

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEMEC - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA

FABRÍCIO YUJI FUJISAWA UEMURA

**PROJETO, MANUFATURA E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
MEDIÇÃO DE ALTURA POR PERFILÔMETRO A LASER**

SÃO CARLOS  
2023

FABRÍCIO YUJI FUJISAWA UEMURA

**PROJETO, MANUFATURA E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
MEDIÇÃO DE ALTURA POR PERFILÔMETRO A LASER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao DEMec -  
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Mariano Eduardo Moreno

SÃO CARLOS  
2023

## **AGRADECIMENTOS**

É com muita felicidade que agradeço à minha família, namorada, amigos e professores todo o suporte emocional, financeiro e técnico provido, não apenas durante a realização deste trabalho, mas sim durante toda a minha vida. Vocês jamais serão esquecidos.

*“Sejam felizes, ou pelo menos tentem com fé e coragem!”*

(Paulo Settervall)



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 42/2022/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

FABRÍCIO YUJI FUJISAWA UEMURA

PROJETO, MANUFATURA E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ALTURA POR PERFILÔMETRO A LASER

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 13 de dezembro de 2022

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Mariano Eduardo Moreno
Membro da Banca 1	Fabício Tadeu Paziani
Membro da Banca 2	Sérgio Henrique Evangelista



Documento assinado eletronicamente por **Mariano Eduardo Moreno, Docente**, em 13/12/2022, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabício Tadeu Paziani, Docente**, em 13/12/2022, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sérgio Henrique Evangelista, Docente**, em 13/12/2022, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0894994** e o código CRC **D32BC3DF**.

## RESUMO

FUJISAWA UEMURA, Fabrício Yuji. PROJETO, MANUFATURA E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ALTURA POR PERFILÔMETRO A LASER. 2023. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2023.

Neste trabalho foi criado o projeto de um sistema de medição de altura relativa de um componente utilizando métodos de solução de problemas (*Problem Solving*). Inicialmente foi feita a análise de um sistema de medição de altura por câmera com auxílio do Diagrama de Ishikawa para identificação das causas raízes de aprovação de peças fora da faixa de tolerância. Então foi criado um modelo CAD (Computer Aided Design) do novo sistema, que utiliza um perfilômetro a laser para solucionar as vulnerabilidades do outro método e contém partes com design para fabricação por manufatura aditiva por extrusão de material termoplástico. As partes necessárias são manufaturadas, o sistema foi montado e então o novo processo submetido a análises estatísticas de qualidade de processo e meio de medição da metodologia *SixSigma*. Foram obtidos gráficos de dispersão, frequência e amplitudes com resultados de  $C_g$ ,  $C_{gk}$  e  $\%GRR$  melhores que o esperado, validando o processo e o sistema como capaz.

**Palavras-chave:** Solução de problemas; sistema de medição; perfilômetro a laser; manufatura aditiva; validação estatística.

## ABSTRACT

FUJISAWA UEMURA, Fabrício Yuji. DESIGN, MANUFACTURING AND VALIDATION OF A HEIGHT MEASUREMENT SYSTEM BY LASER PROFILER. 2023. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2023.

This work carries out the design of a system for measuring the relative height of a component using methods of problem solving. Initially, the analysis of a system for measuring height by camera with the aid of the Ishikawa Diagram was performed to identify the root causes of approval of parts outside the tolerance range. Then a CAD (Computer Aided Design) model of the new system was created, which uses a laser profiler to solve the vulnerabilities of the other method and contains parts designed to be produced by additive manufacturing of extrusion of thermoplastic material. Needed parts are manufactured, the new system assembled and then subjected to statistical analysis of process quality and means of measurement using the *SixSigma* methodology. Scatter, frequency and amplitude graphs were obtained with results of  $C_g$ ,  $C_{gk}$  and  $\%GRR$  being better than expected, validating the process and the system as capable.

**Keywords:** Problem Solving; measuring system; laser profiler; additive manufacturing; statistical validation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do fundamento da triangulação ótica. . . .	16
Figura 2 – Representação esquemática da limitação do perfilômetro. . . . .	17
Figura 3 – Representação esquemática do funcionamento de uma impressora 3D de extrusão. . . . .	18
Figura 4 – Exemplos de <i>raft</i> e <i>brim</i> . . . . .	19
Figura 5 – Resistência de uma peça impressa em função da orientação e tipo de carga. . . . .	19
Figura 6 – Fluxograma do processo de fabricação. . . . .	22
Figura 7 – Vista frontal do sistema de repasse com câmera. . . . .	23
Figura 8 – Vista lateral do sistema de repasse com câmera. . . . .	24
Figura 9 – Parafuso com esfera. . . . .	25
Figura 10 – Perfilômetro Keyence LJ-V7080. . . . .	26
Figura 11 – Impressora 3D Dremel Digilab 3D45. . . . .	27
Figura 12 – Vista isométrica do modelo CAD. . . . .	28
Figura 13 – Diagrama de Ishikawa. . . . .	32
Figura 14 – Modelo CAD do novo sistema de medição. . . . .	35
Figura 15 – Novo design de fixação do eixo de posicionamento. . . . .	36
Figura 16 – Orientação da impressão do suporte do perfilômetro. . . . .	37
Figura 17 – Registro do perfil mestre, referência para software do perfilômetro. . . .	38
Figura 18 – Configuração base de medição do perfilômetro. . . . .	39
Figura 19 – Configuração base de medição do perfilômetro. . . . .	39
Figura 20 – Exemplo de medições <i>NOK</i> e <i>OK</i> da altura do terminal. . . . .	40
Figura 21 – Configuração de checagem de <i>part number</i> . . . . .	41
Figura 22 – Exemplo do Poka-Yoke de <i>PN</i> . . . . .	42
Figura 23 – Suporte do perfilômetro deformado. . . . .	43
Figura 24 – Suporte do perfilômetro de aço 1020 com tratamento superficial. . . .	44
Figura 25 – Modelo final do novo sistema de medição. . . . .	45
Figura 26 – Gráficos de dispersão e frequência da análise estatística do processo. . .	46
Figura 27 – Gráficos de dispersão e amplitudes da análise estatística de meio de medição. . . . .	47



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
ABS	Análise de variâncias
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
GdL	Grau de Liberdade
LSE	Limite Superior de Engenharia
LIE	Limite Inferior de Engenharia
NOK	Fora dos limites de tolerância
OK	Dentro dos limites de tolerância
PFMEA	<i>Process Failure Mode and Effect Analysis</i>
PN	<i>Part number</i>
R&R	Repetibilidade & Reprodutibilidade
USL	<i>Upper Specification Limit</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{x}_g$	Média dos valores medidos para a validação estatística de processo.
$x_i$	Valor medido para a validação estatística de processo.
$n$	Quantidade total de valores para a validação estatística de processo.
$s_g$	Desvio padrão para a validação estatística de processo.
$T$	Valor do tamanho da faixa de tolerância.
$USL$	Limite superior de especificação.
$LSL$	Limite inferior de especificação.
$C_g$	Índice de capacidade potencial.
$C_{gk}$	Índice de capacidade crítico.
$x_m$	Valor da referência para a validação estatística de processo.
$TSS$	Soma total dos quadrados.
$x_{ijm}$	Valor medido de uma determinada amostra, operador e o número da medição por amostra por operador.
$x_{\bullet\bullet\bullet}$	Média de todas as medições.
$n$	Número de amostras.
$k$	Número de operadores.
$r$	Número de medições por parte e operador.
$SS_P$	Soma dos quadrados referente à amostra.
$SS_A$	Soma dos quadrados referente ao operador.
$SS_{AP}$	Soma dos quadrados referente as interações entre amostra e operador.
$SS_E$	Soma dos quadrados referente ao equipamento.
$DF_P$	Graus de liberdade referente à amostra.
$DF_A$	Graus de liberdade referente ao operador.
$DF_{AP}$	Graus de liberdade referente as interações entre amostra e operador.

$DF_E$	Graus de liberdade referente referente ao equipamento.
$DF_{TSS}$	Graus de liberdade total.
$\overline{F_P}$	Significância da quantidade de influência referente à amostra.
$\overline{F_A}$	Significância da quantidade de influência referente ao operador.
$\overline{F_{AP}}$	Significância da quantidade de influência referente as interações entre amostra e operador.
$AV$	Estimador de variância individual de operador.
$INT$	Estimador de variância individual de operador-amostra.
$EV$	Estimador de variância individual de equipamento.
$GRR$	Repetibilidade & Reprodutibilidade de meio de medição.
$\%GRR$	Indicador de Repetibilidade & Reprodutibilidade de meio de medição.

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1 Justificativas e Relevância	14
1.2 Objetivos	14
<b>2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
2.1 Perfilômetro	16
2.2 Manufatura aditiva	17
2.3 Diagrama de Ishikawa	20
2.3.1 Máquina	20
2.3.2 Método	20
2.3.3 Mão de obra	20
2.3.4 Material	20
2.3.5 Meio ambiente	20
<b>3 – METODOLOGIA</b>	<b>21</b>
3.1 Contexto e definição do problema	21
3.2 Análise do sistema de repasse provisório	23
3.2.1 Posicionamento do produto	25
3.2.2 Ajustes e calibração	25
3.3 Projeto e manufatura	26
3.4 Validação	28
<b>4 – RESULTADOS</b>	<b>32</b>
4.1 Análise do sistema antigo	32
4.1.1 Máquina	32
4.1.2 Método	33
4.1.3 Mão de obra	33
4.1.4 Material	33
4.1.5 Meio ambiente	33
4.2 Design e manufatura do sistema de medição por perfilômetro	34
4.2.1 Modelo CAD	34
4.2.2 Estutura	36
4.3 Configuração do perfilômetro	38
4.4 Iteração	43
4.5 Sistema final	44
4.6 Validação	46

<b>5 – CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>49</b>
<b>Anexos</b>	<b>50</b>
<b>ANEXO A – LJ-V7080 Datasheet</b> . . . . .	<b>51</b>
<b>ANEXO B – Configurações do Dremel DigiLab 3D Slicer</b> . . . . .	<b>54</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativas e Relevância

Medições sempre foram necessárias na história da humanidade, mas o propósito, a resolução e o meio evoluíram de forma notável com o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais miniaturizadas e sensíveis. Antes com palmos e polegares para medição de comprimentos, por exemplo, hoje lasers e câmeras de alta definição são capazes de aferir milésimos de milímetro sem qualquer tipo de contato físico com o objeto em questão de frações de segundo.

Na indústria, há uma necessidade crescente de sistemas de medição precisos e rápidos para satisfazer o volume de produção com o mínimo de recursos possível, ou seja, com custo financeiro, tempos de ciclo, quantidade de operadores, necessidade de manutenção e ocupação de espaço reduzidos, mas sem desprezar a qualidade da medição, visto que as tolerâncias dos projetos tendem a ser cada vez mais apertadas e que possíveis falhas na aferição podem gerar prejuízos não apenas financeiros, mas também à imagem da empresa e à segurança do cliente. O acompanhamento de grandezas tem como objetivo detectar variações no processo passíveis de geração de problemas, como por exemplo, a não conformidade de especificações do cliente, e frequentemente é adotado para características críticas em diversas etapas do processo de fabricação de um produto, de forma que quando seja detectada uma falha, o componente não siga no fluxo do processo e conseqüentemente, tenha seu valor agregado aumentado. No caso de não-deteção, pode apresentar risco ao cliente final, situação crítica que deve ser evitada a todo custo. Dessa forma, partes com defeito são refugadas assim que possível e compõem uma parcela significativa dos gastos de uma linha de produção, portanto devem ser evitadas ao máximo. Contudo, há a reprovação de peças boas e por menor que seja a porcentagem, em uma produção volumosa, o custo desse erro de medição torna-se relevante e a situação é ainda mais grave quando peças ruins são julgadas boas, pois como já mencionado, acrescentam sérios riscos à empresa.

Para que então o desperdício seja reduzido, foi realizada uma análise com metodologias de *problem solving* do atual processo recursivo de aferição de peças segregadas e um novo sistema foi desenvolvido para ser mais estável e replicável.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo, sob o contexto fabril de uma empresa multinacional, analisar o sistema de medição utilizado para a aferição da altura de um componente em relação a outro e posteriormente projetar, manufaturar e validar um novo procedimento para substituí-lo. Para isso, serão utilizadas técnicas aprendidas na universidade e na indústria, assim como normas e catálogos de fabricantes, além do software

SolidWorks 2021, utilizado para modelagem 3D, do Dremel Digilab 3D Slicer, como fatiador para manufatura aditiva de algumas peças, do QS-STAT e Q-DAS solara.MP, para análises estatísticas do conjunto final. Do ponto de vista da indústria era de interesse reduzir o gasto com pseudofalhas, diminuir o tempo gasto com mão de obra e adequar o processo aos requisitos estatísticos e de documentação para mapeamento em PFMEA (Process Failure Mode and Effect Analysis) e Plano de Controle.

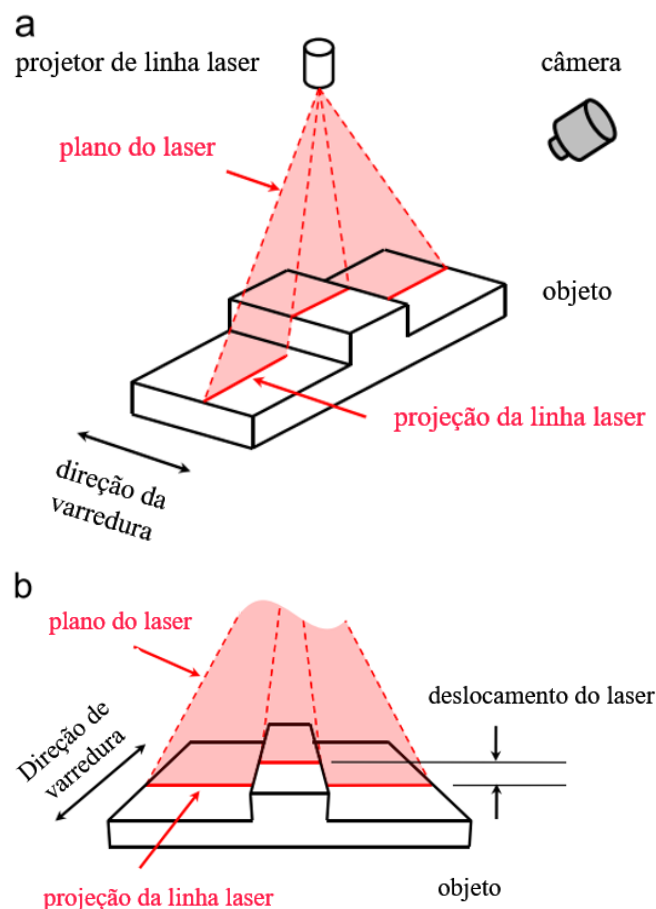
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para este projeto foram utilizados sensor do tipo perfilômetro, juntamente com seu controlador e fonte, impressão 3D por extrusão de polímero termoplástico, além de materiais secundários como perfis, elementos fixadores e posicionadores. Metodologias de *problem solving*, incluindo Diagrama de Ishikawa, definição de problema e mapeamento de processo também foram abordadas.

