

Performance Evaluation of Low-Cost 3D Scanning Techniques

Avaliação de Desempenho de Técnicas de Digitalização 3D de Baixo Custo

Bruno Biz de Castro¹, André Roberto Ortoncelli¹, Marlon Marcon^{1*}

Resumo: This study evaluates the performance of three low-cost 3D scanning techniques: structured light sensors (using a Kinect and a CR-Scan Ferret) and photogrammetry, to capture 3D-printed physical models. The research compares the resulting 3D models with the original digital models to assess each technique's accuracy and the effectiveness of low-cost methods. The study's workflow involved printing four 3D models, scanning them, and comparing the models using similarity metrics like Hausdorff distance, RMSE, and Chamfer distance. The CR-Scan Ferret generally outperformed the other methods, particularly in capturing detail. However, it sometimes produced gaps that required filling. Photogrammetry was a viable alternative, excelling at preserving object shapes without creating gaps. The Kinect, while accessible, consistently delivered the lowest performance, struggling to reproduce object details and forms accurately.

Keywords: 3D scanning — low-cost sensors — photogrammetry — structured light — comparative analysis

Resumo: Este trabalho avaliou o desempenho de diferentes técnicas de digitalização 3D de baixo custo na captura de modelos físicos impressos em 3D. A pesquisa comparou sensores de luz estruturada (Kinect e CR-Scan Ferret) e a fotogrametria, utilizando métricas de similaridade como a Distância de Hausdorff e o Erro Quadrático Médio (RMSE). O processo incluiu a impressão de modelos, a digitalização e a comparação dos resultados com os modelos originais. O CR-Scan Ferret se destacou pela sua precisão e riqueza de detalhes, superando as demais técnicas. A fotogrametria se mostrou uma alternativa promissora, capaz de gerar modelos de alta qualidade sem lacunas, mas exigindo mais tempo e conhecimento técnico. O Kinect, por sua vez, apresentou resultados limitados e inadequados para aplicações que exigem alta precisão. A escolha da técnica ideal deve considerar as características do objeto e o nível de detalhamento desejado.

Palavras-Chave: digitalização 3D — sensores de baixo custo — fotogrametria — luz estruturada — análise comparativa

¹Coordenação de Engenharia de Software, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Brasil

*Corresponding author: marlonmarcon@utfpr.edu.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.22456/2175-2745.150932> • Received: 14/10/2025 • Accepted: 03/11/2025

CC BY-NC-ND 4.0 - This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

1. Introdução

A visão computacional (VC) é uma área da ciência da computação que permite que máquinas vejam e interpretem o mundo visual. Através de imagens, a VC extrai informações como forma, cor e profundidade, possibilitando diversas aplicações em áreas como medicina, agricultura e transporte.

O processo da VC envolve quatro etapas principais: aquisição de imagens, processamento, extração de características e reconhecimento de padrões. A modelagem 3D, por sua vez, oferece uma representação tridimensional mais completa dos objetos, permitindo uma compreensão mais profunda do ambiente. Apesar disso, ainda se depara com obstáculos que limitam sua ampla adoção. O custo elevado de equipamentos, a necessidade de conhecimento técnico especializado para

capturar e reconstruir modelos e a escassez de ferramentas e softwares acessíveis para usuários leigos são alguns dos principais desafios que a tecnologia enfrenta.

De acordo com [1], aparelhos de baixo custo são considerados sinônimos de aparelhos de nível de consumidor ou economicamente acessíveis. Dentre os trabalhos revisados por estes autores, muitos consideram como de baixo custo, dispositivos com um preço inicial de aproximadamente 5000 euros. No contexto deste trabalho, considerando uma realidade econômica do Brasil, foram considerados como sendo de baixo custo aparelhos que custam até 1500 dólares.

Este trabalho visa realizar um estudo comparativo, bem como propor uma metodologia para a digitalização 3D de objetos utilizando câmeras e técnicas de baixo custo, visando tornar essa tecnologia mais acessível e difundida.

2. Trabalhos relacionados

Diversos estudos avaliam e comparam a acurácia de técnicas de digitalização 3D de baixo custo, como fotogrametria baseada em smartphones e sensores de luz estruturada (ex: Kinect, CR-Scan Ferret), especialmente para reconstrução de objetos físicos. A seguir, são destacados trabalhos relevantes que analisam a qualidade das malhas 3D geradas, utilizando métricas como distância de Hausdorff, RMSE e Chamfer, além de discutir desafios e limitações dessas abordagens.

2.1 Avaliação de acurácia e métricas de qualidade

A fotogrametria com smartphones, quando bem configurada (com parâmetros como câmera acima de 12 MP, ângulo de 30°, pós-processamento adequado), pode atingir erros inferiores a 0,075 mm e erro médio abaixo de 3,5% em comparação com scanners a laser, mostrando-se bastante precisa para objetos de pequeno porte [2]. Já sistemas baseados em luz estruturada, como o Kinect e scanners do tipo DAVID [3], apresentam acurácia variável com desempenho comparável a métodos de referência em modelos de menos detalhados, mas menor precisão em detalhes complexos [4, 5, 6].

Sensores de profundidade de baixo custo (ex: RealSense, ZED, Kinect) apresentam desempenho aceitável em ambientes controlados, mas a acurácia real frequentemente é inferior à especificada pelos fabricantes, especialmente em condições de iluminação não ideais ou para superfícies reflexivas/transparentes [7, 8, 9, 10]. O RMSE e a distância de Hausdorff são amplamente utilizados para quantificar desvios entre o modelo digital e o objeto real [2, 4, 9].

