as PLA, ABS, and Tritan, with specific parameters for each material. Additionally, comparative cost analyses and performance tests of the manufactured parts were conducted about the originals supplied by the manufacturer. The results indicated that Tritan was technically superior, offering greater thermal and mechanical resistance with a service life equivalent to the original part in the field. Financially, the production via additive manufacturing represented 18% of the cost of parts purchased from the supplier, highlighting it as a viable and economically advantageous alternative.

**Keywords:** Additive Manufacturing; 3D Printing; Beer; Food Industry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas da Revolução Industrial (Burtet, 2022).....	17
Figura 2. Imagem ilustrativa do acoplamento elástico original.....	22
Figura 3. (a) Ventoinha de motobomba (b) Proteção da parte móvel da ventoinha de motor (c) Bloqueador de painel elétrico, garra de bloqueio (d) Gabarito de erro em garrafas retornáveis.....	22
Figura 4. Tanques de maturação (a) Vista externa (b) Vista interna da fábrica.....	23
Figura 5. Despaletizadora de latas.....	24
Figura 6. Enchedora de latas.....	25
Figura 7. Enchedora de latas a esquerda e recravadora de latas a direita.....	26
Figura 8. Latas na recravadora.....	26
Figura 9. Pasteurizador de latas.....	27
Figura 10. Empacadoras de latas shrink.....	28
Figura 11. Paletizadora de pacote de latas.....	29
Figura 12. Imagem do pente original do pasteurizador.....	30
Figura 13. Imagem do pente montado na saída do pasteurizador.....	30
Figura 14. Imagem da saída do pasteurizador com os pentes indicados pelas setas.....	31
Figura 15. Imagem da saída do pasteurizador vazio. E os pentes, as peças em preto, são responsáveis por fazer a transição de latas da malha para o transporte.....	31
Figura 16. Esquema do sistema malha - pentes - transporte. Vista lateral.....	32
Figura 17. Imagem do pente em funcionamento com a malha.....	33
Figura 18. Esquema de encaixe da do pente com a malha.....	33
Figura 19. Pente do pasteurizador (a) original, (b) manufaturado em Tritan....	36
Figura 20. Medições da peça com o paquímetro.....	36
Figura 21. Impressora 3D GTMax3D A2V2.....	37
Figura 22. Informações dos filamentos da marca 3D Fila utilizados neste estudo.....	37
Figura 23. Software de planejamento software PrusaSlicer 2.6.1.....	38
Figura 24. Cotas A.1, A.2, A.3 e A.4 (Parte 1).....	39
Figura 25. Cotas A.5 (Parte 1).....	39

Figura 26. Cotas B.1, B.2, B.3, B.4, B.5 e B.6 (Parte 2) .....	40
Figura 27. Cotas C.1 (Parte 3) .....	40
Figura 28. Cotas C.2 (Parte 3) .....	40
Figura 29. Cotas C.3 (Parte 3) .....	41
Figura 30. Cotas C.4 (Parte 3) .....	41
Figura 31. Cotas D.1 (Parte 4) .....	41
Figura 32. Cotas D.2 (Parte 4) .....	42
Figura 33. Cotas D.3 (Parte 4) .....	42
Figura 34. Cotas D.4 (Parte 4) .....	42
Figura 35. Cotas E.1, E.2, E.3 e E.4 (Parte 5).....	43
Figura 36. Cotas F.1, F.2, F.3, F.4, F.5 e F.6 (Parte 6).....	43
Figura 37. Pente impresso em ABS. ....	51
Figura 38. Velocidade para movimento de impressão. ....	52
Figura 39. Modificadores. ....	53
Figura 40. Detalhe da movimentação do bico extrusor. ....	53
Figura 41. Detalhe do preenchimento de forma maciça nas abas do pente. ....	53
Figura 42. Detalhe do preenchimento do interior do corpo do pente.....	54
Figura 43. Definição dos parâmetros da primeira camada. ....	54
Figura 44. Pente impresso em Tritan. ....	55
Figura 45. Divisão do pente para impressão. ....	56
Figura 46. Pentes impressos partidos ao meio em TRITAN. ....	57
Figura 47. Pentes impressos repartidos ao meio ainda com suporte de impressão.....	57
Figura 48. Quantidade de pentes produzidos e o custo proporcional em relação ao valor de aquisição junto ao fornecedor original. ....	61
Figura 49. Histórico de substituição dos pentes. ....	62

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Aferimento das cotas A.1, A.2, A.3 e A.4 .....	48
Tabela 2. Aferimento e comparação das cotas. ....	58
Tabela 3. Porcentagem do custo unitário em relação ao original em função da quantidade produzida.....	60

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DfAM	<i>Design for Additive Manufacturing</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
MA	Manufatura Aditiva
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
RA	Realidade Aumentada
SiC	<i>Silicon Carbide</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.1.1. <i>Objetivo Geral</i> .....	13
1.1.2. <i>Objetivo Específicos</i> .....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
2.1. INTRODUÇÃO À MA .....	15
2.2. MATERIAIS UTILIZADOS NA MA .....	18
2.3. APLICAÇÕES DE MA NO SETOR INDUSTRIAL .....	19
2.4. UTILIZAÇÃO DE MA NO SETOR CERVEJEIRO.....	21
3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CERVEJA .....	23
4. METODOLOGIA .....	35
4.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA .....	35
4.2. IDENTIFICAÇÃO DO ITEM PASSÍVEL DE MA .....	35
4.3. FERRAMENTAS UTILIZADAS .....	36
3.3. AFERIÇÃO METROLÓGICA .....	38
3.3. AVALIAÇÃO DE CUSTO.....	44
3.4. CÁLCULO DE CUSTO.....	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	47
4.1. AFERIMENTO DAS MEDIÇÕES .....	47
4.2. IMPRESSÃO DOS PENTES .....	48
4.1.1. <i>Pente PLA</i> .....	49
4.3. ANÁLISE DAS IMPRESSÕES .....	56
4.4. COMPARAÇÃO DIMENSIONAL .....	58
4.5. ANÁLISE DO CUSTO DO PENTE .....	59
4.6. ANÁLISE DE QUEBRAS E IMPACTO ECONÔMICO DA SUBSTITUIÇÃO DOS PENTES .....	61
6. CONCLUSÃO .....	63
REFERÊNCIAS .....	65
ANEXO A .....	70
ANEXO B .....	80

## 1. INTRODUÇÃO

A otimização dos processos de produção na indústria é um esforço multifacetado que busca aumentar a eficiência, reduzir custos e melhorar a qualidade do produto. No contexto da Indústria 4.0, a integração de tecnologias avançadas, como análise de dados, automação e sensores inteligentes, desempenha um papel fundamental na obtenção desses objetivos. A aplicação de estratégias de otimização de processos é essencial para lidar com ineficiências que podem levar a gargalos e aumento de custos operacionais, afetando, em última análise, a competitividade no mercado (Goyal, 2023; Tripathi et al., 2022; Wszołek et al., 2020).

Alinhado a esses princípios onde as tecnologias de manufatura inteligente visam otimizar a utilização de recursos e aumentar a eficiência da produção (Alabi, 2024; Harikannan et al., 2020), a Manufatura Aditiva (MA) tem a capacidade de produzir geometrias complexas quando produzidas com os métodos de manufatura convencionais, atendendo assim à crescente demanda por componentes leves e de alta resistência em indústrias como alimentícia, aeroespacial, automotiva e biomédica (Gülcen et al., 2021; Lyons et al., 2020).

A introdução da MA na indústria alimentícia, particularmente no contexto de manutenção, representa um avanço significativo na eficiência da produção e na confiabilidade do equipamento. À medida que o setor alimentício adota cada vez mais os princípios da Indústria 4.0, a MA surge como uma tecnologia crucial que não apenas aprimora as capacidades de produção, mas também otimiza os processos de manutenção. Essa integração é essencial para manter os altos padrões de qualidade e segurança exigidos na fabricação de alimentos (Abbate et al., 2022).

A MA oferece vantagens exclusivas na manutenção de equipamentos de produção de alimentos. Um dos principais benefícios é a capacidade de produzir peças de reposição sob demanda, o que pode reduzir significativamente o tempo de inatividade associado a falhas de equipamento. As estratégias tradicionais de manutenção geralmente dependem da disponibilidade de peças pré-fabricadas, o que pode levar a atrasos na produção se essas peças não forem facilmente acessíveis. Ao utilizar a MA, os fabricantes de alimentos podem fabricar rapidamente os componentes necessários, minimizando assim as interrupções

de produção e aumentando a eficácia geral do equipamento (Fam et al., 2018). Essa capacidade é particularmente relevante na indústria alimentícia, onde o equipamento deve operar continuamente para atender às demandas de produção e manter a segurança do produto (Ojanga, 2019).

Neste contexto, este trabalho avalia a aplicação da MA na fabricação de um componente crítico do processo produtivo: o "pente" do pasteurizador de latas. O pasteurizador desempenha um papel essencial na linha de produção ao garantir a validade microbiológica do produto envasado por meio de choque térmico. Durante esse processo, as latas são transportadas para o interior do equipamento por meio de transportadores, onde percorrem uma esteira interna enquanto são submetidas ao jateamento de vapor d'água, elevando sua temperatura de forma controlada.

O "pente" é localizado na etapa final desse processo e possui a função vital de transferir as latas do interior do pasteurizador de volta para os transportadores que as conduzem ao próximo estágio da linha de produção. Este componente é projetado para proporcionar uma transição suave e eficiente, evitando que as latas tombem ao passar da malha transversal do pasteurizador para o fluxo linear do transportador. A sua integridade e desempenho são fundamentais para a continuidade da produção e para prevenir interrupções que poderiam comprometer a eficiência operacional e a qualidade do produto.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a análise da viabilidade técnica e financeira da substituição da peça “pente” fabricada de modo convencional pelo mesmo item manufaturada aditivamente em uma fábrica de cerveja, de modo que vá atender os requisitos de projeto. O estudo busca demonstrar a MA como uma alternativa estratégica, alinhada às demandas operacionais e aos objetivos de eficiência e sustentabilidade da fábrica.

### 1.1.2. Objetivo Específicos

Para alcançar as demandas de eficiência e viabilidade no uso da manufatura aditiva em uma fábrica de cerveja, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar uma revisão da literatura sobre manufatura aditiva, abordando tecnologias, materiais e aplicações, para fundamentar as análises realizadas;
- Avaliar o desempenho técnico das peças produzidas por manufatura aditiva, considerando dimensões, resistência e vida útil em comparação às peças originais;
- Comparar os custos de produção interna por manufatura aditiva com os custos de aquisição de peças junto ao fornecedor, destacando os potenciais ganhos financeiros;
- Propor estratégias de otimização para a aplicação da manufatura aditiva na fábrica, considerando melhorias no design das peças, criação de estoques estratégicos e expansão da tecnologia para outros componentes.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste trabalho, serão abordados os principais conceitos relacionados à MA, incluindo a introdução à MA, os materiais utilizados, e suas aplicações no contexto da indústria moderna, especialmente no setor alimentício.

### 2.1. Introdução à MA

A MA, comumente chamada de impressão 3D, é uma tecnologia transformadora que constrói objetos camada por camada a partir de modelos digitais. Esse processo permite a criação de geometrias complexas que muitas vezes são inatingíveis por meio de métodos tradicionais de manufatura subtrativa. De acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), a MA é definida como "um processo de união de materiais para fazer objetos a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada sobre camada" (Huang et al., 2015). Este método contrasta com as técnicas tradicionais de manufatura subtrativa, onde o material é removido de um bloco sólido para criar uma peça. A MA abrange uma variedade de processos, incluindo estereolitografia, sinterização seletiva a laser e modelagem por deposição fundida, cada um com capacidades e aplicações únicas (Zadpoor, 2017; Mehrpouya et al., 2019).

A importância da MA não está apenas em sua capacidade de produzir designs complexos, mas também em seu potencial de personalização, eficiência e sustentabilidade nas práticas de manufatura (Özgüner & Özgüner, 2022). A história da manufatura aditiva remonta ao início da década de 1980, quando as primeiras tecnologias de impressão 3D foram desenvolvidas. O foco inicial foi principalmente na prototipagem rápida, que permitiu que os designers criassem modelos físicos rapidamente para fins de teste e visualização (Chen et al., 2021).

Ao longo das décadas, os avanços na tecnologia levaram a uma diversificação dos métodos de MA, incluindo técnicas como estereolitografia, sinterização seletiva a laser e modelagem de deposição fundida, cada uma com aplicações e compatibilidades de materiais exclusivas (Jiménez et al., 2019; Jockusch & Özcan, 2020).

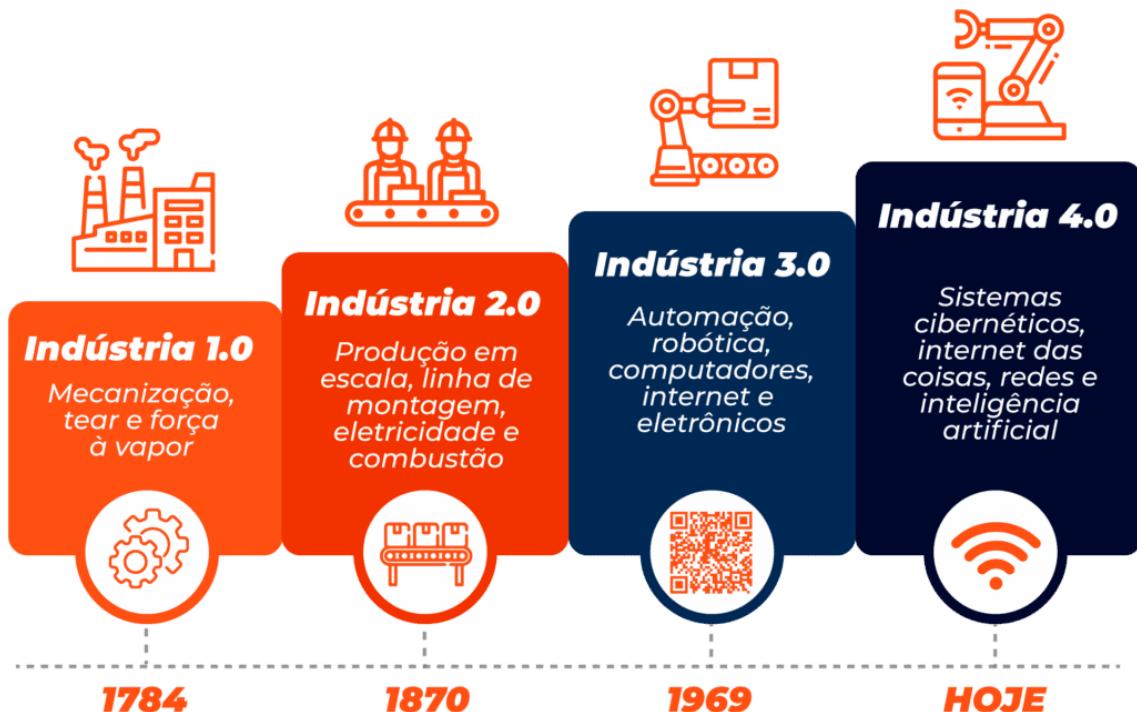
No início dos anos 2000, a MA começou a fazer a transição da prototipagem rápida para a fabricação rápida, onde as peças de uso final podiam ser

produzidas diretamente a partir de designs digitais, expandindo ainda mais sua relevância industrial (Puebla et al., 2012).

Em termos de aplicações, a MA encontrou uma posição em vários setores, incluindo alimentício, aeroespacial, automotivo e saúde. Sua capacidade de produzir peças leves e complexas a tornou particularmente valiosa em indústrias onde desempenho e eficiência são críticos (Liu et al., 2021; Gu, 2023). Por exemplo, no campo médico, a MA é usada para criar implantes e próteses específicos para pacientes, mostrando seu potencial de personalização e melhores resultados para os pacientes (Zhang et al., 2017). Além disso, a tecnologia é reconhecida por suas vantagens de sustentabilidade, como redução de desperdício de material e menor consumo de energia em comparação aos processos de fabricação tradicionais (Özgüner & Özgüner, 2022; Huang et al., 2015).

A evolução das tecnologias de MA também levou a esforços significativos de pesquisa e desenvolvimento visando melhorar as propriedades dos materiais e os processos de fabricação. Estudos recentes se concentraram na otimização de parâmetros para manufatura aditiva de metal, o que é crucial para a produção de componentes de alta qualidade que atendem aos rigorosos padrões da indústria (Rodrigues et al., 2019). Além disso, a integração de métodos computacionais para modelagem e simulação melhorou a compreensão do comportamento microestrutural dos materiais durante o processo de MA, abrindo caminho para técnicas de fabricação mais confiáveis e eficientes (Cao et al., 2023).

Neste sentido, a capacidade da MA de produzir peças diretamente de designs digitais sem a necessidade de ferramentas se alinha bem com os princípios da Indústria 4.0 (Fig. 1), que defendem flexibilidade e eficiência nas operações de fabricação (Friedrich et al., 2022). Por exemplo, tecnologias como sinterização a laser e modelagem por deposição fundida demonstraram seu potencial para produção em maior volume, deslocando assim as técnicas tradicionais de fabricação em certas aplicações (Eyers, 2017).



**Figura 1.** Etapas da Revolução Industrial (Burtet, 2022).

Além disso, a adoção de tecnologias de MA pode impactar significativamente a dinâmica da cadeia de suprimentos. Ao permitir a produção localizada e reduzir os prazos de entrega, a MA contribui para cadeias de suprimentos mais resilientes, o que é um aspecto crítico da Indústria 4.0 (Friedrich et al., 2022). A integração da MA nas cadeias de suprimentos permite a fabricação sob demanda, reduzindo os custos de estoque e aumentando a capacidade de resposta às mudanças do mercado. No entanto, a implementação de MA em pequenas e médias empresas continua sendo um desafio, principalmente em economias em desenvolvimento, onde as taxas de adoção ainda são baixas (Kulkarni et al., 2021).

Ao monitorar as condições da máquina e as métricas de desempenho em tempo real, os fabricantes podem reduzir o tempo de inatividade e aumentar a produtividade. Essa abordagem baseada em dados é crucial para garantir a confiabilidade e a eficiência dos processos de MA, principalmente à medida que eles aumentam para aplicações industriais (Mycroft et al., 2020).

Além disso, os processos de design e fabricação em MA estão evoluindo para incorporar técnicas computacionais mais sofisticadas, como simulação e aprendizado de máquina, que aprimoraram os princípios de design para MA (do

inglês, *Design for Additive Manufacturing – DfAM*) (Nieto & Sánchez, 2021). Esses avanços permitem que os fabricantes otimizem os designs para desempenho e capacidade de fabricação, maximizando assim os benefícios das tecnologias de MA em um contexto da Indústria 4.0 (Olsen & Tomlin, 2020).

## 2.2. Materiais utilizados na MA

As principais categorias de materiais usados na impressão 3D incluem polímeros, metais, cerâmicas e compósitos, cada um oferecendo vantagens e desafios distintos.

- **Polímeros:** São os materiais mais amplamente usados na manufatura aditiva, principalmente devido à sua versatilidade e facilidade de processamento. Os tipos comuns de polímeros incluem termoplásticos como acrilonitrila butadieno estireno (*Acrylonitrile Butadiene Styrene* – ABS) e ácido polilático (*Polylactic Acid* – PLA), que são favorecidos por suas propriedades mecânicas e capacidade de impressão (Zgryza et al., 2018). Além disso, polímeros avançados como poliéster éter cetona (PEEK) são cada vez mais utilizados em aplicações médicas devido à sua biocompatibilidade e resistência (Shetty et al., 2022). Hidrogéis, particularmente aqueles usados em biofabricação, estão ganhando força por sua capacidade de imitar tecidos biológicos e apoiar o crescimento celular (Bakarich et al., 2014). O desenvolvimento de polímeros funcionais que podem ser personalizados para aplicações específicas, como sistemas de administração de medicamentos, aumenta ainda mais a utilidade dos polímeros na MA (Ligon et al., 2017).
- **Metais:** São outra categoria crítica na manufatura aditiva, especialmente em indústrias como aeroespacial e automotiva, onde altas relações resistência-peso são essenciais. Os processos de MA de metais, incluindo fusão seletiva a laser (*Selective Laser Melting* – SLM) e fusão por feixe de elétrons (*Electron Beam Melting* – EBM), permitem a produção de geometrias complexas que são difíceis de obter com métodos de fabricação tradicionais (Singh et al., 2015). Os metais comuns usados na MA incluem ligas de titânio, aço inoxidável e alumínio, cada um selecionado por suas propriedades mecânicas e aplicações específicas

(Zhang, 2023). A capacidade de produzir componentes metálicos leves por meio da MA é particularmente vantajosa em aplicações como motores de turbina a gás, onde desempenho e eficiência são primordiais (Singh et al., 2015).

- **Cerâmicas:** Estão sendo cada vez mais exploradas na manufatura aditiva devido à sua alta resistência térmica e resistência mecânica. Materiais como carboneto de silício (*Silicon Carbide* – SiC) e alumina são comumente usados em aplicações que exigem durabilidade e resistência ao calor (Křížová, 2023). O desenvolvimento de cerâmicas com graduação funcional permite a criação de componentes com propriedades variadas, melhorando seu desempenho em aplicações específicas (Scheithauer et al., 2017). A capacidade de imprimir cerâmicas usando tecnologias MA abre novos caminhos para aplicações em campos eletrônicos, aeroespaciais e biomédicos (He et al., 2021).
- **Compósitos:** Combinam as propriedades de diferentes materiais para atingir características de desempenho aprimoradas. Por exemplo, compósitos de polímero-cerâmica podem ser projetados para fornecer flexibilidade e resistência, tornando-os adequados para várias aplicações, incluindo implantes biomédicos (Inzana et al., 2014). A otimização de materiais compósitos para AMA é uma área ativa de pesquisa, com foco na melhoria de propriedades mecânicas e técnicas de processamento (Raja & Rajan, 2023). A integração de fibras de carbono ou outros reforços em matrizes de polímero pode aumentar significativamente a resistência e a rigidez de peças impressas em 3D, tornando-as adequadas para aplicações exigentes (Mustafa et al., 2023).

### **2.3. Aplicações de MA no setor industrial**

A MA possui diversas aplicações em vários setores industriais, aprimorando significativamente os processos de produção, estratégias de manutenção e personalização de produtos. No contexto da manutenção, que é o foco deste estudo, uma das principais aplicações da MA é a produção de peças de reposição. As cadeias de suprimentos tradicionais frequentemente enfrentam desafios como longos prazos de entrega e altos custos de estoque,

particularmente para peças de baixo volume ou obsoletas. A MA aborda essas questões permitindo a produção sob demanda, reduzindo significativamente o tempo necessário para obter componentes críticos (Abbate et al., 2022). Por exemplo, a integração da MA na indústria aeroespacial permite a produção rápida de peças de reposição, o que é crucial para minimizar o tempo de inatividade da aeronave e aumentar a prontidão operacional (Ceruti et al., 2019). Essa capacidade é particularmente benéfica em indústrias onde a confiabilidade do equipamento é fundamental, pois permite respostas rápidas às necessidades de manutenção sem os atrasos associados aos métodos tradicionais de fabricação.

