

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MECÂNICA

Guilherme Amaral Souza Aeissami

**ANÁLISE QUALIDADE DE ESCANEAMENTO 3D FOTOGRAMÉTRICO DE  
BAIXO CUSTO**

Betim  
2026

GUILHERME AMARAL SOUZA AEISSAMI

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ESCANEAMENTO 3D FOTOGRAFÉTRICO DE  
BAIXO CUSTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Ismael Nogueira Rabelo de Melo

Betim  
2026

## FICHA CATALOGRÁFICA

A247a Aeissami, Guilherme Amaral Souza

Análise qualidade de escaneamento 3D fotogramétrico de baixo custo /  
Guilherme Amaral Souza Aeissami. – 2026.

38 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) -  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus  
Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Ismael Nogueira Rabelo de Melo

1. Metrologia. 2. Engenharia reversa. 3. Inspeção geométrica. 4.  
Escaneamento 3D . 5. Engenharia Mecânica. I. Aeissami, Guilherme Amaral  
Souza. II. Título.

CDU: 006.91

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a conclusão deste trabalho. Este momento representa não apenas o fim de uma etapa acadêmica, mas também a consolidação de um percurso marcado por desafios, aprendizado e crescimento pessoal.

Primeiramente, agradeço a toda a minha família, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos desta caminhada. Em especial à minha mãe, que foi minha maior fonte de inspiração e apoio incondicional. Seu exemplo de força e dedicação foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Agradeço também à minha namorada, Bianca, que foi um pilar emocional durante todo o processo. Sua presença constante me motivou a continuar e sua força não permitiu que eu desistisse diante das dificuldades.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Professor Me. Ismael Nogueira Rabelo de Melo, pela orientação técnica, pela paciência e pelas valiosas contribuições durante esta fase final de desenvolvimento do trabalho. Sua visão crítica e seu apoio foram fundamentais para o refinamento desta pesquisa e para a consolidação dos resultados aqui apresentados.

Estendo meus agradecimentos ao Professor Wanderson, pelo apoio e pelas orientações acadêmicas que foram essenciais para a superação dos desafios encontrados ao longo deste percurso. Este estudo contou, ainda, com o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por meio do projeto APQ-00387-17 (13036), cujo fomento foi fundamental para a viabilização desta pesquisa.

Aos meus amigos, deixo um agradecimento especial. A presença de vocês tornou essa jornada mais leve e divertida. Entre conversas e incentivos, encontrei o equilíbrio necessário para seguir em frente.

Por fim, sou profundamente grato a todos que, de alguma forma, participaram desta conquista. Este trabalho é fruto não apenas do meu esforço, mas do apoio e da colaboração de todos que caminharam comigo ao longo dessa trajetória.

## RESUMO

A digitalização tridimensional tem se consolidado como ferramenta útil em fluxos de engenharia reversa, documentação geométrica e inspeção assistida por computador. Entretanto, a utilidade técnica de um modelo reconstruído não depende apenas de sua aparência visual, mas de sua capacidade de preservar dimensões e formas com estabilidade suficiente para a aplicação pretendida. Nesse contexto, o presente trabalho avaliou a qualidade dimensional de um fluxo fotogramétrico de baixo custo, processado no *Agisoft Metashape Standard* e analisado geometricamente no Siemens NX, tomando como referência medições físicas repetidas em um corpo de prova contendo doze furos nominais de 10 mm. Os resultados mostraram subestimação sistemática de todos os furos avaliados, com erro médio assinado de  $-2,136$  mm, erro absoluto médio de  $2,136$  mm, erro relativo médio absoluto de  $21,55$  % e dispersão digital substancialmente maior que a física. O desvio padrão médio das medições digitais foi aproximadamente  $29,8$  vezes superior ao desvio padrão médio das medições físicas. A amplitude entre as médias digitais dos furos foi artificialmente ampliada em relação ao conjunto físico, evidenciando perda de fidelidade relativa entre características nominalmente semelhantes. Os resultados sustentam que o fluxo avaliado é suficiente para representação de macrogeometria e para engenharia reversa conceitual, mas inadequado, na forma como foi executado, para inspeção dimensional de furos internos de 10 mm. As causas discutidas ao longo do texto, como limitações de textura, oclusão geométrica, suavização de malha e sensibilidade do ajuste geométrico, são tratadas como interpretações técnicas plausíveis à luz dos resultados experimentais e da literatura consultada.

**Palavras-chave:** fotogrametria de curto alcance. escaneamento 3D. metrologia dimensional. engenharia reversa. inspeção geométrica.

## ABSTRACT

Three-dimensional digitization has become a useful tool in reverse engineering, geometric documentation, and computer-aided inspection workflows. However, the technical value of a reconstructed model depends not only on visual realism, but also on its ability to preserve dimensions and shapes with sufficient stability for the intended application. In this context, the present study evaluated the dimensional quality of a low-cost photogrammetric workflow processed in Agisoft Metashape Standard and geometrically analyzed in Siemens NX, using repeated physical measurements of a test specimen with twelve nominal 10 mm holes as reference. The results showed systematic underestimation of all evaluated holes, with a mean signed error of  $-2,136$  mm, mean absolute error of  $2,136$  mm, mean absolute relative error of  $21,55$  %, and digital dispersion substantially higher than physical dispersion. The mean standard deviation of digital measurements was approximately  $29,8$  times higher than that of physical measurements. The range of digital hole means was artificially amplified relative to the physical dataset, indicating loss of relative fidelity between nominally similar features. The results support that the evaluated workflow is sufficient for macro-geometry representation and conceptual reverse engineering, but unsuitable, as implemented, for dimensional inspection of internal 10 mm holes. The causes discussed throughout the text, such as texture limitations, geometric occlusion, mesh smoothing and geometric fitting sensitivity, are treated as technically plausible interpretations in light of the experimental results and the consulted literature.

**Keywords:** close-range photogrammetry. 3D scanning. dimensional metrology. reverse engineering. geometric inspection.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Imagem 1 – Scanner Steinbichler Comet L3D durante o processo de digitalização.....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 2 – Dimensões e forma da amostra.....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 3 – Desvios entre a digitalização 3D e o modelo CAD.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 4 – Condições visuais do corpo de prova.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 5 – Configuração do cenário de digitalização.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 6 – Resultado do alinhamento das câmeras e geração da nuvem de pontos esparsa.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 7 – Malha poligonal densa reconstruída, evidenciando a topologia dos furos antes da correção de escala.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 8 – Inspeção dimensional preliminar no Siemens NX.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 9 – Normalização métrica no ambiente Siemens NX.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 10 – Reconstrução geométrica de furos no Siemens NX.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 11 – Comparativo dimensional entre medição física e digital por furo, evidenciando viés sistemático de contração nas medições digitais.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 12 – Comparação entre os desvios padrão das medições físicas e digitais por furo.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 13 – Desvio de forma por furo, expresso pela circularidade média extraída do modelo digital.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 14 – Gráfico de Bland–Altman construído a partir das médias físicas e digitais por furo.....</b>	<b>32</b>

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1 – Lista de peças, materiais e tratamentos.....</b>	<b>21</b>
<b>Tabela 2 – Resumo consolidado das medições físicas e digitais por furo.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabela 3 – Síntese global dos indicadores de desempenho do método.....</b>	<b>29</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
MVS	<i>Multi-View Stereo</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SfM	<i>Structure from Motion</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{D}$	média aritmética das medições
$D_i$	i-ésima medição individual
$n$	número de repetições
$s$	desvio padrão amostral
$\bar{D}_{fis}$	média das medições físicas
$\bar{D}_{dig}$	média das medições digitais
$E_s$	erro assinado
$E_{abs}$	erro absoluto
$E_{r,abs}$	erro relativo percentual absoluto
$t$	estatística do teste $t$ pareado
$p$	valor- $p$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Revisão bibliográfica.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Digitalização 3D na engenharia mecânica.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Sistemas ativos, sistemas passivos e o lugar da fotogrametria.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Fundamentos da fotogrametria de curto alcance.....</b>	<b>14</b>
<b>2.4</b>	<b>Iluminação, textura e superfícies problemáticas.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5</b>	<b>Oclusão, cavidades e dificuldades associadas a feições internas.....</b>	<b>15</b>
<b>2.6</b>	<b>Exatidão, precisão e avaliação de modelos digitalizados.....</b>	<b>18</b>
<b>2.7</b>	<b>Medição em malhas triangulares e ajuste geométrico.....</b>	<b>18</b>
<b>2.8</b>	<b>Fundamentos estatísticos para comparação entre métodos.....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1</b>	<b>Plano experimental.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2</b>	<b>Corpo de prova e preparação superficial.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3</b>	<b>Ambiente de captura e fluxo fotogramétrico.....</b>	<b>21</b>
<b>3.4</b>	<b>Pós-processamento em CAD.....</b>	<b>23</b>
<b>3.5</b>	<b>Protocolo de medição física e digital.....</b>	<b>25</b>
<b>3.6</b>	<b>Tratamento dos dados.....</b>	<b>25</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>Discussão.....</b>	<b>33</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>Limitações do estudo e sugestão para trabalhos futuros.....</b>	<b>37</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>38</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A incorporação de modelos tridimensionais aos fluxos de engenharia deixou de ser um recurso periférico e passou a ocupar posição central em atividades de inspeção, documentação geométrica, análise de conformidade e desenvolvimento de produto. Em um ambiente industrial cada vez mais orientado por dados digitais, a capacidade de converter um objeto físico em um modelo manipulável em CAD ou em um conjunto de superfícies comparáveis numericamente tem implicações diretas sobre engenharia reversa, rastreabilidade geométrica, manutenção e reconstituição de componentes (Tóth; Živčák, 2014; Coelho, 2023).