2.2 Desafios e limitações

Condições de iluminação A fotogrametria é altamente sensível à iluminação, exigindo luz difusa e homogênea para evitar sombras e reflexos que prejudicam a reconstrução [2, 11].

Pós-processamento Métodos baseados em imagens (fotogrametria) demandam processamento manual significativo para alinhamento, limpeza e fechamento de malhas, enquanto sensores de luz estruturada tendem a gerar malhas mais completas automaticamente [8, 2].

Superfícies problemáticas Objetos translúcidos, brilhantes ou muito detalhados apresentam maior erro de reconstrução, especialmente em scanners a laser ou luz estruturada de baixo custo [9, 10].

Repetibilidade e incerteza A repetibilidade das medições pode ser limitada, com variações de até 1 mm entre digitalizações sucessivas em scanners a laser de baixo custo [9].

Técnicas de digitalização 3D de baixo custo, como fotogrametria com smartphones e sensores de luz estruturada, podem gerar malhas precisas para muitos usos, mas apresentam limitações em superfícies complexas, condições de iluminação e exigem pós-processamento manual significativo. A escolha da técnica depende do objeto, ambiente e precisão desejada [2, 8, 9, 5, 4, 6, 10, 11, 7].

3. Materiais e Métodos

Este trabalho consiste em uma análise comparativa entre a captura e digitalização de objetos em 3D por meios distintos, utilizando sensores de luz estruturada e técnicas de fotogrametria, visando averiguar a capacidade de meios de digitalização de baixo custo se equivalerem a sensores de alto nível.

Com o objetivo de garantir a variabilidade da análise, foram selecionados quatro modelos 3D do repositório da Stanford [12], abrangendo diferentes níveis de complexidade geométrica. Estes são amplamente utilizados na literatura e considerados como paradigmas na área de reconstrução e digitalização de objetos tridimensionais. A Figura 1 apresenta modelos em sua forma original pelo programa MeshLab [13].

A fim de realizar os testes propostos, os modelos selecionados foram materializados por meio de impressão 3D, usando a impressora Creality ENDER-3 V3 KE com filamento PLA e camada de 0,20mm. Foi usado filamento branco nos modelos Dragon, Buddha, Armadillo e preto no modelo Bunny. O tamanho dos modelos foi padronizado para uma altura de 20cm, mantendo a proporção para as outras dimensões. A Tabela 1 apresenta as dimensões e a Figura 2 apresenta os resultados para cada uma das impressões.

Tabela 1. Dimensões dos modelos impressos

Modelo	Altura	Largura	Profundidade
Bunny	20,0 cm	20,2 cm	15,6 cm
Dragon	20,0 cm	28,4 cm	12,7 cm
Armadillo	20,0 cm	16,8 cm	15,3 cm
Buddha	20,0 cm	8,2 cm	8,2 cm

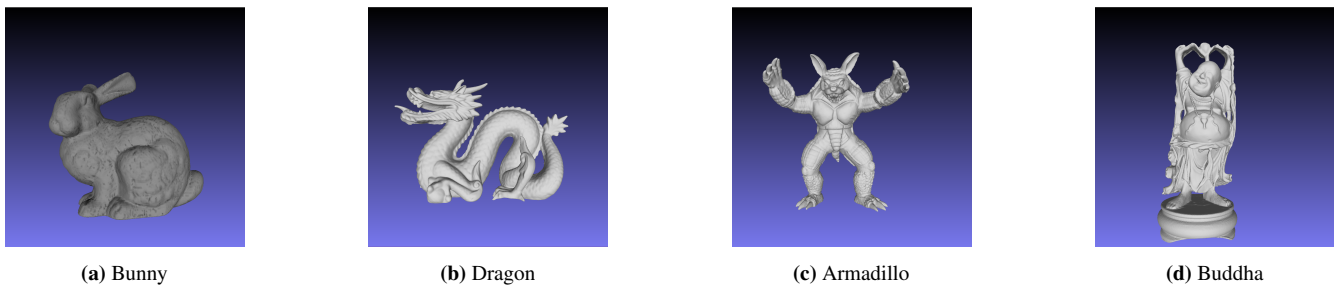
Após a impressão, os suportes de contato com a mesa de impressão foram removidos e foi realizado um lixamento para a remoção do excesso de filamento, que não pertencia ao modelo original. Esta abordagem reflete um cenário realista de uso de equipamentos de baixo custo, embora possa introduzir pequenas variações em relação aos modelos digitais originais, um fator limitante para a análise dos resultados.

O processo consistiu em: 1) Imprimir os modelos com dimensões conhecidas e padronizadas; 2) Digitalizar os modelos impressos por meio das técnicas estudadas; e 3) Comparar os modelos originais e digitalizados por meio de métricas de similaridade.

As seções abaixo se dividem em quatro partes principais: a primeira apresenta as ferramentas e equipamentos utilizados na captura, processamento e análise; a segunda descreve a metodologia empregada na aquisição de dados para cada técnica; a terceira seção detalha o processo de preparação dos dados para análise; e, enfim, a análise de dados, onde serão apresentadas as métricas de comparação.