Além disso, a MA facilita o reparo e a reforma de componentes existentes. Técnicas como a manufatura aditiva por arco de arame (*Wire Arc Additive Manufacturing* – WAAM) permitem a deposição de novo material em peças desgastadas ou danificadas, estendendo efetivamente sua vida útil (Li et al., 2019). Essa abordagem não apenas reduz o desperdício ao minimizar a necessidade de substituições completas, mas também reduz os custos de manutenção ao permitir que as empresas restaurem os componentes às suas especificações originais (Veiga et al., 2020). A capacidade de reparar componentes usando tecnologias de MA pode ser particularmente vantajosa em setores como petróleo e gás, onde o equipamento é frequentemente submetido a condições adversas e requer manutenção frequente. Os colecionadores e entusiastas automobilísticos podem usar essa tecnologia para fabricar peças sob medida, garantindo que seus veículos antigos permaneçam em ótimo estado de funcionamento. Como Delmondes (2018) cita, um componente original do rádio de um corcel 1970 danificado pode ser manufaturada via manufatura aditiva e repor a peça (polia) fora de linha.

A incorporação de MA em estratégias de manutenção também se alinha aos princípios da manutenção preditiva. Ao utilizar análise de dados e aprendizado de máquina, as empresas podem prever quando a manutenção é necessária e produzir proativamente as peças necessárias usando MA. Essa abordagem aumenta a confiabilidade dos sistemas de fabricação e melhora a produtividade geral, garantindo que as atividades de manutenção sejam realizadas de forma eficiente e eficaz. A sinergia entre MA e manutenção preditiva exemplifica o potencial das tecnologias da Indústria 4.0 para otimizar

os processos de manutenção e reduzir interrupções operacionais (Alabi & Botef, 2018).

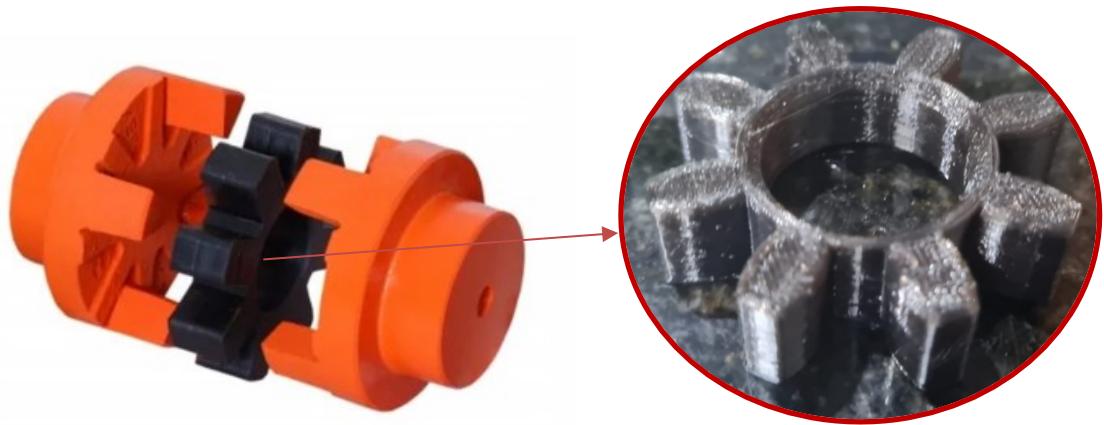
Neste sentido, a integração da Realidade Aumentada (RA) com as tecnologias de MA apresenta novas oportunidades para treinamento e suporte de manutenção. A RA pode fornecer aos técnicos orientação em tempo real sobre reparos e procedimentos de manutenção, enquanto a MA pode fornecer as peças necessárias para essas tarefas (Ceruti et al., 2019). Essa combinação aprimora o conjunto de habilidades do pessoal de manutenção e melhora a precisão e a eficiência das operações de manutenção, levando, em última análise, a um melhor desempenho do equipamento e redução do tempo de inatividade.

#### **2.4. Utilização de MA no setor cervejeiro**

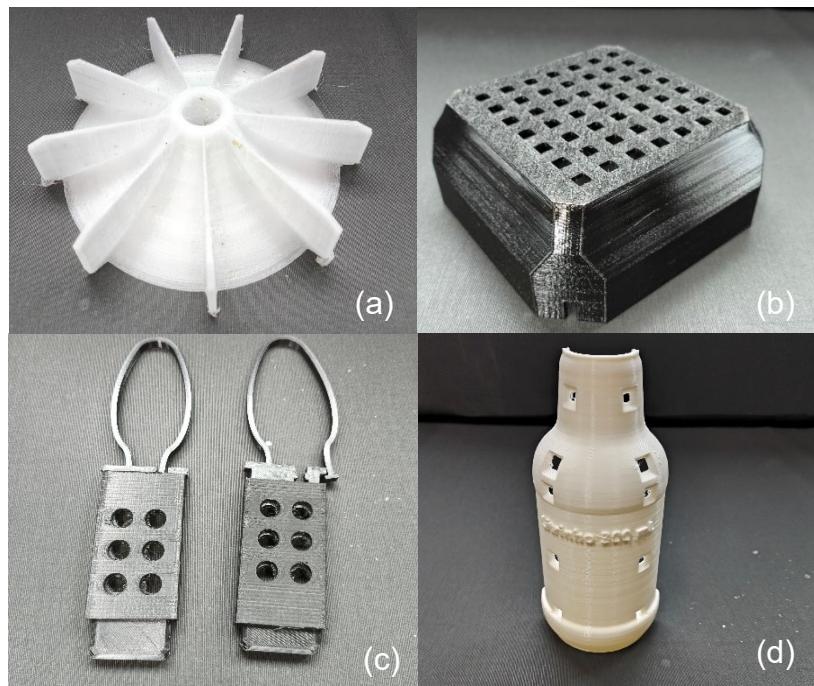
Acompanhando tendências industriais, a empresa "A" tem investido em tecnologias inovadoras, como a MA, para otimizar processos e reduzir custos operacionais. Na planta de Uberlândia, a MA é utilizada para resolver problemas pontuais e criar soluções personalizadas, como tampas de mancais, proteções para ventoinhas de motobombas, dispositivos de bloqueio de sistemas pneumáticos, calços e suportes para subsistemas. Entre os itens fabricados destacam-se componentes como o "bevel end" do equipamento empacotador da linha de envase de "long neck", produzido internamente para evitar a compra de kits completos de fabricantes; o acoplamento elástico utilizado entre eixos e motores de transportes (Fig. 2), que reduz vibrações e aumenta a eficiência; e ventoinhas de bombas hidráulicas, cuja fabricação personalizada em materiais como TRITAN e PETG atende à grande diversidade de modelos na fábrica (Fig. 18a).

Além disso, a MA também é aplicada na produção de dispositivos de segurança (Fig. 3b), como proteções para partes móveis de motores (Fig. 3c), que segregam a área de trabalho e evitam acidentes, e travas para disjuntores elétricos, utilizadas por técnicos para garantir a segurança durante manutenções. Outro exemplo relevante é o gabarito para inspeção de garrafas retornáveis (Fig. 3d), empregado pela equipe de qualidade para identificar defeitos e assegurar a padronização do processo produtivo. Esses exemplos

evidenciam a versatilidade e os benefícios proporcionados pela manufatura aditiva na fábrica.



**Figura 2.** Imagem ilustrativa do acoplamento elástico original.



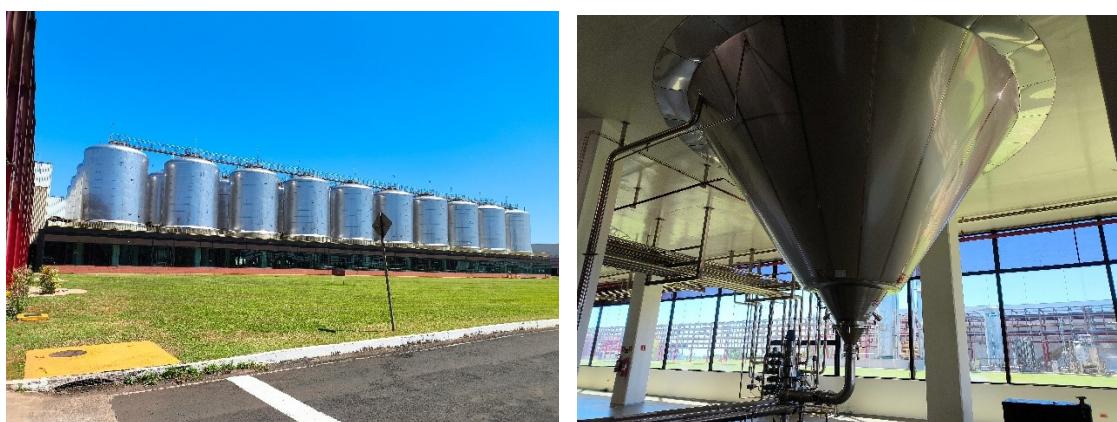
**Figura 3.** (a) Ventoinha de motobomba (b) Proteção da parte móvel da ventoinha de motor (c) Bloqueador de painel elétrico, garra de bloqueio (d) Gabarito de erro em garrafas retornáveis.

### 3. Processo de fabricação da cerveja

A produção de cerveja em uma unidade fabril segue um processo padronizado, que pode ser dividido em várias etapas. A primeira fase envolve o recebimento dos ingredientes básicos: água, malte, lúpulo e leveduras, que são essenciais para a fabricação de todos os tipos de cerveja. Após o recebimento, esses ingredientes passam por um processo denominado beneficiamento. Nesse estágio, o malte é tratado para torná-lo adequado ao consumo, enquanto a água é filtrada e tratada pela estação de captação presente na fábrica, garantindo a qualidade necessária para a produção.

A próxima etapa é a moagem, em que os ingredientes são moídos para preparar os cereais para o processo de fermentação. Durante a fermentação, os cereais moídos liberam amido, que é convertido em moléculas de açúcar. As leveduras, introduzidas nessa etapa como fermento, quebram o açúcar, produzindo álcool e gás carbônico, características fundamentais da cerveja.

Após a fermentação, o líquido é transferido para tanques de maturação (Fig. 4). Nesse estágio, a cerveja descansa em baixas temperaturas, desenvolvendo os aromas e sabores desejados para o produto final. Após um período de maturação, que varia de acordo com a marca, a cerveja passa pelo processo de filtração. Esse procedimento é essencial para conferir brilho, cor e transparência ao produto, resultando na aparência final desejada para comercialização.

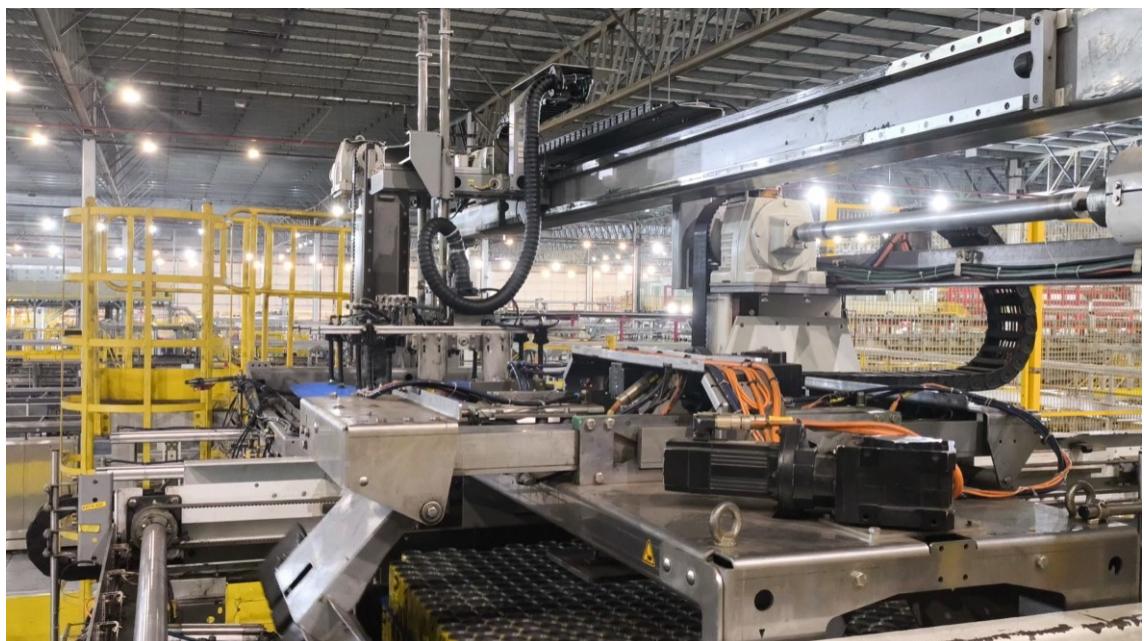


**Figura 4.** Tanques de maturação (a) Vista externa (b) Vista interna da fábrica.

A etapa final do processo de fabricação é o envase, realizado em linhas de

produção específicas. A unidade fabril analisada neste estudo possui cinco linhas de envase: uma linha dedicada às garrafas do tipo "long neck", com volumes entre 330 ml e 355 ml; uma linha de garrafas de 300 ml, popularmente conhecidas como "litrinho"; uma linha de garrafas de 1000 ml, denominadas "litrão"; e duas linhas para latas, sendo uma para latas de 269 ml e outra para latas de 410 ml.

O processo de envase utiliza uma série de equipamentos especializados, cada qual desempenhando funções específicas no ciclo de produção. As linhas de envase são abastecidas em três pontos principais, sendo o primeiro a "Despaletizadora", equipamento responsável por receber os paletes de latas vazias e não recravadas (latas abertas). Esse abastecimento é realizado pela área de logística (Fig. 5).



**Figura 5.** Despaletizadora de latas.

O processo de envase na fábrica conta com três pontos principais de abastecimento que garantem o funcionamento eficiente das linhas de produção. O primeiro ponto de abastecimento é realizado por meio do equipamento denominado "Despaletizadora". Essa máquina é responsável por transferir as camadas de latas do palete para o transporte aéreo de latas. O mecanismo de transferência utiliza um braço robótico equipado com um sistema de sucção, que eleva e posiciona as latas vazias e não recravadas (latas abertas) para serem

conduzidas à linha de envase.

O segundo ponto de abastecimento ocorre no "Alimentador de Tampas". Nesse equipamento, os operadores carregam tubetes de tampas de latas em uma esteira, que os direciona para o interior da máquina. Dentro do alimentador, os tubetes são cortados e desembrulhados, permitindo que as tampas sejam encaminhadas, por meio de uma tubulação, para o equipamento chamado "Recravadora".

O terceiro e último ponto de abastecimento das linhas de envase é o suprimento de cerveja, que é realizado por meio de tubulações conectadas à área de processo de produção do líquido. Essa tubulação introduz o líquido diretamente no equipamento conhecido como "Enchedora de Cerveja", onde as latas vazias são preenchidas. Esse equipamento recebe as latas vazias transportadas pelo sistema aéreo, as tampas provenientes da tubulação de tampas, e o líquido vindo diretamente do processo de fabricação.

A Enchedora de Cerveja (Fig. 6) desempenha um papel central no processo de envase, sendo o equipamento que dita a autonomia da linha e concentra os esforços de manutenção e operação para garantir que a linha de produção funcione em condições ideais. Seu desempenho é crítico para assegurar a eficiência do envase e a continuidade do processo produtivo.



**Figura 6.** Enchedora de latas.

Esse equipamento recebe as latas vazias, enche elas com o líquido e logo em seguida faz a “recravação” que é a etapa de tampar as latas cheias. O nome desse processo é recravação pois o subsistema da enchedora responsável por isso é chamado de “recravadora” (Fig. 7), a Fig. 8 mostra as latas no equipamento.



**Figura 7.** Enchedora de latas a esquerda e regravadora de latas a direita.



**Figura 8.** Latas na regravadora.

Após serem preenchidas e regravadas na enchedora de cerveja, as latas são

encaminhadas para o transportador de latas, que as conduz ao próximo equipamento da linha de envase: o pasteurizador. Este equipamento desempenha um papel essencial no processo de produção, garantindo a estabilidade microbiológica do produto.

O pasteurizador (Fig. 9) recebe as latas provenientes da enchedora e realiza o processo de pasteurização, como o próprio nome sugere. Durante essa etapa, as latas são submetidas a um aumento controlado de temperatura, atingindo a faixa de 60 °C por um período de 30 minutos. O aquecimento é realizado por meio de jateamento de vapor de água em um espaço confinado, cuidadosamente projetado para garantir que todas as latas sejam uniformemente tratadas. Esse processo é essencial para eliminar possíveis microorganismos, prolongar a vida útil do produto e garantir sua segurança para o consumo.



**Figura 9.** Pasteurizador de latas.

Após a conclusão do processo de pasteurização, as latas são encaminhadas para os inspetores de nível, equipamentos responsáveis por verificar a integridade das latas e a conformidade do enchimento. Nessa etapa, são identificados e retirados da linha de produção quaisquer itens que apresentem defeitos, como latas estufadas, mal cheias ou com outros desvios de qualidade.

Em seguida, as latas aprovadas são direcionadas para o terceiro grande equipamento da linha de envase: as empacadoras (Fig. 10). Esse equipamento desempenha a função de organizar as latas, que até então estavam dispostas de forma aleatória nos transportadores, em lotes organizados de 15 unidades,

compostos por 3 fileiras de 5 latas cada. Após a organização, a empacotadora envolve o lote com um filme plástico conhecido como "shrink". Em seguida, os lotes são submetidos a um processo de aquecimento em um forno, que faz com que o plástico encolha, aderindo às latas e formando os chamados "pacotes de latas".

Essa etapa é fundamental para o transporte e armazenamento do produto final, garantindo sua proteção, organização e facilidade de manuseio durante a logística de distribuição.

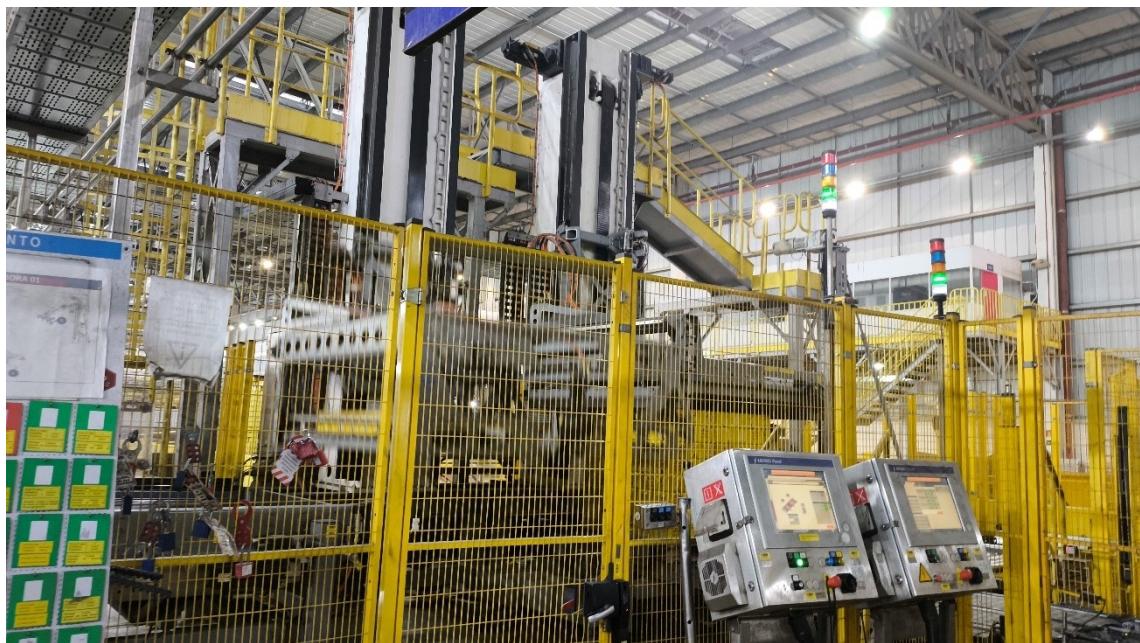


**Figura 10.** Empacotadoras de latas shrink.

Na sequência, os pacotes de latas são encaminhados pelos transportadores de pacotes de latas ao último equipamento da linha de envase, denominado paletizadora (Fig. 11). Esse equipamento desempenha a função de organizar os pacotes em paletes, preparando-os para o transporte e armazenamento no armazém.

A paletizadora é equipada com um par de braços robóticos que realizam o posicionamento preciso dos pacotes, organizando-os camada por camada, em um processo similar ao jogo eletrônico "Tetris". Após a organização de cada camada, o equipamento eleva e empurra as camadas subsequentes para que sejam sobrepostas de maneira estável e eficiente. Ao final do processo, o palete completo é envolvido por um filme plástico transparente, garantindo a firmeza e a integridade estrutural do conjunto durante o transporte.

O palete finalizado é, então, encaminhado para o armazém de cerveja, onde é recebido pelos operadores de empilhadeiras, responsáveis por sua movimentação e armazenamento, completando assim o ciclo de produção e envase.



**Figura 11.** Paletizadora de pacote de latas.

Entre as máquinas que compõem a linha de envase de cerveja, o pasteurizador desempenha um papel fundamental no processo produtivo. Além de realizar a pasteurização, garantindo a estabilidade microbiológica do produto, esse equipamento inclui um componente essencial para a continuidade da linha de produção: o "pente" (Fig. 12).

O pente é responsável pela transposição das latas do interior do pasteurizador (Fig. 13) para as esteiras de transporte, que conduzem as latas ao longo de toda a linha de produção. Essa peça assegura o fluxo contínuo das latas, desempenhando uma função crítica na integração entre o pasteurizador e os equipamentos subsequentes, garantindo a eficiência e a sincronização do processo produtivo.

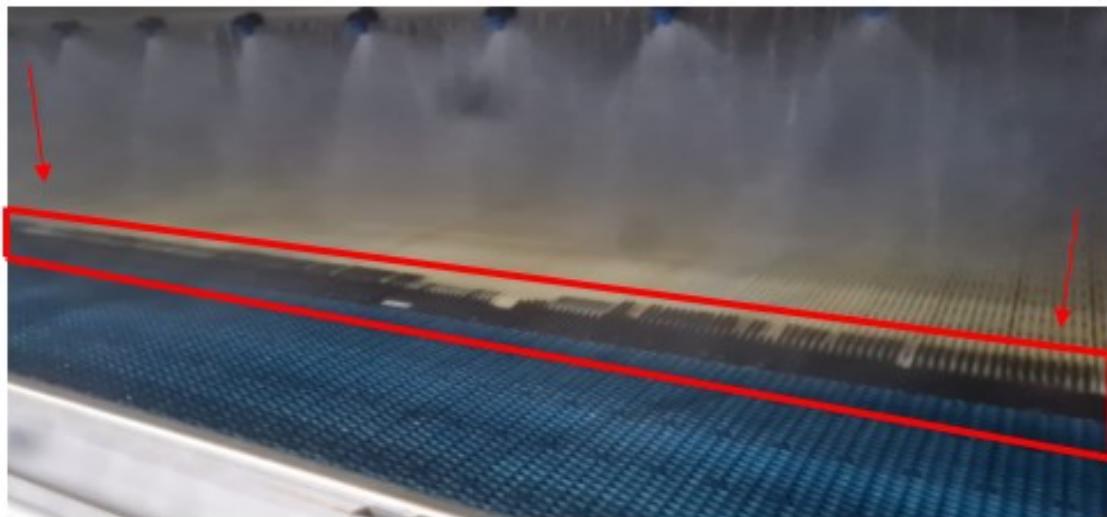


**Figura 12.** Imagem do pente original do pasteurizador.



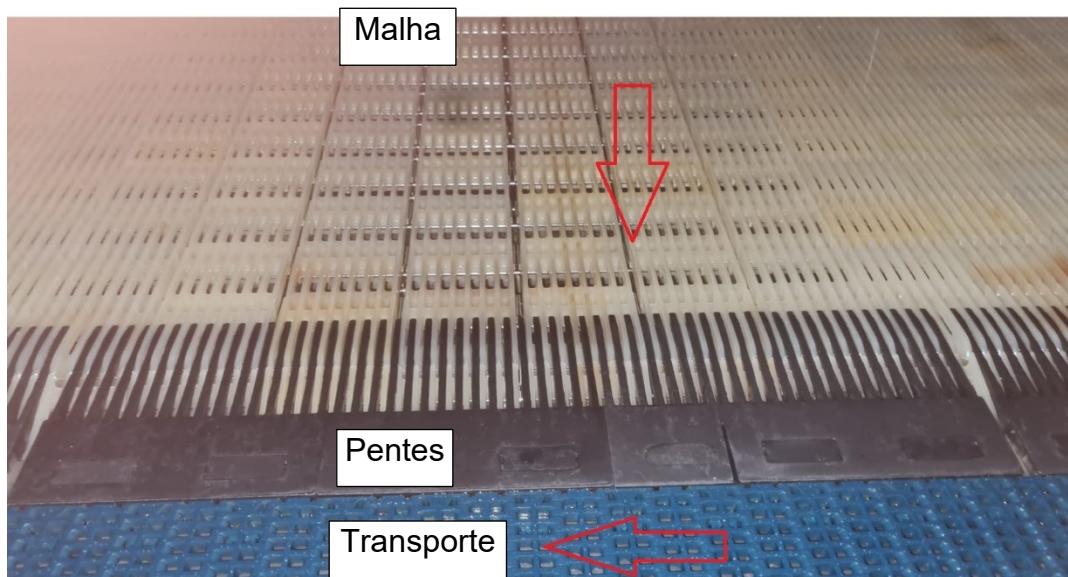
**Figura 13.** Imagem do pente montado na saída do pasteurizador.