### 2.1 Perfilômetro

Perfilômetros a laser são instrumentos de medição utilizados para determinação de alturas em ao longo de um comprimento determinado (KEYENCE. . . , 2022), a partir da emissão de um laser e da captação do seu reflexo devido ao objeto sob análise. Esta técnica, chamada de triangulação ótica, representada na Figura 1, é explicada no trabalho de Abu-Nabah, ElSoussi e Alami (2016) sobre a calibração de um desses sistemas.

Figura 1 – Representação esquemática do fundamento da triangulação ótica.



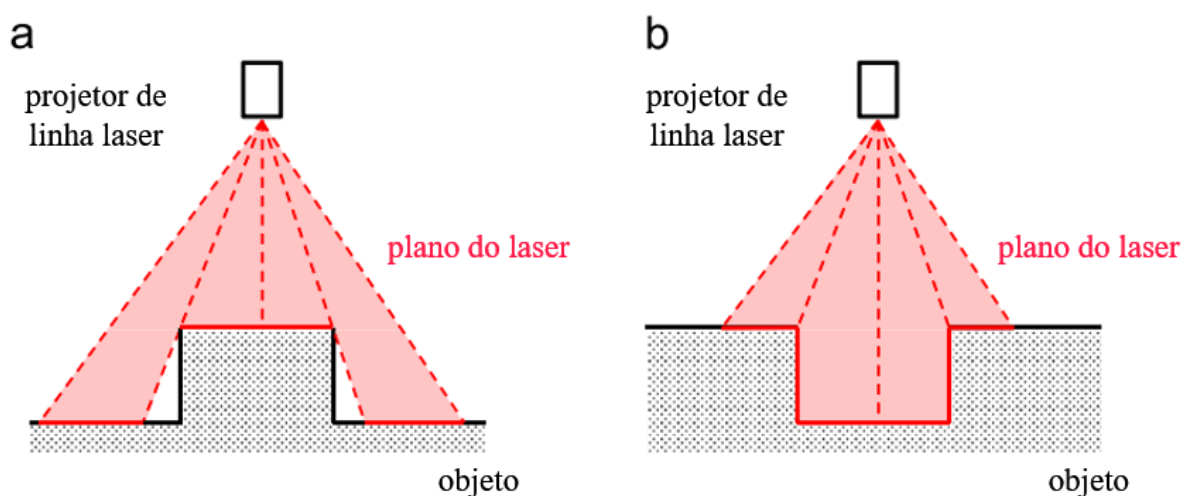
Fonte: Adaptado de Abu-Nabah, ElSoussi e Alami (2016)



Os pontos de reflexão são capturados e a partir da diferença de altura da reflexão do laser, o perfil da peça é determinado por meio de matrizes de transformação que reduzem os pontos de 3D para 2D (ABU-NABAH; ELSOUSSI; ALAMI, 2016).

Contudo, este método de medição possui limitações físicas por depender de um feixe luminoso. Perfis convexos podem gerar “sombra” em algumas regiões pois a emissão do laser é aproximadamente pontual quando comparada à linha de medição. Esse fenômeno pode ser visualizado na Figura 2 e resulta na não detecção de ressaltos esbeltos.

Figura 2 – Representação esquemática da limitação do perfilômetro.



Fonte: Adaptado de Abu-Nabah, ElSoussi e Alami (2016)

Apesar disso, sistemas visuais de medição como este são utilizados para verificação da qualidade de soldas (HUANG; KOVACEVIC, 2011), revestimentos metálicos (DAVIS; SHIN, 2011) e medição de formas 2D (LEE; NGUYEN, 2015).

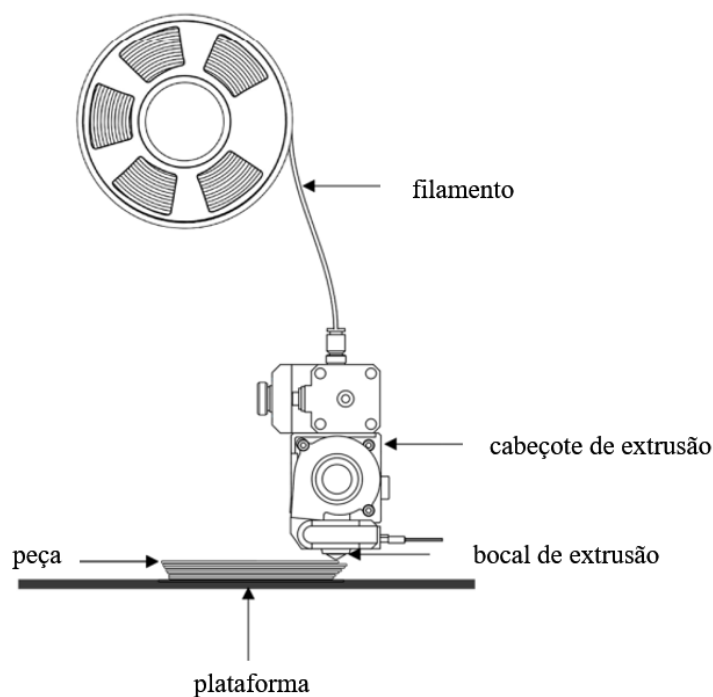
## 2.2 Manufatura aditiva

Outra ferramenta utilizada foi a manufatura aditiva. Conhecida pela flexibilidade e baixo custo, é amplamente utilizada para a prototipação pois habilita a criação de um modelo físico de forma rápida e extremamente mais barata quando comparada a outros processos de fabricação, como a usinagem, conformação e fundição. Isso se deve ao fato de sua matéria prima ser acessível, não requerer ferramental especializado para cada impressão e tampouco mão de obra dedicada durante todo o processo.

Há vários tipos: jateamento de aglomerante, deposição direta por aplicação de energia, fotopolimerização de líquido, entre outros (SILVA et al., 2020), mas foi utilizada a extrusão de material polimérico, que consiste na deposição por extrusão de material termoplástico por um bocal, representada na Figura 3. Neste processo, a matéria-prima, usualmente plástico na forma de filamento, é aquecida acima da temperatura de derretimento para polímeros semicristalinos ou acima da transição vítrea para amorfos (JIANG

et al., 2020) e então extrudada pelo bocal sobre uma plataforma ou outra camada da peça, solidificando-se rapidamente para manter a forma desejada.

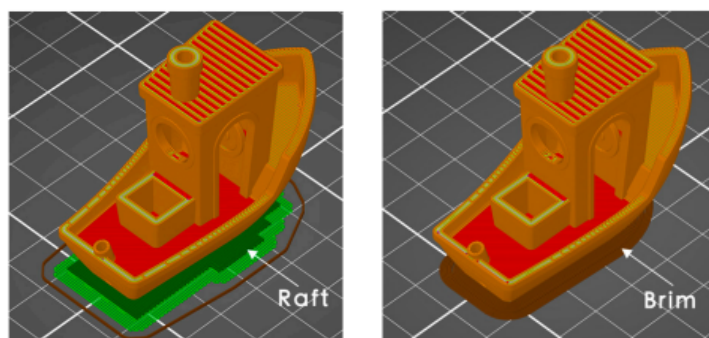
Figura 3 – Representação esquemática o funcionamento de uma impressora 3D de extrusão.



Fonte: Adaptado de Loh et al. (2020)

Contudo, nem sempre a geometria se mantém até o final da impressão. Devido ao gradiente de temperatura formado após a deposição de algumas camadas, o resfriamento das recém depositadas faz com que o material se contraia, criando tensões internas e consequentemente a tendência de uma camada se desgrudar da anterior ou da plataforma. Caso isso ocorra, pode causar *warping*, deformação local devido à contração do material.

Para evitar o desgrudamento da plataforma, caso mais comum, há a possibilidade da utilização de *raft* ou *brim*, estruturas que melhoram a adesão à mesa a custo de material e tempo de impressão, representadas na Figura 4. *Raft* é uma base formada por algumas poucas camadas sobre a qual a peça é impressa. Já *brim* é uma extensão do perfil da primeira camada da peça sobre a plataforma para aumentar a superfície de contato.

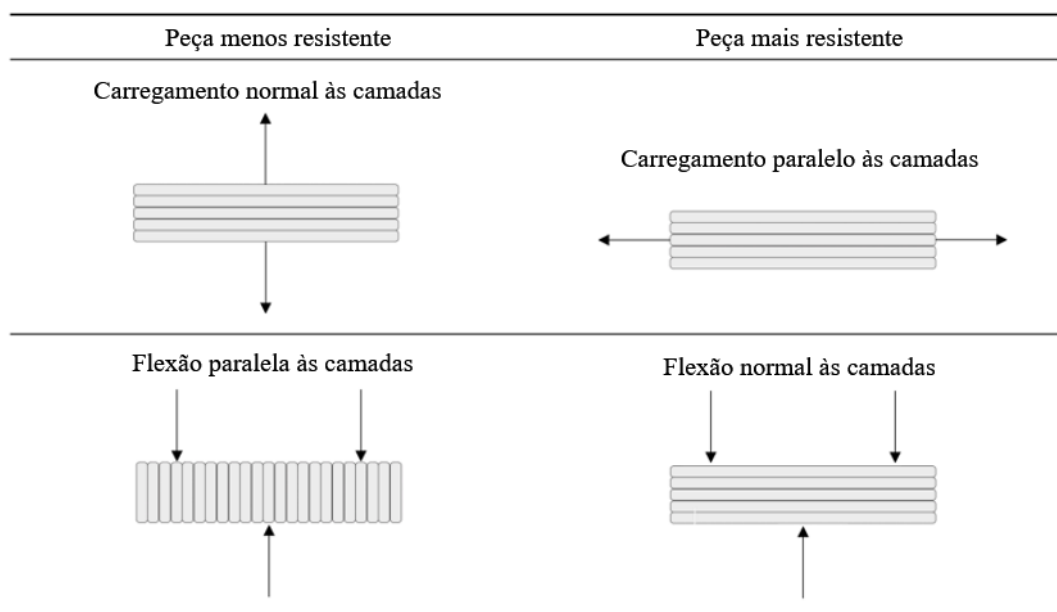
Figura 4 – Exemplos de *raft*, à direita, e *brim*, à esquerda.

Fonte: Adaptado de Loh et al. (2020)

A impressão por filamento também é limitada para características de tamanho reduzido. Devido ao bocal de extrusão utilizado, usualmente de 0,2 mm, fios de roscas para parafusos pequenos, como os utilizados neste trabalho, são extremamente difíceis de serem impressos com qualidade funcional, sendo preferível a utilização de insertos metálicos fêmea, porcas ou outros modos de fixação.

Devido ao próprio conceito desse tipo de manufatura, foi criada uma peça com propriedades ortotrópicas (Figura 5), com a direção normal à plataforma com resistência de 74% a 79% da tensão de escoamento para o caso do ABS (LOH et al., 2020). Portanto, para casos onde haja carga mecânica considerável, a orientação da impressão deve ser considerada.

Figura 5 – À esquerda, orientação das camadas menos resistente e à direita, mais resistente em relação ao tipo de carga aplicado.



Fonte: Adaptado de Loh et al. (2020)

## 2.3 Diagrama de Ishikawa

Para analisar o sistema de repasse provisório, que estava em utilização antes da implementação deste projeto na linha de produção, foi utilizada a metodologia aplicada por Liliana (2016) para avaliação de erros de medição de uma superfície rugosa, porém com adaptações devido à natureza da situação. Como fundamento para o seu modelo, Liliana (2016) utiliza os princípios de qualidade de Ishikawa e Loftus (1990), criador do Diagrama de Ishikawa ou Diagrama Espinha de Peixe (*fishbone diagram*), que considera sete principais classificações de causa de um problema previamente identificado, todas elas com a letra M (por isso pode ser conhecido como 4M, 5M, 6M ou 7M, a depender do domínio produtivo (LILIANA, 2016)). Para este, serão utilizados 5M, por já se tratar de um sistema de medição em si. São eles: *machines* (máquina), *methods* (método), *man* (mão de obra), *materials* (material), *mother nature - environment* (meio ambiente). As divisões também são feitas com base na causa direta da falha, de forma a simplificar a sistemática. A seguir, há a descrição classificações.

### 2.3.1 Máquina

A categoria Máquina engloba as falhas provenientes de todo e qualquer equipamento e ferramenta envolvido no processo, como tolerâncias, resolução, configuração e limites de medição inadequados, assim como erros de design e fabricação.

### 2.3.2 Método

Referente à forma de como a operação é realizada, como por exemplo procedimentos e regras, erros de posicionamento, método ou quantidade de medições e calibração inadequados ou insuficientes, entre outros.

### 2.3.3 Mão de obra

Esta causa se relaciona a toda e qualquer vulnerabilidade humana. Nervosismo ou cansaço do operador, falta de treinamento ou cuidado etc.

### 2.3.4 Material

Falhas relacionadas a propriedades e características de materiais e das partes envolvidas, como rugosidade, rigidez, coeficiente de atrito, e propriedades químicas inadequadas, entre outros.

### 2.3.5 Meio ambiente

Influências externas ao sistema, como temperatura, pressão, umidade, vibração, barulho, iluminação (LILIANA, 2016) e etc.

### 3 METODOLOGIA

Foram utilizadas metodologias de *problem solving* para guiar o desenvolvimento do projeto, que então foi manufaturado, implementado e posteriormente submetido a análises estatísticas de processo e meio de medição para validação.

O primeiro passo é a definição do problema.

#### 3.1 Contexto e definição do problema

No ambiente em questão era aplicada a metodologia de Lean Manufacture, ou Manufatura Enxuta, popularizada no final do século XX no Japão (BHAMU; SANGWAN, 2014), que tem como pilar a redução do desperdício. Este princípio, aliado com problemas no fornecimento de peças para o cliente cuja causa foi identificada nesta etapa da fabricação, fomentaram a necessidade de tornar o sistema de medição de repasse mais robusto e, como a melhoria da máquina onde o produto é montado requiriria um alto investimento, foi tomada a decisão de substituição da forma de identificação do problema.

Em uma linha de produção, tanto o custo de fabricação quanto a qualidade do produto são importantes. Contudo, frequentemente, a melhoria de uma delas tem como consequência a piora da outra, ou seja, são inversamente proporcionais, portanto, um equilíbrio entre as duas partes deve ser encontrado.

O produto a ser fabricado consiste na montagem de um terminal de cobre em uma base plástica, que é posteriormente dobrado duas vezes ao longo de sua extensão. A altura da ponta do terminal em relação a um referencial na base onde é inserido é crítica para o processo, pois realiza o contato elétrico entre esse conjunto e o elemento final de saída de corrente elétrica. Isso significa que caso esteja fora da tolerância especificada, o contato elétrico pode permanecer aberto e o produto não exercerá sua função. O efeito mola do material devido às duas dobras, potencializado pelo comprimento do terminal faz com que qualquer variação de ângulo e de altura de dobra durante o processo de fabricação cause grandes variações na altura final, o que torna esta uma etapa delicada e de difícil ajuste.