A atratividade dos sistemas de baixo custo decorre de uma tensão permanente entre acessibilidade e desempenho. De um lado, câmeras convencionais, smartphones e sensores voltados ao mercado consumidor reduziram significativamente a barreira de entrada para a reconstrução 3D. De outro, a transposição dessas tecnologias para aplicações de engenharia mecânica encontra um limite claro quando se exige exatidão dimensional, repetitividade e preservação de feições críticas (Brandão; Gomes; Silva, 2026; Castro; Orton-Celli; Marcon, 2026; Coelho, 2023). O ponto central, portanto, não é apenas verificar se um sistema de baixo custo é capaz de gerar um modelo tridimensional, mas em que medida esse modelo pode ser utilizado para fins técnicos sem comprometer a interpretação dimensional da peça (Tóth; Živčák, 2014; Coelho, 2023).

Neste trabalho, a avaliação concentra-se em furos internos nominais de 10 mm. Esse tipo de feição reúne várias dificuldades conhecidas da digitalização óptica, como menor visibilidade da borda, sombreamento local, menor disponibilidade de textura interna, sensibilidade da medição ao posicionamento da fronteira geométrica e forte impacto de pequenas deformações locais sobre o diâmetro final obtido. Trata-se, portanto, de um problema mais exigente do que a simples reconstrução da forma externa de um objeto (Tóth; Živčák, 2014; Coelho, 2023).

Neste estudo, o fluxo analisado foi processado no *Agisoft Metashape Standard*, seguido de pós-processamento geométrico no *Siemens NX* e de validação dimensional por comparação entre medições físicas e medições digitais de doze furos nominais de 10 mm (Agisoft, 2022; Siemens, 2024). Esse recorte se mostra relevante porque muitos estudos de digitalização de baixo custo concentram-se em objetos externos, geometrias abertas ou métricas globais de superfície (Tannús Et Al., 2019; Castro; Ortoncelli; Marcon, 2026). Aqui, o foco recai sobre a confiabilidade geométrica local de cavidades internas.

## **1.2 Objetivo Geral**

Avaliar a qualidade dimensional de um fluxo de escaneamento 3D fotogramétrico de baixo custo por meio da comparação entre medições físicas repetidas e medições digitais obtidas após reconstrução, correção de escala e ajuste geométrico em ambiente CAD.

### ***1.2.1 Objetivos Específicos***

1. Consolidar, por furo, as métricas de média física, desvio padrão físico, média digital, desvio padrão digital, erro assinado, erro absoluto, erro relativo percentual absoluto e circularidade média.
2. Avaliar exatidão, precisão e concordância entre medições físicas e digitais.
3. Delimitar a aplicabilidade do método à escala geométrica investigada.

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Digitalização 3D na engenharia mecânica

A digitalização 3D, em sentido amplo, corresponde à conversão de um objeto físico em uma representação digital de sua geometria. Em termos operacionais, essa representação pode assumir a forma de nuvem de pontos, malha triangular ou, após etapas adicionais de reconstrução, geometrias analíticas compatíveis com fluxos CAD/CAE. A engenharia mecânica se apropria dessas informações em aplicações como engenharia reversa, inspeção dimensional, documentação de componentes, comparação com modelos nominais e suporte a processos de manutenção.

A utilidade de um escaneamento não se resume à obtenção da forma aparente, pois qualquer aplicação de medição exige conhecimento do comportamento dimensional do sistema utilizado (Tóth; Živčák, 2014). Essa observação se torna ainda mais pertinente diante da difusão de sistemas de menor custo em atividades que, tradicionalmente, dependiam de equipamentos de maior robustez metrológica.

Segundo Coelho (2023), a escolha da tecnologia envolve um compromisso entre portabilidade, simplicidade operacional, custo e capacidade de reproduzir geometrias de interesse técnico. Em linha semelhante, Castro, Ortoncelli e Marcon (2026) destacam que a noção de baixo custo só faz sentido quando relacionada ao uso final pretendido.

A Figura 1 ilustra um exemplo de arranjo de aquisição empregado em digitalização tridimensional. É possível perceber que a qualidade do resultado depende não apenas do princípio físico do sensor, mas também do arranjo experimental, da visibilidade da peça, da estratégia de posicionamento e do modo como o objeto é exposto ao sistema de captura.

Imagem 1 – Scanner Steinbichler Comet L3D durante o processo de digitalização



Fonte: (Tóth e Živčák, 2014, p. 288).

## 2.2 Sistemas ativos, sistemas passivos e o lugar da fotogrametria

Uma classificação útil para o campo do escaneamento 3D distingue sistemas ativos e sistemas passivos. Nos sistemas ativos, alguma forma de energia é emitida em direção ao objeto, e a resposta do retorno é interpretada para estimar a geometria. Sistemas de luz estruturada, escaneamento a laser e sensores baseados em profundidade se enquadram nessa lógica. Nos sistemas passivos, por outro lado, não há projeção ativa voltada à medição; a reconstrução depende da análise de imagens e da inferência geométrica a partir da informação radiométrica disponível na cena.

Essa distinção é relevante porque condiciona as limitações operacionais de cada técnica (Coelho, 2023). Sensores passivos tendem a ser mais acessíveis e compactos, mas podem apresentar maior sensibilidade à textura, à iluminação e à qualidade visual do objeto. Sensores ativos, por sua vez, geralmente oferecem maior controle do fluxo de aquisição, embora também apresentem restrições em materiais problemáticos, superfícies reflexivas ou geometrias de difícil acesso.

Entre as técnicas passivas, a fotogrametria de curto alcance ganhou destaque em função da ampla disponibilidade de câmeras digitais, da evolução dos algoritmos de *Structure from Motion* (SfM) e *Multi-View Stereo* (MVS) e da popularização de softwares capazes de transformar sequências fotográficas em malhas tridimensionais utilizáveis em fluxos técnicos.

## 2.3 Fundamentos da fotogrametria de curto alcance

A fotogrametria de curto alcance se baseia no princípio segundo o qual pontos visíveis em múltiplas imagens, obtidas sob diferentes posições, podem ser correlacionados e triangulados para estimar sua posição no espaço. Brandão, Gomes e Silva (2026) descrevem esse encadeamento ao discutir fluxos SfM aplicados a maquetes com smartphone, mostrando que elevada sobreposição entre imagens, planejamento geométrico da captura e cobertura angular coerente são condições fundamentais para a identificação de feições homólogas, a estimação da posição das câmeras e a geração de nuvens de pontos densas e modelos texturizados.

Do ponto de vista operacional, a reconstrução fotogramétrica pode ser entendida em quatro momentos principais: aquisição das imagens, alinhamento, reconstrução densa e geração da malha. No alinhamento, o sistema identifica pontos correspondentes entre as imagens e estima a posição relativa das câmeras, produzindo uma nuvem esparsa. A

reconstrução densa amplia a estimativa geométrica da superfície. Em seguida, a malha transforma os pontos reconstruídos em uma superfície facetada passível de manipulação.

## **2.4 Iluminação, textura e superfícies problemáticas**

A literatura converge ao reconhecer que a fotogrametria depende de informação visual estável. Textura, contraste e iluminação não são elementos acessórios, mas componentes estruturais da reconstrução. Brandão, Gomes e Silva (2026) salientam que smartphones podem produzir imagens adequadas para fluxos SfM desde que haja planejamento rigoroso da captura, com múltiplas vistas e elevada sobreposição.

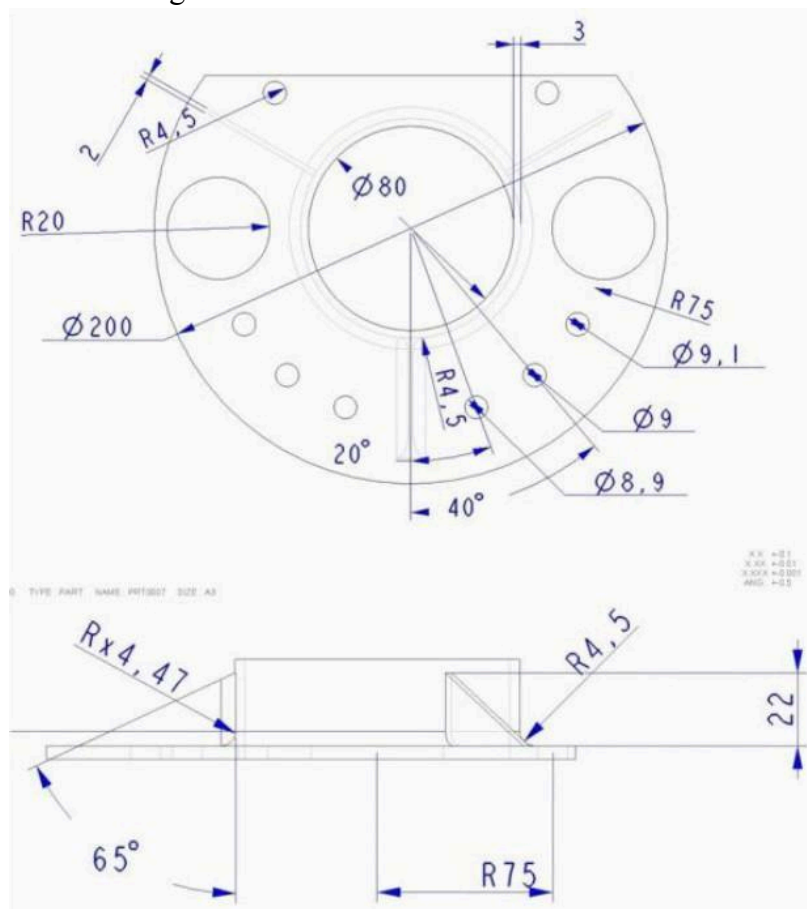
Essa interpretação também aparece em Castro, Ortoncelli e Marcon (2026), que sintetizam estudos apontando sensibilidade da fotogrametria à iluminação não homogênea e à presença de superfícies translúcidas, brilhantes ou excessivamente detalhadas. Em aplicações de engenharia mecânica, componentes metálicos ou superfícies refletivas tendem a dificultar a aquisição tanto em sistemas passivos quanto em ativos (Coelho, 2023). Na fotogrametria, a falta de textura ou a presença de brilho especular pode comprometer diretamente a consistência da correspondência entre imagens, com reflexos posteriores na qualidade da malha reconstruída.