3.1 Ferramentas

CR-Scan Ferret é um scanner de luz estruturada com software de pós-processamento próprio. Dentre os dispositivos utilizados neste trabalho, este apresenta o maior custo, com valor de referência de US\$ 329,00 [14];

**Figura 1. Modelos Originais****Figura 2. Resultado Impressão**

Kinect Este sensor é um dispositivo de baixo custo, quando comparado com os demais scanners disponíveis no mercado, entretanto, sua funcionalidade como scanner 3D depende da combinação com o software KinectFusion [15] para a digitalização dos objetos.

Fotogrametria A fotogrametria é uma técnica de medição e análise de objetos ou cenários a partir de fotografias. Utilizando imagens capturadas por câmeras digitais, drones ou satélites, ela permite a obtenção de dados tridimensionais de grande precisão. A fotogrametria pode ser classificada em dois tipos principais: fotogrametria terrestre, realizada a partir de câmeras posicionadas em locais fixos ou móveis e a fotogrametria aérea, que utiliza imagens obtidas por aeronaves ou drones. O avanço tecnológico nos últimos anos, como o uso de drones e softwares de processamento de imagens, tem ampliado ainda mais as aplicações da fotogrametria, tornando-a uma ferramenta essencial para estudos de grande escala e alta resolução [16].

3.2 Procedimento de Captura

A captura dos modelos foi realizada de duas formas distintas, utilizando uma plataforma giratória customizada para os sensores Kinect e CR-Scan Ferret e a "mão-livre" para a técnica de fotogrametria. A razão para diferenciar a forma de aquisição se deu à dificuldade de triangulação para imagens capturadas a partir de um mesmo ângulo e distância do objeto.

No caso dos sensores estáticos, o objeto a ser digitalizado era posicionado sobre a plataforma, que executava uma leve rotação a cada segundo (6° por segundo). A iluminação do ambiente era branca posicionada no teto da sala e o sensor estava em um ponto fixo, diretamente à frente da mesa, a aproximadamente 30 cm de distância do modelo e na mesma altura. O ângulo de captura se manteve constante, com um ângulo

reto em relação ao centro do objeto ($\text{altura}/2$) sendo escaneado. Cada captura levou 120 segundos, que correspondem a duas voltas completas da base giratória.

Para definir a metodologia ideal de captura com os dispositivos Kinect e Ferret, foram realizados testes individuais variando a distância e o ângulo dos dispositivos em relação aos modelos. O objetivo era encontrar um posicionamento que garantisse resultados consistentes e comparáveis entre ambos os sensores. Como critério de aceitabilidade, considerou-se a cobertura completa dos objetos sem perda de elementos estruturais. A principal dificuldade encontrada foi equilibrar a altura do modelo Buddha com a largura do modelo Dragon, garantindo que ambos fossem digitalizados de forma íntegra. Após ajustes sucessivos, chegou-se a um conjunto de condições padronizadas que asseguraram a melhor captura possível. Esse processo de calibração demandou entre duas e três horas para ser concluído. A Figura 3 apresenta, por meio do software MeshLab, a captura inicial dos modelos pelos aparelhos Kinect, Ferret e Fotogrametria respectivamente, incluindo a base giratória, antes do pré-processamento.

A coleta de dados para fotogrametria foi realizada ao ar livre em tempo nublado, com iluminação natural difusa, entre 12h30 e 13h00, para garantir condições de iluminação homogêneas. É importante salientar que, como a Fotogrametria utiliza somente imagens capturadas por sensores de luz visível, é importante que existam pontos de triangulação das imagens para cálculo da profundidade, e como os modelos impressos não possuem textura, foi necessário induzir a diferença na cor do objeto pelo sombreamento do mesmo.

A definição das condições ideais para a captura por fotogrametria exigiu uma série de testes para minimizar interferências causadas pela iluminação. Inicialmente, os experimentos foram conduzidos em um ambiente externo com forte inci-