A Figura 14 ilustra a parte posterior do pasteurizador vazio, sem a presença de latas. Nessa imagem, é possível observar a malha do pasteurizador, identificada como o componente de cor branca que se desloca no sentido de dentro para fora do equipamento. Adjacente a essa estrutura, o transportador de latas, representado pelo componente azul, realiza o movimento no sentido da fotografia, da direita para a esquerda, transportando as latas ao longo da linha de produção.

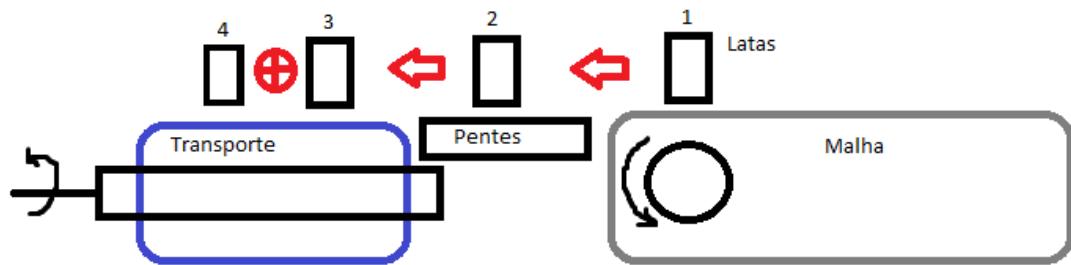


**Figura 14.** Imagem da saída do pasteurizador com os pentes indicados pelas setas.

Já as Figuras 15 e 16 apresentam uma visão esquemática do funcionamento dos pentes entre a malha e o transportador de latas, representadas por uma vista superior. A malha, responsável por trazer as levas de latas do interior do pasteurizador, interage diretamente com os pentes, que são componentes fixos. Esses pentes desempenham a função crucial de realizar a transição das latas da malha para o transportador, garantindo um fluxo contínuo e eficiente no processo produtivo.



**Figura 15.** Imagem da saída do pasteurizador vazio. E os pentes, as peças em preto, são responsáveis por fazer a transição de latas da malha para o transporte.



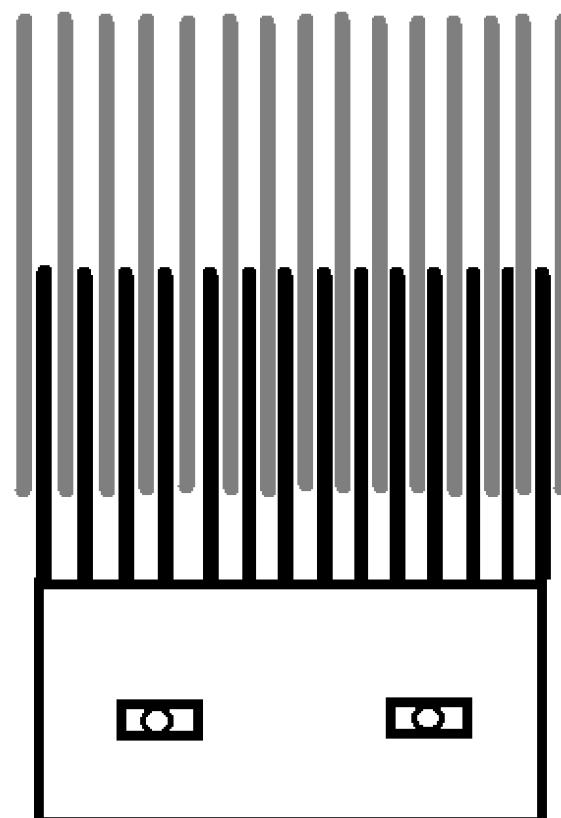
**Figura 16.** Esquema do sistema malha - pentes - transporte. Vista lateral.

Na Figura 17 e na Figura 18, apresenta-se um esquema ilustrativo da interação entre a malha do pasteurizador (representada em cinza) e o pente (representado em preto). Essa imagem destaca o encaixe funcional entre os dois componentes: a malha move-se ciclicamente sobre a superfície dos pentes, encaixando-se entre suas abas e deslocando-se para a parte inferior da superfície de movimentação das latas, desempenhando o papel de uma esteira.

Entretanto, defeitos identificados na malha do pasteurizador têm gerado desafios operacionais significativos. Técnicos responsáveis pela manutenção da máquina relataram uma frequência elevada de quebras nos pentes, atribuída à oscilação lateral anormal da malha durante seu funcionamento. Essa oscilação acima do esperado aumenta o risco de as abas dos pentes se prenderem na malha, resultando na quebra dos pentes e, em casos mais graves, no dano à própria malha. Esse último cenário é particularmente crítico, uma vez que a malha é um componente estrutural consideravelmente mais caro e complexo de substituir.



**Figura 17.** Imagem do pente em funcionamento com a malha.



**Figura 18.** Esquema de encaixe da do pente com a malha.

Com base no histórico dos últimos 6,5 anos de consumo de pentes, foi registrado um total de 604 unidades utilizadas entre maio de 2017 e dezembro de 2023, resultando em um consumo médio anual de 91,74 pentes. Essa demanda consistente ressalta a importância de explorar alternativas mais eficientes, como a MA, cuja aplicação no setor cervejeiro será abordada no próximo capítulo.

## 4. METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia adotada para realizar o estudo de viabilidade técnica e financeira da utilização de peças manufaturadas aditivamente no processo produtivo da fábrica em questão. Também serão descritas as etapas realizadas para o levantamento, análise e consolidação dos dados técnicos necessários, abrangendo desde a seleção do componente analisado até a avaliação comparativa de custos e desempenho em campo.

### 4.1. Apresentação da empresa

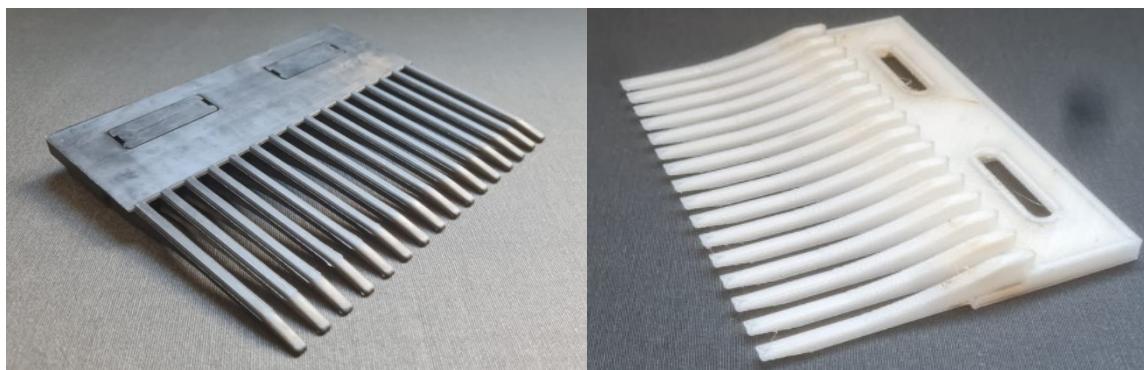
A empresa "A" é uma das líderes no setor de bebidas no Brasil, com forte presença tanto nacional quanto internacional. Especializada na produção e distribuição de cervejas, refrigerantes e outras bebidas, destaca-se por seu amplo portfólio e eficiência logística. Sua estrutura de produção inclui fábricas estrategicamente localizadas, permitindo atender às demandas de diferentes mercados com rapidez e eficácia.

### 4.2. Identificação do item passível de ser fabricado por MA

Os maquinários industriais são compostos por subsistemas que, por sua vez, são formados por peças. Na análise para viabilidade de MA, busca-se identificar peças que possam ser fabricadas com os polímeros disponíveis para essa tecnologia. O processo inicia com a análise do material original da peça. Itens de polímeros plásticos são candidatos a serem impressos, com qualidade próxima à original. Em seguida, considera-se o tamanho da peça, verificando se está dentro do volume de impressão das impressoras 3D disponíveis na fábrica (220 mm x 220 mm x 250 mm). Finalmente, avalia-se a resistência da peça impressa, comparando sua durabilidade com o item original.

Neste estudo, o item selecionado para análise é o "pente" do pasteurizador, componente essencial para o funcionamento da linha de envase. De acordo com o histórico de consumo mencionado na seção anterior, a recorrência da demanda torna o pente um forte candidato para ser produzido por MA, dada a possibilidade de redução de custos e maior controle interno sobre sua produção. A seguir, apresenta-se uma foto do item original (Fig. 19a) ao lado de sua versão

fabricada por MA (Fig. 19b), produzida internamente na planta.



**Figura 19.** Pente do pasteurizador (a) original, (b) manufaturado em Tritan.

#### 4.3. Ferramentas utilizadas

A seleção e o uso das ferramentas adequadas são cruciais para garantir a precisão na MA. O paquímetro é utilizado na etapa de engenharia reversa para obter medidas do item original (Fig. 20). O modelo escolhido é um paquímetro analógico Mitutoyo, com capacidade de medição entre 0 e 150 mm, exatidão de  $\pm 0,05$  mm e resolução de 0,05 mm, equipado com cursor temperado, medidor de profundidade e faces lapidadas. É importante ressaltar que, embora o paquímetro seja uma ferramenta precisa para medições lineares, ele não é adequado para capturar detalhes como os arredondamentos, filetes e chanfros presentes na peça original. Dessa forma, o projetista, ao realizar a modelagem tridimensional, ajustou essas características com base no que era mais próximo da realidade, garantindo a funcionalidade e a fidelidade ao projeto original.



**Figura 20.** Medições da peça com o paquímetro.

Para a fabricação, emprega-se a impressora 3D GTMax3D A2V2 (Fig. 21), com um gabinete robusto de aço carbono e compatível com diversos filamentos, como PLA, ABS, PETG, Tritan e TPU (Fig. 22). A máquina permite ajustes de resolução entre 0,05 mm e 0,32 mm, mesa aquecida até 135 °C e bico de impressão com temperatura máxima de 295 °C, proporcionando versatilidade no uso de diferentes materiais.

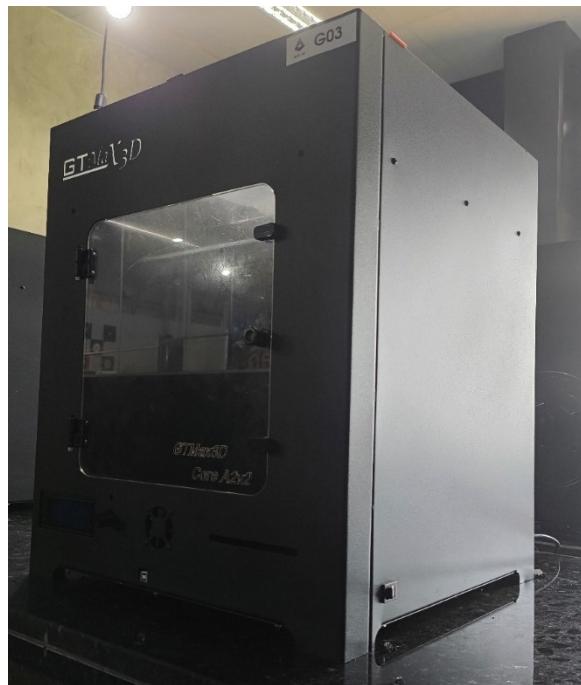
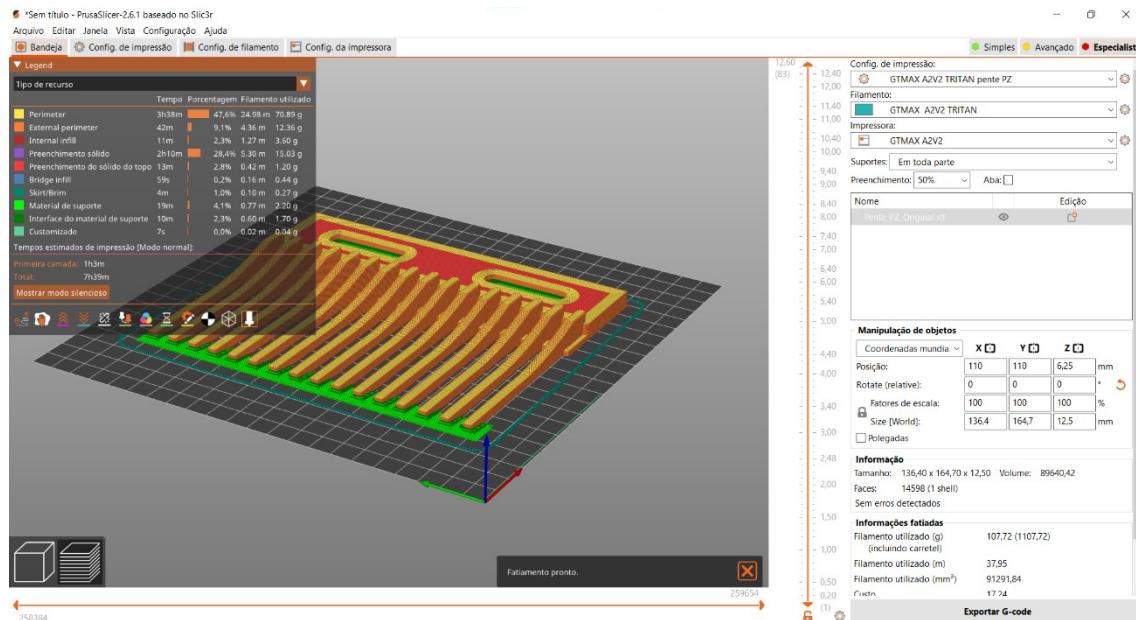


Figura 21. Impressora 3D GTMax3D A2V2.

Filamentos • Filaments					
TEMPERATURA DE IMPRESSÃO PRINTING TEMPERATURE	ABS	ASA	CONDUCTIVE	FLEX	FRP
	225 - 260°C 435 - 500°F	245 - 260°C 475 - 500°F	245 - 260°C 475 - 500°F	235 - 255°C 455 - 490°F	225 - 260°C 435 - 500°F
TEMPERATURA DE MESA BED TEMPERATURE	110°C 230°F	110°C 230°F	110°C 230°F	FRIA COLD	90°C 195°F
	230 - 240°C 445 - 465°F	225 - 255°C 435 - 490°F	180 - 220°C 355 - 430°F	180 - 220°C 355 - 430°F	260 - 275°C 500 - 530°F
TEMPERATURA DE IMPRESSÃO PRINTING TEMPERATURE	HIPS	PETG	PLA BASIC	PLA EASYFILL	TRITAN
	60 - 110°C 140 - 230°F	80 - 90°C 175 - 195°F	45 - 60°C 115 - 140°F	60°C 140°F	110 - 120°C 230 - 250°F
 3DFila®					

Figura 22. Informações dos filamentos da marca 3D Fila utilizados neste estudo.

O planejamento da impressão é realizado no software PrusaSlicer, versão 2.6.1 (Fig. 23), que permite o ajuste de camadas, temperaturas e velocidades de impressão, adaptando-se às especificidades dos materiais utilizados e às características técnicas da GTMax3D A2V2.



**Figura 23.** Software de planejamento software PrusaSlicer 2.6.1.

A modelagem foi realizada no software Autodesk Inventor Professional 2022<sup>©</sup>, amplamente utilizado para engenharia reversa e compatível com sistemas operacionais Windows 64 bits.

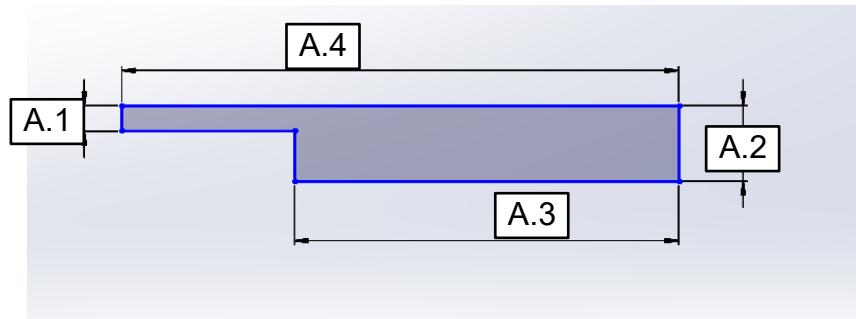
#### 4.3. Aferição metrológica

Com o item original selecionado, realiza-se a aferição metrológica utilizando o paquímetro para medir suas dimensões com precisão. Para melhor organização, a peça é dividida em seis partes, cada uma contendo conjuntos de medidas. Por exemplo, a Parte 1 inclui as medidas denominadas A.1, A.2, A.3, A.4 e A.5, todas aferidas três vezes para garantir confiabilidade. Da mesma forma, as Partes 2 a 6 seguem esse padrão, com medidas repetidas e organizadas sob a mesma lógica de nomenclatura. Após as medições, as médias de cada conjunto são calculadas, e possíveis discrepâncias são analisadas.

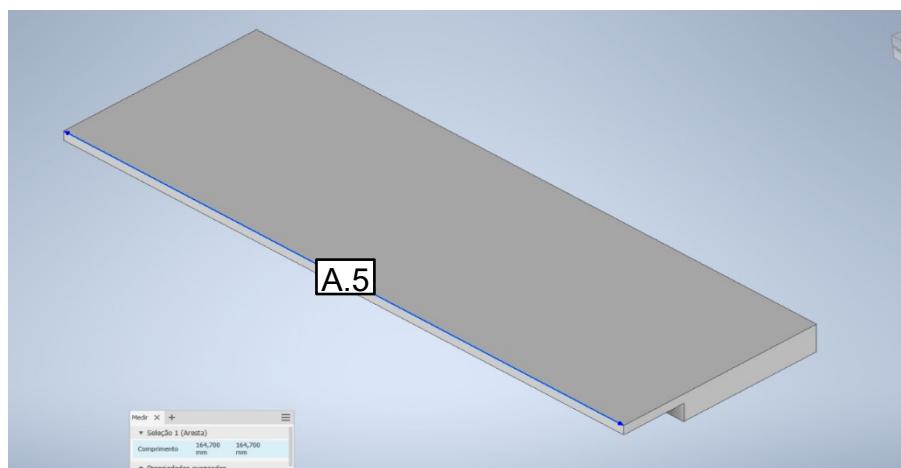
De modo a garantir a repetibilidade e a confiabilidade dimensional das peças fabricadas por manufatura aditiva, seria ideal a medição de ao menos 30

unidades para a realização de medições estatisticamente significativas. No entanto, neste estudo foram realizadas medição de apenas uma peça, uma vez que a tolerância dimensional exigida pelo projeto não era rigorosa, permitindo uma amostragem reduzida sem comprometer os objetivos da análise.

A Figura 24 ilustra as cotas A.1, A.2, A.3 e A.4 e a Fig. 25 apresenta a cota A.5, referente à extrusão do modelo (Parte 1).

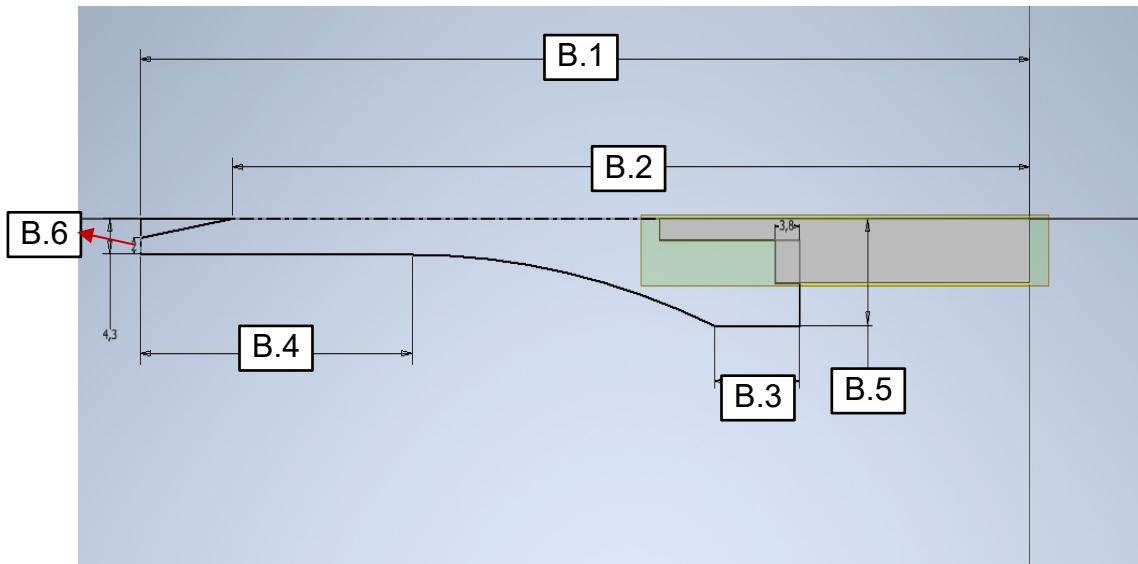


**Figura 24.** Cotas A.1, A.2, A.3 e A.4 (Parte 1).



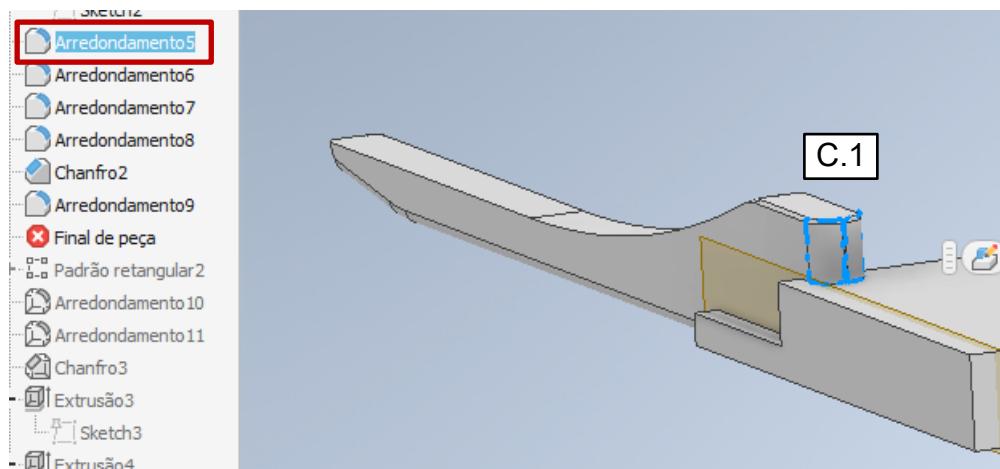
**Figura 25.** Cotas A.5 (Parte 1).