## **2.5 Oclusão, cavidades e dificuldades associadas a feições internas**

Se a reconstrução de superfícies externas já depende de condições geométricas e radiométricas favoráveis, a digitalização de cavidades e furos introduz uma camada adicional de complexidade. Tóth e Živčák (2014) informam que o corpo de prova utilizado em seu estudo comparativo foi projetado para atender a critérios de escaneamento e, por isso, evitava geometrias excessivamente complexas e aberturas profundas de pequeno diâmetro.

A Figura 2 apresenta um exemplo de corpo de prova com geometria controlada, utilizado para comparar o comportamento dimensional de modelos digitalizados. Esse tipo de abordagem é útil porque permite relacionar desvios medidos a dimensões nominais previamente conhecidas.

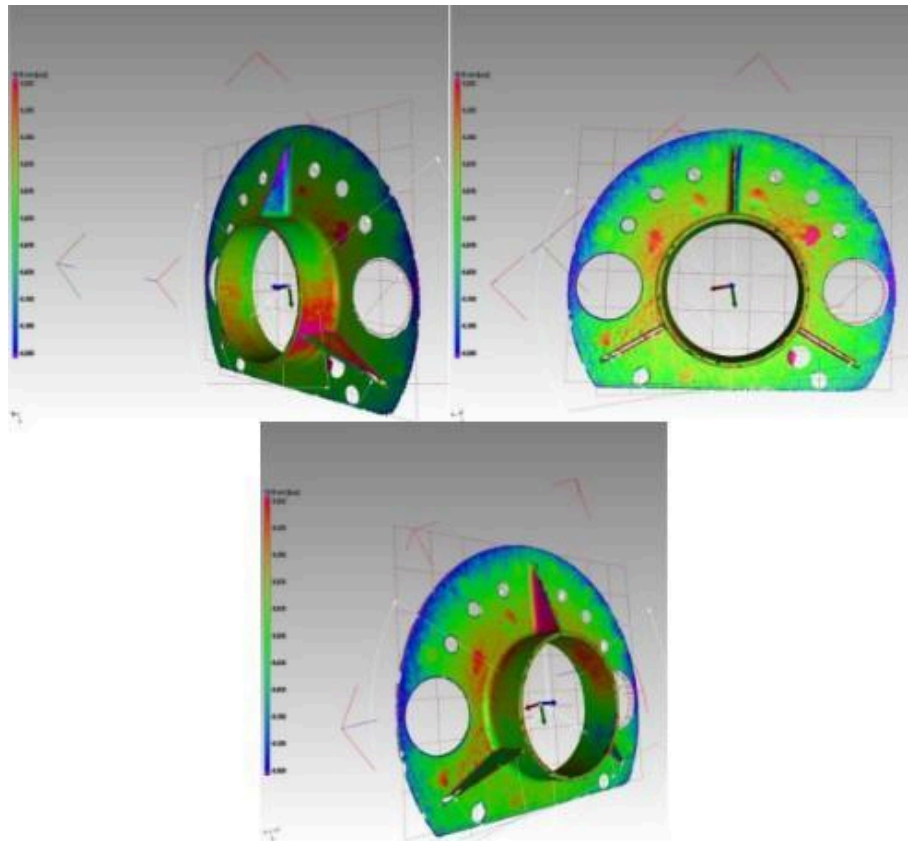
Figura 2 – Dimensões e forma da amostra.



Fonte: Tóth e Živčák (2014).

Na Figura 3, vê-se como a comparação entre modelo digital e modelo nominal pode ser convertida em mapa de desvios distribuídos sobre a geometria. Essa visualização é particularmente útil quando o interesse não recai apenas sobre uma dimensão isolada, mas sobre o comportamento geométrico da peça como um todo.

Figura 3 – Desvios entre a digitalização 3D e o modelo CAD.



Fonte: Tóth e Živčák (2014).

O procedimento de inspeção por mapa de desvios, exemplificado na Figura 3, fundamenta a análise realizada neste trabalho sobre a Peça C. A referida peça, após o processo de fosqueamento químico, permitiu a geração de uma malha digital estável e suficiente para a comparação com o modelo nominal (CAD), seguindo a metodologia de visualização de discrepâncias geométricas globais aqui descrita.

Quando o interesse se desloca para furos internos, a visibilidade da borda e da parede interna diminui, a incidência de oclusão aumenta e o posicionamento da fronteira geométrica se torna mais sensível a pequenas irregularidades da malha. A discussão apresentada Tannús et al. (2019) é elucidativa nesse ponto. Ao compararem fotogrametria e escaneamento de luz estruturada em um pequeno objeto decorativo, os autores verificaram que a fotogrametria produziu modelo mais detalhado e dimensionalmente mais confiável do que o scanner utilizado, embora com maior tempo de processamento. Ainda assim, a extrapolação desses resultados para cavidades internas pequenas exige cautela, porque o caso geométrico investigado no presente trabalho é mais severo.

## **2.6 Exatidão, precisão e avaliação de modelos digitalizados**

A avaliação de um sistema de digitalização não pode se limitar à inspeção visual do modelo. É necessário distinguir exatidão e precisão. Exatidão diz respeito à proximidade entre o valor medido e o valor de referência. Precisão, por sua vez, relaciona-se à dispersão das medições quando o procedimento é repetido sob condições semelhantes. Um sistema pode ser preciso e ainda assim enviesado; também pode apresentar grande variabilidade, tornando-se inadequado para decisão dimensional (Jcgm, 2012).

Essa distinção aparece de forma explícita em Tannús et al. (2019), que compararam medidas lineares do objeto real com medidas extraídas dos modelos digitais e complementaram a análise com correlação, teste t de Student e Bland–Altman. Tóth e Živčák (2014) avaliaram dimensões selecionadas, desvios de forma e orientação por comparação com CAD. Já Castro, Ortoncelli e Marcon (2026) ampliaram a discussão ao citar métricas globais como distância de Hausdorff, RMSE e Chamfer em comparações entre malhas e modelos originais.

No presente trabalho, a avaliação se concentra em comparação dimensional localizada, com medições físicas repetidas, medições digitais repetidas, cálculo de erro relativo e acompanhamento do desvio de forma por circularidade.

## **2.7 Medição em malhas triangulares e ajuste geométrico**

A avaliação dimensional em modelos facetados exige cuidado conceitual adicional. Diferentemente de um modelo CAD analítico, uma malha triangular representa a superfície por meio de facetas planas discretas. Assim, o diâmetro de um furo não existe diretamente como entidade geométrica perfeita na malha; ele precisa ser inferido a partir da borda reconstruída ou de um ajuste geométrico aplicado sobre pontos ou trechos da superfície (Siemens, 2024; Shakarji, 1998).

Esse aspecto é central em aplicações metrológicas, porque pequenas irregularidades locais da malha podem deslocar a fronteira geométrica aparente da feição. Em cavidades internas de pequeno diâmetro, esse problema se torna ainda mais sensível: poucos triângulos mal posicionados, bordas incompletas ou ruído localizado já são suficientes para deslocar o círculo reconstruído e, conseqüentemente, o valor final do diâmetro medido (Siemens, 2024; Shakarji, 1998; Tóth; Živčák, 2014).

No fluxo experimental deste trabalho, a medição digital foi operacionalizada no Siemens NX a partir da reconstrução geométrica das bordas dos furos. Contudo, a documentação do procedimento indica o uso da ferramenta Circle by 3 Points, e não um ajuste estatístico completo por mínimos quadrados sobre toda a borda disponível. Essa escolha torna a medição mais dependente da seleção manual dos pontos e deve ser reconhecida como uma limitação metodológica importante, sobretudo quando se busca inferir desempenho metrológico fino (Siemens, 2024; Shakarji, 1998).

## **2.8 Fundamentos estatísticos para comparação entre métodos**

Na comparação entre métodos de medição, não basta apenas verificar se dois conjuntos de valores são numericamente diferentes. É necessário examinar se existe diferença média entre os métodos e qual é a magnitude prática dessa diferença. Nesse contexto, o teste t para amostras dependentes e o gráfico de Bland–Altman constituem ferramentas complementares.