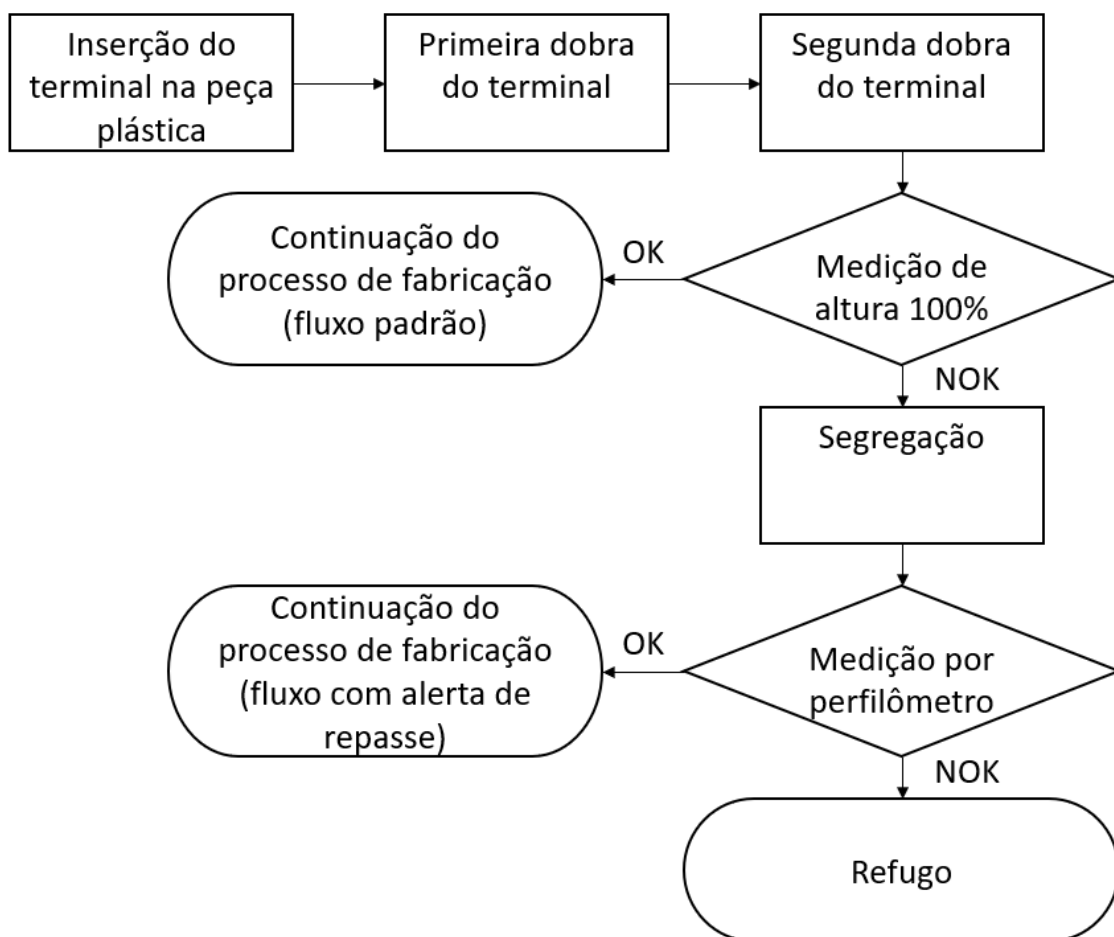
Na máquina onde o processo é realizado há a medição dessa característica de forma automática para 100% das peças produzidas com a utilização de uma câmera para tirar a foto do produto contra um *backlight*, de forma a criar contraste e, com a utilização de ferramentas do software, medir a altura desejada. Contudo, essa sistemática está sujeita a falhas devido a vibrações, assim como pequenas variações no posicionamento da peça e eventuais sujeiras na lente que tornam a imagem menos nítida, gerando falhas na identificação de referência das ferramentas do software da câmera, consequentemente a avaliação ótica da dimensão é impactada de forma negativa. Por esse motivo, está configurado um programa conservador para evitar problemas de qualidade, minimizando

a aprovação de peças com defeito para continuação no processo de fabricação (que não seriam testadas pelo sistema de repasse).

O resultado é então julgado se está dentro (“OK”) ou não (“NOK”) da tolerância especificada e a peça continua para o próximo processo ou é segregada, respectivamente. Na figura 6, um fluxograma do processo descrito pode ser visualizado.

As peças reprovadas e segregadas passam então por uma reavaliação (também chamado de repasse), pois por menor que seja a taxa de reprovadas, significa um prejuízo financeiro e ambiental significativos anualmente. Porém, estudos internos à empresa já constataram que grande parte das segregações são pseudofalhas e portanto, havia sido criado provisoriamente um sistema para medir novamente as peças em questão. Contudo, este apresentava grandes incertezas de medição e pouca robustez, gerando o risco de aprovação de uma peça NOK, problema que foi o foco deste estudo.

Figura 6 – Fluxograma das etapas de fabricação do produto.



Fonte: próprio autor

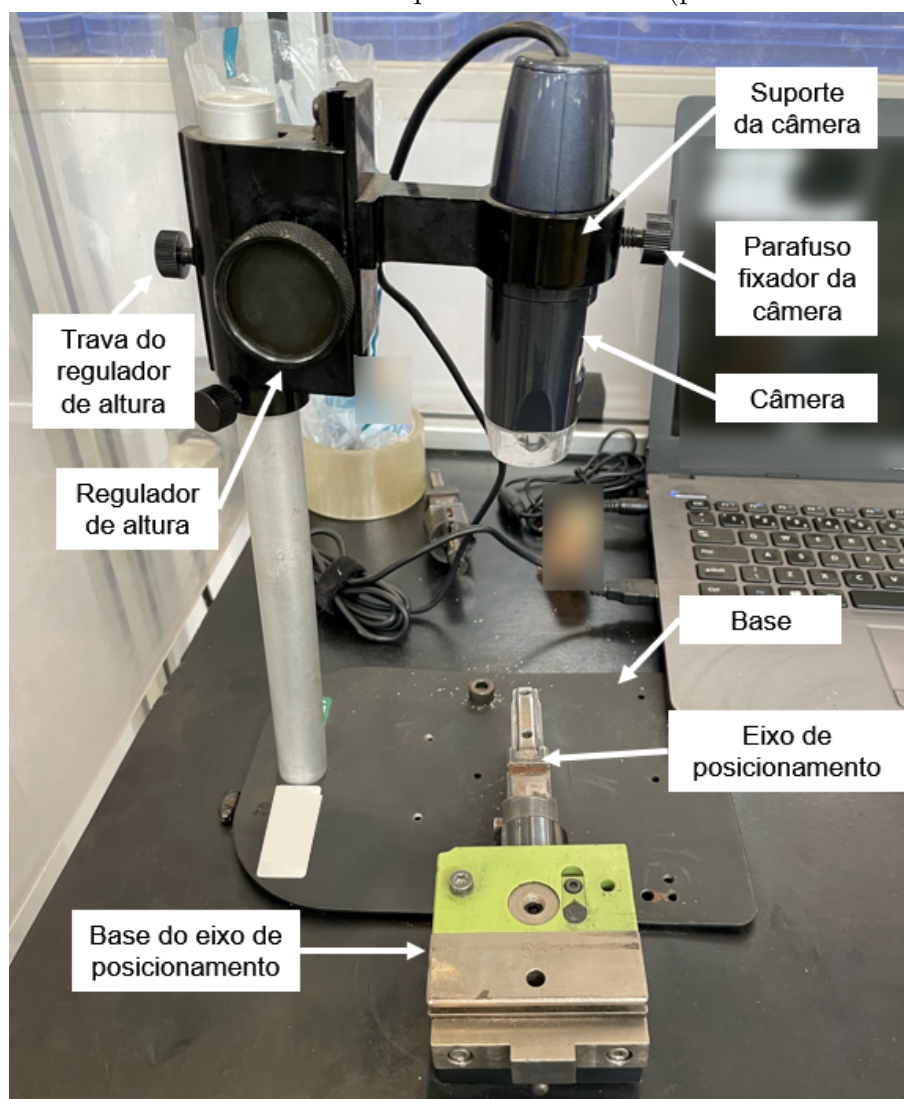
Naturalmente, seguindo a lógica de *problem solving*, uma análise do processo de fabricação, da medição automática por câmera da máquina, processo etc. deveria ser realizada. Contudo, o escopo deste projeto será unicamente a sistemática de repasse de

peças segregadas. Portanto, a seguir foi analisado esse sistema provisório de medição.

### 3.2 Análise do sistema de repasse provisório

O sistema provisório é composto por uma câmera fixada em uma barra de alumínio com regulador plástico de altura, uma base e um eixo de posicionamento para posicionamento da peça a ser medida. A câmera é posicionada no regulador e um parafuso é apertado para fixá-la no suporte. O regulador possui um sistema de sem fim-cremalheira para ajuste de altura da câmera e é anexado à barra metálica também com parafuso de aperto. A barra prende-se à base por um parafuso e são utilizados outros dois parafusos para fixação desse conjunto à bancada. O eixo é montado ao carrinho transportador por meio de parafuso com esfera (*ball plunger*) e o último é parafusado à mesa. As vistas frontal e lateral deste sistema estão contidas nas figuras 7 e 8, respectivamente.

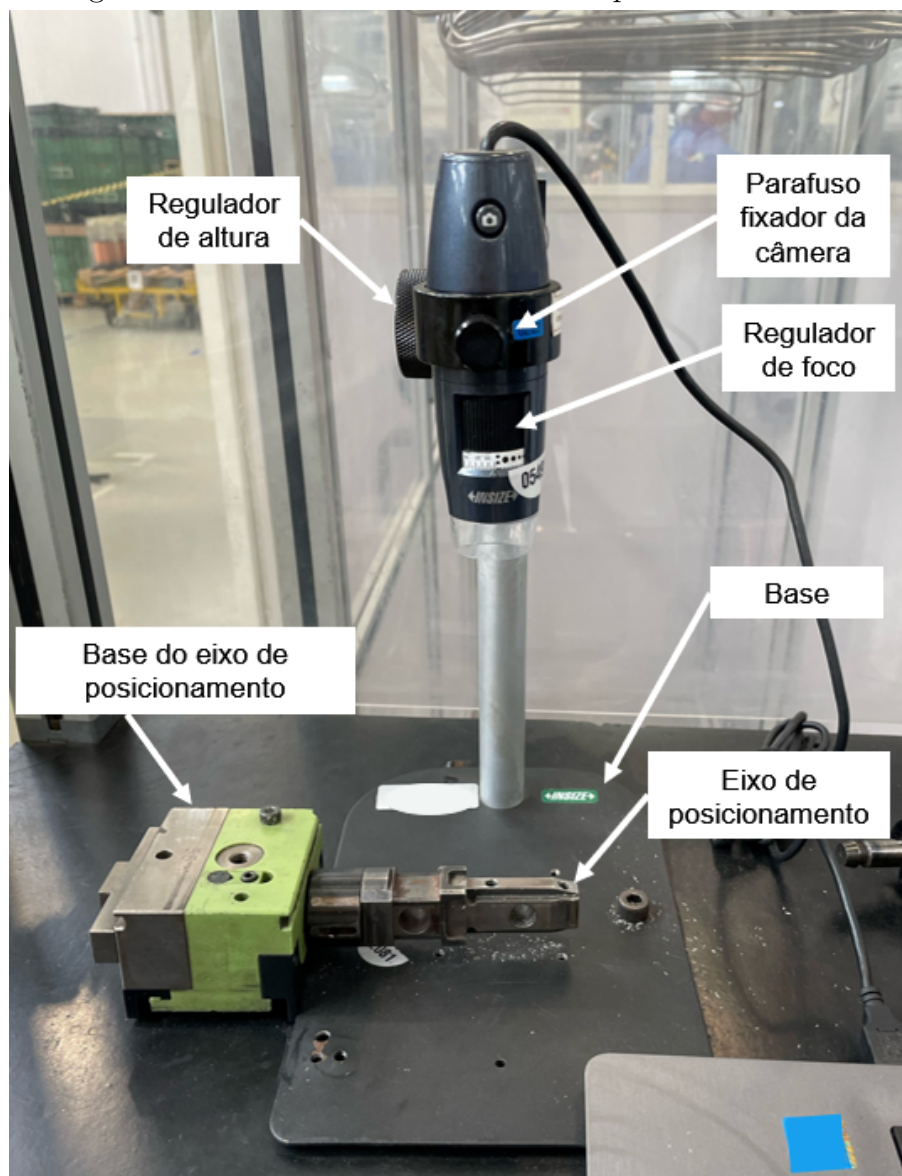
Figura 7 – Vista frontal do sistema de repasse com câmera (ponto de vista do operador).



Fonte: próprio autor



Figura 8 – Vista lateral do sistema de repasse com câmera.



Fonte: próprio autor

Contudo, este conjunto apresentava falhas de medição, cujas causas serão discutidas com base na elaboração do Diagrama de Ishikawa no capítulo seguinte. A consequência da aprovação de uma peça defeituosa para as próximas etapas da linha de produção é crítica, pois o valor agregado aumenta conforme o avanço no processo, resultando no desperdício dos componentes montados após a etapa de medição, onde o defeito deveria ser detectado. Por consequência, gera danos materiais, logísticos e ambientais, situação contrária à metodologia de Lean Manufacturing adotada.

Além disso, há uma maior chance de, estatisticamente, este produto não ter o seu problema detectado até o cliente final, o que se tornaria um grande empecilho para a empresa, devido aos danos financeiros e à imagem gerados.

Foi feita então a elaboração do Diagrama de Ishikawa para o sistema de medição de

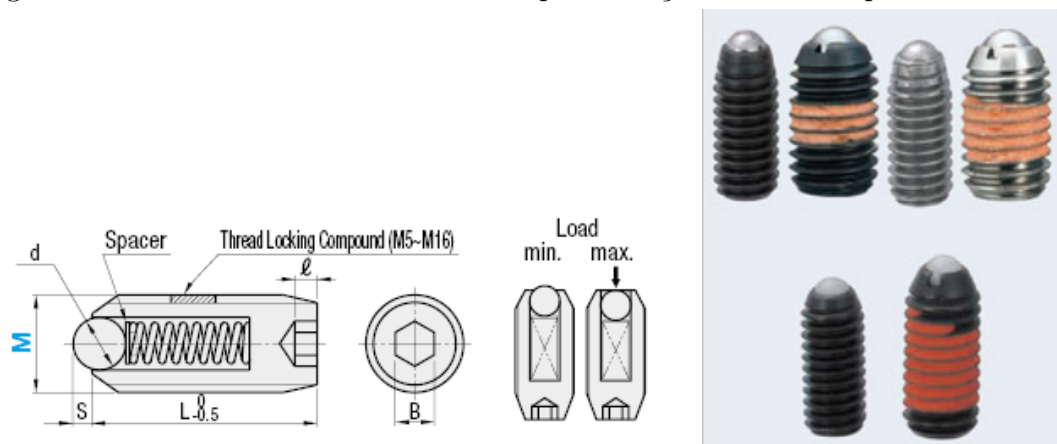


altura por câmera, onde foi notada a criticidade da categoria Método devido à quantidade de causas de falha. O desenvolvimento do novo projeto de medidor teve foco em sanar o maior número de vulnerabilidades possível, o que implicou na necessidade de mudança na forma como as medições eram realizadas.

### 3.2.1 Posicionamento do produto

Era utilizado um carro transportador (base do eixo) da linha de produção onde o produto era feito. Nele, um eixo metálico era anexado por meio de um parafuso com esfera metálica (Figura 9), M5 Misumi BPJF-5, localizado no centro da face superior, que travava o eixo na direção axial. Quanto à restrição de rotação do eixo de posicionamento, era feita com um pino que encaixava-se em um canal na base do eixo, esta parafusada à bancada.