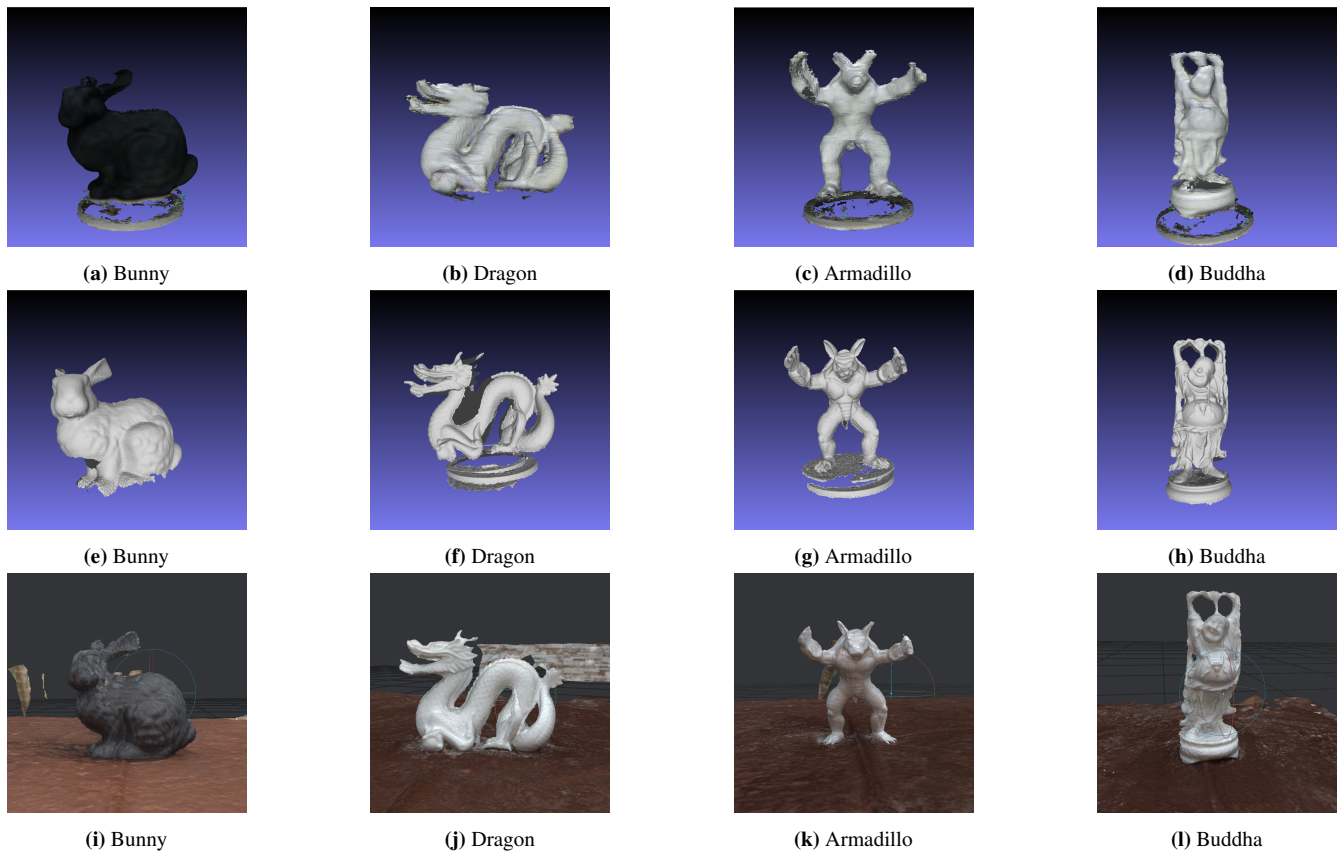


Figura 3. Resultado da digitalização inicial. Kinect (a-d), Ferret (e-h) e Fotogrametria (i-l)

dência de luz solar, seguidos por capturas em um ambiente interno iluminado por lâmpadas incandescentes comuns e, posteriormente, com o auxílio de uma luminária adicional. No entanto, em todas essas condições, a presença de sombras intensas comprometeu a qualidade da reconstrução dos modelos. Após múltiplos ajustes, chegou-se à configuração utilizada neste trabalho, que proporcionou resultados mais estáveis e detalhados. Esse processo demandou vários dias e um alto número de horas de trabalho, considerando que cada teste exigia, no mínimo, 80 fotografias, além do processamento completo das imagens no software MeshRoom [17].

Os objetos foram colocados sobre um manto marrom, a fim de criar contraste com a cor do filamento. Um smartphone Samsung S22 Ultra, configurado no modo profissional com ISO 50 e velocidade do obturador 1/1000s, foi utilizado para capturar cerca de 90 imagens por modelo. Foi mantido um padrão para a captura; primeiramente, foi realizado um círculo ao redor do objeto em distância constante, capturando imagens suficientes para garantir a completa cobertura da superfície e sobreposição das imagens. Então, foram capturados ângulos superiores e, por fim, imagens próximas para captura de detalhes. A Figura 4 ilustra, no software MeshRoom, o padrão de captura utilizado para o modelo Dragon, sendo que cada ponto de visão, bem como a angulação da câmera no momento da captura das imagens, são representados de forma gráfica.

As imagens capturadas foram submetidas a um processo de reconstrução 3D utilizando o software Meshroom. Com base nos parâmetros padrão do software, foram gerados modelos 3D dos objetos, conforme demonstrado na Figura 3.

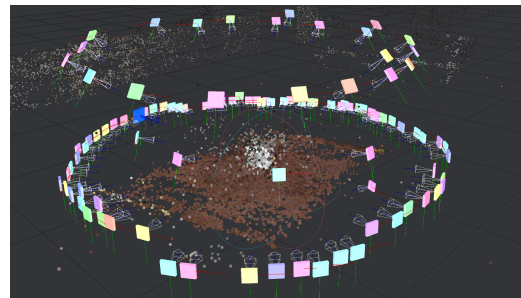


Figura 4. Ângulos de captura na fotogrametria

A Tabela 2 evidencia a disparidade entre o número de fotos capturadas e aquelas efetivamente utilizadas pelo software MeshRoom. O modelo Bunny, em particular, apresentou um alto índice de rejeição, atribuído à baixa refletividade do filamento preto sob a iluminação utilizada, o que limitou a reconstrução 3D à face frontal.

3.3 Processo de Preparação dos Modelos

A análise comparativa dos modelos 3D exigiu uma série de etapas de processamento prévio dos dados. Inicialmente, as digitalizações obtidas foram submetidas a um processo de seg-

Tabela 2. Capturas realizadas para a técnica de Fotogrametria

Modelo	Fotos Capturadas	Fotos Aceitas
Bunny	90	36
Dragon	100	100
Armadillo	99	99
Buddha	72	72

mentação das regiões de interesse, para isolar os objetos 3D do fundo e da base de suporte. Para garantir a integridade geométrica dos modelos, foram preenchidas as lacunas existentes. Os modelos originais e os provenientes da fotogrametria foram redimensionados usando os modelos do Ferret como base para as medidas, estabelecendo um sistema de coordenadas comum, permitindo a comparação direta entre eles. Por fim, foi realizado o alinhamento entre cada modelo digitalizado em comparação com o seu modelo original equivalente.