O teste t para amostras dependentes é apropriado quando se comparam duas séries de medições obtidas sobre os mesmos elementos amostrais. Em termos conceituais, esse teste avalia se a média das diferenças entre pares de observações pode ser considerada estatisticamente igual a zero. Sua aplicação é pertinente quando se pretende verificar se há evidência de diferença sistemática entre dois métodos aplicados às mesmas características geométricas (Bussab; Morettin, 2017).

O gráfico de Bland–Altman, por sua vez, foi proposto para avaliar a concordância entre métodos. Sua construção baseia-se na representação das diferenças entre dois métodos em função da média entre eles para cada unidade analisada. Esse procedimento permite visualizar o viés médio entre os métodos e a dispersão das diferenças ao redor desse viés. Em geral, também se incluem limites de concordância, fornecendo uma noção da faixa dentro da qual se espera encontrar a maior parte das discrepâncias entre os métodos (Bland; Altman, 1986; Bland; Altman, 1999).

No contexto deste trabalho, a utilização conjunta dessas ferramentas é adequada porque o teste t pareado permite avaliar a existência de diferença média entre as medições físicas e digitais, enquanto a análise de Bland–Altman contribui para interpretar a magnitude do viés e a dispersão das diferenças sob o ponto de vista metrológico.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Plano experimental

O estudo foi estruturado como uma validação cruzada entre medições físicas e digitais. O objeto de interesse consistiu em um corpo de prova contendo doze furos nominais de 10 mm, identificados como Ø2A a Ø2L. O fluxo experimental compreendeu a preparação superficial do corpo de prova, a aquisição fotogramétrica, a reconstrução da malha, a importação em CAD, a normalização métrica, a reconstrução geométrica dos furos e a comparação entre medições físicas e digitais.

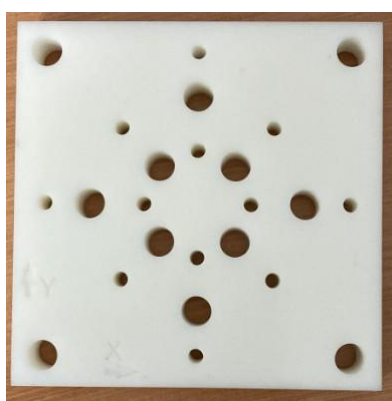
#### 3.2 Corpo de prova e preparação superficial

Ao longo do desenvolvimento experimental, foram adotadas três condições visuais principais do corpo de prova, reunidas na Figura 4. Na subfigura 4a, observa-se a peça em resina clara, sem tratamento superficial, condição mais suscetível a reflexos especulares. A subfigura 4b mostra a peça B com acabamento cinza fosco, produzida com o mesmo projeto da peça A, porém com método, material e cor diferentes, utilizada em ensaios iterativos de captura e reconstrução. Já a subfigura 4c apresenta o corpo de prova A após tratamento químico, resultando em superfície visualmente mais fosca, condição empregada na etapa quantitativa.

Tabela 1 – Lista de peças, materiais e tratamentos

Identificação	Processo de Fabricação	Material Base	Aspecto Visual
Peça A	Fotopolimerização (MSLA)	Fotopolímero UV Standard	Translúcido / Brilhante
Peça B	Deposição de Filamento (FDM)	Ácido Polilático (PLA)	Cinza / Fosco
Peça C	Fotopolimerização (MSLA)	Fotopolímero UV Standard	Opaco / Fosco

Figura 4 – Condições visuais do corpo de prova



(a) Sem tratamento.



(b) Peça B fosca.



(c) Após tratamento.

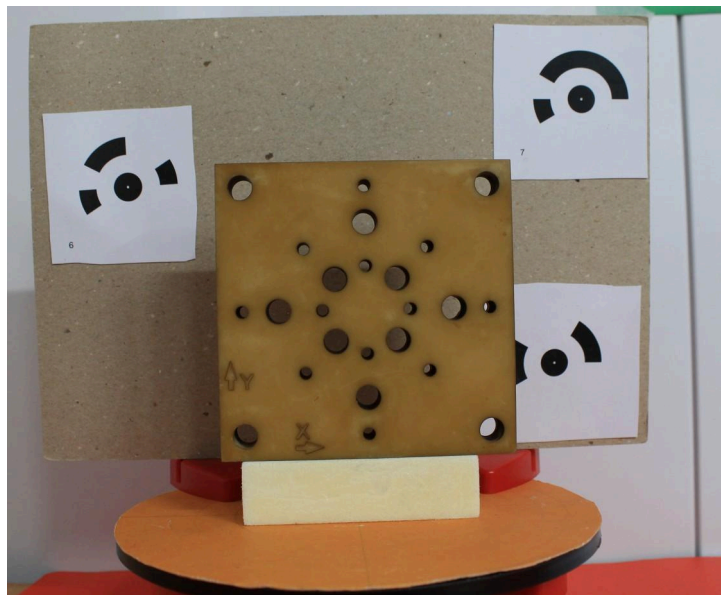
Fonte: Próprio autor

Essas três condições indicam a preocupação em reduzir os efeitos de superfícies desfavoráveis à captura óptica. Observa-se uma transição entre a condição inicial mais suscetível a reflexos, a condição intermediária de ensaio e a condição final adotada para a coleta quantitativa. O estudo, entretanto, não contemplou ensaio isolado para quantificar separadamente a contribuição de cada condição superficial sobre a qualidade geométrica final.

### 3.3 Ambiente de captura e fluxo fotogramétrico

A aquisição das imagens foi realizada em cenário montado para estabilizar o corpo de prova e fornecer referências visuais no entorno. O objeto foi posicionado em um suporte de bancada, circundado por marcadores no plano de apoio e submetido a um arranjo de iluminação difusa, em ambiente interno. A configuração geral deste cenário, incluindo a distribuição dos marcadores, pode ser visualizada na Figura 5.

Figura 5 – Configuração do cenário de digitalização



Fonte: Próprio autor.

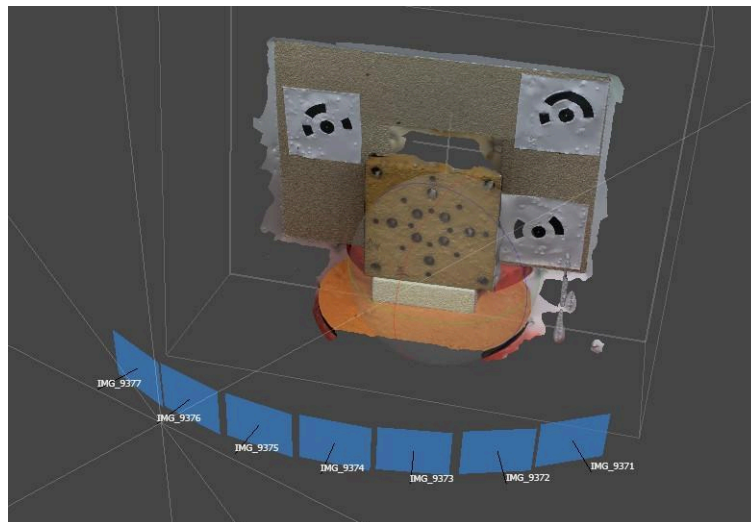
O protocolo de captura buscou manter uma elevada sobreposição entre as imagens, consistência de foco e estabilidade do conjunto durante a tomada fotográfica. Para a reconstrução do modelo digital quantitativo, foram selecionadas 7 fotografias, capturadas de ângulos estratégicos para manter a sobreposição entre 60% e 80%.

As imagens foram capturadas utilizando uma câmera DSLR Canon EOS Rebel T3, equipada com sensor CMOS APS-C (22,2 \times 14,7 mm) e resolução de 12,2 megapixels

efetivos. Utilizou-se a lente padrão do equipamento, uma Canon EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS II, mantendo-se a distância focal fixa para minimizar variações nos parâmetros de calibração interna da câmera (camera calibration), fator essencial para a estabilidade dimensional do modelo digital.

A reconstrução foi realizada no *Agisoft Metashape Standard*. O fluxo iniciou-se pelo alinhamento das imagens para a geração da nuvem de pontos esparsa (Figura 6), seguido pela reconstrução da malha poligonal densa (Figura 7). Como o software não utilizou barras de escala calibradas na etapa de processamento, a correção métrica foi executada posteriormente em ambiente CAD, a partir de uma dimensão física de referência do corpo de prova.

Figura 6 – Resultado do alinhamento das câmeras e geração da nuvem de pontos esparsa



Fonte: Próprio autor.

Figura 7 – Malha poligonal densa reconstruída, evidenciando a topologia dos furos antes da correção de escala.



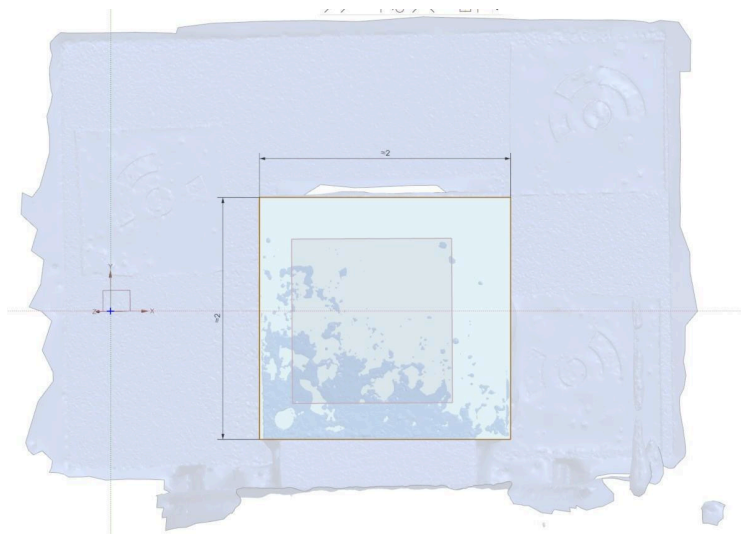
Fonte: Próprio autor.