Figura 9 – Parafuso com esfera utilizado para fixação do eixo de posicionamento.



Fonte: MISUMI... (2022)

O produto era introduzido axialmente no eixo, restrito de rotação devido ao perfil retangular e no sentido da inserção por mais dois parafusos com esferas M3. A geometria da peça impedia que fosse inserida girada tanto no sentido do eixo, quanto “ao contrário”, com uma das extremidades do produto com sentido invertido.

### 3.2.2 Ajustes e calibração

Por se tratar de uma câmera, era necessário ajustar seu foco. Para isso, havia um volante para acionamento de um conjunto sem fim-cremalheira que movimentava o suporte de câmera verticalmente, porém a própria câmera possuía um ajuste de foco manual, o que tornava o ajuste de altura redundante e origem de falhas, visto seu acionador demasiadamente exposto em relação ao operador, abrindo margem para colisões e conseqüentemente desregulagem, e folgas mecânicas.

A calibração, assim como o foco, era feita manualmente. Um par de peças padrão com altura do terminal conhecida e nos limites superior e inferior de tolerância eram

posicionadas, medidas, a relação *pixel*/distância ajustada e uma faixa visual de valores aceitáveis era criada, de forma que quando uma outra peça, com altura desconhecida, fosse inserida, seria possível a avaliação de conformidade pelo operador.

### 3.3 Projeto e manufatura

Para satisfazer a necessidade de um sistema mais robusto para a medição de altura do terminal, inicialmente foi avaliada a disponibilidade de recursos materiais e financeiros. Naturalmente, o sistema deveria satisfazer todas os quesitos de qualidade com o menor custo possível. Havia à disposição um perfilômetro a laser Keyence LJ-V7080 (Figura 10), juntamente com o seu controlador LJ-V7001P e fonte, já com os valores depreciados, ou seja, este conjunto já havia sido utilizado em uma outra linha de produção e seu custo já coberto pelo valor agregado (SOUZA; NETO, 2012). Em outras palavras, do ponto de vista da empresa, o investimento realizado já havia sido retornado, o que significa que todo e qualquer ganho gerado por este equipamento a partir deste momento seria lucro, sem necessidade de diluição do seu preço de compra no rendimento gerado. Além deste sensor, havia a disponibilidade de perfis de 60 mm de alumínio, parafusos e porcas, assim como as peças do antigo sistema com câmera e uma impressora 3D Dremel Digilab 3D45 (Figura 11, com filamento de ABS).

Figura 10 – Vista lateral do perfilômetro Keyence LJ-V7080 utilizado.



Fonte: próprio autor

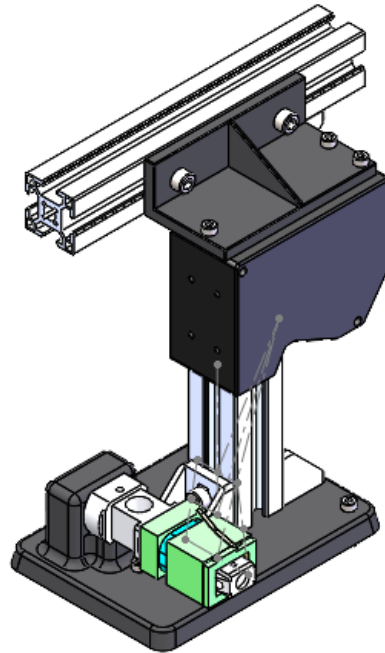
Figura 11 – Impressora 3D modelo Dremel Digilab 3D45.



Fonte: Bosch... (2021)

Após o levantamento dos materiais disponíveis, um modelo CAD (*Computer Aided Design*), mostrado na Figura 12, foi feito no software SolidWorks 2021 para dimensionamento dos perfis de alumínio com base no alcance ótimo do perfilômetro, 80 mm a partir da superfície de medição e faixa de medição de  $\pm 23$  mm, informação obtida pelo *datasheet* do sensor, Anexo A. A partir dessas restrições, os outros elementos foram desenvolvidos e selecionados para resolver as fontes de erros de medição identificados no Diagrama de Ishikawa citado anteriormente neste capítulo.

Figura 12 – Vista isométrica do modelo CAD criado.



Fonte: próprio autor

Com o modelo CAD pronto, foi criada a programação de impressão da base e do suporte do perfilômetro (ambas na cor preta da figura 12), onde foi utilizado o *slicer* Dremel Digilab 3D Slicer com as configurações do Anexo B. Posteriormente, ambas as partes foram impressas na impressora 3D Dremel Digilab 3D45.

### 3.4 Validação

Após a construção e instalação do novo método de medição, houve a fase de validação estatística. Foram feitos dois estudos de capacidade com auxílio do programa QS STAT e QDAS-solara.MP: de processo e meio de medição. Para o primeiro, uma peça referência foi medida pelo laboratório de metrologia da empresa e o valor obtido, tomado como “valor de referência” e a resolução do perfilômetro foi informada pelo fabricante. Então, a mesma peça medida 25 vezes com o mesmo procedimento (inserção, medição e remoção) no novo método. A altura foi anotada e foram calculados a média ( $\bar{x}_g$ ), o desvio padrão ( $s_g$ ), largura da faixa de tolerância ( $T$ ),  $C_g$  e  $C_{gk}$  a partir das equações a seguir.

$$\bar{x}_g = \frac{\sum_1^n x_i}{n} \quad (1)$$

$$s_g = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x}_g)^2}{n - 1}} \quad (2)$$

$$T = USL - LSL \quad (3)$$

$$C_g = \frac{0,2 * T}{6 * s_g} \quad (4)$$

$$C_{gk} = \frac{0,1 * T - |\bar{x}_g - x_m|}{3 * s_g} \quad (5)$$

Onde  $n$  é a quantidade de medições,  $x_i$  o valor medido,  $USL$  (*Upper Specification Limit*) a tolerância superior de especificação,  $LSL$  (*Lower Specification Limit*) a tolerância inferior de especificação e  $x_m$  o valor da referência.

Já para a validação estatística de meio de medição, também conhecida como estudo R&R, 25 amostras foram medidas 2 vezes cada. Como o procedimento de medição utilizado não é dependente do operador, pois este não afere diretamente a dimensão de interesse (como seria o caso da utilização de um paquímetro, por exemplo), apenas duas réplicas de um operador são o suficiente.

Foi utilizada a análise de variâncias (ANOVA), cuja ideia é a decomposição da variação total em componentes. Foram calculados a soma total do quadrados ( $TSS$ , *total sum of squares*); a média de todos os valores medidos ( $x_{\bullet\bullet\bullet}$ ); a soma dos quadrados ( $SS_X$ ); o grau de liberdade ( $DF_X$ ); a média dos quadrados ( $MS_X$ ); a variação devido ao operador ( $AV$ ), também conhecido como reprodutibilidade; a variação devido à interação amostra-operador ( $INT$ ); a variação do equipamento ( $EV$ ), chamada de repetibilidade; e a repetibilidade e reprodutibilidade de meio de medição em relação à faixa de tolerância ( $\%GRR$ ).

$$TSS = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^r \left( x_{ijm} - \frac{x_{\bullet\bullet\bullet}}{nkr} \right)^2 = SS_P + SS_A + SS_{AP} + SS_E \quad (6)$$

$$\frac{x_{\bullet\bullet\bullet}}{nkr} = \frac{1}{nkr} * \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^r x_{ijm} \quad (7)$$

$$x_{\bullet\bullet\bullet} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^r x_{ijm} \quad (8)$$

Onde o ponto no lugar do índice denota a somatória daquele índice (como pode ser visto na Eq. 8),  $n$  a quantidade de amostras,  $r$  a quantidade de medidas por operador por amostra,  $k$  a quantidade de operadores e ( $SS_X$ ) a soma dos quadrados (*sum of squares*) referente à amostra ( $SS_P$ ), operador ( $SS_A$ ), interações entre amostra e operador ( $SS_{AP}$ ) e medição de equipamento ( $SS_E$ ).

$$SS_P = \sum_{i=1}^n \frac{x_{i\bullet\bullet}^2}{kr} - \frac{x_{\bullet\bullet\bullet}^2}{nkr} \quad (9)$$

$$SS_A = \sum_{j=1}^k \frac{x_{\bullet j\bullet}^2}{kr} - \frac{x_{\bullet\bullet\bullet}^2}{nkr} \quad (10)$$

$$SS_{AP} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \frac{x_{ij\bullet}^2}{r} - \frac{x_{\bullet\bullet\bullet}^2}{nkr} - SS_P - SS_A \quad (11)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^r \frac{x_{ijm}^2}{r} - \frac{x_{\bullet\bullet\bullet}^2}{nkr} - SS_P - SS_A - SS_{AP} \quad (12)$$

As equações de grau de liberdade foram dadas por:

$$DF_P = n - 1 \quad (13)$$

$$DF_A = k - 1 \quad (14)$$

$$DF_{AP} = (n - 1) * (k - 1) \quad (15)$$

$$DF_E = nk * (r - 1) \quad (16)$$

$$DF_{TSS} = nkr - 1 \quad (17)$$

Onde os índices fazem referência aos mesmos componentes das somas dos quadrados,  $DF_{TSS}$  é a quantidade de graus de liberdade da variação total ( $TSS$ ). Com esses resultados, testes-F foram realizados para analisar a significância da quantidade de influência.

$$\overline{F}_P = \frac{MS_P}{MS_{AP}} \quad (18)$$

$$\overline{F}_A = \frac{MS_A}{MS_{AP}} \quad (19)$$

$$\overline{F}_{AP} = \frac{MS_{AP}}{MS_E} \quad (20)$$

Por fim, os estimadores de variância individual de operador ( $AV$ ), interação operador-amostra ( $INT$ ) e equipamento ( $EV$ ) foram calculados para a Repetibilidade & Reprodutibilidade de meio de medição ( $\%GRR$ ).

$$AV = \sqrt{\frac{MS_A - MS_{AP}}{nr}} \quad (21)$$

$$INT = \sqrt{\frac{MS_{AP} - MS_E}{r}} \quad (22)$$

$$EV = \sqrt{MS_E} \quad (23)$$

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2 + INT^2} \quad (24)$$

$$\%GRR = \frac{6 * GRR}{T} * 100\% \quad (25)$$

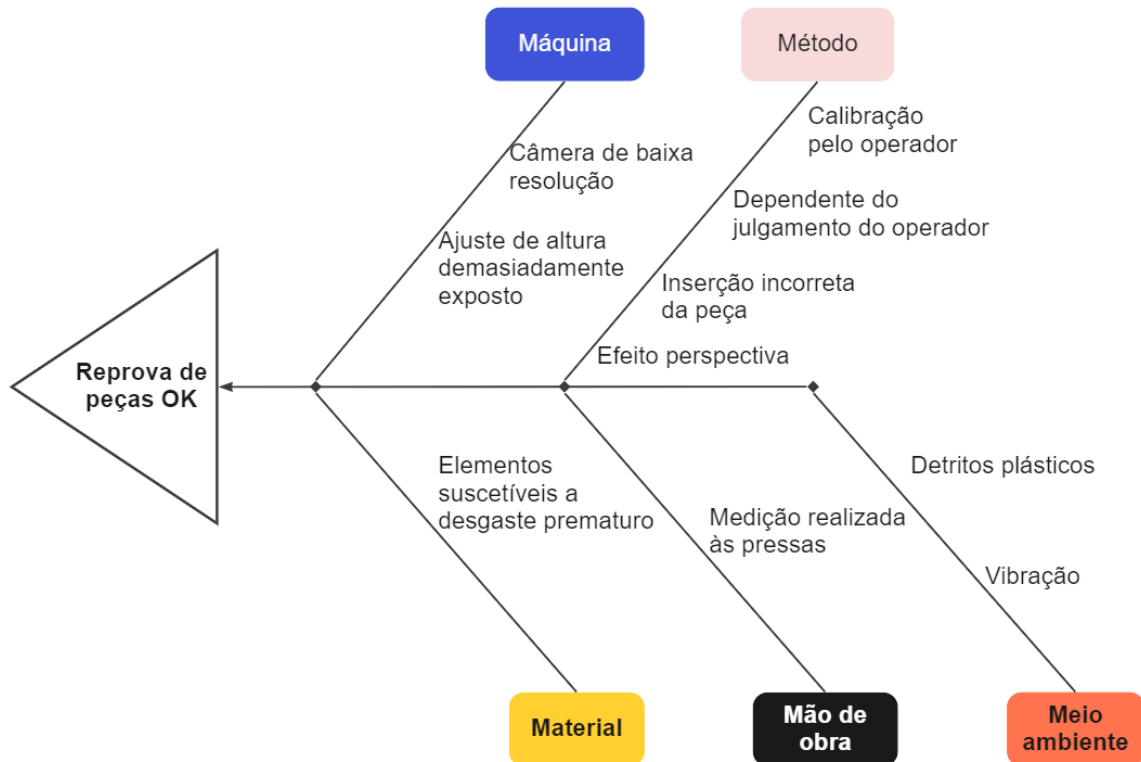
Para que um processo de medição seja válido estatisticamente pela metodologia *SixSigma*, os valores de  $C_g$  e  $C_{gk}$  devem ser maiores que 1,33, e de  $\%GRR$  menor que 10%.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Análise do sistema antigo

Primeiramente foi elaborado o Diagrama de Ishikawa (Figura 13) para o sistema de medição de altura por câmera, onde foi notada a criticidade da categoria Método devido à quantidade de causas de falha. O desenvolvimento do novo projeto de medidor teve foco em sanar o maior número de vulnerabilidades possível, o que implicou na necessidade de mudança na forma como as medições eram realizadas.

Figura 13 – Diagrama de Ishikawa aplicado para o sistema de medição com câmera.



Fonte: próprio autor

#### 4.1.1 Máquina

Para este sistema, foram identificados duas causas principais de erros: a baixa resolução da câmera e o ajuste de altura demasiadamente exposto. A primeira pode gerar dúvida no operador durante a calibração ou medição, possibilitando a aprovação de peças ruins que estejam nos limites da tolerância especificada de altura, o que poderia ser contornado ao reduzir o tamanho da faixa de tolerância, a custo de reprovação de unidades que estejam tecnicamente aptas. Já a segunda cria o cenário de uma colisão com o botão giratório de ajuste de altura da câmera, conseqüentemente a perda de foco e a necessidade



de uma nova calibração. Enquanto isso não é realizado, a verificação torna-se inválida, o que significa que no caso desse acidente acontecer sem que o responsável ou o operador perceba, a medição estará sendo feita incorretamente.

#### 4.1.2 Método

A calibração do software era feita pelo operador com auxílio de duas amostras limite, superior e inferior. Uma das amostras era posicionada no eixo de posicionamento e uma linha traçada digitalmente na vista da câmera, então o processo era repetido para o outro calibrador, de forma que ao final, gerava-se uma faixa de tamanhos aceitáveis. Esse método é bastante vulnerável pois os modelos já não possuíam os tamanhos exatos dos limites devido à dificuldade inerente ao processo de fabricação do produto, e a pequena espessura do terminal fazia com que qualquer colisão, queda ou manuseio incorreto causasse a alteração da medida, o que geraria a necessidade de troca e da amostra limite e sua medição pelo laboratório de metrologia, resultando em perda de tempo e geração de custo.