1. Isolamento: Para isolar os modelos 3D e garantir a precisão das comparações, foi necessário remover as porções indesejadas. Essa tarefa foi realizada manualmente no software MeshLab, que, por meio da ferramenta de seleção de vértices, foram selecionados e removidos os vértices da base de apoio. Esta etapa foi replicada para todos os modelos.

2. Preenchimento: A fim de garantir a integridade geométrica dos modelos, foram preenchidos os buracos presentes nas malhas. Utilizando o MeshLab, as bordas dos modelos foram selecionadas automaticamente e suavizadas por meio do filtro de Laplace. Em seguida, o algoritmo de preenchimento de buracos nativo do software foi aplicado. Esta etapa foi realizada apenas nos modelos do sensor Kinect e do scanner Ferret, pois nestes casos os modelos apresentaram áreas não capturadas devido ao ângulo fixo da fase de aquisição.

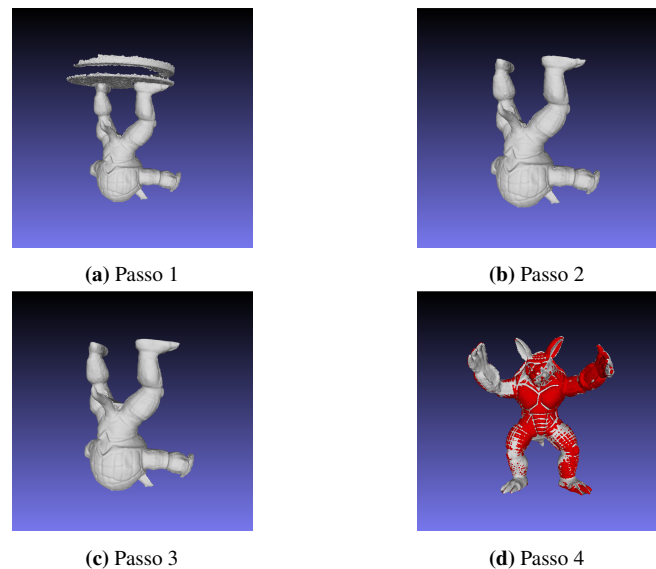
3. Redimensionamento: A etapa de redimensionamento foi crucial para garantir a comparabilidade entre os modelos obtidos pelas diferentes técnicas de digitalização. Considerando a maior qualidade visual dos modelos gerados pelo sensor Ferret, estes foram utilizados como referência dimensional. Inicialmente, foram calculadas as dimensões das bounding boxes de cada modelo Ferret no MeshLab. Em seguida, as dimensões dos modelos originais e da fotogrametria foram comparadas com as respectivas dimensões dos modelos Ferret. A partir dessa comparação, foram calculados os fatores de escala necessários para redimensionar cada modelo, de forma que suas dimensões se aproximassem. Por fim, utilizando a ferramenta de redimensionamento do MeshLab, os modelos originais e da fotogrametria foram escalados proporcionalmente, garantindo assim a comparabilidade entre todos.

4. Alinhamento: Para permitir a comparação precisa entre os modelos, foi necessário alinhá-los espacialmente. Utilizando o software MeshLab, cada modelo digitalizado foi carregado juntamente com sua versão original, permitindo a visualização simultânea de ambos. A ferramenta de colagem baseada em pontos foi utilizada para estabelecer correspondências entre os modelos. Inicialmente, foram selecionados

manualmente de 4 a 5 pares de pontos correspondentes em regiões características de cada modelo. Em seguida, o algoritmo ICP (Iterative Closest Point) foi aplicado com os parâmetros padrão, realizando o alinhamento fino e ajuste da posição e orientação entre os modelos digitalizados em relação aos originais. Esse processo foi executado apenas uma vez para cada modelo digitalizado.

Este processo de alinhamento entre os modelos é importante visto que a orientação original deles pode não ser a mesma da dos modelos digitalizados. Como o objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade de digitalização, esta etapa é fundamental, entretanto, em situações reais, isto é, que não possuam uma referência digital, essa etapa é desnecessária.

A Figura 5 demonstra os passos de preparação do modelo Armadillo, capturado pelo Ferret. Em seu alinhamento original, são apresentados o seu estado inicial pós-captura, então o isolamento, preenchimento de buracos e por fim o alinhamento juntamente com o modelo original (em vermelho).

**Figura 5.** Processo de preparação do modelo Armadillo

3.4 Análise de Dados

A avaliação quantitativa dos modelos 3D reconstruídos foi realizada utilizando a biblioteca Open3D [18], em Python. A distância de Hausdorff foi utilizada para medir a maior distância entre os pontos correspondentes dos dois modelos, fornecendo uma indicação da maior discrepância entre as superfícies. O erro quadrático médio (RMSE) foi calculado para avaliar o erro médio quadrático entre os pontos correspondentes, fornecendo uma medida da precisão global da reconstrução. A distância média absoluta foi utilizada para calcular a distância média entre os pontos correspondentes, fornecendo uma medida da precisão local da reconstrução. A distância de Chamfer avalia a distância média entre os pontos mais próximos de cada nuvem. Os resultados obtidos por esses algoritmos permitiram identificar a técnica de digitalização que apresentou o melhor desempenho em termos de precisão e detalhe.