A Figura 26 ilustra as cotas B.1, B.2, B.3, B.4, B.5 e B.6, referente à extrusão do modelo (Parte 2).

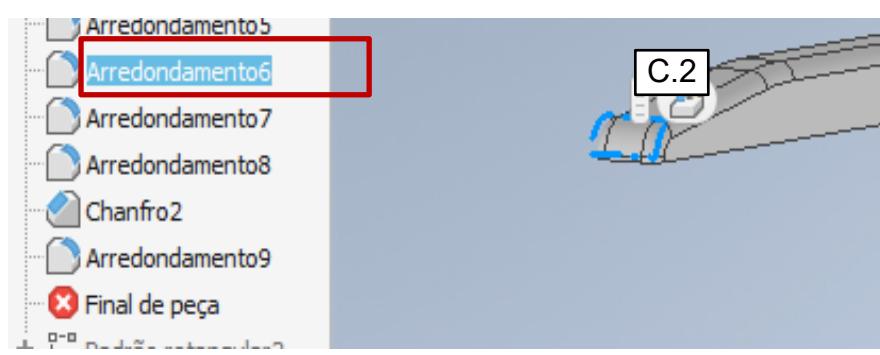


**Figura 26.** Cotas B.1, B.2, B.3, B.4, B.5 e B.6 (Parte 2).

As Figuras 27, 28, 29 e 30 ilustram as cotas C.1, C.2, C.3 e C.4, referente à extrusão do modelo (Parte 3).



**Figura 27.** Cotas C.1 (Parte 3).



**Figura 28.** Cotas C.2 (Parte 3).

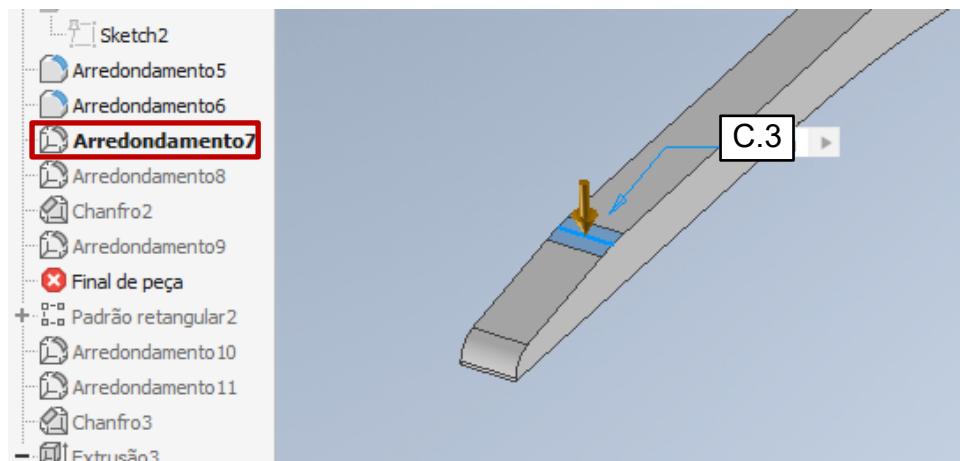


Figura 29. Cotas C.3 (Parte 3).

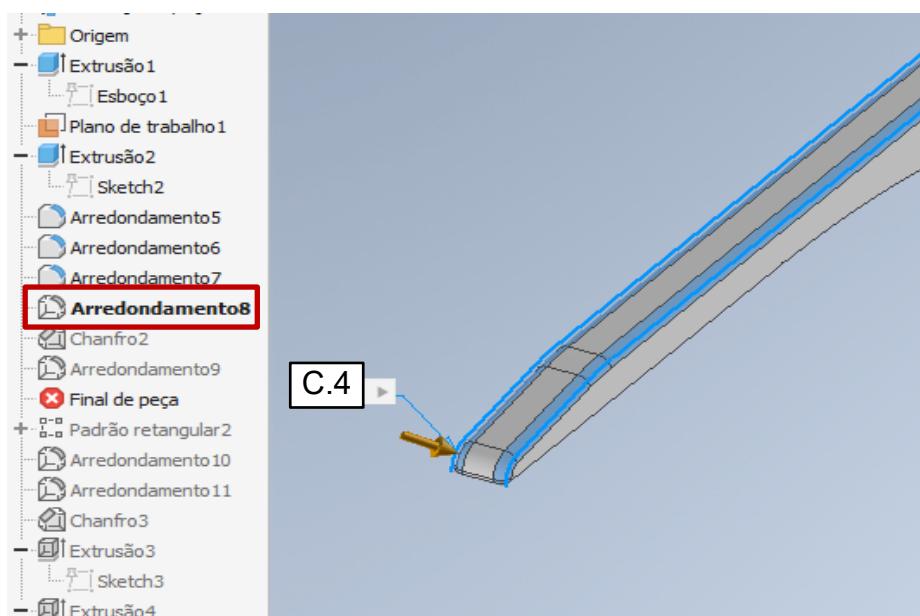


Figura 30. Cotas C.4 (Parte 3).

A cota de D.1 (Figura 31) é a distância entre uma face da aba da peça até a mesma face da aba logo ao lado.

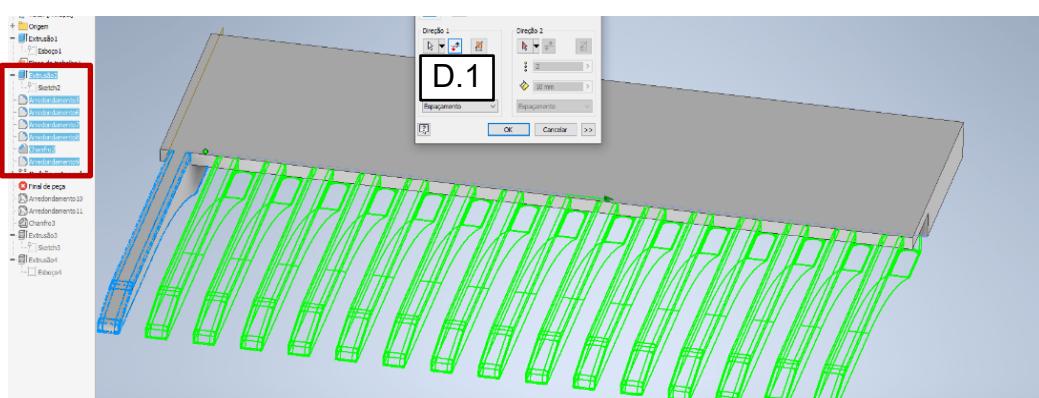


Figura 31. Cotas D.1 (Parte 4).

A cota D.2 (Figura 32) é o arredondamento de raio 1 mm das arestas entre as abas na parte superior do corpo da peça.



Figura 32. Cotas D.2 (Parte 4).

Cota D.3. (Figura 33) é o arredondamento da parte lateral do pente que distancia a face lateral mais extrema até a primeira aba do pente.

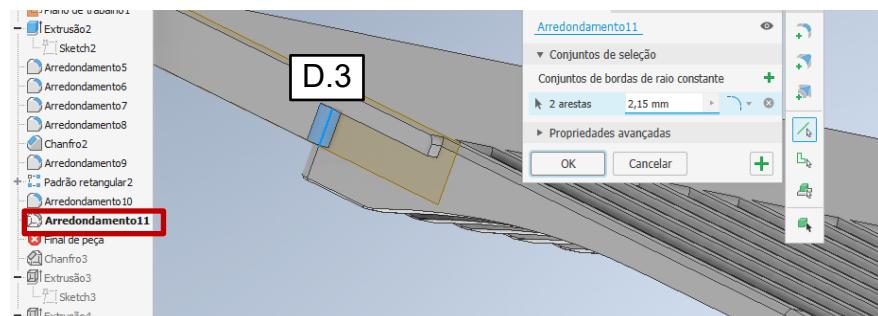


Figura 33. Cotas D.3 (Parte 4).

A cota D.4 (Figura 34) é o chanfro de 1 mm das arestas entre as abas na parte inferior do corpo da peça.

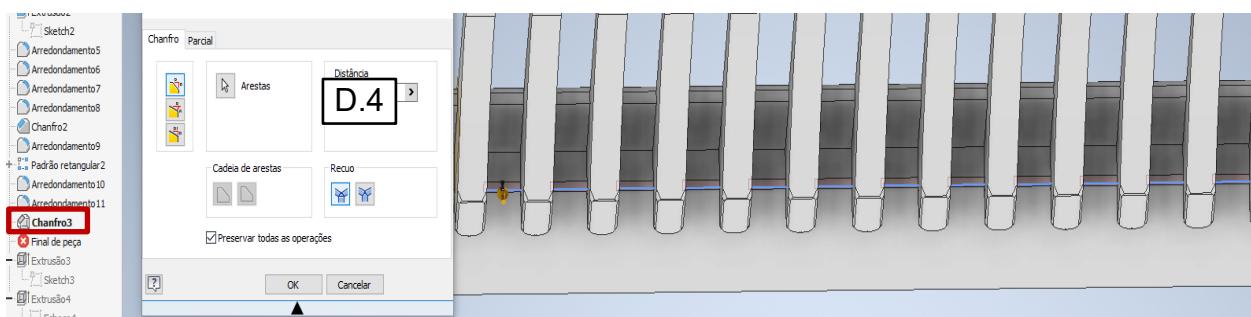
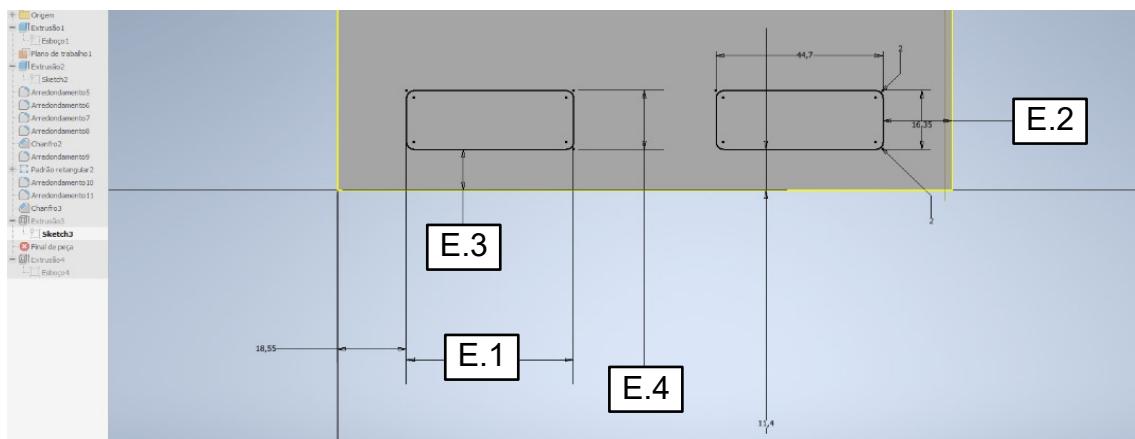


Figura 34. Cotas D.4 (Parte 4).

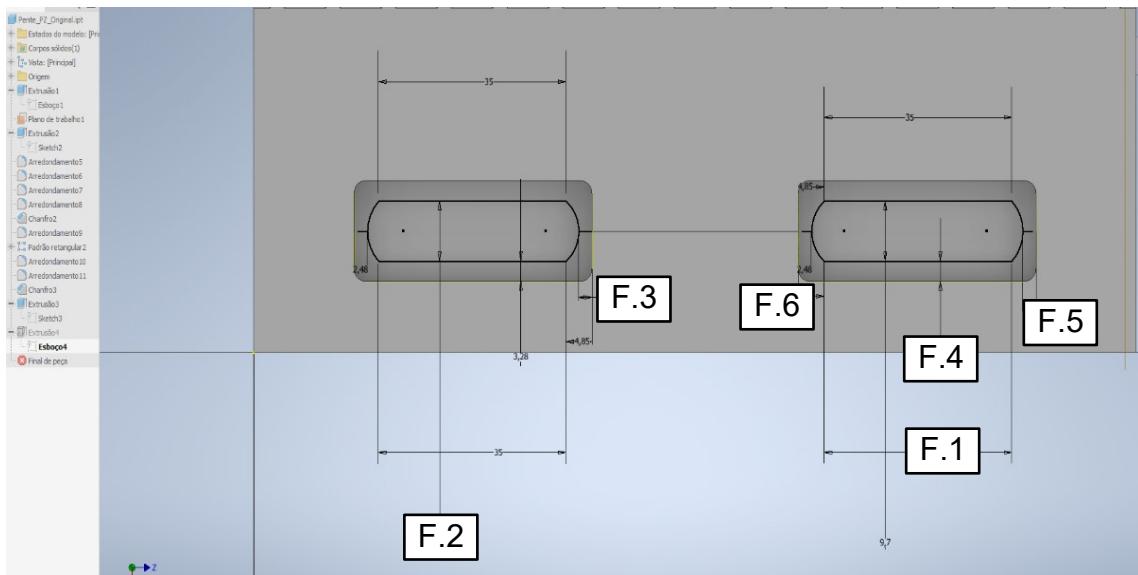
A Figura 35 mostra as cotas E.1, E.2, E.3 e E.4 referente as medidas abaixo

(Parte 5).



**Figura 35.** Cotas E.1, E.2, E.3 e E.4 (Parte 5).

Por fim, a Figura 36 ilustra as cotas F.1, F.2, F.3, F.4, F.5 e F.6.



**Figura 36.** Cotas F.1, F.2, F.3, F.4, F.5 e F.6 (Parte 6).

#### 4.3. Requisitos de projeto

Para a adequada substituição da peça original por uma versão fabricada por manufatura aditiva, foi necessário estabelecer requisitos mínimos de projeto que garantissem o desempenho da peça em operação. Entre os principais critérios adotados, destaca-se a temperatura de trabalho, uma vez que a peça está sujeita a ambientes com elevação térmica. Assim, definiu-se que o material utilizado deveria possuir temperatura de transição vítreia ( $T_g$ ) de, no mínimo, 60 °C, garantindo que o componente mantinha sua rigidez estrutural sob tais

condições sem deformações significativas.

Além do requisito térmico, foi considerada a solicitação mecânica predominante na aplicação da peça, caracterizada por esforços laterais recorrentes durante sua utilização. Medições realizadas em ambiente operacional permitiram quantificar o esforço lateral médio aplicado à peça, estimado em aproximadamente XX N (substituir com o valor real, se disponível). Esse dado foi essencial para a definição de propriedades mecânicas mínimas, como módulo de elasticidade e resistência à tração, a serem atendidas pelos materiais candidatos.

#### **4.4. Avaliação de Custo**

A avaliação de custo para a produção via MA considera quatro parâmetros principais: tempo de impressão, material utilizado, vida útil da peça e tempo gasto pelo projetista. O tempo de impressão é determinado em horas, sendo proporcional ao custo operacional, uma vez que as máquinas são alugadas e possuem custos variáveis dependendo do tempo de uso. O material utilizado é selecionado com base na aplicação da peça, considerando custos e propriedades mecânicas de filamentos como PLA, ABS e PETG. A vida útil da peça impressa é comparada com a peça original, estabelecendo um multiplicador para calcular quantas peças impressas seriam necessárias para alcançar o mesmo desempenho da original. Por fim, o tempo investido pelo projetista na modelagem e preparação para impressão é registrado e convertido em custo com base no valor/hora do profissional.

#### **4.5. Cálculo de Custo**

Com os parâmetros definidos, os custos individuais são calculados. O custo de energia (Eq. 1) é obtido multiplicando o tempo de impressão pelo consumo de energia da máquina e o custo por quilowatt-hora.

$$C_t = H \times E \times C_E \quad (1)$$

onde,  $C_t$ : Custo de tempo de impressão [R\$],  $H$ : Horas utilizadas [h],  $E$ : Consumo

de energia [kWh],  $C_E$ :Custo da energia [R\$/kWh].

O custo do material é calculado pela quantidade de filamento utilizada, multiplicada pelo preço por grama do material.

$$C_{ma} = Q \times P \quad (2)$$

onde,  $C_{am}$ : Custo de material [R\$],  $Q$ : Quantidade de filamento por peça [g],  $P$ :Preço por grama do material [R\$/g].

Para o custo do projetista, considera-se o tempo total de trabalho multiplicado pelo valor/hora do profissional.

$$C_{proj} = Tp \cdot valor/h \quad (3)$$

onde,  $C_{proj}$ : Custo do projetista,  $Tp$ :Tempo gasto pelo projetista,  $valor/h$ : Valor da hora trabalhado do engenheiro.

Já o custo da hora-máquina é calculado dividindo o custo mensal do aluguel pelo total de horas utilizadas no mês, considerando uma média de 12 horas por dia durante 21 dias.

$$C_{hm} = \frac{C_{al}}{H} \quad (4)$$

onde,  $C_{hm}$ : Custo hora-máquina [R\$],  $H$ : Horas utilizadas [h],  $C_{al}$ : Custo do aluguel [R\$].

Somando todos os custos (Eq. 1, Eq. 2, Eq. 3 e Eq. 4), obtém-se o valor total de fabricação de cada unidade da peça, permitindo compará-lo ao custo de aquisição junto ao fabricante original.

$$C_{peça} = C_t + C_{ma} + C_{proj} + C_{hm} \quad (4)$$

Esses cálculos são fundamentais para determinar a viabilidade técnica e econômica da manufatura aditiva em pequenos lotes. Por questões de confidencialidade, os valores absolutos dos custos dos pentes originais serão

preservados, sendo os custos dos pentes produzidos via MA apresentados em proporções comparativas.

Os custos associados à produção de peças por MA na fábrica podem ser classificados em dois tipos: custos fixos por unidade e custos amortizáveis. O custo do projetista é único e fixo, independentemente da quantidade de peças produzidas, sendo atribuído apenas uma vez ao total de peças fabricadas. Em contraste, os custos de energia ( $C_t$ ), material ( $C_{ma}$ ) e hora-máquina ( $C_{hm}$ ) são fixos para cada unidade de peça fabricada, variando proporcionalmente à quantidade de unidades produzidas.

A amortização do custo do projetista ocorre com o aumento da produção. Quanto maior o número de peças produzidas, menor será a fração do custo do projetista alocada por unidade. A fórmula para o custo unitário ( $C_{peça}$ ) considera todos esses fatores e é descrita abaixo:

- Para uma unidade de peça:

$$C_{peça} = (1C_t + 1C_{ma} + 1C_{proj} + 1C_{hm})/1 \quad (5)$$

- Para duas unidades de peça:

$$C_{peça} = (2C_t + 2C_{ma} + 1C_{proj} + 2C_{hm})/2 \quad (5)$$

- Para três unidades de peça:

$$C_{peça} = (3C_t + 3C_{ma} + 3C_{proj} + 3C_{hm})/3 \quad (6)$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da análise de custos associados à produção de pentes utilizando a MA na fábrica, comparando-os com os custos de aquisição dos pentes fornecidos pelo fabricante original. Além disso, é projetada a perspectiva de economia a ser alcançada com a adoção dos pentes produzidos internamente por meio da MA.

Os resultados incluem a descrição das peças impressas, com registros de suas aplicações após a montagem nos equipamentos da planta. Também são discutidos os ganhos obtidos em termos de redução de custos, economia de tempo de manutenção e a porcentagem de redução de despesas em relação ao processo tradicional de aquisição.

### 5.1. Aferimento das medições

O processo de aferição das cotas foi realizado utilizando o paquímetro mencionado na seção 3.3, garantindo a confiabilidade das dimensões obtidas. Todas as cotas foram medidas três vezes, e a média aritmética dessas medições foi utilizada como valor de referência para o modelo.

A tabela 1 apresenta os resultados divididos em partes, com tabelas correspondentes às medidas aferidas e figuras representativas das cotas.

As aferições realizadas apresentaram boa consistência, com 88 % das cotas apresentando medições idênticas entre as três repetições, enquanto 12% das cotas mostraram variações mínimas, sendo estas concentradas em geometrias mais complexas, como as cotas A.3, B.4, E.3, e F.3, que apresentaram desvios médios de até 0,5%.

As medições com maior precisão (100% consistência) ocorreram nas cotas das Partes 3 e 4, que correspondem a geometrias simples e lineares, como arredondamentos e chanfros. Apesar das pequenas variações em algumas dimensões, todas as médias calculadas foram consideradas adequadas e estão dentro de tolerâncias aceitáveis para o projeto, sendo representativas das dimensões reais, garantindo precisão suficiente para a modelagem e fabricação do modelo proposto.

**Tabela 1.** Aferimento das cotas A.1, A.2, A.3 e A.4.

PARTE	COTA	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MÉDIA
Parte 1	<b>A.1.</b>	2,60	2,60	2,60	2,60
	<b>A.2.</b>	7,70	7,70	7,70	7,70
	<b>A.3.</b>	39,00	39,10	39,10	39,07
	<b>A.4.</b>	56,80	56,70	56,70	56,73
	<b>A.5.</b>	164,70	164,70	164,70	164,70
Parte 2	<b>B.1.</b>	136,10	136,10	136,10	136,10
	<b>B.2.</b>	122,00	122,00	122,00	122,00
	<b>B.3.</b>	13,00	13,00	13,00	13,00
	<b>B.4.</b>	41,60	41,10	42,10	41,60
	<b>B.5.</b>	12,80	12,80	12,80	12,80
	<b>B.6.</b>	2,00	2,00	2,00	2,00
Parte 3	<b>C.1</b>	2,20	2,20	2,20	2,20
	<b>C.2</b>	2,00	2,00	2,00	2,00
	<b>C.3</b>	20,00	20,00	20,00	20,00
	<b>C.4</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
Parte 4	<b>D.1</b>	10,40	10,40	10,40	10,40
	<b>D.2</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
	<b>D.3</b>	2,15	2,15	2,15	2,15
	<b>D.4</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
Parte 5	<b>E.1</b>	44,70	44,70	44,70	44,70
	<b>E.2</b>	18,55	18,55	18,55	18,55
	<b>E.3</b>	11,40	11,45	11,35	11,40
	<b>E.4</b>	16,30	16,35	16,40	16,35
Parte 6	<b>F.1</b>	35,00	35,00	35,00	35,00
	<b>F.2</b>	9,70	9,70	9,70	9,70
	<b>F.3</b>	2,55	2,50	2,40	2,48
	<b>F.4</b>	3,28	3,28	3,28	3,28
	<b>F.5</b>	2,50	2,50	2,45	2,48
	<b>F.6</b>	4,85	4,85	4,85	4,85

**Impressão dos pentes****4.2.**

Após o aferimento detalhado das dimensões do "pente", foi realizada a

modelagem tridimensional da peça, utilizando a média dos valores obtidos na Tab. 1 como base para a construção do modelo. O passo a passo completo da modelagem 3D e o desenho técnico encontram-se descrito no ANEXO A e no ANEXO B, respectivamente, deste trabalho.