Por se tratar de uma análise visual do operador com auxílio de uma forma de gabarito (resultado da calibração do software), unidades perto dos limites aceitáveis eram fonte de dúvida de aprovação. Além disso, por não haver nenhum Poka-Yoke (dispositivo à prova de erros (SHINGO, 1988)) para impedir a inserção incompleta no eixo de posicionamento, leituras incorretas eram frequentes.

#### 4.1.3 Mão de obra

Neste caso, foi observado que não eram raros os casos nos quais o procedimento era realizado às pressas por ser executado nos finais de turno.

#### 4.1.4 Material

Devido aos elementos responsáveis pelo ajuste do sistema serem de plástico comum, estão suscetíveis a desgaste prematuro devido ao uso frequente, resultando em folgas e imprecisão na medição.

#### 4.1.5 Meio ambiente

Relacionado a qualquer fator externo ao sistema, a classificação de Meio Ambiente, quando aplicada neste contexto, inclui o desprendimento de particulado oriundo do posicionamento impreciso do carretel no eixo de posicionamento de medição. A raspagem da peça contra o parafuso com esfera que posiciona o conjunto acontece quando o ajuste do mesmo no eixo de posicionamento é inadequado, o que pode gerar cavacos plásticos que contaminam a lente da câmera e o próprio eixo de posicionamento, resultando em leituras e posicionamento incorretos, respectivamente.

Muito comum no ambiente industrial, a vibração também foi considerada. Com origem primária no manuseio de peças e de bandejas (onde o produto tanto antes quanto depois da medição são posicionados), o movimento da cabine onde o sistema todo é instalado é propagado para medição, resultando em mais fontes de erro e aumento do tempo de ciclo.

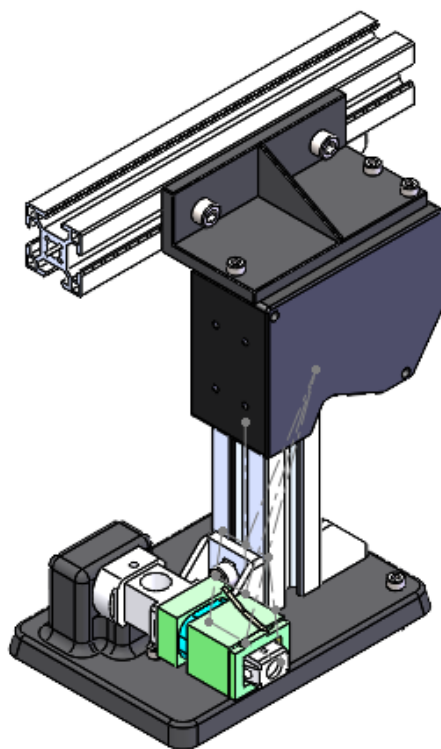
## 4.2 Design e manufatura do sistema de medição por perfilômetro

### 4.2.1 Modelo CAD

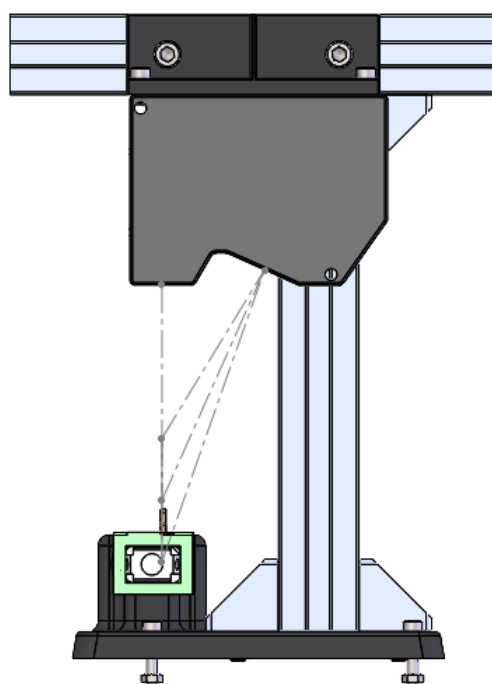
O modelo CAD pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – a), vista isométrica, b), vista direita e c) vista frontal do novo sistema de medição. As linhas cinzas pontilhadas representam a faixa de leitura do perfilômetro.

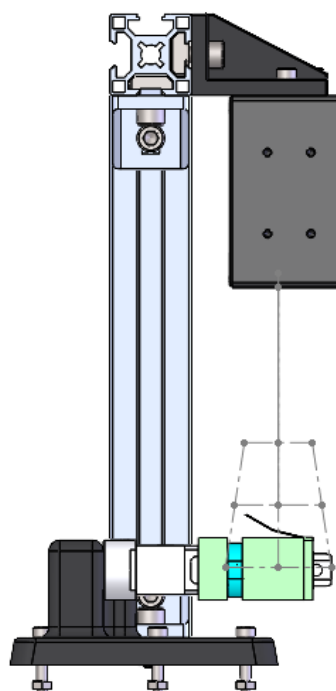
a) Vista isométrica



b) Vista direita



c) Vista frontal



Fonte: próprio autor

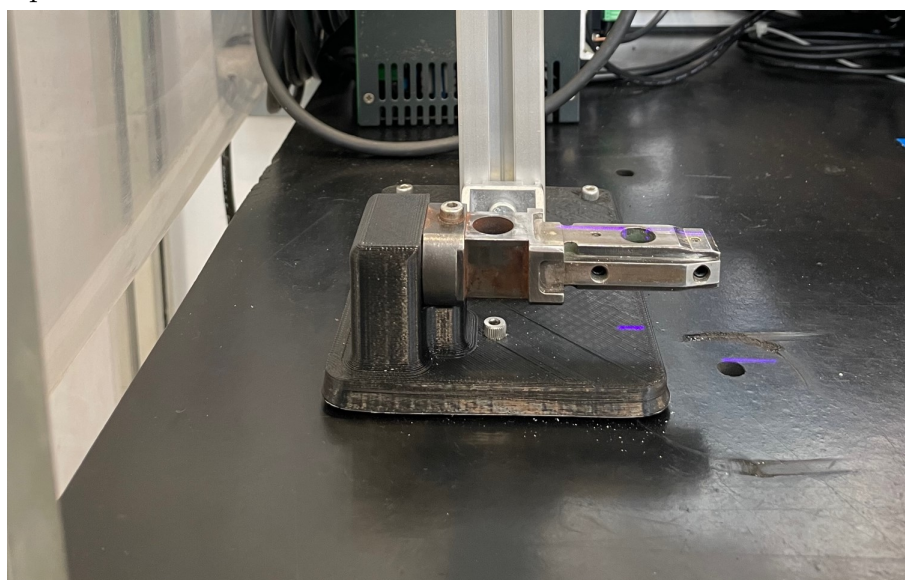
#### 4.2.2 Estutura

Para a estrutura, foi considerado a reutilização parcial do eixo de posicionamento onde o produto era inserido para medição devido à complexidade da superfície interna da peça, além disso, não foi identificada qualquer outra causa raiz de falha para esta forma de posicionamento, exceto a inserção incompleta, que será tratada na seção a seguir. Contudo, o conceito de fixação deste eixo foi alterado, para que origens de folgas mecânicas desnecessárias sejam eliminadas e o sistema de medição inteiro possa ser adaptado a outras bancadas.

Desta forma, a base e a base do eixo de posicionamento do sistema anterior foram substituídas por uma peça manufaturada por impressão 3D, em ABS, que também anexa o perfil conectado ao perfilômetro. Isso possibilita o conjunto inteiro ser removido e montado em outra bancada com facilidade, requerendo apenas seu parafusamento em 3 pontos.

O design da base impressa foi feito a partir dos desenhos técnicos fornecidos pelo fabricante do eixo de posicionamento. Foi notada a possibilidade de simplificação e enrobustecimento da fixação: como a antiga base do eixo de posicionamento (peça de cor esverdeada das Figs. 7 e 8) já seria substituída, o elemento conector do mesmo também poderia ser removida. Dessa forma, a fixação, mostrada na Figura 15 deixou de depender do conjunto de parafuso com esfera e rasgo para ser realizada diretamente por dois parafusos M3, reduzindo assim a necessidade de manutenção e aumentando a rigidez total do sistema.

Figura 15 – Novo design de fixação do eixo de posicionamento de posicionamento do produto.



Fonte: próprio autor

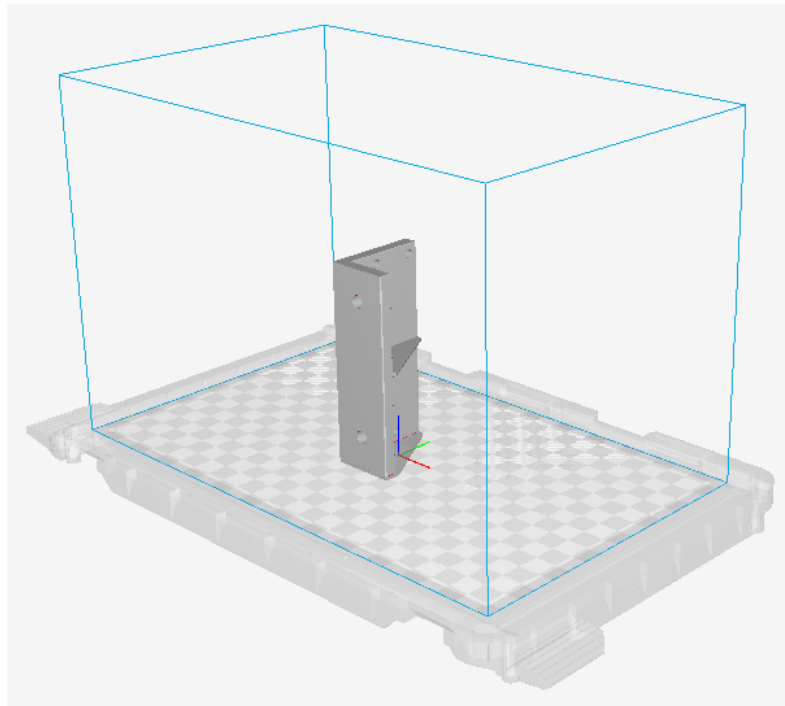
Vale ressaltar também que para a fabricação dessa peça, foram utilizadas técnicas para facilitar a impressão, como o arredondamento de cantos para evitar o fenômeno de *warping* e delaminação das camadas. Esse atributo também contribui no aspecto de

ergonomia e segurança, pois reduz as chances do operador se machucar durante o processo de inserção e retirada do produto a ser medido.

Para anexar o perfil, cantoneiras estruturais, parafusos e porcas foram utilizados. Contudo, como a criação de roscas em peças de impressão 3D são complexas e de baixa qualidade, foi optado pela utilização de rebaixos sextavados na superfície inferior onde possam ser inseridas porcas sem a possibilidade de rotação, tornando possível o parafusamento das cantoneiras do perfil à base.

Já para o sensor, foi desenvolvido também um componente para prendê-lo ao perfil de alumínio. Consiste basicamente em uma cantoneira com a furação específica do perfilômetro e uma nervura para aumento de rigidez. Este foi impresso com uma orientação incomum, representado na Figura 16, na mesa para que a nervura não sofresse tensão devido ao peso do sensor na direção de deposição das camadas, pois é sabidamente a menos resistente devido à característica ortotrópica da impressão 3D de deposição de filamento plástico.

Figura 16 – Orientação não convencional da impressão do suporte do perfilômetro.



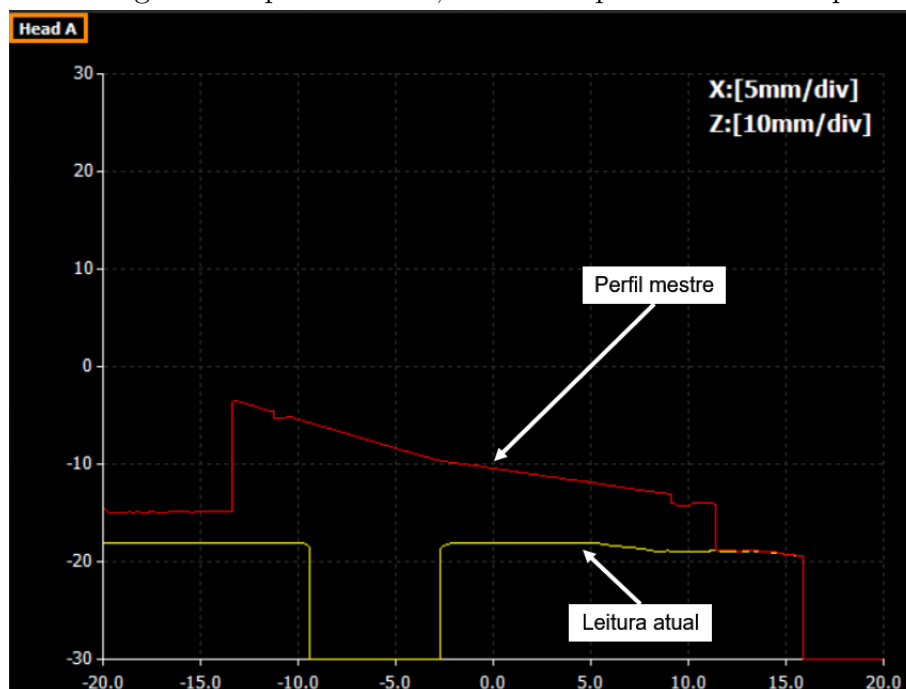
Fonte: próprio autor

Foi utilizado preenchimento *grid* para ambas as peças devido às suas propriedades superiores de resistência, assim como *raft* para auxiliar na fixação à plataforma e evitar *warping*. As demais configurações estão contidas no Anexo B.

### 4.3 Configuração do perfilômetro

Inicialmente foi determinado um perfil mestre (em vermelho) da peça a ser medida para que as configurações de medição e de correção sejam feitas (ou seja, é utilizado como referência para as ferramentas do software). A leitura em tempo real está representada na cor amarela, neste caso, como não há peça alguma inserida, o perfil medido na Figura 17 é do próprio eixo de posicionamento.

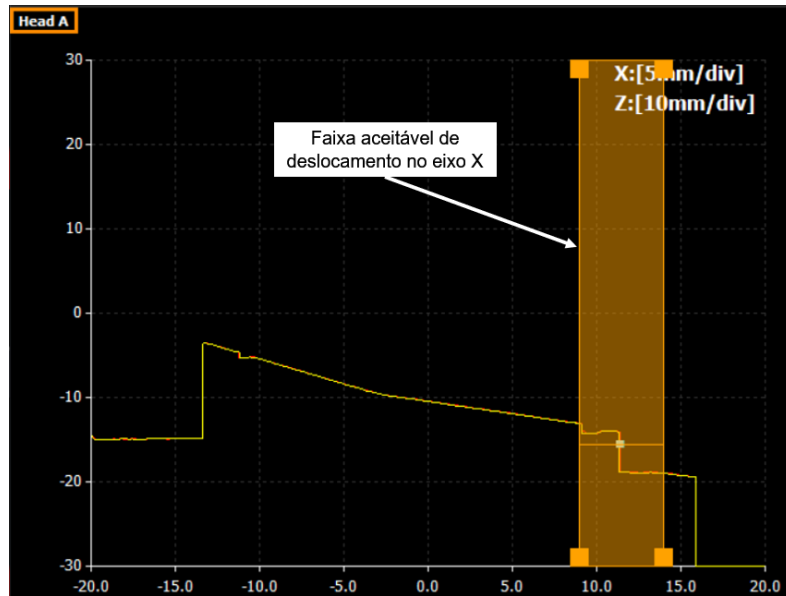
Figura 17 – Registro do perfil mestre, referência para software do perfilômetro.