3.4.1 Distância Hausdorff

A distância de Hausdorff [19], definida na Equação (1), é uma métrica fundamental na comparação de nuvens de pontos 3D, como as obtidas em processos de digitalização. Dadas duas nuvens de pontos representando dois objetos, a distância de Hausdorff busca encontrar o ponto mais distante de um conjunto que esteja mais próximo do outro conjunto. Esse valor máximo representa a distância de Hausdorff entre os dois conjuntos. Em outras palavras, ela mede o quanto um conjunto se afasta do outro, considerando a maior discrepância entre seus pontos. Para calcular a distância de Hausdorff, para cada ponto em uma nuvem, encontra-se o ponto mais próximo na outra nuvem. A maior distância entre esses pares de pontos é a distância de Hausdorff. Um valor baixo indica que os dois conjuntos são muito similares, enquanto um valor alto indica que há grandes diferenças entre eles.

$$dH(A, B) = \max \left\{ \sup_{a \in A} \inf_{b \in B} d(a, b), \sup_{b \in B} \inf_{a \in A} d(a, b) \right\} \quad (1)$$

3.4.2 Erro Quadrático Médio (RMSE)

O Erro Quadrático Médio (RMSE), definido na Equação (2), é uma métrica estatística que quantifica a diferença média entre os valores previstos por um modelo e os valores reais. No contexto de nuvens de pontos 3D, o RMSE mede a distância média entre os pontos correspondentes de duas nuvens. Para calcular o RMSE, calcula-se a diferença entre as coordenadas de cada par de pontos correspondentes, elevam-se essas diferenças ao quadrado, calcula-se a média dos quadrados e, por fim, extrai-se a raiz quadrada. Um valor baixo de RMSE indica que, em média, os pontos das duas nuvens estão próximos um do outro, sugerindo uma boa correspondência entre os modelos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

3.4.3 Distância Média Absoluta:

A distância média absoluta, definida na Equação (3), é uma métrica simples e intuitiva utilizada para avaliar a similaridade entre duas nuvens de pontos 3D. Ela representa a média das distâncias entre os pontos correspondentes de ambas as nuvens. Em outras palavras, ela calcula a diferença média entre cada ponto de um modelo em relação ao ponto correspondente no outro modelo. O seu cálculo consiste em determinar a distância entre cada par de pontos correspondentes nas duas nuvens, calcular o valor absoluto dessas distâncias e, em seguida, calcular a média de todos esses valores absolutos. Um valor baixo indica que os dois modelos são muito semelhantes, enquanto um valor alto indica que há grandes diferenças entre eles.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

3.4.4 Chamfer

A distância de Chamfer, definida na Equação (4), é uma métrica empregada na comparação de nuvens de pontos 3D, fornecendo uma medida mais robusta e informativa da similaridade entre duas formas do que a distância de Hausdorff. Essencialmente, ela calcula a distância média entre os pontos mais próximos de cada nuvem. Para calcular a distância de Chamfer, para cada ponto em uma nuvem, encontra-se o ponto mais próximo na outra nuvem, e vice-versa. Em seguida, calcula-se a distância entre cada par de pontos correspondentes e determina-se a média dessas distâncias. Esse processo é repetido para todos os pontos de ambas as nuvens e a média final representa a distância de Chamfer. Um valor baixo indica que as nuvens são muito semelhantes, enquanto um valor alto sugere grandes diferenças entre elas. A vantagem da distância de Chamfer está em sua capacidade de considerar a proximidade entre todos os pontos das nuvens, proporcionando uma visão mais completa da correspondência entre as formas. Além disso, ela é menos sensível a outliers do que a distância de Hausdorff, tornando-a uma ferramenta robusta para avaliar a qualidade de reconstruções 3D e comparar diferentes técnicas de digitalização.

$$DC(A, B) = \frac{1}{|A|} \sum_{p \in A} \min_{q \in B} d(p, q) + \frac{1}{|B|} \sum_{q \in B} \min_{p \in A} d(p, q) \quad (4)$$

4. Resultados

A Tabela 3 apresenta, separadas por modelo, os resultados de cada algoritmo de comparação e técnica de digitalização empregados neste trabalho.

Tabela 3. Resultados quantitativos da digitalização. Os melhores valores de cada métrica para cada modelo estão representados em negrito.

Modelo	Método	Hausdorff	RMSE	MAE	Chamfer
Bunny	Ferret	36.08	5.25	2.17	2.89
	Kinect	37.44	5.85	3.83	6.87
	Fotog.	36.18	6.37	3.87	5.10
Dragon	Ferret	19.67	3.37	1.83	2.70
	Kinect	15.18	2.94	2.31	4.35
	Fotog.	20.37	2.91	1.58	2.35
Armadillo	Ferret	20.35	0.77	0.39	0.70
	Kinect	42.11	2.19	1.76	3.26
	Fotog.	31.60	1.03	0.67	1.13
Buddha	Ferret	20.57	2.75	1.15	1.49
	Kinect	26.00	3.30	2.44	4.18
	Fotog.	20.41	2.23	1.26	1.92

Considerando os resultados, é possível identificar a qualidade da captura entre as técnicas apresentadas neste trabalho. Analisando primeiramente o modelo Bunny, é possível identificar que o scanner Ferret se sobressaiu em todos os algoritmos de comparação. O Kinect apresentou resultados melhores nos algoritmos RMSE e MAE. Enquanto a fotogrametria se saiu melhor no Hausdorff e Chamfer. É importante ressaltar que,

apesar da perda de 60% das imagens capturadas durante o processo de fotogrametria, a técnica ainda superou o Kinect em dois dos quatro algoritmos de avaliação e ficou pouco abaixo do scanner Ferret na métrica de Hausdorff. Visualmente, esse foi um dos melhores resultados do Kinect, já que o modelo não apresentava detalhes nem texturas diferenciadas.