### 5.1.1. Fabricação em PLA

Com a modelagem tridimensional concluída, a peça estava pronta para o planejamento de sua manufatura. Na primeira versão, utilizou-se o software Simplify 3D para o processo de impressão, empregando o material PLA.

Os parâmetros de impressão foram definidos da seguinte forma:

**Altura de camada:** 0,2 mm

**Velocidade de impressão:** 80 mm/s

**Camadas de perímetro:** 3

**Camadas de topo:** 3

**Camadas de base:** 3

**Largura de extrusão:** 0,44 mm

**Temperatura da mesa:** 60 °C

**Temperatura do bico:** 200 °C

As temperaturas da mesa e do bico foram configuradas conforme as recomendações do fabricante do filamento. A definição de três camadas de perímetro foi estabelecida para garantir a fabricação de dentes maciços no pente, com as paredes laterais de cada dente unindo-se ao centro do corpo, tornando-o inteiriço. A largura de extrusão foi ajustada para 0,44 mm, correspondente ao diâmetro do bico utilizado.

Durante as etapas iniciais do projeto, o material PLA (ácido polilático) foi utilizado para a fabricação de protótipos com o objetivo de verificar a geometria da peça e validar aspectos dimensionais do modelo CAD. A escolha do PLA nessa fase deveu-se à sua ampla disponibilidade, baixo custo e facilidade de impressão, características que o tornam ideal para testes rápidos de forma e encaixe.

No entanto, os testes demonstraram que o PLA não atende aos requisitos de desempenho exigidos para a aplicação final da peça, especialmente em relação à temperatura de trabalho. Por apresentar uma temperatura de transição

vítreas inferiores a 60 °C, o material tende a perder suas propriedades mecânicas e apresentar deformações estruturais em ambientes mais aquecidos, comprometendo a integridade funcional do componente. Dessa forma, o uso do PLA foi restrito à fase de prototipagem geométrica, sendo descartado para a produção definitiva.

### 5.1.2. Fabricação em ABS

O pente foi fabricado utilizando o filamento de plástico ABS, devido à sua maior resistência térmica em comparação ao PLA. Segundo a ficha técnica do fornecedor 3DFila (2018), o ABS apresenta uma temperatura de transição vítreas de 107 °C, significativamente superior à do PLA (55 °C) e acima da temperatura máxima atingida pelo pasteurizador durante seu funcionamento. Dessa forma, a substituição do PLA pelo ABS visa garantir maior resistência térmica ao item, tornando-o mais adequado às condições operacionais.

Para a impressão em ABS, foram utilizadas as seguintes configurações no processo de MA:

**Altura de camada:** 0,2 mm

**Velocidade de impressão:** 80 mm/s

**Camadas de perímetro:** 3

**Camadas de topo:** 3

**Camadas de base:** 3

**Largura de extrusão:** 0,44 mm

**Temperatura da mesa:** 100 °C

**Temperatura do bico:** 220 °C

O protótipo produzido em ABS demonstrou maior resistência térmica e mecânica em comparação ao fabricado em PLA, proporcionando um aumento significativo na vida útil da peça em campo. Inicialmente, o pente fabricado com este material cumpriu sua função de forma satisfatória, suportando as condições operacionais do pasteurizador. No entanto, com o passar do tempo e sob esforço mecânico constante, as abas que se encaixam na malha começaram a empenar e, eventualmente, romperam-se.

Esses danos comprometeram o alinhamento da peça, resultando no tombamento de latas e na interrupção do fluxo da linha de produção. Apesar de

apresentar desempenho superior ao PLA, o ABS mostrou-se insuficiente para atender às exigências do processo em longo prazo, revelando a necessidade de explorar materiais ainda mais robustos para esta aplicação. A Figura 37 mostra o pente impresso em ABS.



**Figura 37.** Pente impresso em ABS.

#### 5.1.3. Fabricação em Tritan

O pente produzido em Tritan apresentou o melhor desempenho entre os materiais testados, com uma vida útil significativamente superior à dos produzidos em PLA e ABS. Dessa forma, os parâmetros de impressão do Tritan foram definidos da seguinte forma:

**Altura de camada:** 0,2 mm

**Velocidade de impressão:** 60 mm/s

**Camadas de perímetro:** 13

**Camadas de topo:** 8

**Camadas de base:** 8

**Largura de extrusão:** 0,48 mm

**Temperatura da mesa:** 109 °C

**Temperatura do bico:** 270 °C

A altura de camada foi definida na mesma medida como as outras devido ao tamanho do bico de impressão. Existem algumas dimensões de bico, sendo elas de 0,2 mm, 0,4 mm e 0,6 mm, entre outros de até 1 mm de espessura. E por padrão do fabricante a altura de camada de uma impressão é metade da

dimensão do diâmetro do bico, no caso deste estudo a altura definida é 0,2 mm.

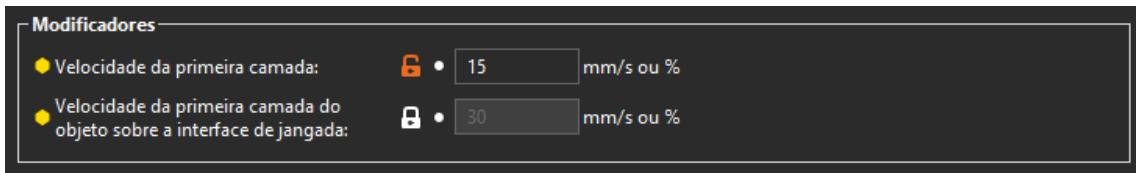
A velocidade de impressão é a velocidade (Fig. 38) com que o bico de impressão se move durante a deposição de material. Essa velocidade pode ser definida pelo software Prusa Slice para várias etapas da impressão. Sendo elas: perímetros, perímetros pequenos, perímetros externos, preenchimento, preenchimento sólido, preenchimento de sólido do topo, material de suporte, interface do material de suporte, pontes e preenchimento de vão, como ilustrado na figura abaixo:

Velocidade para movimentos de impressão		
● Perímetros:	• 60	mm/s
● Perímetro pequeno:	• 60	mm/s ou %
● Perímetros externos:	• 60	mm/s ou %
● Preenchimento:	• 60	mm/s
● Preenchimento sólido:	• 60	mm/s ou %
● Preenchimento do sólido do topo:	• 60	mm/s ou %
● Material de suporte:	• 60	mm/s
● Interface do material de suporte:	• 60	mm/s ou %
● Pontes:	• 60	mm/s
● Preenchimento de vão:	• 60	mm/s
● Passar ferro:	• 15	mm/s

Figura 38. Velocidade para movimento de impressão.

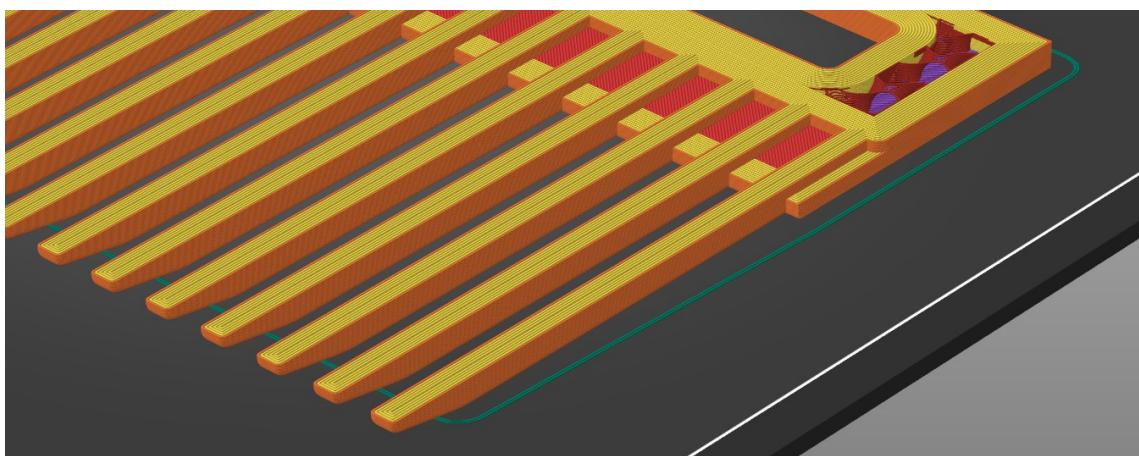
Neste trabalho, todas as velocidades são definidas com o valor de 60 mm/s para evitar variação de fluxo de material durante a impressão da peça. Além disso, essa velocidade permite com que a peça seja confeccionada no tempo indicado acima de 7h.

A velocidade do parâmetro “velocidade da primeira camada” que é a velocidade de deslocamento do bico enquanto a impressora deposita material na camada que faz interface com a mesa de impressão foi reduzida para o valor de 15 mm/s (Fig. 39). Isso foi necessário pois a dimensões do pente exigiam cautela durante a deposição da primeira camada para evitar que o filamento perca aderência na mesa e a impressão seja perdida.



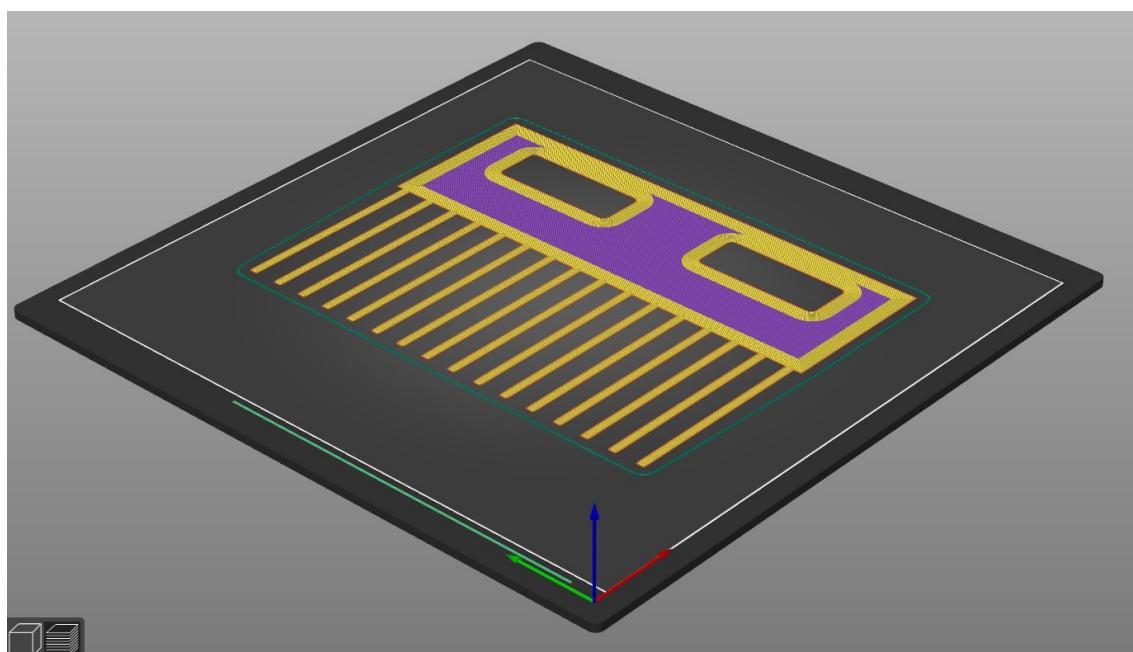
**Figura 39.** Modificadores.

A grande quantidade de abas dos pentes exige do bico movimentos alternados de ida e volta que aumenta as chances de descolamento da camada durante a mudança de direção do bico. Devido esse motivo a redução da velocidade da primeira camada foi necessária, como pode ser observado na Fig. 40.



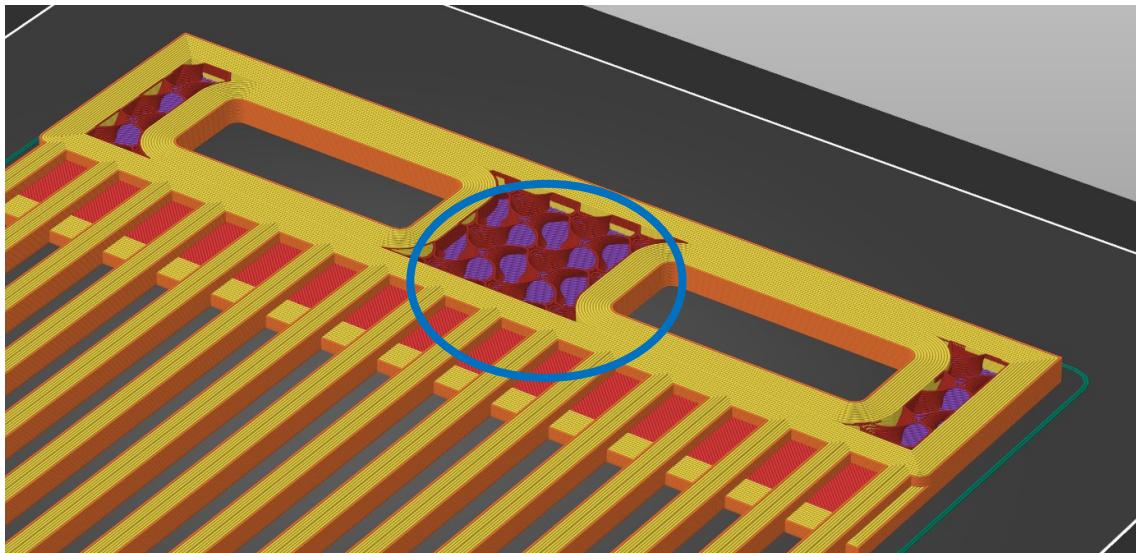
**Figura 40.** Detalhe da movimentação do bico extrusor.

Os perímetros do pente é o parâmetro de impressão que mais impacta na resistência mecânica da peça. A utilização de 13 camadas foi necessária para fornecer o preenchimento de forma maciça nas abas do pente (Fig. 41).



**Figura 41.** Detalhe do preenchimento de forma maciça nas abas do pente.

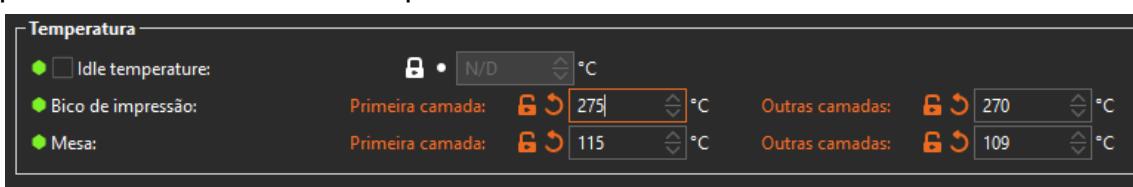
Desse modo as abas têm resistência mecânica suficiente para suas condições de trabalho. O corpo do pente adquire o perímetro espesso de modo que tenha resistência sem preencher desnecessariamente interior do corpo do pente, como mostra a Fig. 42.



**Figura 42.** Detalhe do preenchimento do interior do corpo do pente.

A largura de extrusão é um parâmetro de impressão que depende do diâmetro do bico de impressão, neste trabalho foi utilizado o bico de 0,4 mm. A largura de impressão utilizada para confecção da peça foi de 0,48 mm visando resistência mecânica. Utilizar uma largura de extrusão superior ao diâmetro do bico resulta em maior aderência entre camadas gerando maior resistência da peça como um todo.

A recomendação do fabricante conforme Figura 22 é usar entre 110 °C e 120 °C de temperatura de mesa para conferir boa aderência mesa-filamento. No entanto as impressoras de modelo Gtmax A2V2 apresentavam grande redução na vida útil na resistência usada para aquecer a mesa quando submetida a temperatura recomendada por altos períodos. Nesse sentido, a temperatura da mesa durante a impressão foi definida como 109 °C. Como mostrado na Fig. 43, apenas o parâmetro “primeira camada” foi definido dentro da faixa recomendada pelo fabricante, para que a aderência a mesa fique boa conforme explicado no parâmetro “velocidade de impressão”.



**Figura 43.** Definição dos parâmetros da primeira camada.

Conforme recomendação do fabricante a temperatura do bico foi utilizada em 270 °C para toda a impressão. Apenas o parâmetro “primeira camada” foi utilizado uma temperatura maior visando a melhor aderência da peça a mesa como explicado acima, reduzindo chances de perder a peça por descolamento da primeira camada durante a impressão.

Pelo mesmo motivo dos perímetros, foram feitas várias camadas de topo e de base para conferir resistência mecânica da peça. Com essas configurações a peça tem uma carcaça externa reforçada com 13 perímetro, 8 camadas de topo e mais 8 camadas de base e um interior pouco preenchido evitando desperdício de material que não conferiria resistência proporcional a quantidade a mais de material utilizada caso a peça fosse totalmente sólida.

É importante salientar que, diferentemente do PLA, o Tritan possui uma temperatura de transição vítreia de 110 °C, superior à temperatura máxima de trabalho do pasteurizador, garantindo que a peça mantivesse sua integridade mesmo sob condições térmicas extremas. Além disso, o Tritan apresentou um coeficiente de elasticidade superior ao do ABS, permitindo que as abas do pente se deformassem e retornassem ao formato original sem escoamento permanente. Essa propriedade foi crucial para evitar o empenamento dos dentes e garantir a continuidade do fluxo de latas na linha de produção. A Figura 44 apresenta o pente impresso em Tritan.



**Figura 44.** Pente impresso em Tritan.

### 5.3. Análise das impressões

A análise das impressões 3D apresenta um importante benefício no contexto do estudo de caso relacionado ao pente do pasteurizador. Para compreender melhor as adaptações realizadas, é essencial destacar a interconexão entre o pente e a estrutura da malha do equipamento mencionado na seção 3.2. A malha, como ilustrado na Fig. 12 apresentou avarias que alteraram seu deslocamento perpendicular ao sentido de transporte original.

Essa modificação estrutural resultou em um atrito entre os pentes, independentemente de serem fabricados aditivamente ou adquiridos diretamente do fornecedor, e a malha do equipamento. O atrito ocorre devido ao leve deslocamento perpendicular que a malha realiza ao transportar as latas no interior do pasteurizador.

Para mitigar esse problema, a solução adotada foi a fabricação dos pentes divididos em duas partes. Cada metade passou a ser fixada por um parafuso, permitindo ao técnico modular com maior precisão o posicionamento do pente e evitar a sobreposição de suas abas com a malha. Essa solução não apenas reduz o atrito, mas também aumenta a eficiência operacional do sistema, minimizando interrupções no fluxo de produção. A modificação do design, realizada no software de planejamento PrusaSlicer 2.6.1, envolveu a divisão do modelo do pente em duas partes, como mostrado na Fig. 45.

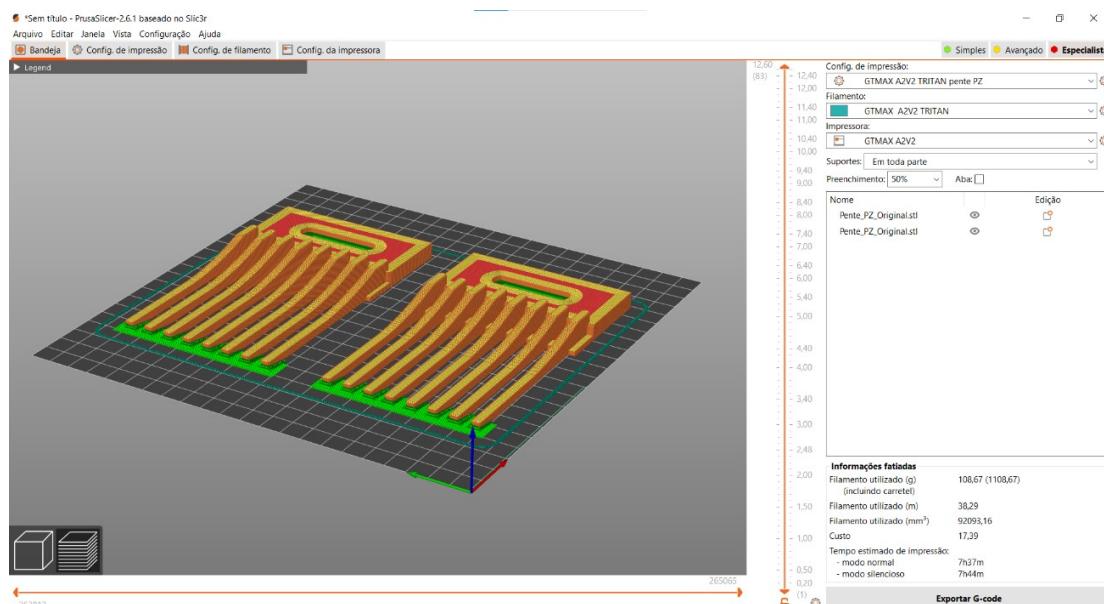
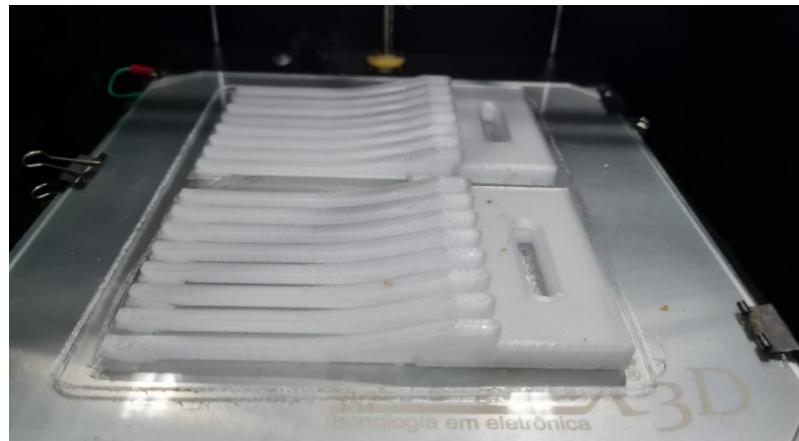
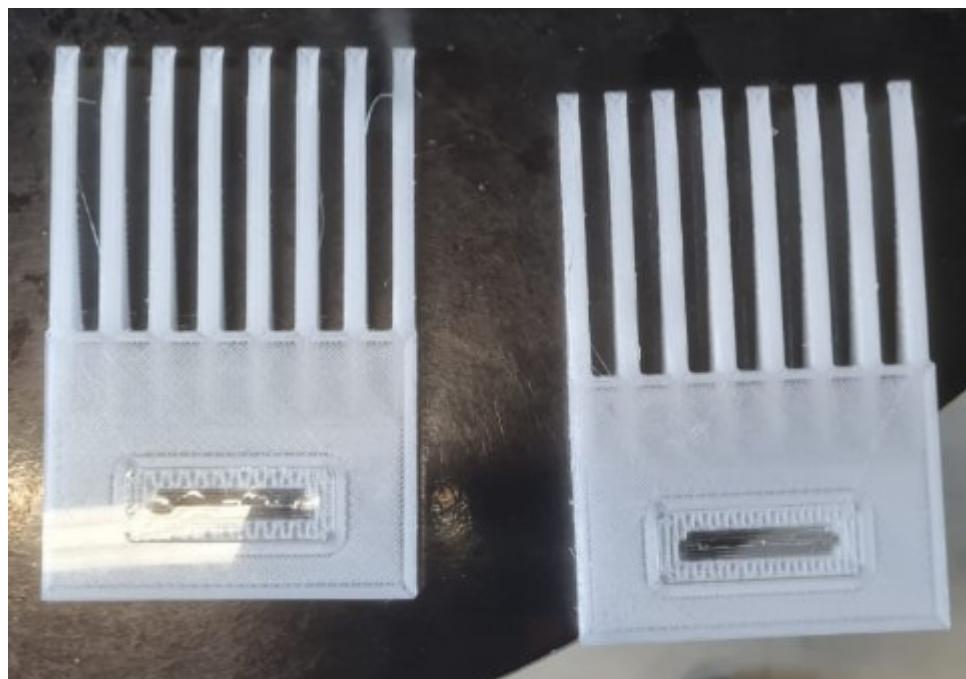


Figura 45. Divisão do pente para impressão.