Fonte: próprio autor

Como forma de mitigação de erros de posicionamento, foi utilizada uma ferramenta de correção de leitura no software do perfilômetro. Para solucionar o problema da inserção incompleta da peça no eixo de posicionamento, uma correção de deslocamento em X (direção horizontal) foi configurada. Isso significa que as ferramentas de medição de altura serão deslocadas na mesma distância que o comprimento entre as primeiras linhas verticais da referência e leitura atual no sentido negativo do eixo X, desde que estejam dentro da área alaranjada da Figura 18. Dessa forma, as regiões de medição de pico (em verde da Figura 19) e de média (em roxo na mesma figura), continuariam corretamente definidas mesmo em caso de inserção incompleta.

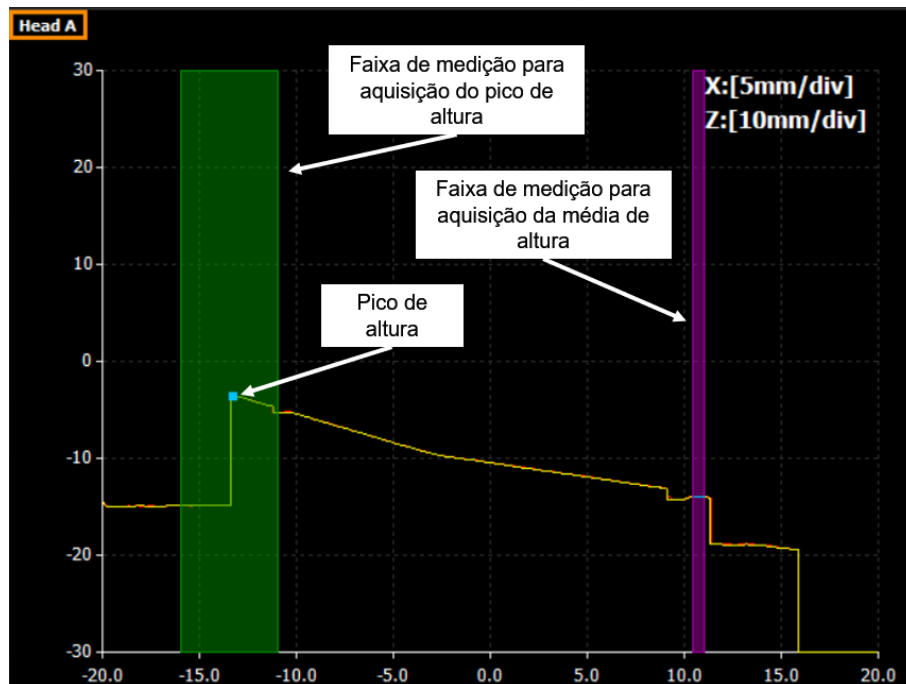
Figura 18 – Configuração de correção de deslocamento da leitura no eixo X.



Fonte: próprio autor

O perfilômetro foi configurado para realizar a diferença de altura entre a pico do terminal (ponto azul da região verde) e a média da referência (linha azul da região roxa), ilustrados na Figura 19.

Figura 19 – Configuração base de medição do perfilômetro.



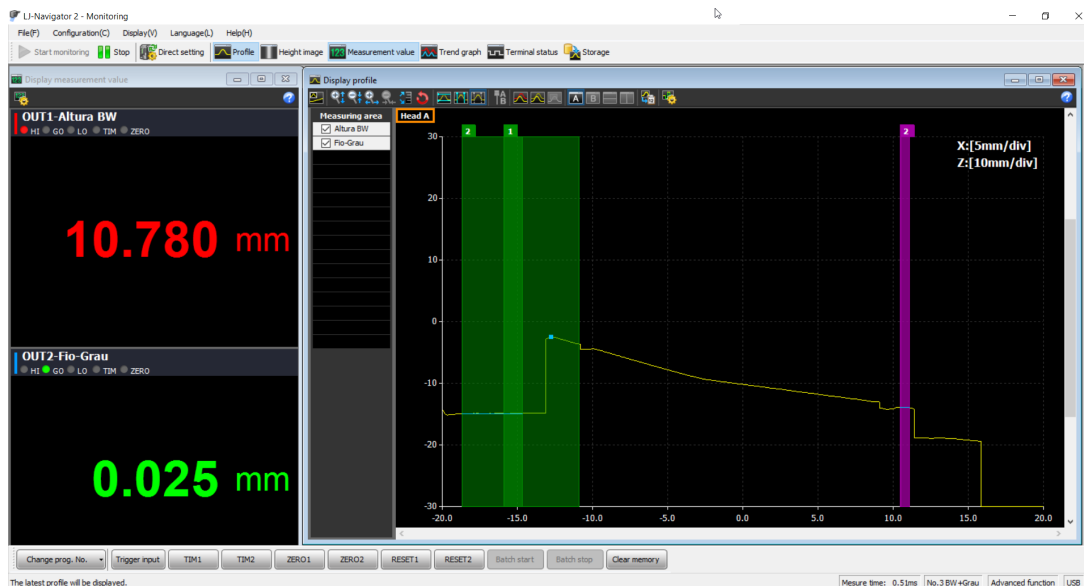
Fonte: próprio autor

Quando o valor da altura está fora da tolerância especificada, a medição mostrada na região superior esquerda torna-se vermelha (Figura 20 a)), mas caso esteja dentro, é

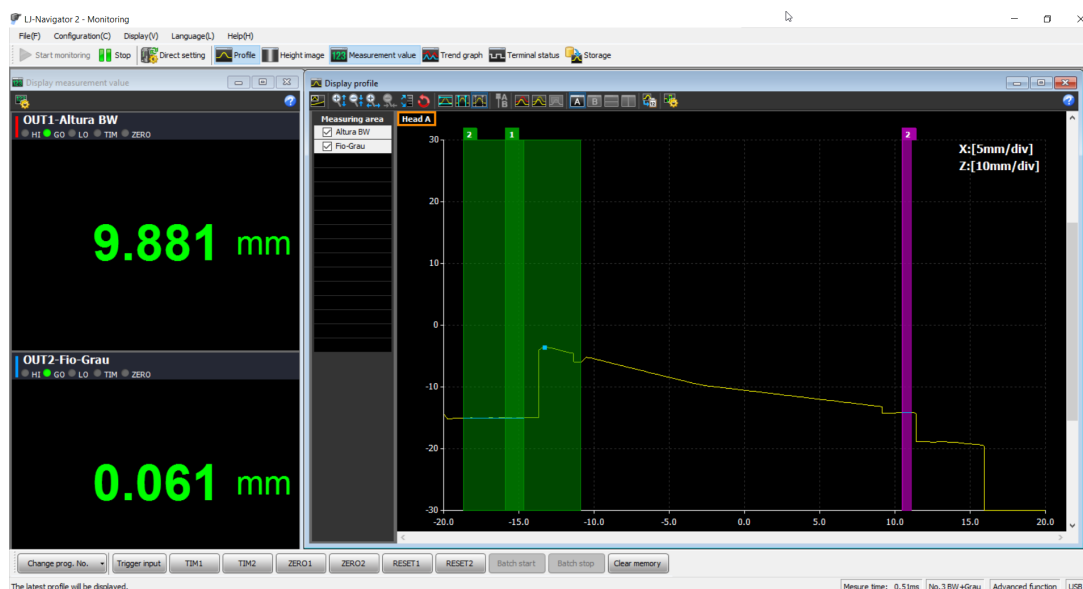
indicada na cor verde (Figura 20 b)).

Figura 20 – a), exemplo de medição de altura fora da tolerância (peça *NOK*) e b), dentro da tolerância (peça *OK*).

a)



b)



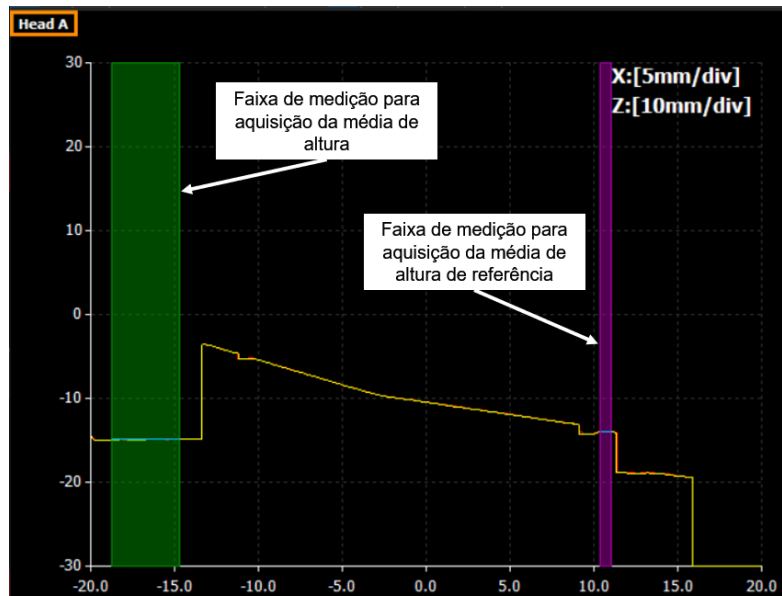
Fonte: próprio autor

Como segurança adicional, foi criado também um Poka-Yoke para evitar a utilização de *part numbers* (*PN*) (versões de produtos) incorretos nesta configuração. De forma similar à forma como a altura de pico do terminal é medida, a altura da região à esquerda do terminal também (Figura 21). A referência permanece a mesma (região de cor roxa) e



resultado (diferença das médias das regiões roxa e verde) pode ser visto na região inferior esquerda da Figura 22, onde o valor medido torna-se vermelho, caso seja o  $PN$  errado (Figura 22 a)) e verde, certo (Figura 22 b)). Vale ressaltar que na Figura 22, assim como na Figura 21 há a sobreposição de ambas as ferramentas de medição de altura (de pico e a verificação do  $PN$ ), por isso a sobreposição de regiões verdes).

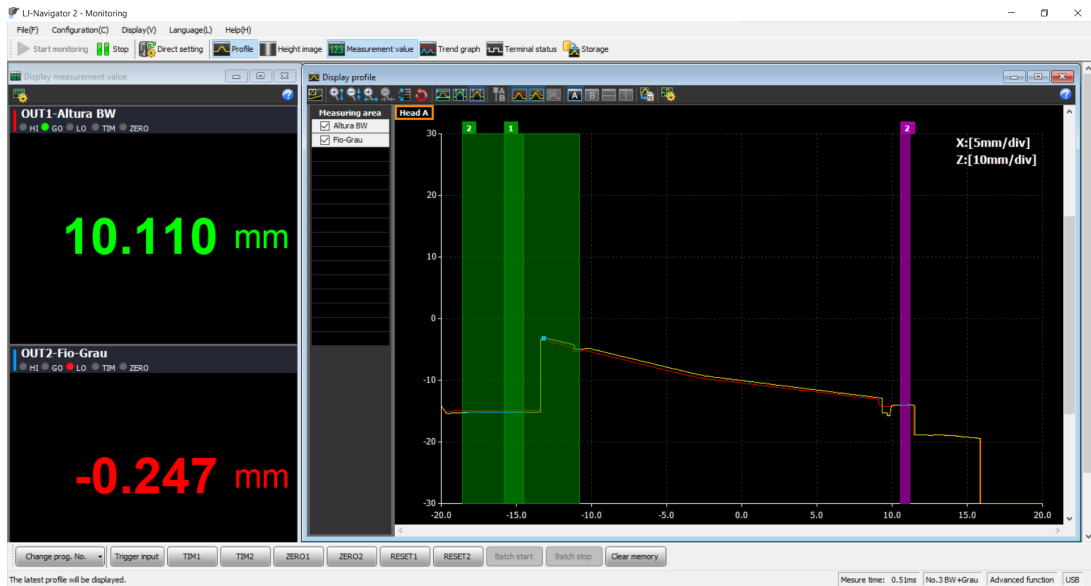
Figura 21 – Configuração de checagem de *part number*.



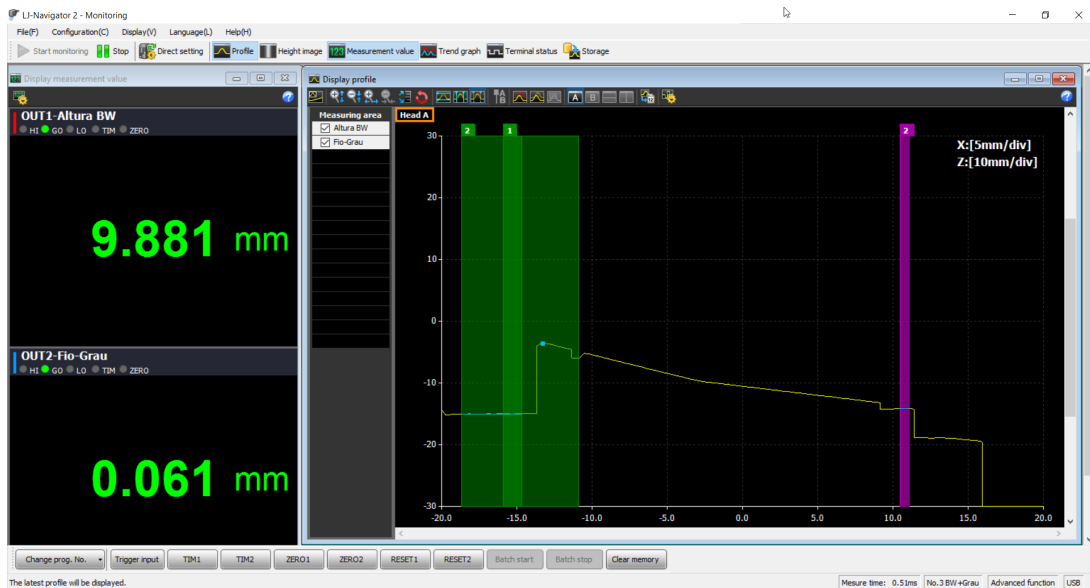
Fonte: próprio autor

Figura 22 – a), exemplo de medição de um *PN* incorreto e b), exemplo de um correto.

a)



b)



Fonte: próprio autor

Em suma, a peça só pode ser aprovada e ser considerada uma pseudofalha caso a medição de pico de altura e verificação de *PN* estejam indicadas na cor verde, como na Figura 22 b). Essa representação por cores tornou a inspeção pelo operador muito mais rápida e menos passível de falhas, quando comparada à avaliação da altura com a faixa de tolerância realizada no método antigo.

#### 4.4 Iteração

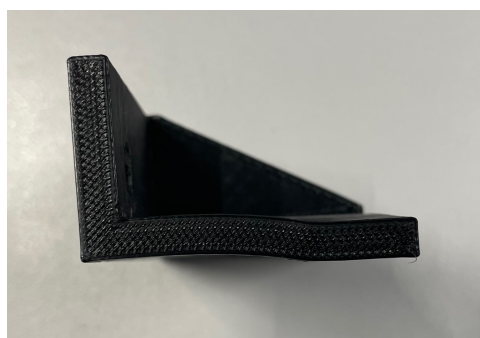
Após alguns dias da instalação do sistema, ainda na fase de estabilização, foi notada a deformação do suporte do perfilômetro, Figura 23, que trouxe riscos à acurácia das medições. Após uma breve análise, foi constatado que a temperatura durante o regime permanente do sensor era alta e, combinado com seu peso, causou a deformação no material plástico. A solução mais eficaz em consideração com tempo e resultado foi a troca do material e processo de fabricação do suporte, que tornou-se de Aço 1020 com tratamento superficial de óxido negro para evitar oxidação, mostrado na Figura 24. Devido às propriedades superiores do novo material e para facilitar a fabricação, a nervura foi removida.