### 3.4 Pós-processamento em CAD

O modelo facetado foi importado para o *Siemens NX*, ambiente em que se realizaram a inspeção preliminar da malha, a normalização métrica e a reconstrução geométrica dos furos para medição. Na inspeção inicial, confirmou-se que o modelo apresentava coerência topológica, porém não estava em escala métrica real.

A Figura 8 mostra a etapa inicial de inspeção dimensional no ambiente CAD, utilizada para verificar a integridade geral da malha antes do escalonamento.

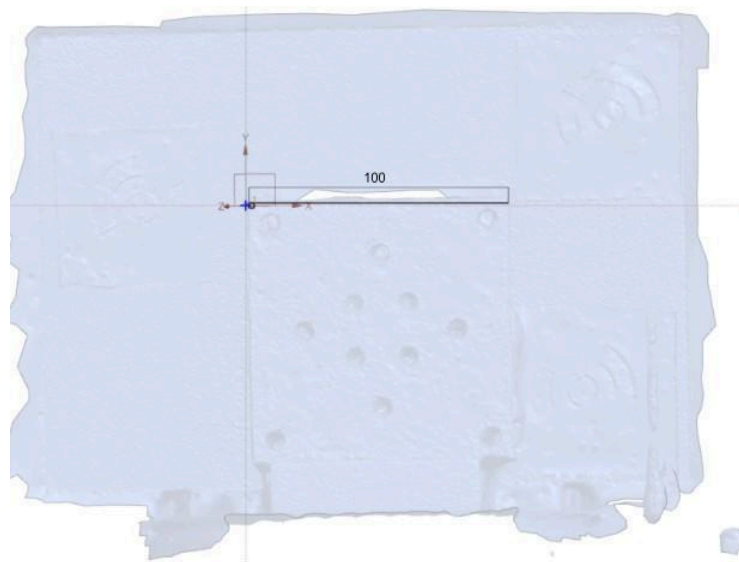
Figura 8 – Inspeção dimensional preliminar no Siemens NX



Fonte: Próprio autor.

A normalização métrica foi realizada a partir de uma dimensão física de referência de 100 mm, de modo a aplicar ao modelo um fator global uniforme de escala. Esse procedimento está ilustrado na Figura 9.

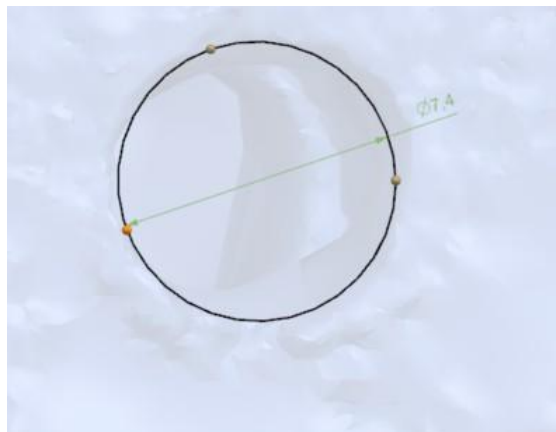
Figura 9 – Normalização métrica no ambiente Siemens NX



Fonte: Próprio autor.

Após o escalonamento, a reconstrução geométrica dos furos foi realizada sobre as bordas disponíveis da malha. A documentação do experimento registra o uso da ferramenta *Circle by 3 Points*, com seleção manual de três pontos na aresta perimetral de cada furo. Assim, embora o procedimento produza uma entidade geométrica utilizável para leitura dimensional, ele não corresponde a um *best-fit* estatístico de toda a borda disponível e deve ser interpretado como etapa suscetível a variabilidade do operador. A Figura 10 exemplifica essa etapa de reconstrução geométrica no *Siemens NX*.

Figura 10 – Reconstrução geométrica de furos no Siemens NX.



Fonte: Próprio autor.

### 3.5 Protocolo de medição física e digital

Para cada um dos doze furos nominais de 10 mm, foram realizadas três repetições de medição física e três repetições de medição digital. Também foi considerada a circularidade média associada à reconstrução geométrica dos furos.

A medição física foi adotada como referência comparativa interna do experimento. A medição digital, por sua vez, foi obtida a partir dos círculos reconstruídos em ambiente CAD. As planilhas utilizadas no estudo registram, para cada furo, as repetições físicas, as repetições digitais e o erro de circularidade correspondente.

### 3.6 Tratamento dos dados

A análise quantitativa foi realizada por furo, considerando média, desvio padrão, erro assinado, erro absoluto, erro relativo percentual absoluto e circularidade média. A média das repetições foi obtida por:

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (3.1)$$

e o desvio padrão amostral por:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

em que  $D_i$  representa cada medição individual e  $n$  o número de repetições.

A comparação entre as medições digitais e físicas foi expressa pelo erro assinado

$$E_s = \bar{D}_{dig} - \bar{D}_{fis} \quad (3.3)$$

pelo erro absoluto

$$E_{abs} = |E_s| \quad (3.4)$$

e pelo erro relativo percentual absoluto

$$E_{r,abs} = 100. \frac{|E_s|}{\bar{D}_{fis}} \quad (3.5)$$

em que  $\bar{D}_{fis}$  e  $\bar{D}_{dig}$  correspondem, respectivamente, às médias física e digital de cada furo.

Adicionalmente, foram aplicados teste *t* pareado entre as médias físicas e digitais e análise de Bland–Altman, ambos com base nas médias por furo.

#### 4. RESULTADOS

A Tabela 1 reúne as métricas consolidadas dos doze furos nominais de 10 mm, incluindo média física, desvio padrão físico, média digital, desvio padrão digital, erro assinado, erro absoluto, erro relativo percentual absoluto e circularidade média.

Tabela 2 – Resumo consolidado das medições físicas e digitais por furo.

<b>Furo</b>	$D_{fis}$	$S_{fis}$	$D_{dig}$	$S_{dig}$	$E_s$	$E_{abs}$	$E_{r,abs}$ (%)	<b>Circ. média</b>
Ø2A	9,930	0,002	7,683	0,104	-2,247	2,247	22,63	0,009
Ø2B	9,927	0,004	7,983	0,104	-1,944	1,944	19,58	0,007
Ø2C	9,943	0,003	7,683	0,362	-2,259	2,259	22,72	0,014
Ø2D	9,927	0,009	8,017	0,029	-1,911	1,911	19,25	0,012
Ø2E	9,914	0,005	7,833	0,208	-2,081	2,081	20,99	0,018
Ø2F	9,894	0,009	7,817	0,161	-2,077	2,077	21,00	0,040
Ø2G	9,913	0,002	7,883	0,104	-2,030	2,030	20,47	0,019
Ø2H	9,913	0,002	7,667	0,115	-2,246	2,246	22,66	0,020
Ø2I	9,898	0,005	7,783	0,076	-2,115	2,115	21,37	0,026
Ø2J	9,869	0,012	7,921	0,133	-1,948	1,948	19,74	0,022
Ø2K	9,914	0,003	7,647	0,307	-2,267	2,267	22,87	0,026
Ø2L	9,923	0,013	7,413	0,301	-2,510	2,510	25,29	0,020

Fonte: Próprio autor.

Os resultados da Tabela 2 mostram, em primeiro lugar, que a diferença entre as medições físicas e digitais não foi episódica nem restrita a alguns furos, mas sistemática em todo o conjunto. A média das médias físicas foi de 9,914 mm, enquanto a média das médias digitais foi de 7,778 mm, resultando em erro médio assinado de -2,136 mm, erro absoluto médio de 2,136 mm e erro relativo médio absoluto de 21,55 %. Em outras palavras, na escala geométrica investigada, o modelo digital subestimou em torno de um quinto o diâmetro dos furos avaliados, o que já afasta sua utilização como base confiável para inspeção dimensional fina.

Além da tendência média, a Tabela 2 também revela que essa contração ocorreu com intensidade variável entre os furos. O menor erro absoluto foi observado em Ø2D, com 1,911 mm, seguido de Ø2B, com 1,944 mm, e Ø2J, com 1,948 mm. No extremo oposto, o maior erro absoluto ocorreu em Ø2L, com 2,510 mm, seguido de Ø2K, com

2,267 mm, Ø2C, com 2,259 mm, Ø2A, com 2,247 mm e Ø2H, com 2,246 mm. Esse espalhamento indica que o problema não pode ser descrito apenas como um deslocamento uniforme de escala, pois o erro residual variou entre furos nominalmente equivalentes.

A Tabela 3 apresenta a síntese global desses indicadores e confirma que o desempenho do método foi comprometido simultaneamente em exatidão e em repetitividade. O viés médio de  $-2,136$  mm é elevado para furos de 10 mm, enquanto o desvio padrão médio das medições digitais, de  $0,167$  mm, foi muito superior ao desvio padrão médio das medições físicas, de apenas  $0,005$  mm. A razão entre essas dispersões foi de  $29,79$ , o que significa que, além de enviesado, o processo digital foi muito menos estável que o físico. A diferença entre as amplitudes reforça essa leitura: enquanto as médias físicas variaram apenas  $0,074$  mm entre os furos, as médias digitais variaram  $0,604$  mm, valor mais de oito vezes superior, indicando amplificação artificial da variabilidade entre feições nominalmente semelhantes.