Essa alteração não impactou de forma significativa o tempo ou o custo de produção, preservando a viabilidade econômica e operacional da solução. A abordagem adotada demonstra como a impressão 3D pode ser utilizada para ajustar rapidamente componentes às necessidades específicas de equipamentos industriais, proporcionando flexibilidade e eficiência no processo de fabricação. A impressão final das peças pode ser vista nas Figuras 46 e 47.



**Figura 46.** Pentes impressos partidos ao meio em TRITAN.



**Figura 47.** Pentes impressos repartidos ao meio ainda com suporte de impressão.

#### 5.4. Comparação dimensional

Na Tabela 2 estão disponíveis as cotas aferidas do pente impresso da seção 4.1.3, obtidas utilizando-se o paquímetro analógico Mitutoyo, conforme descrito na metodologia. Apenas as cotas A.4, A.5, B.1, B.6, E.1 e E.4 foram medidas, pois essas dimensões representam os aspectos mais críticos para o encaixe e funcionalidade do pente no sistema. As demais cotas foram consideradas estáveis e com baixa relevância funcional no contexto operacional, sendo estimadas diretamente a partir do modelo tridimensional desenvolvido na fase de engenharia reversa.

**Tabela 2.** Aferimento e comparação das cotas.

COTA	PENTE ORIGINAL				PENTE IMPRESSO EM TRITAN			
	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MÉDIA	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MÉDIA
A.4.	56,8	56,7	56,7	56,73	56,4	56,4	56,4	56,4
A.5.	164,7	164,7	164,7	164,7	158,4	158,4	158,4	158,4
B.1.	136,1	136,1	136,1	136,1	135,4	135,4	135,5	135,4
B.6.	44,7	44,7	44,7	44,7	44,15	44,15	44,15	44,15
E.1	16,3	16,35	16,4	16,35	16,2	16,4	16,45	16,4
E.4	56,8	56,7	56,7	56,73	56,4	56,4	56,4	56,4

Para a cota A.4, observa-se uma redução de aproximadamente 0,58 mm no pente impresso, enquanto na cota A.5, a diferença foi mais significativa, com o pente impresso apresentando uma redução média de 6,3 mm. Na cota B.1, a diferença foi de 0,7 mm, mantendo-se dentro de uma tolerância aceitável para a funcionalidade. A cota B.6 apresentou uma diferença média de 0,55 mm, indicando boa correspondência com o original. Já nas cotas E.1 e E.4, as diferenças foram mínimas, com variações de 0,05 mm e 0,33 mm, respectivamente. De modo geral, as dimensões do pente impresso demonstraram ser suficientemente precisas para a aplicação, embora a diferença na cota A.5 mereça atenção, pois pode impactar no encaixe e funcionamento em situações específicas.

### 5.5. Análise do custo do pente

A análise dos custos associados à produção dos pentes por MA revelou um comportamento interessante: o custo do projetista, por ser fixo, mantém-se constante independentemente da quantidade de peças fabricadas. Isso implica que, à medida que a quantidade de peças aumenta, o custo unitário de produção diminui, uma vez que o custo fixo é diluído entre um maior número de unidades.

Ao comparar o custo unitário de produção de uma peça por MA com o valor de aquisição de uma peça diretamente do fornecedor, observa-se que uma peça produzida via MA representa 72 % do custo da peça original adquirida. Ademais, como discutido anteriormente, essa porcentagem diminui progressivamente conforme o número de peças produzidas aumenta, destacando a economia proporcionada pela produção em maior escala.

Durante o processo de manufatura aditiva, foi identificado um índice de aproximadamente 10% de refugo de material. Esse desperdício ocorreu, principalmente, devido a falhas nas primeiras camadas de impressão, problemas de adesão à mesa, ou interrupções no processo decorrentes de parâmetros mal ajustados. A ocorrência de refugo é comum em processos de impressão 3D, especialmente durante a fase de otimização, e deve ser considerada na análise de eficiência do processo produtivo.

A Tabela 3 apresenta, em porcentagem, o valor unitário de produção de uma peça em função da quantidade de peças fabricadas, evidenciando a relação inversa entre o número de unidades produzidas e o custo unitário.

A análise de custo também considerou a demanda anual média da fábrica, que nos últimos 6,5 anos foi de 92 peças por ano para suprir as necessidades operacionais. Ao comparar os custos totais, utilizando o preço do fornecedor original como base de 100 %, observa-se que a produção das mesmas 92 peças por MA resultam em um custo correspondente a apenas 18 % do valor original.

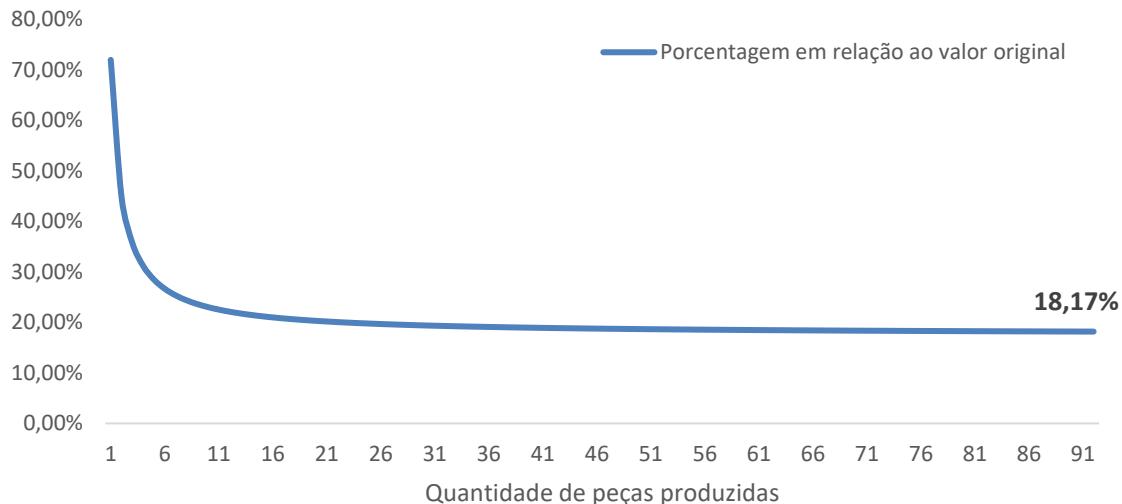
Essa redução significativa demonstra o impacto econômico positivo da produção interna por MA, especialmente em demandas recorrentes e de médio volume. A relação entre custo e quantidade de pentes fabricados revela que, conforme a produção aumenta, o custo unitário continua a reduzir devido à diluição do custo fixo do projetista.

A Figura 48 demonstra a relação entre a quantidade de pentes produzidos

e o custo proporcional em relação ao valor de aquisição junto ao fornecedor original, evidenciando a vantagem econômica da MA à medida que a escala de produção aumenta.

**Tabela 3.** Porcentagem do custo unitário em relação ao original em função da quantidade produzida.

Quantidade de Peças	Porcentagem em relação ao valor original
1	71,96%
2	44,77%
3	35,71%
4	31,18%
5	28,46%
6	26,65%
7	25,35%
8	24,38%
9	23,63%
10	23,02%
11	22,53%
12	22,12%
13	21,77%
14	21,47%
15	21,21%
16	20,98%
17	20,78%
18	20,6%
19	20,45%
20	20,30%
21	20,17%
22	20,06%
23	19,95%
24	19,85%
25	19,76%

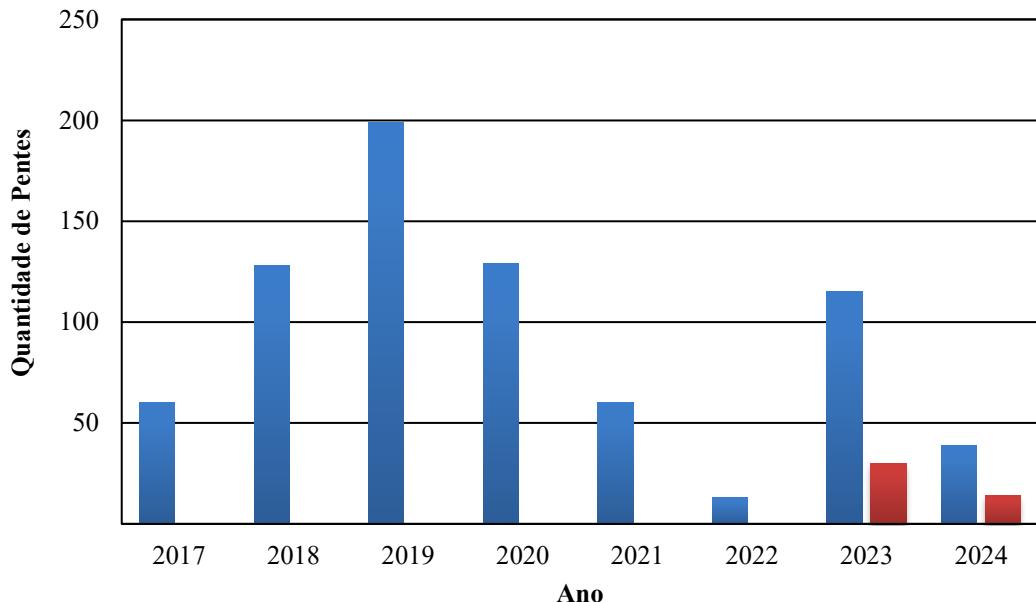


**Figura 48.** Quantidade de pentes produzidos e o custo proporcional em relação ao valor de aquisição junto ao fornecedor original.

## 5.6. Análise de Quebras e Impacto Econômico da Substituição dos Pentes

Para realizar a análise de quebras e impacto econômico, foi utilizado o histórico de solicitações registrado no almoxarifado, que detalha a quantidade de saídas do material nos últimos cinco anos. O valor médio do pente original variou significativamente ao longo do período analisado, refletindo as oscilações da cotação do dólar. Em 2017, o custo médio por unidade era de R\$ 45,00, subindo para R\$ 52,64 em 2018, R\$ 61,89 em 2019, R\$ 65,34 em 2020, R\$ 86,83 em 2021, R\$ 97,83 em 2022 e alcançando R\$ 102,73 em 2023. Esses aumentos destacam a relevância de buscar alternativas mais econômicas, como a MA.

O histórico de quebras mostra que a maior parte das substituições ocorreu devido ao desgaste natural da peça, sem um grande registro de quebras catastróficas. O número de pentes solicitados ao almoxarifado foi o seguinte: 60 unidades em 2017, 128 em 2018, 199 em 2019, 129 em 2020, 60 em 2021, 13 em 2022, e 115 em 2023. Em 2023, foram incluídas 30 unidades do pente impresso como parte do plano de transição. Em 2024, o histórico inclui 39 unidades originais e 14 unidades impressas. Como mostra a Figura 49 O histórico de quebras não evidenciou incidentes severos, sendo a maioria das trocas atribuídas ao desgaste natural das peças.



**Figura 49.** Histórico de substituição dos pentes.

O plano inicial da fábrica é utilizar os pentes impressos principalmente como peças de estoque, enquanto mantém a compra de peças originais apenas para emergências. Esse modelo híbrido busca garantir a continuidade da operação enquanto reduz custos, promovendo uma transição gradual para a adoção integral da MA.

Com base na projeção de custo reduzido por unidade da seção 4.5, foi possível calcular a economia alcançada com o uso dos pentes impressos em 2023 e 2024, considerando o número de unidades utilizadas nesses anos. Em 2023, foram utilizados 30 pentes impressos, com custo unitário médio, de aproximadamente R\$ 25,35, resultando em um custo total de R\$ 760,50 para os pentes impressos. Se os 30 pentes tivessem sido adquiridos do fornecedor original ao custo médio de R\$ 102,73 por unidade, o total seria de R\$ 3.081,90. Assim, a economia total foi de R\$ 2.321,40, o que corresponde a uma redução de 75 % no custo.

Em 2024, foram utilizadas 14 unidades impressas, com custo médio por unidade foi estimado em R\$ 21,77, resultando em um custo total de R\$ 304,78. Caso esses pentes tivessem sido comprados do fornecedor original ao preço médio de R\$ 102,73, o custo seria de R\$ 1.438,22. Portanto, a economia alcançada foi de R\$ 1.133,44, representando também uma redução significativa de aproximadamente 79 % no custo.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica e financeira da utilização de peças manufaturadas aditivamente *in loco* em uma fábrica de cerveja. A análise financeira consistiu na comparação dos custos de produção das peças internamente com os custos de aquisição junto ao fornecedor original. Já a viabilidade técnica foi avaliada por meio de testes em campo, considerando as dimensões e a vida útil das peças produzidas.

Entre as versões de pentes produzidos, a opção fabricada em Tritan demonstrou o melhor desempenho, atendendo plenamente às demandas da fábrica. Comparado aos modelos em ABS e PLA, o pente em Tritan apresentou maior resistência térmica e durabilidade, com sua integridade mantida mesmo sob as condições adversas do ambiente de trabalho. Essa característica assegurou sua superioridade tanto em termos de funcionalidade quanto de confiabilidade operacional.

Do ponto de vista financeiro, os resultados indicaram que o custo da produção *in loco* de peças por MA representa apenas 18 % do valor da aquisição de peças originais junto ao fornecedor, conforme evidenciado no Capítulo 4, tópico 4.3. Esse diferencial de custo reforça a vantagem econômica da solução proposta, especialmente para demandas recorrentes e moderadas.

Sob a ótica técnica, a análise das dimensões demonstrou alta consistência entre as peças fabricadas, sem variações significativas que comprometessem o desempenho das mesmas. Em campo, o pente produzido *in loco* mostrou-se equivalente à peça original no quesito funcionalidade. Em relação à durabilidade, os primeiros lotes de pentes estão em uso há até 18 meses e permanecem íntegros, indicando uma vida útil promissora dentro desse intervalo de tempo. No entanto, uma análise mais aprofundada será necessária para validar a performance das peças em períodos superiores a três anos de uso.

A análise dos históricos de quebra e custo, como apresentado nos capítulos 4.4 e 4.6, reforçou a viabilidade da manufatura aditiva para atender às demandas de reposição da fábrica. Em 2023 e 2024, a adoção dos pentes impressos em Tritan gerou economias significativas de aproximadamente 75% e 79%, respectivamente, quando comparado aos custos de aquisição das peças originais. Essa economia demonstra o impacto positivo da MA no orçamento da

fábrica, mesmo considerando um volume moderado de produção.

Entretanto, a capacidade de produção limitada pela tecnologia de MA, que permite fabricar uma unidade em um período de 8 horas. Essa limitação torna inviável atender grandes demandas de forma imediata, sendo recomendada a manutenção de um estoque estratégico para emergências. Assim, é fundamental monitorar a durabilidade das peças em prazos mais longos, permitindo que a análise de custo-benefício inclua o tempo de uso como variável crítica.

Portanto, conclui-se que a adoção de peças manufaturadas aditivamente in loco é uma solução viável e vantajosa para a fábrica, tanto em termos econômicos quanto técnicos, ao menos no horizonte de 18 meses analisados. A MA demonstrou ser uma alternativa eficiente, oferecendo economia de custo e manutenção do desempenho esperado dos equipamentos.

Apesar das vantagens econômicas e da viabilidade técnica do uso do Tritan na fabricação da peça por manufatura aditiva, é importante reconhecer uma limitação associada à sua vida útil. Atualmente, a durabilidade do componente produzido com Tritan ainda não pode ser quantificada com precisão, uma vez que não há dados suficientes sobre seu comportamento em longo prazo nas condições específicas de uso. No entanto, há evidências empíricas de que sua vida útil é inferior à da peça original, produzida com materiais industriais de maior resistência e durabilidade.

Ainda assim, considerando o baixo custo unitário, a possibilidade de produção sob demanda e a redução do tempo de reposição, a utilização do Tritan se mostra vantajosa para aplicações em que a substituição periódica é viável. Essa estratégia pode ser especialmente útil em cenários onde o custo e a agilidade de produção superam a necessidade de longa durabilidade, reforçando o potencial da manufatura aditiva como solução econômica e flexível.

Por fim, para futuros estudos, recomenda-se ampliar a análise da vida útil das peças produzidas por MA, observando seu desempenho em períodos superiores a três anos, permitindo uma avaliação mais precisa do custo-benefício em longo prazo. Além disso, investigações sobre a causa raiz para as quebras dos pentes originais e dos impressos permitem a identificação de falhas estruturais ou funcionais, viabilizando otimizações no projeto dos pentes, aumentando sua vida útil e reduzindo ainda mais os custos associados à sua substituição.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3DFila. (2018). Ficha técnica ABS FI05. Revisão D, 13/09/2018.
- 3DFila. (2023). Ficha técnica TRITAN HT FI05. Revisão B, 14/03/2023.
- 3D Lab. (2021). Ficha técnica PLA Data-Sheet. 3D Lab Indústria Ltda.
- Abbate, R., Manco, P., Macchiaroli, R., & Lambiase, A. (2022). A survey on the integration between additive manufacturing and maintenance. *Macromolecular Symposia*, 404(1). <https://doi.org/10.1002/masy.202100452>
- Alabi, M. (2024). Application of digital lean manufacturing system in additive manufacturing industries: a review. *Engineering Headway*, 2, 79-94. <https://doi.org/10.4028/p-fcle7u>
- Bakarich, S., Balding, P., Gorkin, R., Spinks, G., & Panhuis, M. (2014). Printed ionic-covalent entanglement hydrogels from carrageenan and an epoxy amine. *RSC Advances*, 4(72), 38088-38092. <https://doi.org/10.1039/c4ra07109c>
- Burtet, L. O que é a Indústria 4.0. 49 Educação, 2022. Disponível em: <https://49educacao.com.br/inovacao/industria-4-0/>. Acesso em: 5 jul. 2024
- Cao, J., Sun, X., Lin, Z., & Dong, Q. (2023). Dimensional modeling of single pass welding in wire and arc additive manufacturing. International Conference on Mechatronics Engineering and Artificial Intelligence (MEAI 2022), 19. <https://doi.org/10.1117/12.2671849>
- Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A., & Bil, C. (2019). Maintenance in aeronautics in an industry 4.0 context: the role of augmented reality and additive manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(4), 516-526. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.02.00>
- Chen, Y., Peng, X., Kong, L., Dong, G., Remani, A., & Leach, R. (2021). Defect inspection technologies for additive manufacturing. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 3(2), 022002. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/abe0d0>
- Eyers, D. (2017). Control architectures for industrial additive manufacturing systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 232(10), 1767-1777.

- <https://doi.org/10.1177/0954405417703420>
- Fam, S., Loh, S., Musa, H., Yanto, H., Khoo, L., & Yong, D. (2018). Overall equipment efficiency (oee) enhancement in manufacture of electronic components & boards industry through total productive maintenance practices. *Matec Web of Conferences*, 150, 05037. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201815005037>
- Goyal, A. (2023). Visualization of industrial production processes using 3d simulation software for enhanced decision-making. *Linköping Electronic Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.3384/ecp200013>
- Gu, Y. (2023). Simulation of slm manufactured aluminum process and optimization of the parameters by computational fluid dynamics method. *Theoretical and Natural Science*, 5(1), 525-531. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/5/20230318>
- Gülcan, O., Günaydin, K., & Tamer, A. (2021). The state of the art of material jetting—a critical review. *Polymers*, 13(16), 2829. <https://doi.org/10.3390/polym13162829>
- Harikannan, N., Vinodh, S., & Gurumurthy, A. (2020). Sustainable industry 4.0 – an exploratory study for uncovering the drivers for integration. *Journal of Modelling in Management*, 16(1), 357-376. <https://doi.org/10.1108/jm2-11-2019-0269>
- Huang, Y., Leu, M., Mazumder, J., & Dönmez, A. (2015). Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(1). <https://doi.org/10.1115/1.4028725>
- Inzana, J. A., Olvera, D., Fuller, S. M., Kelly, J., Graeve, O. A., Schwarz, E. M., ... & Awad, H. A. (2014). 3d printing of composite calcium phosphate and collagen scaffolds for bone regeneration. *Biomaterials*, 35(13), 4026-4034. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2014.01.064>
- Jiménez, M., Romero, L., Somonte, M., Espinosa, M., & Domínguez, M. (2019). Additive manufacturing technologies: an overview about 3d printing methods and future prospects. *Complexity*, 2019(1). <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>
- Křížová, H. (2023). Filament for 3d printing of high-strength ceramics: structure and properties.. <https://doi.org/10.37904/nanocon.2023.4784>

- Kulkarni, P., Kumar, A., Chate, G., & Dandannavar, P. (2021). Elements of additive manufacturing technology adoption in small- and medium-sized companies. *Innovation & Management Review*, 18(4), 400-416. <https://doi.org/10.1108/inmr-02-2020-0015>
- Kumar, A. and Gupta, R. (2003). Fundamentals of polymer engineering, revised and expanded.. <https://doi.org/10.1201/9780203911891>
- Li, Y., Han, Q., Horváth, I., & Zhang, G. (2019). Repairing surface defects of metal parts by groove machining and wire + arc based filling. *Journal of Materials Processing Technology*, 274, 116268. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116268>
- Ligon, S., Liska, R., Stampfl, J., Gurr, M., & Mülhaupt, R. (2017). Polymers for 3d printing and customized additive manufacturing. *Chemical Reviews*, 117(15), 10212-10290. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
- Liu, C., Gao, H., Li, L., Wang, J., Guo, C., & Jiang, F. (2021). A review on metal additive manufacturing: modeling and application of numerical simulation for heat and mass transfer and microstructure evolution. *China Foundry*, 18(4), 317-334. <https://doi.org/10.1007/s41230-021-1119-2>
- Lyons, R., Newell, A., Ghadimi, P., & Papakostas, N. (2020). Environmental impacts of conventional and additive manufacturing for the production of ti-6al-4v knee implant: a life cycle approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3-4), 787-801. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06367-7>
- Mehrpooya, M., Dehghan-hadikolaei, A., Fotovvati, B., Vosooghnia, A., Emamian, S.S., & Gisario, A. (2019). The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: a review. *Applied Sciences*, 9, 3865. <https://doi.org/10.3390/app9183865>
- Mustafa, M., Raja, S., Alasadi, L., Jamadon, N., Rajeswari, N., & Kumar, A. (2023). A decision-making carbon reinforced material selection model for composite polymers in pipeline applications. *Advances in Polymer Technology*, 2023, 1-9.
- Mycroft, W., Katzman, M., Tammas-Williams, S., Hernández-Nava, E., Panoutsos, G., Todd, I., ... & Kadirkamanathan, V. (2020). A data-driven approach for predicting printability in metal additive manufacturing processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(7), 1769-1781.