A fotogrametria se mostrou a técnica de reconstrução mais eficaz para o modelo Dragon, superando as demais em todas as métricas, exceto na de Hausdorff. O scanner Ferret, apesar de apresentar um bom desempenho geral, não alcançou, pela única vez neste trabalho, a primeira colocação em alguma das métricas. O Kinect, por sua vez, obteve o seu único melhor resultado, dentre todos os modelos, na métrica de Hausdorff. É importante destacar que o modelo Dragon foi o que contou com o maior número de fotos capturadas e processadas, o que contribuiu para a alta qualidade da reconstrução obtida pela fotogrametria.

O modelo Armadillo revelou uma hierarquia de desempenho similar à observada no modelo Bunny. O scanner Ferret se destacou em todas as métricas, demonstrando maior precisão e detalhamento na reconstrução 3D, seguido pela fotogrametria e, por fim, o Kinect, que apresentou os piores resultados, sugerindo limitações na captura de detalhes e na representação da forma do objeto.

No modelo Buddha, houve um empate técnico entre o scanner Ferret e a fotogrametria, com cada técnica liderando em duas métricas. O Ferret obteve melhores resultados em MAE e Chamfer, enquanto a fotogrametria se destacou em Hausdorff e RMSE. O Kinect, mais uma vez, apresentou o pior desempenho em todas as métricas. Ressalta-se que o modelo Buddha foi capturado com menor quantidade de fotos em comparação aos modelos Dragon e Armadillo.

Na Figura 6, é apresentada a comparação da distância entre pontos correspondentes nos modelos original e digitalizados. A visualização emprega uma escala cromática, variando do azul ao vermelho, para representar a magnitude da distância entre os pontos, onde azul indica pontos mais próximos (menor distância) e vermelho, pontos mais distantes (maior distância). As colunas representam os modelos gerados a partir das seguintes técnicas: Ferret (primeiro), Fotogrametria (segundo) e Kinect (terceiro).

A análise dos resultados visuais revela uma hierarquia consistente entre as técnicas de digitalização 3D avaliadas. O scanner Ferret destaca-se pela capacidade de capturar uma riqueza de detalhes significativamente maior em comparação com as demais técnicas, conforme evidenciado na cabeça do modelo Dragon e nos detalhes do tecido e rosas do modelo Buddha. A fotogrametria, por sua vez, preserva com fidelidade as formas e silhuetas dos objetos, como as rosas do Buddha e os chifres do Dragon, porém com menor nível de detalhe em relação ao Ferret.

Uma vantagem notável da fotogrametria é a ausência de lacunas ou buracos nas malhas 3D, um aspecto em que o Ferret apresentou deficiências, como os buracos observados no corpo do Dragon. Contudo, a fotogrametria, apesar de

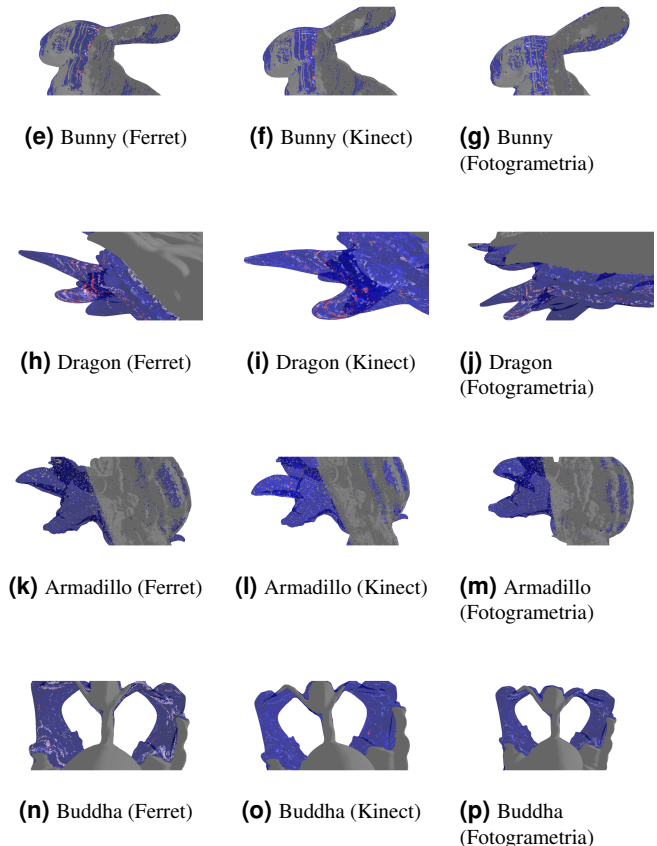


Figura 6. Resultado da digitalização inicial para cada técnica e modelo.

se aproximar do Ferret em termos de precisão, não atinge o mesmo nível de detalhe.

A técnica do Kinect, por outro lado, apresentou resultados visuais considerados decepcionantes, com ausência de detalhes e dificuldades em reproduzir com precisão as formas e silhuetas dos objetos, comprometendo a identificação dos modelos 3D.

A presença de formas anômalas entre a cabeça e o corpo do modelo Dragon, resultante do algoritmo de preenchimento de buracos do MeshLab, embora visualmente inaceitável, foi mantida para preservar a integridade dos testes e ilustrar as limitações do processo de reconstrução 3D.