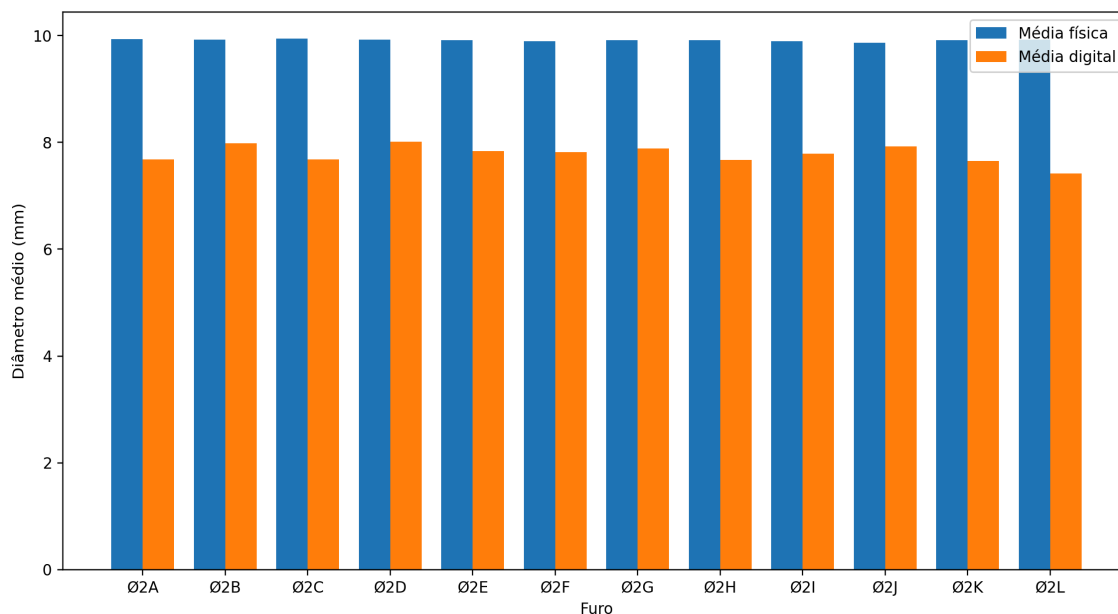
Essa tendência pode ser visualizada na Figura 11, na qual todas as médias digitais permanecem abaixo das médias físicas correspondentes.

Tabela 3 – Síntese global dos indicadores de desempenho do método.

<b>Indicador</b>	<b>Valor</b>
Erro médio assinado	$-2,136$ mm
Erro absoluto médio	$2,136$ mm
Erro relativo médio absoluto	$21,55$ %
Desvio padrão médio das medições físicas	$0,005$ mm
Desvio padrão médio das medições digitais	$0,167$
Razão entre os desvios padrão médios (digital/físico)	$29,79$
Amplitude entre as médias físicas dos furos	$0,074$ mm
Amplitude entre as médias digitais dos furos	$0,604$ mm
Teste $t$ pareado	$t = -42.218, p = 1.603e -$
13 Bland–Altman: viés médio	$-2,136$ mm
Bland–Altman: limite inferior de concordância	$-2,480$ mm
Bland–Altman: limite superior de concordância	$-1,793$ mm

Fonte: Próprio autor.

Figura 11 – Comparativo dimensional entre medição física e digital por furo, evidenciando viés sistemático de contração nas medições digitais.

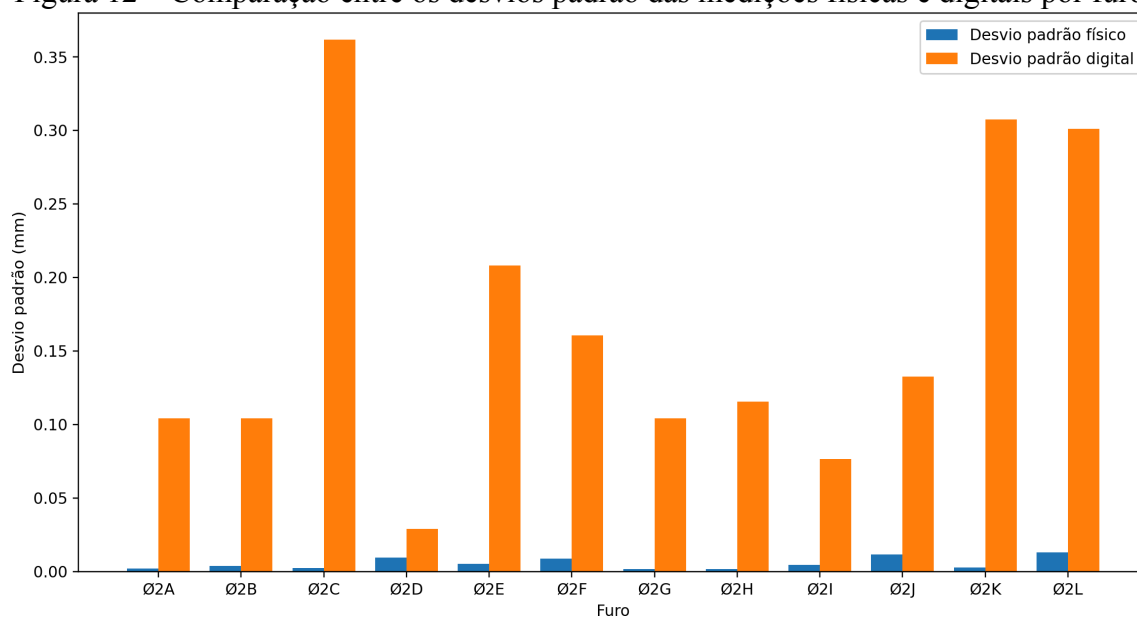


Fonte: Próprio autor.

A Figura 11 mostra que os doze furos apresentaram subdimensionamento digital, sem exceção. A leitura gráfica confirma os valores da Tabela 1: Ø2D foi o furo menos contraído, com média física de 9,927 mm e média digital de 8,017 mm, ao passo que Ø2L apresentou a maior diferença, passando de 9,923 mm para 7,413 mm. O fato de não haver qualquer caso em que a média digital se aproxime da física por oscilação aleatória em torno do valor de referência indica que o problema observado não é meramente dispersivo, mas fortemente direcional.

A diferença de estabilidade entre os dois procedimentos de medição aparece de forma ainda mais clara na Figura 12.

Figura 12 – Comparação entre os desvios padrão das medições físicas e digitais por furo.

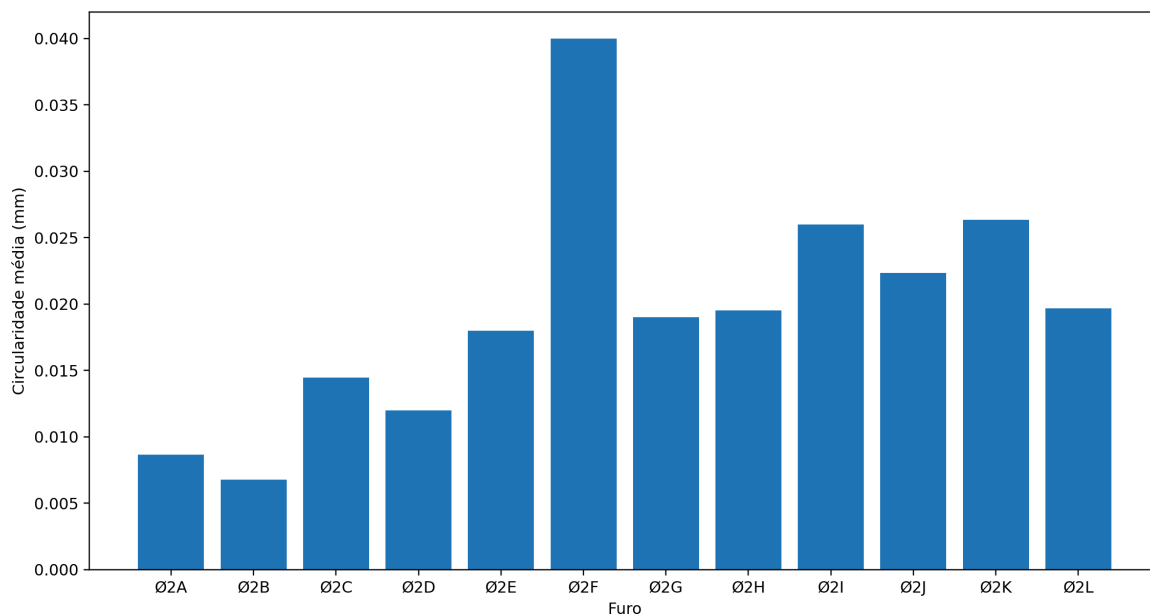


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 12, observa-se que os desvios padrão físicos permaneceram muito baixos em todo o conjunto, variando de 0,002 mm em Ø2A, Ø2G e Ø2H até 0,013 mm em Ø2L, conforme os dados da Tabela 1. Já os desvios padrão digitais oscilaram entre 0,029 mm em Ø2D e 0,362 mm em Ø2C, com valores também elevados em Ø2K, com 0,307 mm, e Ø2L, com 0,301 mm. Essa diferença ajuda a explicar por que o desvio padrão médio digital atingiu 0,167 mm, contra apenas 0,006 mm no conjunto físico, como resumido na Tabela 2. Assim, o problema não se restringe ao desvio médio entre métodos; ele também envolve baixa repetitividade na leitura digital dos mesmos furos.