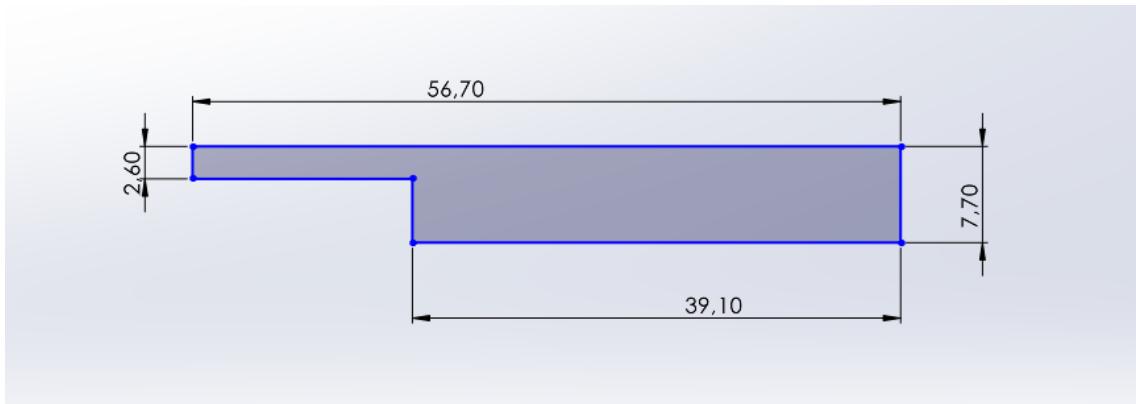
- https://doi.org/10.1007/s10845-020-01541-w
- Ojanga, M. (2019). Effect of total productive maintenance on manufacturing performance of food and non-alcoholic beverage firms in Nairobi county, Kenya. Strategicjournals.com, 6(2).  
<https://doi.org/10.61426/sjbcm.v6i2.1130>
- Olsen, T. and Tomlin, B. (2020). Industry 4.0: opportunities and challenges for operations management. *Manufacturing & Service Operations Management*, 22(1), 113-122. <https://doi.org/10.1287/msom.2019.0796>
- Özgüler, M., & Özgüler, Z. (2022). Evaluation of the importance of additive manufacturing technology in terms of sustainable production with the dematel method. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 9(10), 116-125. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2022.10.015>
- Plessis, A., Desrosiers, C., Majkut, M., Jakata, K., Cook, P., Rack, A., ... & Piché, N. (2023). X-ray tomography study of “squeezed pores” in additively manufactured titanium alloy subjected to hot isostatic pressing. *E-Journal of Nondestructive Testing*, 28(3). <https://doi.org/10.58286/27759>
- Puebla, K., Arcaute, K., Quintana, R., & Wicker, R. B. (2012). Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type I specimens manufactured via stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 18(5), 374-388.  
<https://doi.org/10.1108/13552541211250373>
- Raja, S. and Rajan, A. J. (2023). Challenges and opportunities in additive manufacturing polymer technology: a review based on optimization perspective. *Advances in Polymer Technology*, 2023, 1-18.  
<https://doi.org/10.1155/2023/8639185>
- Rocha, V. M. Impressora 3D – o futuro tecnológico e criativo das indústrias automobilísticas. Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2018.
- Rodrigues, T. A., Duarte, V. R., Miranda, R. M. M., Santos, T. G., & Oliveira, J. (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12(7), 1121.  
<https://doi.org/10.3390/ma12071121>
- Scheithauer, U., Weingarten, S., Johne, R., Schwarzer, E., Abel, J., Richter, H., ... & Michaelis, A. (2017). Ceramic-based 4D components: additive

- manufacturing (am) of ceramic-based functionally graded materials (fgm) by thermoplastic 3d printing (t3dp). *Materials*, 10(12), 1368. <https://doi.org/10.3390/ma10121368>
- Shetty, S., Nandish, B., Amin, V., Jayaprakash, K., Kumar, G., Khan, F., ... & Harish, P. (2022). 3d printed polyether ether ketone (peek), polyamide (pa) and its evaluation of mechanical properties and its uses in healthcare applications.. *lop Conference Series Materials Science and Engineering*, 1224(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1224/1/012005>
- Singh, M., Halbig, M., & Grady, J. (2015). Additive manufacturing of light weight ceramic matrix composites for gas turbine engine applications., 145-150. <https://doi.org/10.1002/9781119211662.ch16>
- Tripathi, V., Chattopadhyaya, S., Mukhopadhyay, A., Saraswat, S., Sharma, S., Li, C., ... & Georgise, F. B. (2022). A novel smart production management system for the enhancement of industrial sustainability in industry 4.0. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 1-24. <https://doi.org/10.1155/2022/6424869>
- Ultimaker. (2017). Ficha técnica ABS. Versão 3.011, 16/05/2017.
- Veiga, F., Val, A., Suárez, A., & Alonso, U. (2020). Analysis of the machining process of titanium ti6al-4v parts manufactured by wire arc additive manufacturing (waam). *Materials*, 13(3), 766. <https://doi.org/10.3390/ma13030766>
- Wszołek, G., Czop, P., Słoniewski, J., & Dogrusoz, H. (2020). Vibration monitoring of cnc machinery using mems sensors. *Journal of Vibroengineering*, 22(3), 735-750. <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20788>
- Zadpoor, A.A., & Malda, J. (2017). Additive manufacturing of biomaterials, tissues, and organs. *Annals of Biomedical Engineering*, 45(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1719-y>
- Zgryza, Ł., Raczyńska, A., & Paśnikowska-Łukaszuk, M. (2018). Thermovisual measurements of 3d printing of abs and pla filaments. *Advances in Science and Technology – Research Journal*, 12(3), 266-271. <https://doi.org/10.12913/22998624/94325>
- Zhang, X., Fang, G., & Zhou, J. (2017). Additively manufactured scaffolds for bone tissue engineering and the prediction of their mechanical behavior: a review. *Materials*, 10(1), 50. <https://doi.org/10.3390/ma10010050>

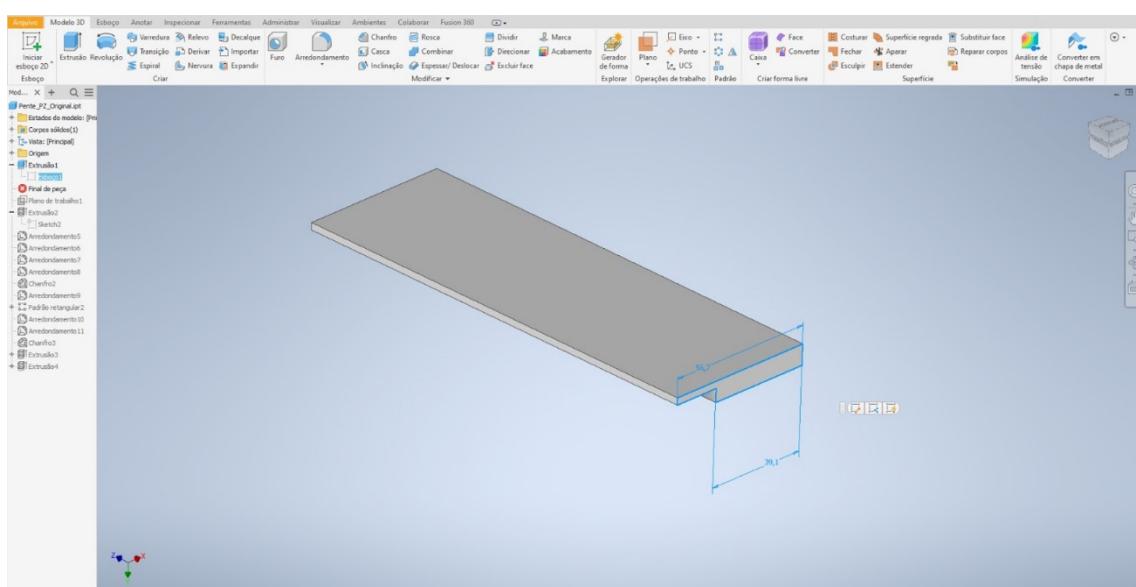
## ANEXO A

Passo a Passo da modelagem no software CAD.

- **Passo 1:** É criado um esboço no plano médio do espaço virtual de trabalho. O recurso “linha” é utilizado para desenhar a seguinte geometria:

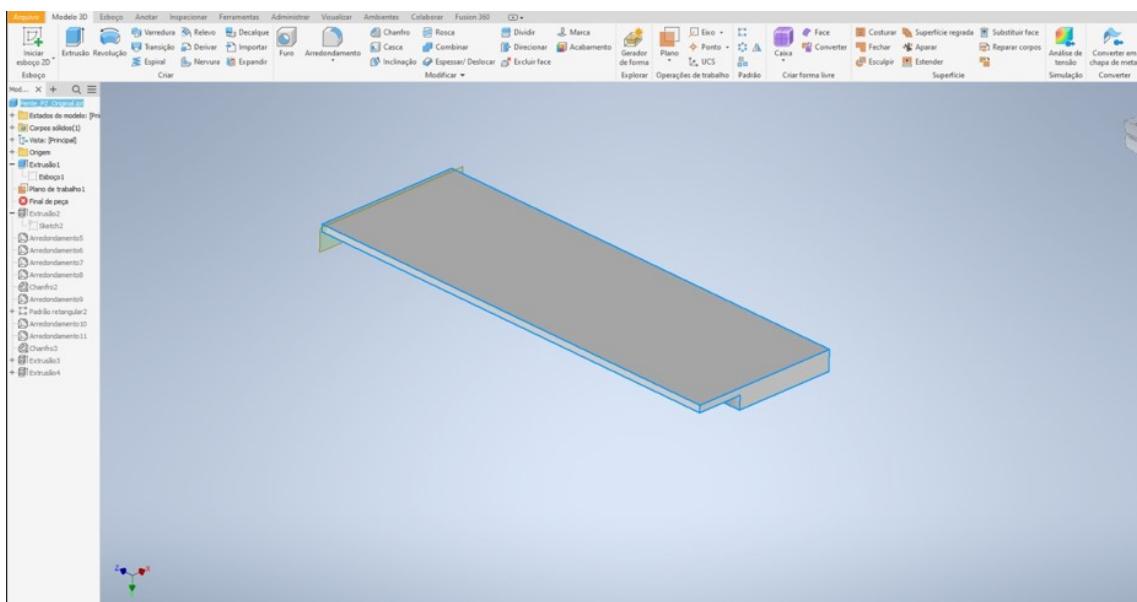


- **Passo 2:** Utiliza-se o recurso “extrusão” para criar um corpo sólido a partir do esboço acima. O corpo sólido criado a partir do esboço 1 que dará origem a base do pente.

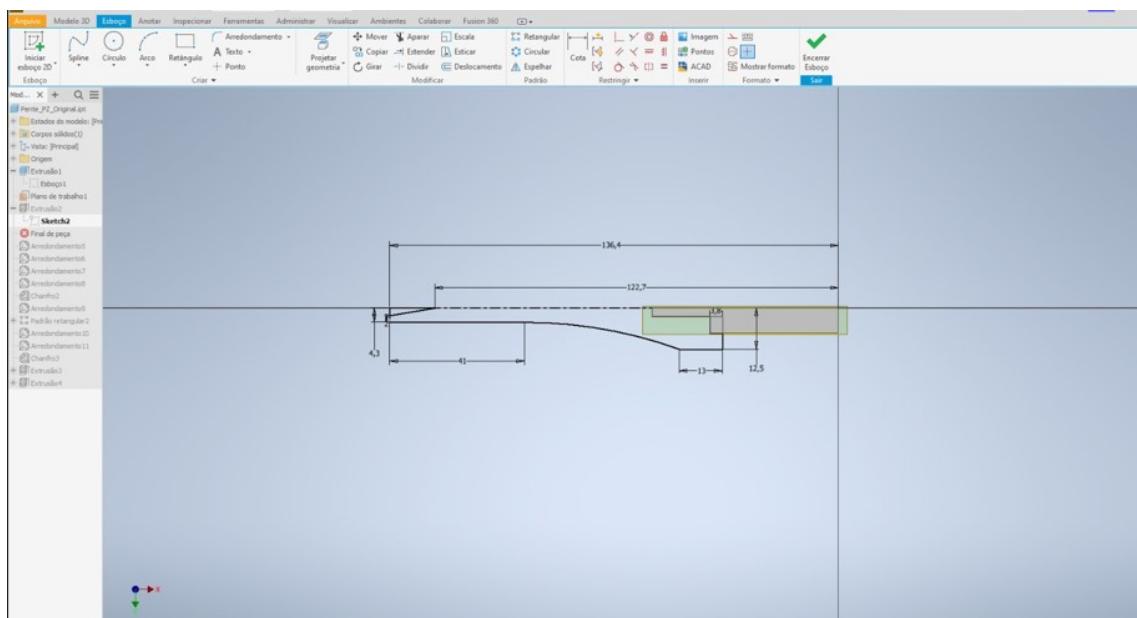


- **Passo 3:** Criação do plano auxiliar onde será inserido o esboço da primeira aba do pente. O plano é criado a 1 mm de distância da

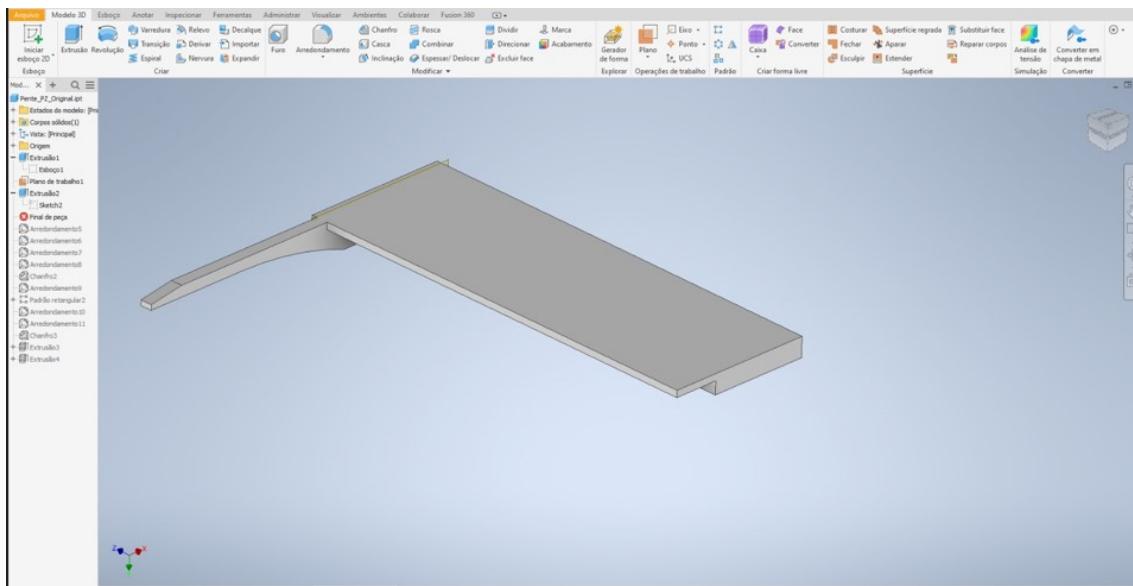
extremidade esquerda do pente.



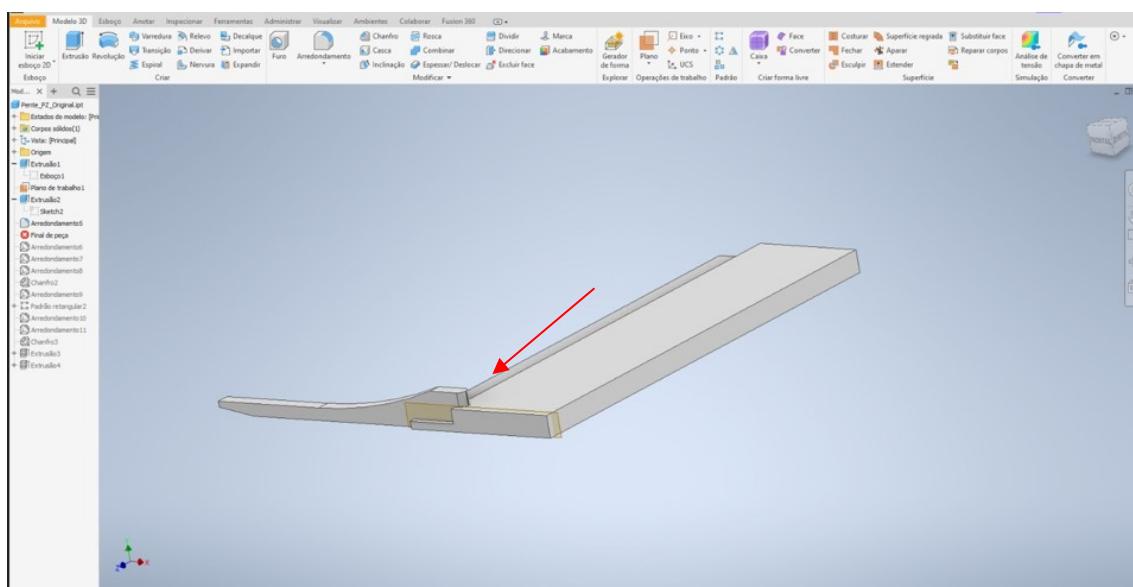
- **Passo 4:** Utilizando o recurso de “linha” cria-se as arestas retilíneas da primeira aba do pente. E com o recuso “spiline” é desenhado a aresta curva da parte de baixo da aba.



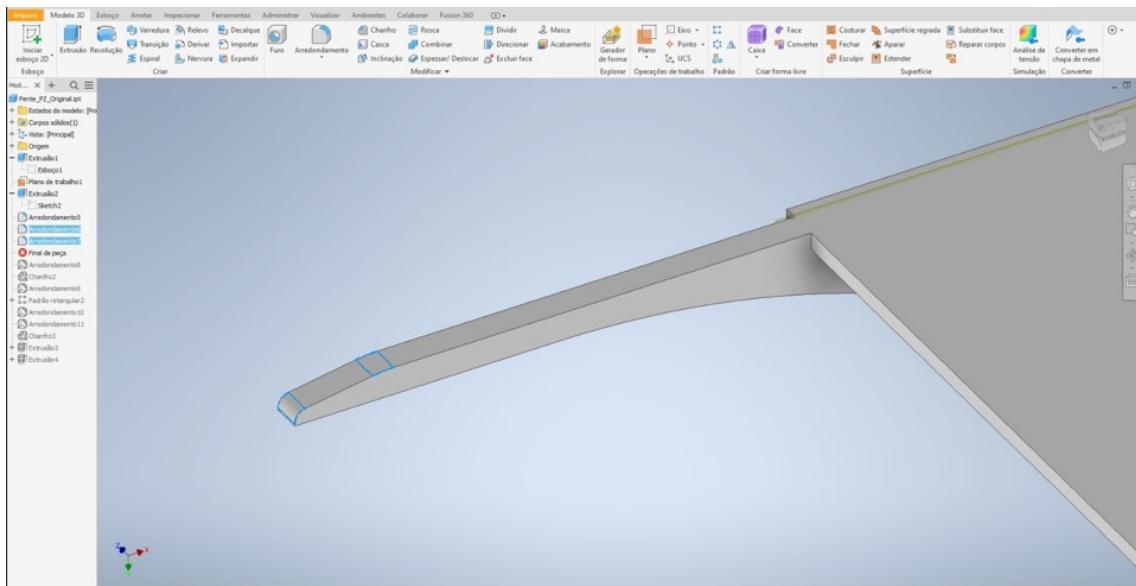
- **Passo 5:** Com o recurso “extrusão” cria-se o corpo sólido a partir do esboço 2, com 4,6 mm de espessura.



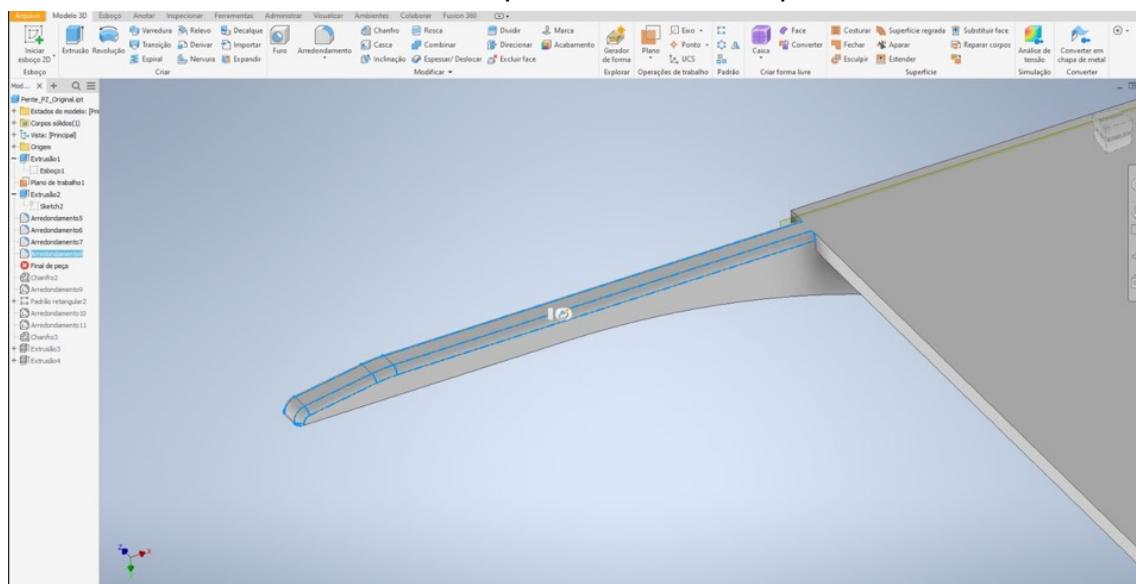
- **Passo 6:** Utilizando o recurso arredondamento, com 1mm de raio, seleciona-se as arestas que fazem contato com o corpo do pente na parte inferior.



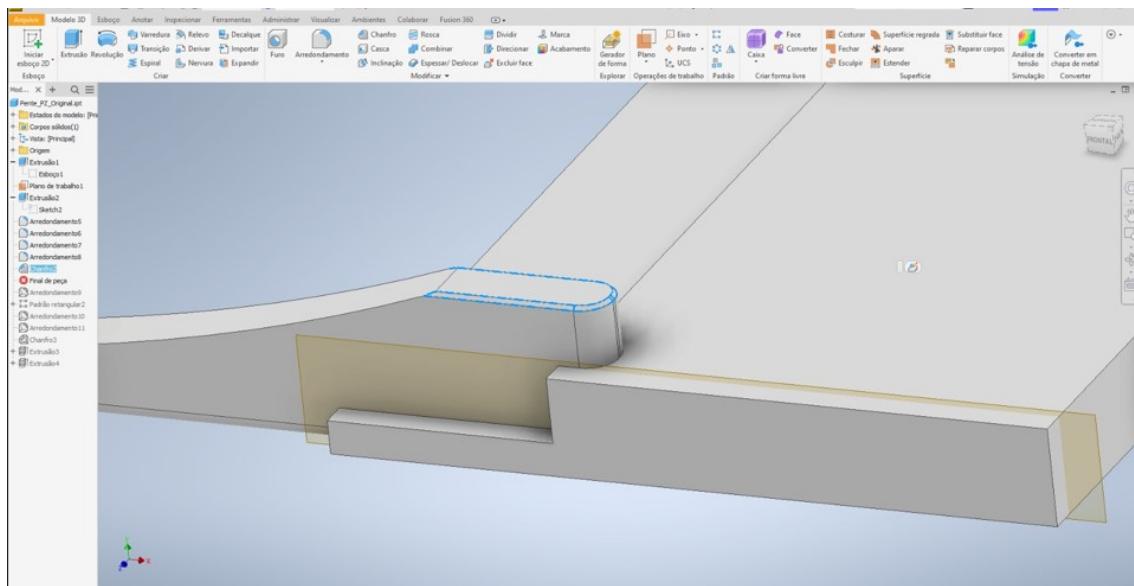
- **Passo 7:** Utilizando o recurso “Arredondamento”, com 10 e 1 mm de raio, selecionasse a aresta superior do chanfro e a aresta inferior do chanfro da ponta do pente, respectivamente.