Figura 23 – a), vista lateral e b), vista frontal do suporte do perfilômetro deformado.

a)



b)



Fonte: próprio autor

Figura 24 – Suporte do perfilômetro de aço 1020 com tratamento superficial.



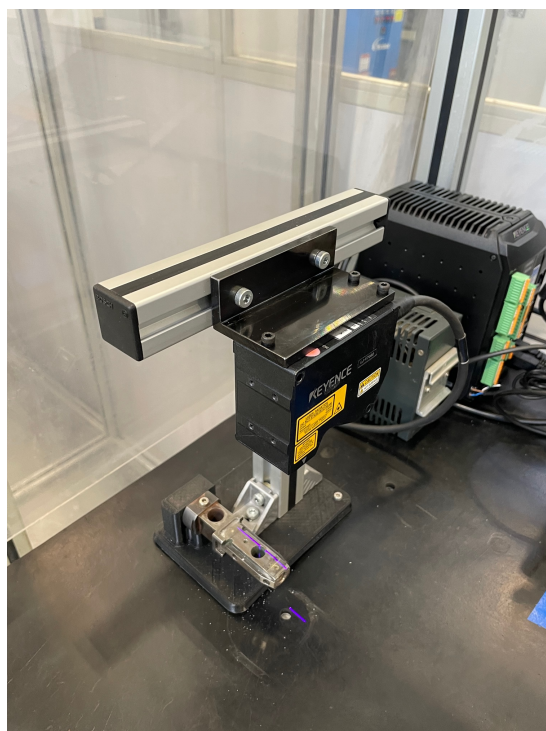
Fonte: próprio autor

#### 4.5 Sistema final

O resultado do design, manufatura e instalação do sistema pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 – a), vista isométrica, b), vista direita e c) vista frontal do sistema de medição final.

a)



b)



c)



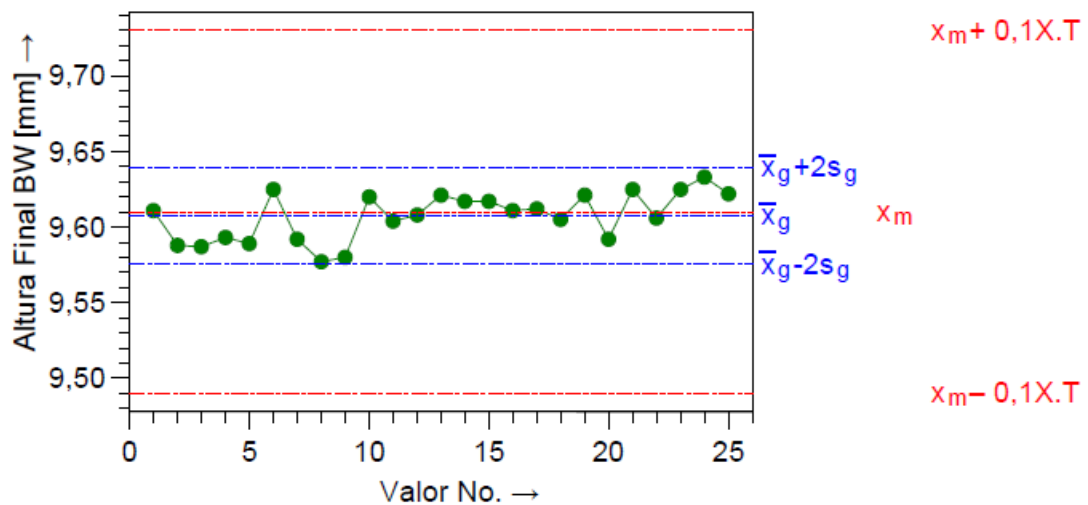
Fonte: próprio autor

### 4.6 Validação

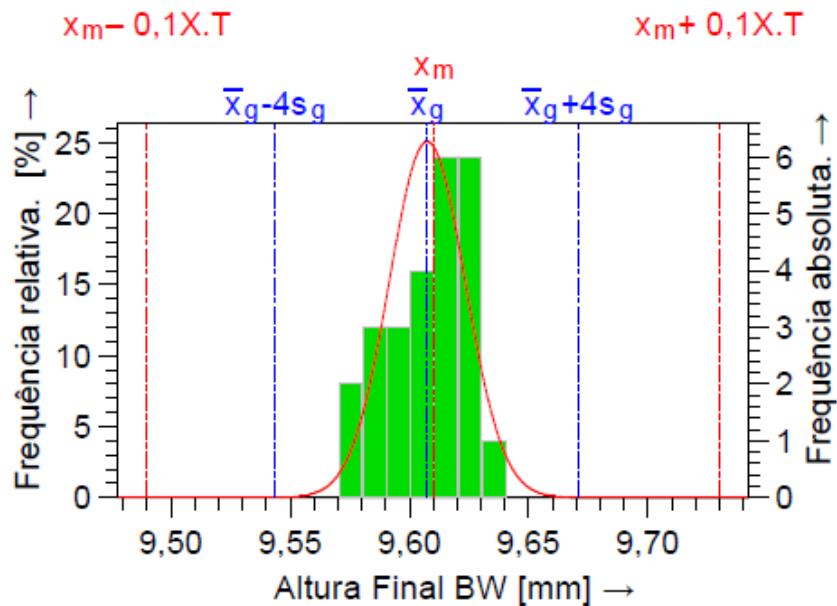
Após a substituição do suporte do perfilômetro, foi realizada a validação estatística do sistema. Para a análise de processo, um gráfico de dispersão (Figura 26 a)) e outro de frequência (Figura 26 b)) foram obtidos.

Figura 26 – a) gráfico de dispersão e b) de frequência da análise estatística do processo.

a)



b)



Fonte: próprio autor

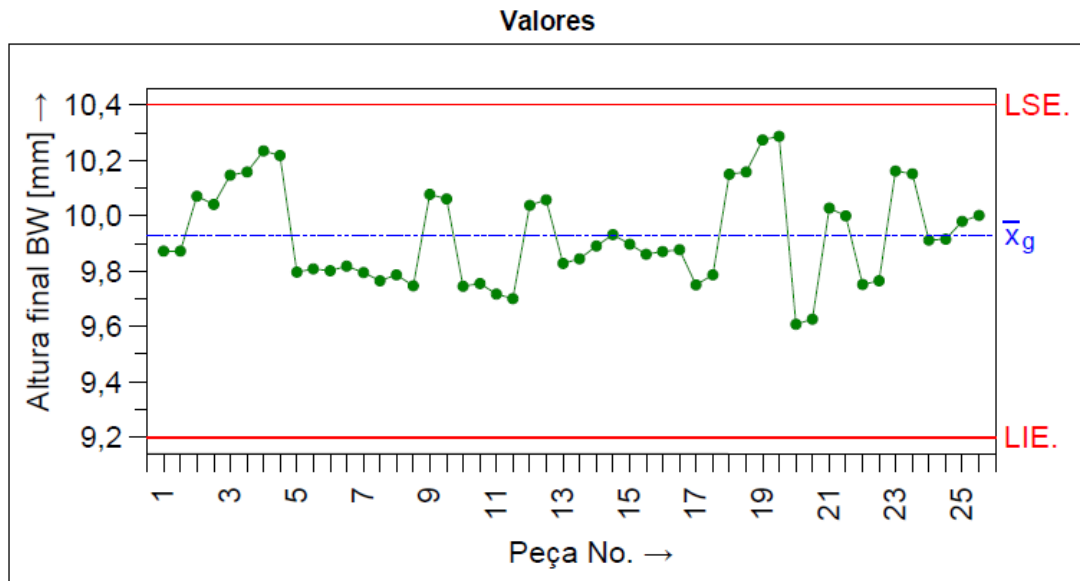
Os valores de  $C_g$  e  $C_{gk}$  foram, respectivamente, 2,52 e 2,46, ambos maiores que o

1,33 requerido para aprovação, o que valida o processo.

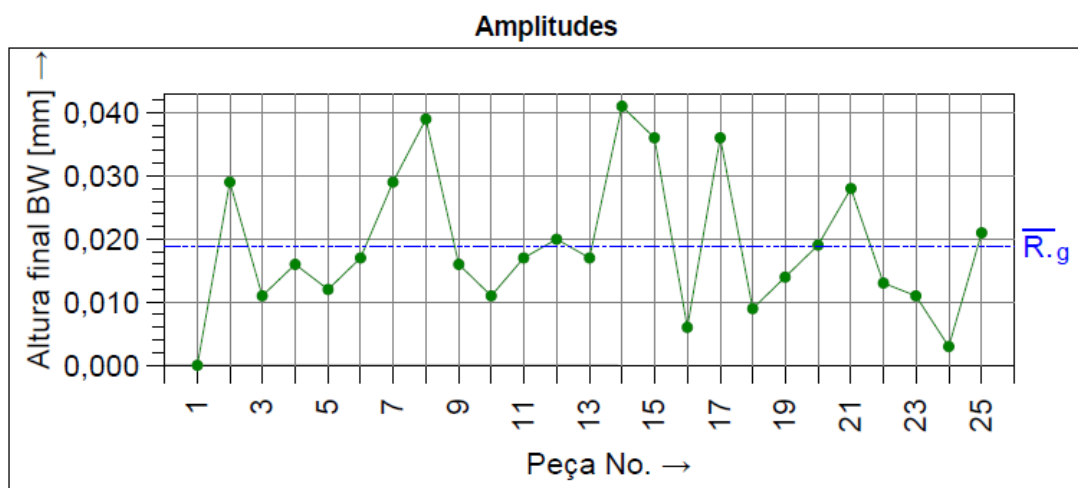
Para a avaliação de meio de medição, um gráfico de dispersão (Figura 27 a)) também foi feito, assim como um de amplitudes (Figura 27 b)).

Figura 27 – a) gráficos de dispersão e b) de amplitudes da análise estatística de meio de medição.

a)



b)



Fonte: próprio autor

Nas quais LSE (Limite Superior de Engenharia) e LIE (Limite Inferior de Engenharia) são respectivamente a tradução de USL (*Upper Specification Limit*) e LSL (*Lower Specification Limit*). O valor obtido de %GRR foi de 7,69%, o que é menor que os 10% máximo para aprovação, portanto o meio de medição também é considerado capaz.



## 5 CONCLUSÃO

Após o Diagrama de Ishikawa do sistema de repasse antigo ser feito e analisado, um novo sistema de medição foi desenvolvido com o intuito de aumentar a robustez do processo por meio da solução das vulnerabilidades identificadas no Diagrama. Para isso, o método foi completamente modificado, pois era a categoria com maior quantidade e gravidade de causas de aprovação de peças *NOK*. Foi utilizado um novo sensor, um perfilômetro a laser, para a realização das medidas de forma mais precisa e sem a influência do operador e o restante do conjunto foi criado em torno das características desse equipamento. Foi feito um modelo CAD do projeto com design de peças para serem fabricadas por manufatura aditiva por extrusão de material termoplástico (ABS) por ser um processo de baixo custo, altíssima flexibilidade e requerer pouco tempo para ser realizado. Foram criados Poka-Yokes na configuração do software do sensor, com o intuito de superar erros de posicionamento do produto e evitar que algum *PN* seja indevidamente medido, além de tornar a interface muito mais simples para o operador, reduzindo drasticamente a chance de erro humano e o tempo de ciclo. Após a manufatura, durante a fase de testes, foi necessária a substituição de uma das peças impressas em 3D, o suporte do perfilômetro, por uma metálica, devido à deformações causadas por esforço e alta temperatura. Por fim, as validações estatísticas de processo e meio de medição foram feitas e os resultados obtidos foram melhores que o esperado.

A nova sistemática eliminou as causas de falha identificadas no sistema anterior devido a desgaste prematuro de componentes, ajuste de altura demasiadamente exposto e baixa resolução de câmera, além de reduzir o efeito da vibração na medição, torná-la independente do julgamento do operador, corrigir a inserção incorreta da peça e eliminar completamente o efeito perspectiva.

Como resultado, foram obtidos valores de  $C_g$ ,  $C_{gk}$  e  $\%GRR$  respectivamente iguais a 2,52, 2,46 e 7,69%, que comprovam a capacidade do processo e do meio de medição.

Como sugestão para próximos trabalhos, considerar o fator térmico quando houver interface de materiais termoplásticos com eletrônicos, assim como os esforços envolvidos no processo para evitar retrabalho. Outros tipos de sensores devem também ser levados em consideração, como medidores a laser pontuais e até por contato, caso a peça medida não seja tão sensível quanto a deste trabalho, pois são mais acessíveis e simples para configuração e manutenção.



## REFERÊNCIAS

- ABU-NABAH, B. A.; ELSOUSSI, A. O.; ALAMI, A. E. K. A. Simple laser vision sensor calibration for surface profiling applications. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 84, p. 51–61, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- BHAMU, J.; SANGWAN, K. S. Lean manufacturing: literature review and research issues. **International Journal of Operations & Production Management**, Emerald Group Publishing Limited, 2014. Citado na página 21.
- BOSCH Power Tools B.V. 2021. Citado na página 27.
- DAVIS, T. A.; SHIN, Y. C. Vision-based clad height measurement. **Machine Vision and Applications**, Springer, v. 22, n. 1, p. 129–136, 2011. Citado na página 17.
- HUANG, W.; KOVACEVIC, R. A laser-based vision system for weld quality inspection. **Sensors**, Molecular Diversity Preservation International (MDPI), v. 11, n. 1, p. 506–521, 2011. Citado na página 17.
- ISHIKAWA, K.; LOFTUS, J. H. **Introduction to quality control**. [S.l.]: Springer, 1990. v. 98. Citado na página 20.
- JIANG, Z. et al. Extrusion 3d printing of polymeric materials with advanced properties. **Advanced Science**, Wiley Online Library, v. 7, n. 17, p. 2001379, 2020. Citado na página 18.
- KEYENCE CORPORATION OF AMERICA. 2022. Citado na página 16.
- LEE, B.-R.; NGUYEN, H.-C. Development of laser-vision system for three-dimensional circle detection and radius measurement. **Optik**, Elsevier, v. 126, n. 24, p. 5412–5419, 2015. Citado na página 17.
- LILIANA, L. A new model of ishikawa diagram for quality assessment. v. 161, n. 1, p. 012099, 2016. Citado na página 20.
- LOH, G. H. et al. An overview of material extrusion troubleshooting. **Applied Sciences**, MDPI, v. 10, n. 14, p. 4776, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- MISUMI CORPORATION. 2022. Citado na página 25.
- SHINGO, S. **Non-stock production: the Shingo system of continuous improvement**. [S.l.]: CRC Press, 1988. Citado na página 33.
- SILVA, P. C. et al. Manufatura aditiva: Revisão sistemática da literatura. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 84502–84515, 2020. Citado na página 17.
- SOUZA, J. S. d.; NETO, F. J. K. O impacto da incorporação da inflação na análise de projetos de investimentos. **Production**, SciELO Brasil, v. 22, p. 709–717, 2012. Citado na página 26.