A avaliação de forma acrescenta outra dimensão à análise. A Figura 13 apresenta a circularidade média obtida para cada furo, enquanto a Tabela 2 permite identificar numericamente os extremos e as tendências intermediárias.

Figura 13 – Desvio de forma por furo, expresso pela circularidade média extraída do modelo digital.

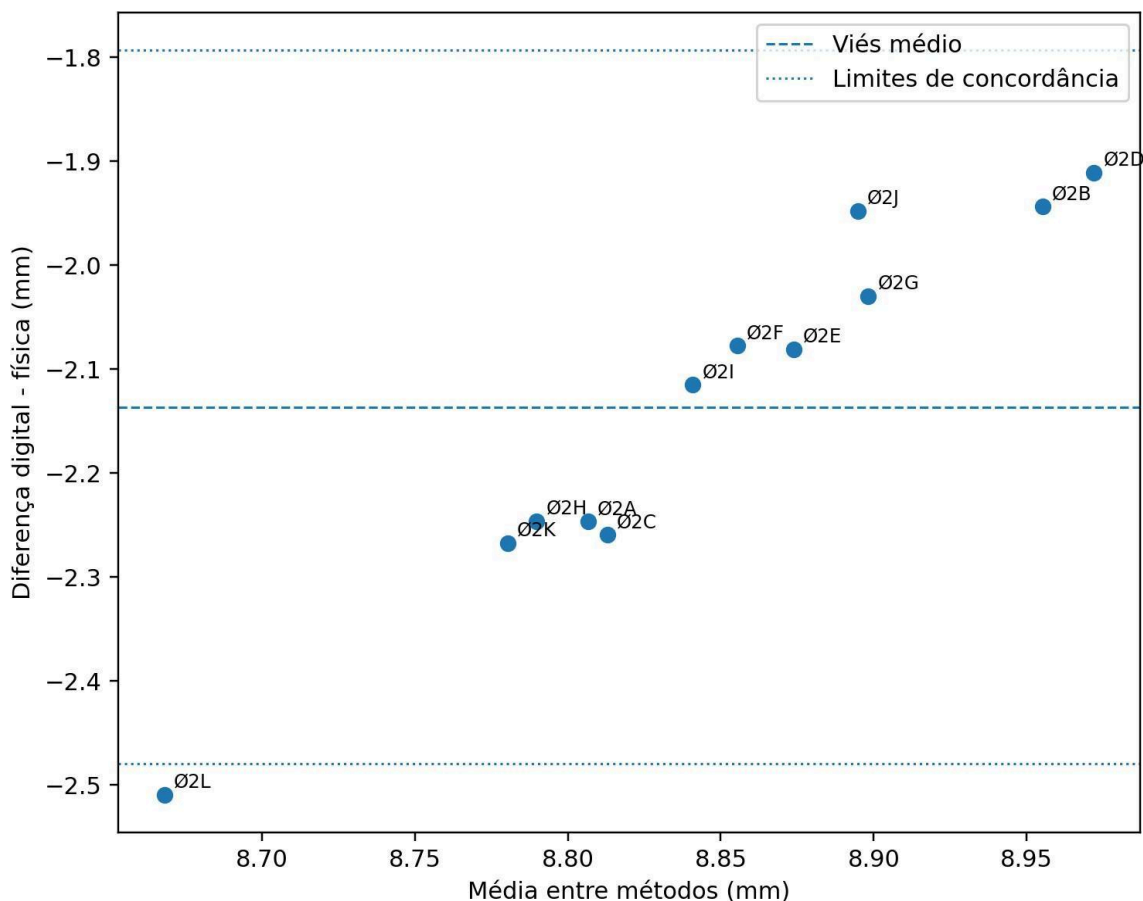


Fonte: Próprio autor.

Os valores de circularidade da Figura 13 e da Tabela 2 mostram que a qualidade geométrica dos furos não foi homogênea. O melhor resultado ocorreu em Ø2B, com circularidade média de 0,007 mm, seguido de Ø2A, com 0,009 mm, e Ø2D, com 0,012 mm. No extremo oposto, Ø2F apresentou o pior valor, com 0,040 mm, enquanto Ø2I e Ø2K atingiram 0,026 mm, e Ø2J, 0,022 mm. A circularidade média global do conjunto foi de aproximadamente 0,019 mm. Esses números indicam que houve degradação de forma, mas também sugerem que ela não foi uniforme nem perfeitamente proporcional ao erro dimensional, já que furos com circularidade relativamente moderada ainda apresentaram erros absolutos elevados.

A análise estatística comparativa reforça essa interpretação. O teste t pareado entre as médias físicas e digitais por furo resultou em  $t = -42.218$  e  $p = 1.603 \times 10^{-13}$ , valores apresentados na Tabela 3, indicando diferença estatisticamente significativa entre os métodos. Complementarmente, a análise de Bland–Altman apontou viés médio de  $-2,136$  mm, limite inferior de concordância de  $-2,480$  mm e limite superior de  $-1,793$  mm, também sintetizados na Tabela 2 e visualizados na Figura 14.

Figura 14 – Gráfico de Bland–Altman construído a partir das médias físicas e digitais por furo.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 14, percebe-se que as diferenças entre métodos permanecem concentradas em torno de um viés negativo elevado, sem qualquer aproximação real da linha de diferença nula. Como os limites de concordância se estendem de  $-2,480$  mm a  $-1,793$  mm, a discordância entre os dois métodos se mantém grande em todo o intervalo analisado. Isso significa que, mesmo admitindo a variabilidade natural do processo, a medição digital não apresentou concordância aceitável com a medição física na escala geométrica investigada.

## 5 Discussão

Os resultados indicam que o sistema avaliado não foi apenas pouco preciso, mas simultaneamente enviesado e pouco repetitivo para a característica geométrica investigada. Essa interpretação decorre da combinação entre os dados da Tabela 1, da síntese apresentada na Tabela 2 e das tendências visuais mostradas nas Figuras 11, 12, 13 e 14. O viés é evidenciado pelo fato de todos os doze furos apresentarem média digital inferior à média física, com erro médio assinado de  $-2,136$  mm e erro relativo médio absoluto de  $21,55$  % (Tabela 3; Figura 11). A baixa repetitividade, por sua vez, aparece no contraste entre o desvio padrão médio físico, de  $0,005.6$  mm, e o digital, de  $0,167.1$  mm, isto é, uma dispersão  $29,79$  vezes maior no conjunto digital (Tabela 2; Figura 12). Em termos metrológicos, trata-se de condição mais crítica do que um simples erro de escala, porque o modelo não conserva nem o valor absoluto nem a estabilidade da medição.

Essa leitura se fortalece quando se considera que a normalização métrica do modelo foi realizada em CAD com base em uma dimensão física de referência de  $100$  mm. Se, mesmo após o escalonamento, persistem erros absolutos entre  $1,911$  mm e  $2,510$  mm, conforme a Tabela 1, então o problema remanescente não pode ser atribuído apenas à ausência de escala absoluta na etapa inicial da reconstrução. O comportamento observado aponta para degradação local da geometria das cavidades e, possivelmente, para limitações da forma como essa geometria foi posteriormente medida.

Os resultados não negam a viabilidade da fotogrametria de baixo custo em sentido amplo; eles delimitam sua faixa de aplicação. Tannús et al. (2019) concluíram que a fotogrametria foi superior a um sistema de luz estruturada de baixo custo na reconstrução de um pequeno objeto de superfícies difusas, com diferenças lineares da ordem de milímetros e melhor qualidade visual. Castro, Ortoncelli e Marcon (2026) também observaram que a fotogrametria se mostrou alternativa viável, sobretudo por preservar a forma dos objetos sem gerar lacunas tão evidentes quanto alguns sensores. Brandão, Gomes e Silva (2026), por sua vez, demonstraram viabilidade técnica da fotogrametria com smartphone em maquete física, desde que o planejamento de captura fosse adequado. No presente estudo, porém, a questão central não é a reconstrução visual de superfícies externas, mas a medição de furos internos nominais de  $10$  mm. Nessa condição, a fronteira entre um modelo visualmente coerente e um modelo dimensionalmente confiável se torna muito mais restritiva.

A discussão apresentada por Tóth e Živčák (2014) é particularmente útil para interpretar esse ponto. Ao desenvolverem um corpo de prova comparativo para scanners, os autores excluíram aberturas profundas de pequeno diâmetro e outras geometrias desfavoráveis às tecnologias empregadas. Essa escolha sugere que pequenas cavidades internas já são reconhecidas, na literatura, como um caso não trivial de digitalização. O desempenho insuficiente observado aqui é coerente com esse diagnóstico. Os dados da Figura 11 e da Tabela 1 mostram que nenhum dos furos alcançou proximidade dimensional aceitável com o valor físico, e os piores casos, como Ø2L, com média digital de 7,413 mm para média física de 9,923 mm, e Ø2K, com 7,647 mm para 9,914 mm, indicam forte sensibilidade da medição ao contorno reconstruído.