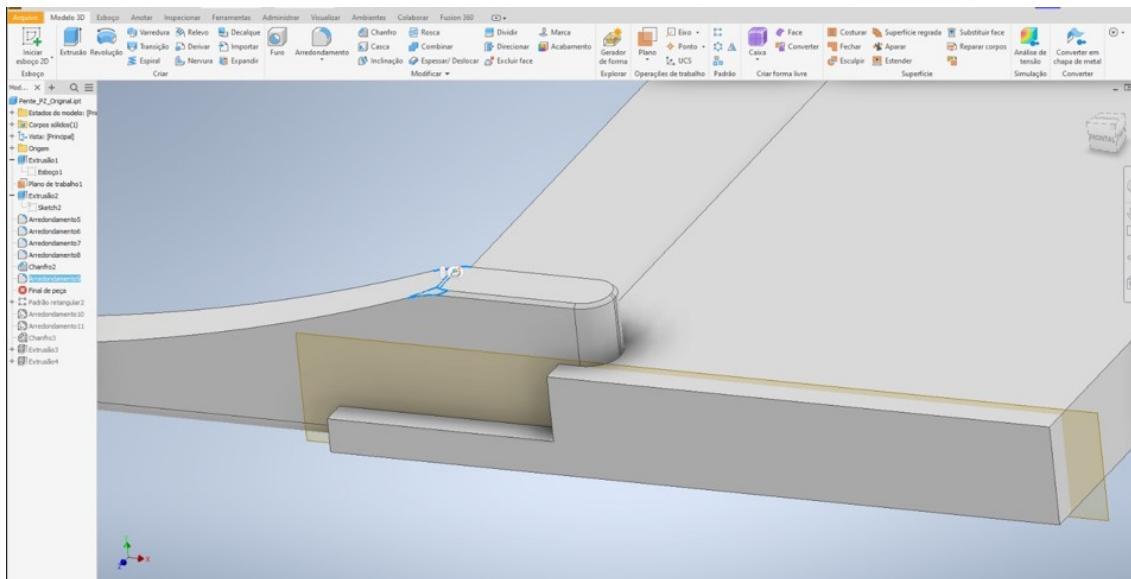
- **Passo 8:** Com o recurso “arredondamento” com raio de 1mm seleciona-se as arestas superiores da aba do pente.



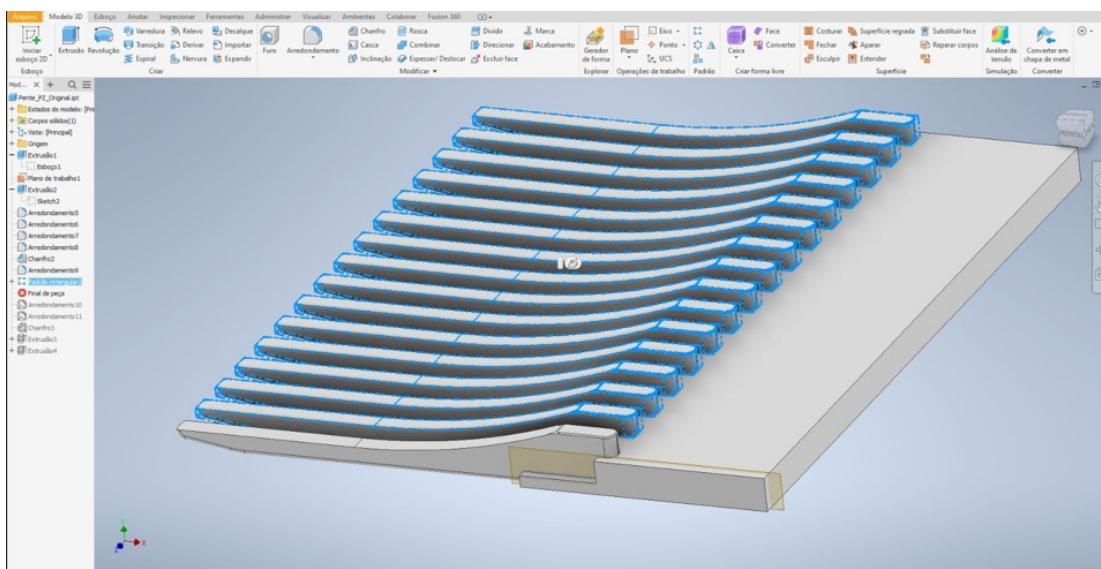
- **Passo 9:** Usa-se o recurso “chanfro” com 0,5 mm de comprimento e seleciona-se a aresta da face inferior da aba do pente.



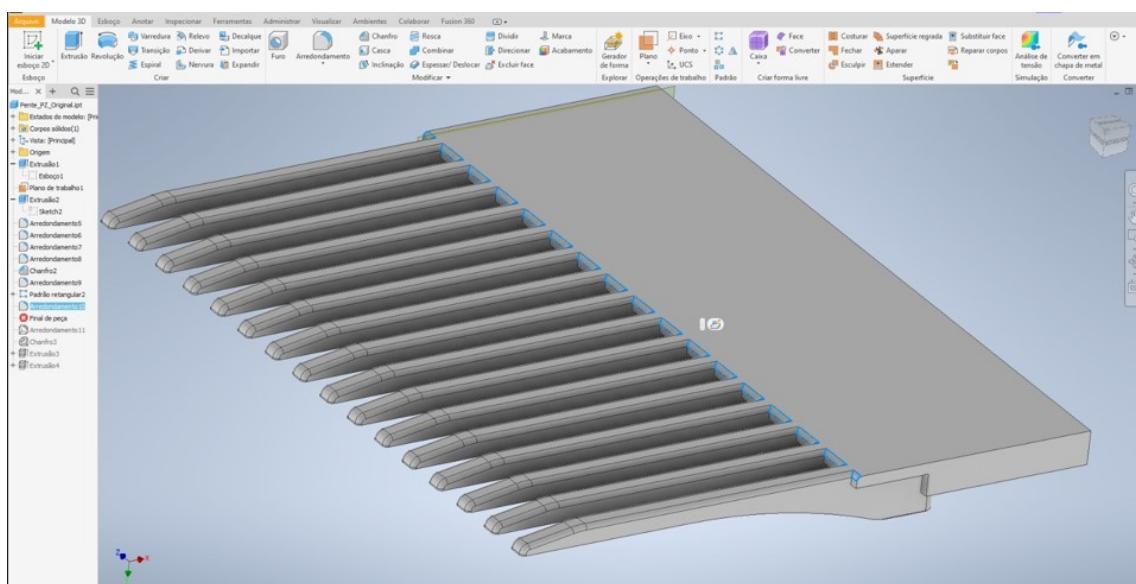
- **Passo 10:** Utilizando o recurso de “chanfro” com 0,5 mm seleciona-se as arestas destacadas na figura 22. Tem-se a modelagem da primeira aba concluída.



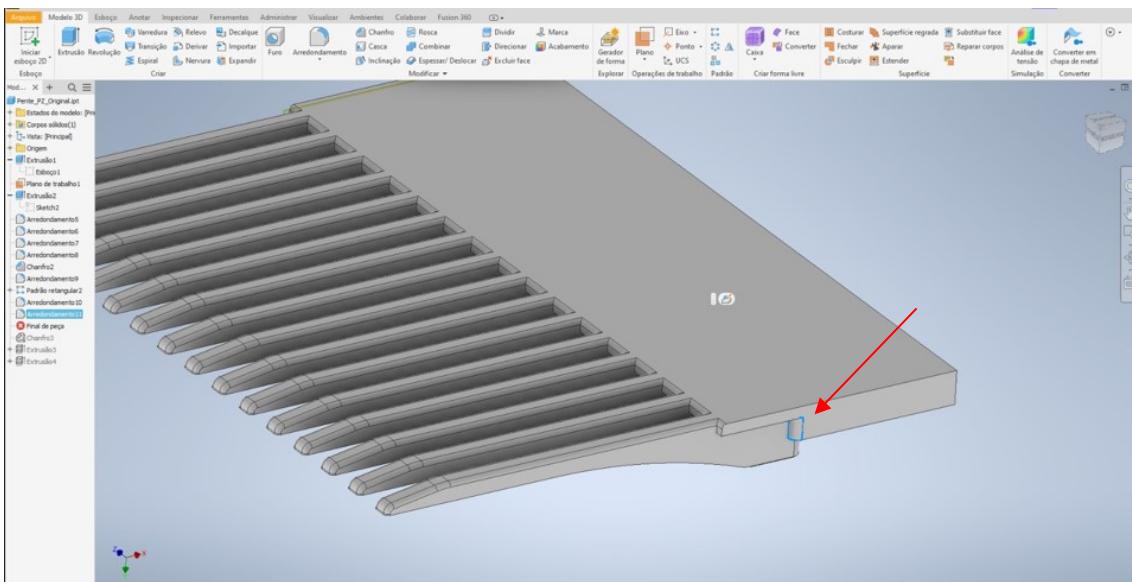
- **Passo 11:** Ao finalizar a primeira aba replica-se ao longo do pente por meio do recuso “padrão linear”. São criadas 15 unidades de aba distanciadas de 1,4 mm entre si, além da criada no passo anterior.



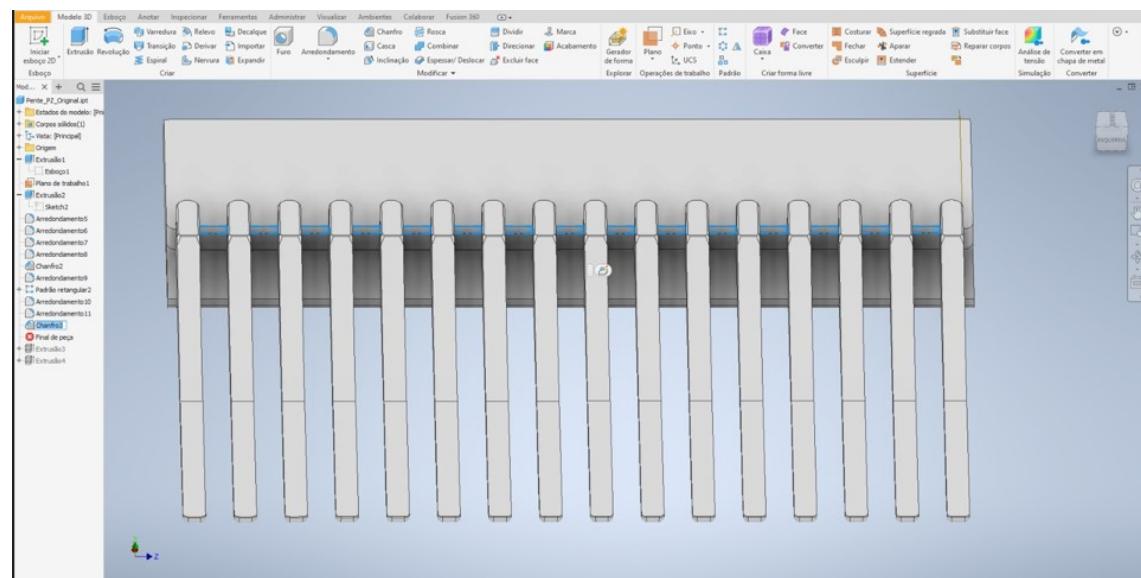
- **Passo 12:** Utiliza-se o recurso “chanfro” com 1 mm de comprimento e seleciona-se as arestas superiores entre as abas do pente.



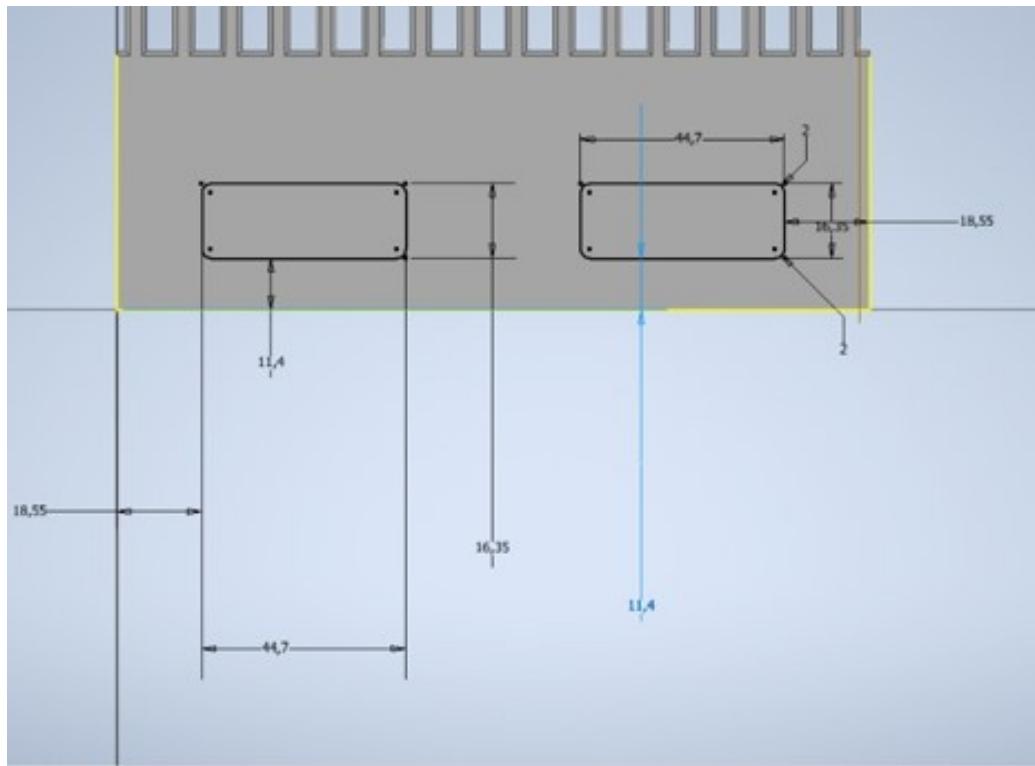
- **Passo 13:** Seleciona-se a aresta indicada na figura 25 e cria-se um “arredondamento” de raio 1 mm.



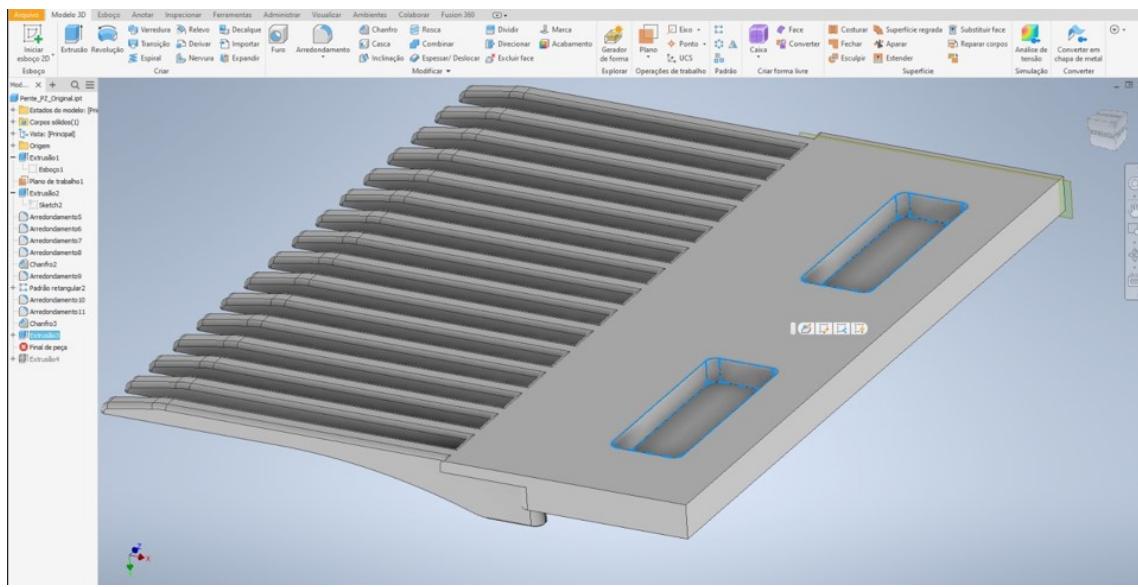
- **Passo 14:** No lado inferior do pente seleciona-se as arestas entre as abas e cria-se chanfro com distância de 1mm.



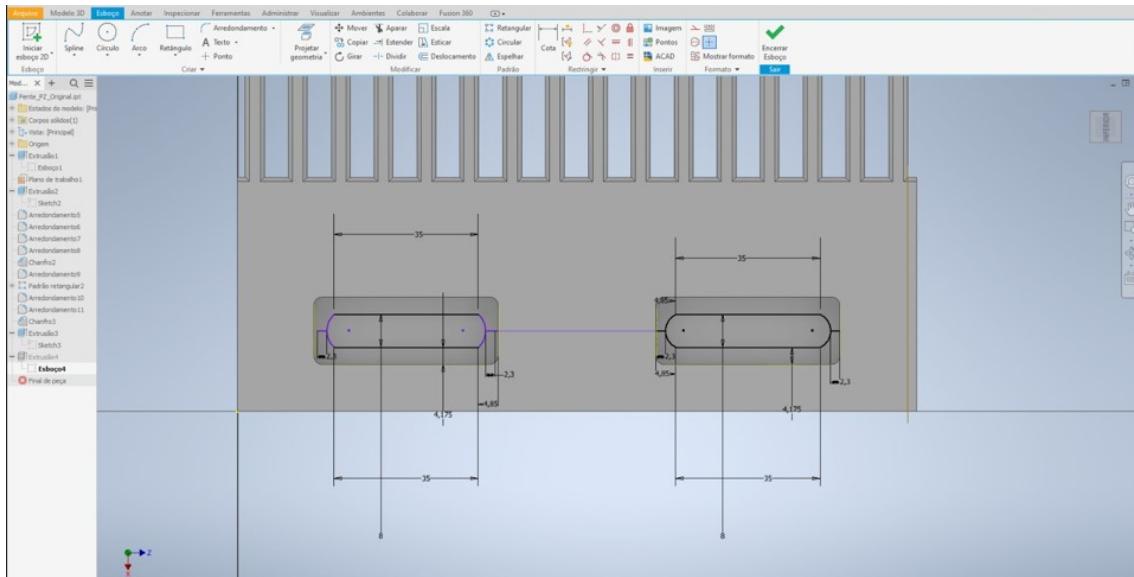
- **Passo 15:** Na face superior do corpo do pente cria-se o esboço conforme a figura do passo 17.



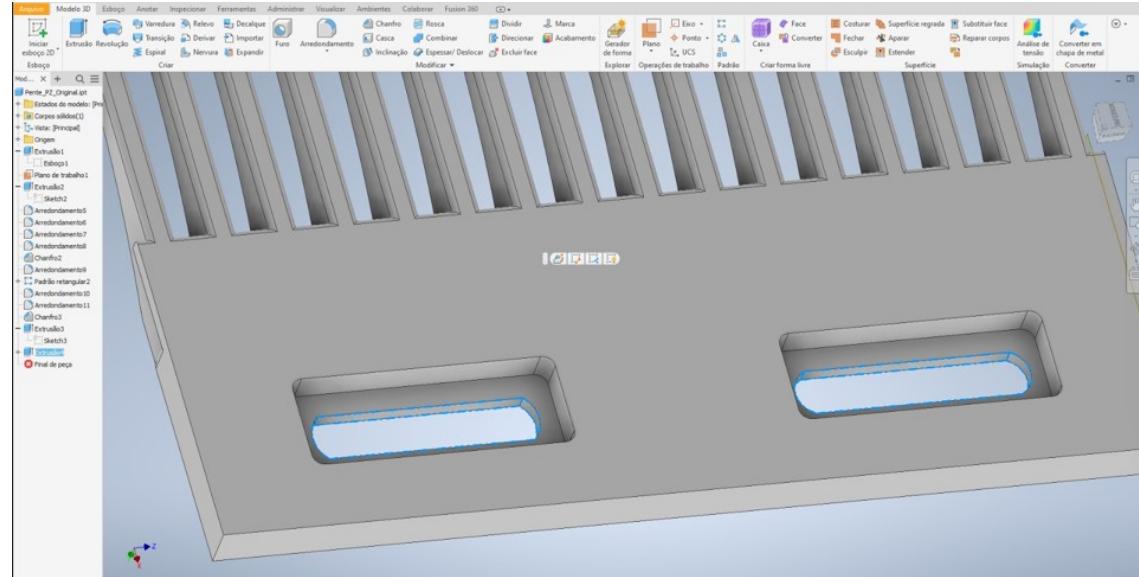
- **Passo 16:** Utilizando o recurso de “extrusão”, cria-se o furo a partir do esboço do passo 15 com 5,30 mm de profundidade.



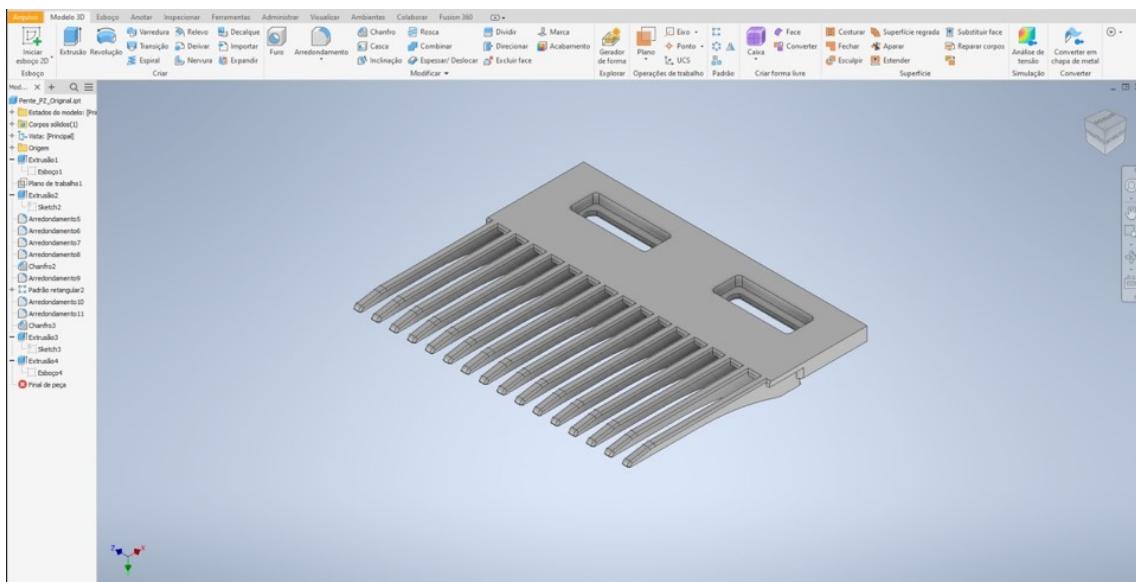
- **Passo 17:** Cria-se o esboço conforme figura 41 na face superior do furo.



- **Passo 18:** Utilizando o recurso “extrusão” cria-se o furo a partir do esboço do passo 17.



Ao finalizar os 18 passos a peça está finalizada:



## ANEXO B