Anexos

**ANEXO A – LJ-V7080 Datasheet**

## Data Sheet



## LJ-V7080

Sensor Head



## Specifications

Model		LJ-V7080	
Mounting conditions		Diffuse reflection	
Reference distance		80 mm 3.15"	
Measurement range	Z-axis (height)	±23 mm 0.91" (F.S.=46 mm 1.81")	
	X-axis (width)	NEAR side	
		Reference distance	25 mm 0.98" 32 mm 1.26"
		Far side	39 mm 1.54"
Light source	Type	Blue semiconductor laser	
	Wavelength	405 nm (visible beam)	
	Laser class	Class 2 Laser Product (IEC60825-1, FDA(CDRH) Part 1040.10 <sup>11</sup> )	
	Output	4.8 mW	
Spot size (reference distance)		Approx. 48 mm × 48 μm 1.89" × 0.001890"	
Repeatability	Z-axis (height)	0.5 μm 0.000020 <sup>**2,3</sup>	
	X-axis (width)	10 μm 0.000394 <sup>**2,4</sup>	
Linearity	Z-axis (height)	±0.1% of F.S. <sup>5</sup>	
Profile data interval	X-axis (width)	50 μm 0.002"	
Sampling cycle (trigger interval)		Top speed: 16 μs (high-speed mode), Top speed: 32 μs (advanced function mode) <sup>6</sup>	
Temperature characteristics		0.01% of F.S./°C	
Environmental resistance	Enclosure rating	IP67 (IEC60529) <sup>7</sup>	
	Ambient light	Incandescent lamp: 10,000 lux max. <sup>8</sup>	
	Ambient temperature	0 to +45 °C 32 to 113 °F <sup>9</sup>	
	Relative humidity	20 to 85 % RH (No condensation)	
	Vibration resistance	10 to 57 Hz, Double amplitude 1.5 mm 0.06", 3 hours in each of the X, Y, and Z directions	
	Shock resistance	15 G/6 ms	
Material		Aluminum	
Weight		Approx. 400 g	

<sup>\*1</sup> The laser classification for FDA(CDRH) is implemented based on IEC60825-1 in accordance with the requirements of Laser Notice No. 50.

<sup>\*2</sup> This value is from a case in which measurement has been performed with a reference distance with 4,096 times of averaging.

<sup>\*3</sup> The measurement targets are KEYENCE standard targets. This value is from a case in which the average height of the default setting area has been measured in height mode. All other settings are default.

<sup>\*4</sup> The measurement target is a pin gauge. This value is from a case in which the position of the intersection between the rounded surface of the pin gauge and the edge level has been measured in position mode. All other settings are default.

<sup>\*5</sup> The measurement targets are KEYENCE standard targets. The profile data is from a case in which measurement has been performed with 64 times of smoothing and 8 times of averaging. All other settings are default.

Data Sheet

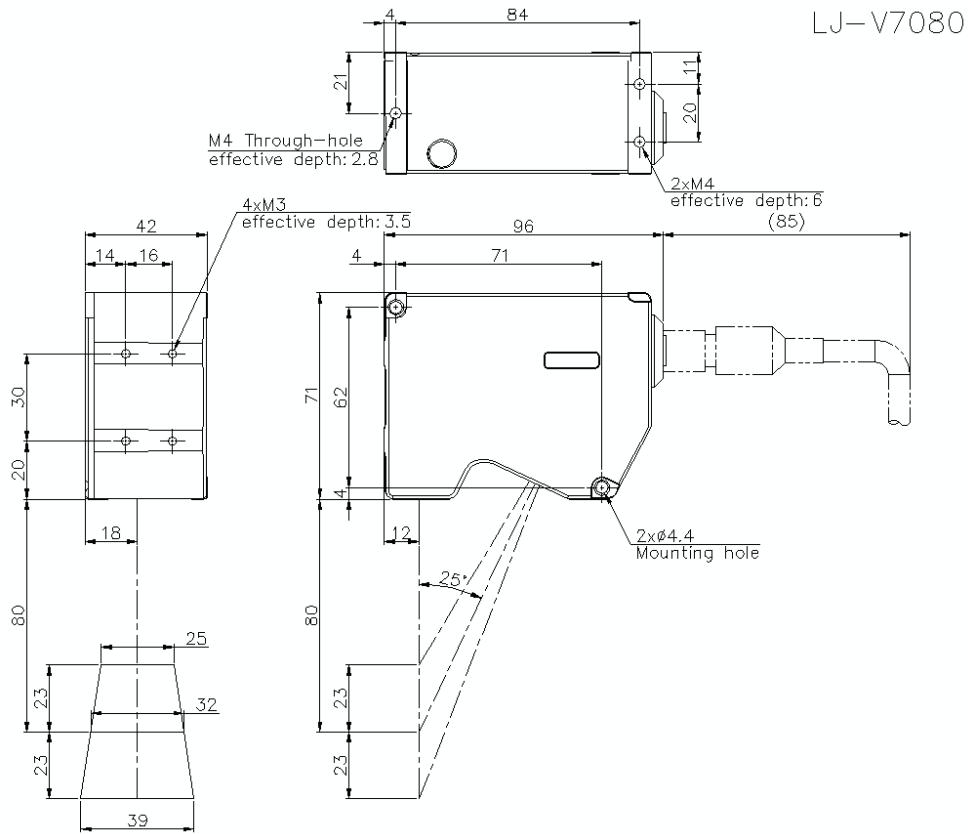


\*6 For high-speed mode, when the measurement area is at its minimum, binning is ON, image capture mode is set to standard, and parallel image capture is ON.  
 All other settings are default. For advanced function mode, when the measurement area is at its minimum, binning is ON and image capture mode is set to standard. All other settings are default.  
 \*7 This value is from a case in which the sensor head cable (CB-B\*) or extension cable (CB-B\*E) has been connected.  
 \*8 This is the illuminance for the light-receiving surface of the sensor head during white paper measurement when light has been shined onto the white paper.  
 \*9 The sensor head must be mounted on a metal plate for use.

Dimensions










\* Download CAD file or product manual for larger image/text and more detail.

lj-v7080\_dimension\_01.gif




## **ANEXO B – Configurações do Dremel DigiLab 3D Slicer**

Quality		<
Layer Height	0.3	mm
Initial Layer Height	0.3	mm
Line Width	0.4	mm
Wall Line Width	0.4	mm
Outer Wall Line Width	0.4	mm
Inner Wall(s) Line Width	0.4	mm
Top/Bottom Line Width	0.4	mm
Infill Line Width	0.4	mm
Support Line Width	0.4	mm
Support Interface Line Width	0.4	mm
Support Roof Line Width	0.4	mm
Support Floor Line Width	0.4	mm
Shell		∨
Wall Thickness	0.8	mm
Wall Line Count	2	
Outer Wall Wipe Distance	0.2	mm
Top/Bottom Thickness	0.8	mm
Top Thickness	0.8	mm
Top Layers	<i>i</i> 3	
Bottom Thickness	0.8	mm
Bottom Layers	<i>i</i> 3	
Top/Bottom Pattern	Lines	∨
Bottom Pattern Initial Layer	Lines	∨
Top/Bottom Line Directions	[ ]	
Outer Wall Inset	0	mm
Outer Before Inner Walls	<input type="checkbox"/>	
Alternate Extra Wall	<input type="checkbox"/>	
Compensate Wall Overlaps	<input checked="" type="checkbox"/>	
Compensate Outer Wall Overlaps	<input checked="" type="checkbox"/>	
Compensate Inner Wall Overlaps	<input checked="" type="checkbox"/>	
Fill Gaps Between Walls	Everywhere	∨
Horizontal Expansion	0	mm
Initial Layer Horizontal Expansion	0	mm
Z Seam Alignment	Shortest	∨
Ignore Small Z Gaps	<input checked="" type="checkbox"/>	

 <b>Infill</b>			
<i>Infill Density</i>		30	%
Infill Line Distance		2.6667	mm
<i>Infill Pattern</i>	 <i>i</i>	Grid	
Infill Line Directions		[ ]	
Infill Overlap Percentage	<i>i</i>	12	%
Infill Overlap		0.048	mm
Skin Overlap Percentage	<i>i</i>	10	%
Skin Overlap		0.04	mm
Infill Wipe Distance		0.1	mm
Infill Layer Thickness		0.3	mm
<i>Gradual Infill Steps</i>		0.0	
Infill Before Walls		<input type="checkbox"/>	
Minimum Infill Area		0	mm <sup>2</sup>
Expand Skins Into Infill		<input type="checkbox"/>	
Expand Top Skins Into Infill		<input type="checkbox"/>	
Expand Bottom Skins Into Infill		<input type="checkbox"/>	
 <b>Material</b>			
Default Printing Temperature		220	°C
Printing Temperature		220	°C
<i>Printing Temperature Initial Layer</i>	 <i>i</i>	230	°C
Initial Printing Temperature		210	°C
Final Printing Temperature		205	°C
<i>Build Plate Temperature</i>		75	°C
<i>Build Plate Temperature Initial Layer</i>	 <i>i</i>	80	°C
Diameter		1.75	mm
Flow		100	%
Enable Retraction		<input checked="" type="checkbox"/>	
Retract at Layer Change		<input type="checkbox"/>	
Retraction Distance		2	mm



Retraction Speed		25.0	mm/s
Retraction Retract Speed		25.0	mm/s
Retraction Prime Speed		25.0	mm/s
Retraction Extra Prime Amount		0.2	mm <sup>3</sup>
Retraction Minimum Travel		0.8	mm
Maximum Retraction Count		90	
Minimum Extrusion Distance Window		2	mm
Nozzle Switch Retraction Distance		16	mm
Nozzle Switch Retraction Speed		20	mm/s
Nozzle Switch Retract Speed		20	mm/s
Nozzle Switch Prime Speed		20	mm/s
 <b>Speed</b>			▼
Print Speed		60	mm/s
Infill Speed	<i>i</i>	55	mm/s
Wall Speed		30.0	mm/s
Outer Wall Speed		30.0	mm/s
Inner Wall Speed		60.0	mm/s
Top/Bottom Speed		30.0	mm/s
Support Speed		60	mm/s
Support Infill Speed		60	mm/s
Support Interface Speed		40.0	mm/s
Support Roof Speed		40.0	mm/s
Support Floor Speed		40.0	mm/s
Travel Speed		120	mm/s
Initial Layer Speed	<i>i</i>	25	mm/s
Initial Layer Print Speed		25	mm/s
Initial Layer Travel Speed		50.0	mm/s
Maximum Z Speed		0	mm/s
Number of Slower Layers		2	
Equalize Filament Flow		<input type="checkbox"/>	
Enable Acceleration Control		<input type="checkbox"/>	
Enable Jerk Control		<input type="checkbox"/>	

Travel	
Combing Mode	All
Retract Before Outer Wall	<input type="checkbox"/>
Avoid Printed Parts When Traveling	<input checked="" type="checkbox"/>
Travel Avoid Distance	0.625 mm
Layer Start X	0.0 mm
Layer Start Y	0.0 mm
Z Hop When Retracted	<input type="checkbox"/>
Cooling	
Enable Print Cooling	<input checked="" type="checkbox"/>
Fan Speed	100.0 %
Regular Fan Speed	100.0 %
Maximum Fan Speed	100.0 %
Regular/Maximum Fan Speed Threshold	10 s
Initial Fan Speed	0 %
Regular Fan Speed at Height	0 mm
Regular Fan Speed at Layer	1
Minimum Layer Time	5 s
Minimum Speed	10 mm/s
Lift Head	<input type="checkbox"/>
Support	
Generate Support	<input checked="" type="checkbox"/>
Support Placement	Everywhere
Support Overhang Angle	35 °
Support Pattern	Zig Zag
Connect Support ZigZags	<input checked="" type="checkbox"/>
Support Density	15 %
Support Line Distance	2.6667 mm
Support Z Distance	0.3 mm
Support Top Distance	0.6 mm
Support Bottom Distance	0.3 mm
Support X/Y Distance	1 mm
Support Distance Priority	Z overrides X/Y
Minimum Support X/Y Distance	0.2 mm

Support Stair Step Height	0.3	mm
Support Stair Step Maximum Width	5.0	mm
Support Join Distance	2.0	mm
Support Horizontal Expansion	0.2	mm
Enable Support Interface	<input checked="" type="checkbox"/>	
Enable Support Roof	<input checked="" type="checkbox"/>	
Enable Support Floor	<input checked="" type="checkbox"/>	
Support Interface Thickness	1	mm
Support Roof Thickness	1	mm
Support Floor Thickness	1	mm
Support Interface Resolution	0.3	mm
Support Interface Density	100	%
Support Roof Density	100	%
Support Roof Line Distance	0.4	mm
Support Floor Density	100	%
Support Floor Line Distance	0.4	mm
Support Interface Pattern	Concentric	▼
Support Roof Pattern	Concentric	▼
Support Floor Pattern	Concentric	▼
Use Towers	<input type="checkbox"/>	
<b>Build Plate Adhesion</b>		<
Build Plate Adhesion Type	<input type="radio"/> Raft	▼
Raft Extra Margin	<input type="radio"/> 5	mm
Raft Air Gap	0.3	mm
Initial Layer Z Overlap	0.15	mm
Raft Top Layers	2	
Raft Top Layer Thickness	0.3	mm
Raft Top Line Width	0.4	mm
Raft Top Spacing	0.4	mm
Raft Middle Thickness	0.45	mm
Raft Middle Line Width	0.8	mm
Raft Middle Spacing	1.0	mm
Raft Base Thickness	0.36	mm
Raft Base Line Width	0.8	mm

Raft Line Spacing	1.6	mm
Raft Print Speed	30.0	mm/s
Raft Top Print Speed	30.0	mm/s
Raft Middle Print Speed	22.5	mm/s
Raft Base Print Speed	22.5	mm/s
Raft Fan Speed	0	%
Raft Top Fan Speed	0	%
Raft Middle Fan Speed	0	%
Raft Base Fan Speed	0	%
<b>Mesh Fixes</b> ▾		
Union Overlapping Volumes	<input checked="" type="checkbox"/>	
Remove All Holes	<input type="checkbox"/>	
Extensive Stitching	<input type="checkbox"/>	
Keep Disconnected Faces	<input type="checkbox"/>	
Merged Meshes Overlap	0.15	mm
Remove Mesh Intersection	<input type="checkbox"/>	
<b>Special Modes</b> ▾		
Print Sequence	All at Once	▾
Mold	<input type="checkbox"/>	
Surface Mode	Normal	▾
Spiralize Outer Contour	<input type="checkbox"/>	
<b>Experimental</b> ▾		
Enable Draft Shield	<input type="checkbox"/>	
Make Overhang Printable	<input type="checkbox"/>	
Enable Coasting	<input type="checkbox"/>	
Extra Skin Wall Count	0	
Alternate Skin Rotation	<input type="checkbox"/>	
Spaghetti Infill	<input type="checkbox"/>	
Enable Conical Support	<input type="checkbox"/>	
Hollow Out Objects	<input type="checkbox"/>	
Fuzzy Skin	<input type="checkbox"/>	
Wire Printing	<input type="checkbox"/>	
Enable Ironing	<input type="checkbox"/>	