A literatura de Brandão, Gomes e Silva (2026), Castro, Ortoncelli e Marcon (2026) e Coelho (2023) converge ao apontar textura, iluminação e comportamento superficial como fatores decisivos em fluxos fotogramétricos. Superfícies homogêneas, pouco texturizadas ou refletivas dificultam a correspondência robusta entre imagens e podem produzir ruído geométrico, ondulações e instabilidades na malha. No experimento desenvolvido, houve preparação superficial do corpo de prova antes da etapa final de medição, justamente para reduzir efeitos ópticos desfavoráveis. Ainda assim, os resultados permaneceram críticos, com erro absoluto médio de 2,136 mm e circularidade média global de 0,019 mm (Tabela 2). Isso sugere que a preparação superficial foi uma condição importante, mas insuficiente, para assegurar fidelidade dimensional local nas cavidades internas.

Complementarmente à questão da textura, a configuração de iluminação estática durante o processo de aquisição atuou como um limitador crítico para a exatidão do método. Na fotogrametria baseada em Structure from Motion (SfM), o algoritmo assume a premissa de que a superfície do objeto é Lambertiana, ou seja, que sua aparência permanece constante independentemente do ângulo de visão. No entanto, ao utilizar fontes de luz fixas enquanto a câmera executa uma trajetória orbital, ocorre um deslocamento relativo das sombras e dos brilhos sobre a geometria da peça. Nos furos de 10 mm, essa variação de iluminação cria zonas de penumbra dinâmicas que dificultam a correlação exata de pontos homólogos, resultando no ruído geométrico e na instabilidade digital observada, onde a dispersão foi 29,79 vezes superior à física.

Outro aspecto decisivo é que o modelo digital não apenas subestimou os diâmetros, mas também alterou a estrutura relativa do conjunto. Nas medições físicas, as médias dos furos variaram apenas 0,074 mm; no ambiente digital, essa amplitude subiu para 0,603 mm, como mostra a Tabela 2. Em termos práticos, isso significa que a variabilidade aparente

entre furos foi artificialmente ampliada. Assim, o erro observado não pode ser descrito como um simples offset removível por correção escalar única. Ao lado do viés médio negativo, houve aumento expressivo da dispersão e distorção da variabilidade relativa entre características que, fisicamente, eram bastante próximas.

Os valores de circularidade reforçam a ideia de degradação geométrica, mas sua interpretação exige cautela. A Figura 13 e a Tabela 1 mostram que Ø2F apresentou a pior circularidade, com 0,040 mm, enquanto Ø2B apresentou a melhor, com 0,007 mm. No entanto, o maior erro absoluto não ocorreu em Ø2F, mas em Ø2L, com 2,510 mm. Esse desacoplamento parcial entre circularidade e erro absoluto indica que a perda de forma contribui para o problema, mas não explica sozinha a magnitude da contração observada. Em outras palavras, não basta que a borda se torne menos circular; importa também como ela é reconstruída, amostrada e interpretada durante a medição.

Nesse ponto, a limitação do procedimento de medição ganha centralidade. Conforme discutido no capítulo metodológico, a reconstrução geométrica foi feita no Siemens NX a partir de seleção manual de pontos, com uso de ferramenta do tipo Circle by 3 Points, e não por ajuste estatístico completo sobre toda a borda disponível. Em modelos facetados, pequenas irregularidades locais podem deslocar significativamente a fronteira geométrica aparente da feição, sobretudo em cavidades internas pequenas, como discutido por Shakarji (1998) e compatível com o tratamento de dados facetados no ambiente NX (Siemens, 2024). A diferença entre os desvios padrão médios físico e digital, 0,005 mm contra 0,167 mm, respectivamente, na Tabela 2, é compatível com essa leitura: o resultado final incorpora não apenas limitações ópticas e geométricas da malha, mas também a dependência do operador na seleção da região medida.

A análise estatística confirma que essa discordância não é apenas visualmente perceptível, mas quantitativamente robusta. O teste t pareado produziu  $t = -42.218$  e  $p = 1.603 \times 10^{-13}$  (Tabela 2), o que indica diferença estatisticamente significativa entre os métodos. A análise de Bland–Altman acrescenta interpretação metrológica mais direta: o viés médio foi de  $-2,136$  mm, com limites de concordância entre  $-2,480$  mm e  $-1,793$  mm (Tabela 2; Figura 14). Esses valores mostram que a discordância não é pequena nem marginal frente à escala do problema; ao contrário, ela permanece elevada em todo o intervalo analisado.

Em síntese, os resultados permitem delimitar com clareza a fronteira de aplicabilidade do método. Na configuração experimental adotada, a fotogrametria de baixo custo mostrou-se suficiente para reconstruir a macrogeometria do corpo de prova, viabilizar

a manipulação em CAD e permitir inspeção qualitativa geral da peça, em consonância com aplicações de documentação geométrica, engenharia reversa conceitual e estudo morfológico de contornos externos, como também sugerem os trabalhos de Tannús et al. (2019), Brandão, Gomes e Silva (2026) e Castro, Ortoncelli e Marcon (2026). Por outro lado, na mesma configuração, o método se mostrou inadequado para inspeção dimensional de furos internos de 10 mm, pois combinou erro absoluto médio superior a 2 mm, dispersão digital elevada, perda de fidelidade relativa entre furos e ausência de concordância aceitável com a medição física.

## **6. CONCLUSÃO**

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

1. o fluxo fotogramétrico empregado foi capaz de reconstruir a macrogeometria do corpo de prova e gerar malha manipulável em ambiente CAD;
2. todos os doze furos nominais de 10 mm apresentaram subestimação nas medições digitais, com erro médio assinado de  $-2,136$  mm e erro absoluto médio de  $2,136$  mm;
3. a medição digital apresentou baixa repetitividade em relação à medição física, com desvio padrão médio  $29,79$  vezes maior;
4. o modelo digital não preservou satisfatoriamente a variabilidade relativa entre os furos, ampliando artificialmente as diferenças entre características nominalmente semelhantes;
5. a circularidade indicou degradação geométrica não uniforme da forma dos furos;
6. o teste  $t$  pareado e a análise de Bland–Altman confirmaram ausência de concordância aceitável entre as medições físicas e digitais;
7. na configuração testada, o método mostrou-se adequado para representação geométrica global e engenharia reversa conceitual, mas inadequado para inspeção dimensional de furos internos de 10 mm.

## 7 Limitações do estudo e sugestão para trabalhos futuros

As principais limitações do estudo podem ser assim sintetizadas. Em primeiro lugar, detalhes de aquisição como modelo da câmera, lente, número de imagens, distância de captura e configuração completa do processamento fotogramétrico não foram registrados de forma suficientemente detalhada. Em segundo lugar, a referência física utilizada não foi acompanhada de documentação formal de calibração e incerteza, o que restringe a discussão metrológica em nível mais rigoroso (Bipm, 2008; Jcgm, 2012). Em terceiro lugar, não foi conduzido experimento controlado capaz de separar quantitativamente a contribuição de textura, iluminação, oclusão, algoritmo de reconstrução e procedimento de medição em CAD para o erro final observado.

Como desdobramentos futuros, recomenda-se documentar integralmente a cadeia de aquisição e processamento, comparar o mesmo corpo de prova sob diferentes estratégias de iluminação, textura superficial e redundância fotográfica, repetir o procedimento com sistema de referência metrológica mais robusto, avaliar separadamente geometrias externas e internas e comparar estratégias de ajuste geométrico dos furos, incluindo *best-fit* por múltiplos pontos. Esse tipo de aprofundamento é importante para distinguir quanto do erro observado decorre da própria reconstrução fotogramétrica e quanto decorre da etapa de inferência geométrica sobre malha facetada, aspecto particularmente relevante em aplicações metrológicas (Shakarji, 1998; Siemens, 2024).

## REFERÊNCIAS

- Agisoft. *Agisoft Metashape User Manual: Standard Edition, Version 1.8*. St. Petersburg, 2022.
- BIPM. JCGM 100:2008: Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Sèvres, 2008.
- BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, v. 1, n. 8476, p. 307–310, 1986.
- BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical Methods in Medical Research*, v. 8, n. 2, p. 135–160, 1999.
- BRANDÃO, R. J. F.; GOMES, L.; SILVA, R. N. F. Aplicação de fotogrametria baseada em SfM com smartphone de baixo custo para documentação tridimensional de maquete arquitetônica. *Revista de Gestão e Secretariado*, v. 17, n. 1, p. 1–15, 2026.
- BUSSAB, W. d. O.; MORETTIN, P. A. *Estatística Básica*. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.
- CASTRO, B. B. d.; ORTONCELLI, A. R.; MARCON, M. Performance evaluation of low-cost 3d scanning techniques. *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, v. 33, n. 2, p. 106–114, 2026.
- COELHO, D. d. M. *Avaliação Operacional de Sistemas de Escaneamento 3D de Baixo Custo para Inspeção de Componentes Fabricados por Manufatura Aditiva*. Uberlândia, 2023. Projeto de fim de curso.
- JCGM. *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*. Sèvres, 2012. JCGM 200:2012.
- SHAKARJI, C. M. Least-squares fitting algorithms of the nist algorithm testing system. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, v. 103, n. 6, p. 633–641, 1998.
- Siemens. *Siemens NX 2306 Help Documentation: Convergent Modeling and Inspection*. Plano, TX, 2024.
- TANNÚS, J. et al. Comparação entre técnicas de fotogrametria e escaneamento de luz estruturada para reconstrução de objetos em 3d. In: *Anais do Workshop de Iniciação Científica do Simpósio de Realidade Virtual e Aumentada*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Computação, 2019. p. 21–22.
- TÓTH, T.; ŽIVČÁK, J. A comparison of the outputs of 3d scanners. *Procedia Engineering*, v. 69, p. 393–401, 2014.