5. Considerações Finais

A presente pesquisa evidenciou a diversidade de técnicas de digitalização 3D e suas respectivas aplicações. A fotogrametria se mostrou uma técnica promissora, capaz de gerar modelos 3D de alta qualidade, porém demandando maior tempo e conhecimento técnico. A dependência de condições de iluminação e tempo favoráveis limita sua aplicação em determinados cenários. O scanner Ferret, por sua vez, apresentou-se como uma ferramenta mais intuitiva, mas a presença de buracos na digitalização utilizando a mesa giratória indica a necessidade

de ajustes no processo de aquisição de dados. O Kinect, apesar de ser uma tecnologia acessível, mostrou-se limitado na captura de detalhes, tornando-o inadequado para aplicações que exigem alta precisão. Considerando os resultados obtidos, conclui-se que a escolha de meios mais acessíveis de digitalização pode resultar em modelos não detalhados, ou irá necessitar de conhecimento prévio em demais áreas, como as necessárias para a correta execução da fotogrametria. Devem também ser levadas em consideração as características do objeto a ser capturado, os recursos disponíveis e os objetivos da pesquisa.

5.1 Limitações e trabalhos futuros

Uma limitação do presente estudo reside no número restrito de modelos 3D utilizados para a avaliação. Embora os modelos selecionados representem uma variedade de complexidades geométricas, um conjunto maior e mais diversificado de objetos poderia fornecer uma análise mais abrangente da performance das técnicas em diferentes cenários. Adicionalmente, a utilização de iluminação externa para a fotogrametria, embora representativa de um ambiente de baixo custo e acessível, pode introduzir variabilidade nos resultados devido a condições de luz não controladas. Futuros trabalhos poderiam explorar a performance das técnicas com uma maior diversidade de formas e texturas, bem como em ambientes de iluminação controlada para a fotogrametria, a fim de mitigar a influência de fatores externos e aprofundar a análise da robustez das técnicas.

É importante ressaltar que, embora os resultados apresentem diferenças claras na performance das técnicas, uma análise estatística robusta não foi o foco principal deste estudo exploratório. As métricas de similaridade foram utilizadas para uma comparação direta e quantitativa. Futuras investigações poderiam se beneficiar de testes estatísticos para confirmar a significância das diferenças observadas e a consistência dos ganhos de performance, especialmente para o CR-Scan Ferret.

Contribuição dos Autores

Bruno Biz de Castro: Conducted the experimental procedures, including the execution of all 3D scanning tests using the Kinect, CR-Scan Ferret, and photogrammetry techniques. Responsible for systematic data collection from all scanning methods, processing of captured models, and primary authorship of the manuscript, including the methodology, results, and discussion sections. Marlon Marcon: Conceived the research project and defined the comparative study framework. Supervised the 3D printing of all physical models. Conducted critical review and revision of the manuscript content, ensuring scientific rigor and clarity. André Roberto Ortoncelli: Provided critical review of the research methodology and experimental design. Assisted in the interpretation and validation of the comparative analysis results. Contributed to the refinement of the manuscript through detailed feedback and suggestions for improvement.

References

- [1] BALADO, J. et al. A systematic literature review of low-cost 3d mapping solutions. *Information Fusion*, v. 114, p. 102656, 2025.
- [2] FANG, K. et al. A quick and low-cost smartphone photogrammetry method for obtaining 3d particle size and shape. *Engineering Geology*, 2023.
- [3] WINKELBACH, S.; MOLKENSTRUCK, S.; WAHL, F. M. Low-cost laser range scanner and fast surface registration approach. In: SPRINGER. *Joint Pattern Recognition Symposium*. [S.l.], 2006. p. 718–728.
- [4] YANG, Y. et al. The development of a low-cost photogrammetry-based 3d hand scanner. *HardwareX*, v. 10, 2021.
- [5] RAPHAEL, O. et al. Accuracy of digital dental models using the low-cost david laser scanner. *Advances in clinical and experimental medicine : official organ Wroclaw Medical University*, 2019.
- [6] YU, F. et al. Evaluating the accuracy of hand models obtained from two 3d scanning techniques. *Scientific Reports*, v. 10, 2020.
- [7] JANOS, D.; ORTYL, ; KURAS, P. Low-cost 3d depth sensors for mobile applications and control systems – accuracy assessments using surveying techniques. *Geomatics and Environmental Engineering*, 2025.
- [8] PAULUS, S. et al. Low-cost 3d systems: Suitable tools for plant phenotyping. *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 14, p. 3001–3018, 2014.
- [9] POLO, M.; FELICÍSIMO, Analysis of uncertainty and repeatability of a low-cost 3d laser scanner. *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 12, p. 9046–9054, 2012.
- [10] KęDZIERSKI, M. et al. Analysis of the possibilities of using low-cost scanning system in 3d modeling. In: *ISPRS - Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 261–267.
- [11] STRAUB, J. et al. Characterization of a large, low-cost 3d scanner. *Technologies*, v. 3, p. 19–36, 2015.
- [12] CURLESS, B.; LEVOY, M. A volumetric method for building complex models from range images. In: *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: ACM, 1996. (SIGGRAPH '96), p. 303–312.
- [13] CIGNONI, P. et al. MeshLab: An Open-source Mesh Processing Tool. In: *Eurographics Italian Chapter Conference*. [S.l.: s.n.], 2008.
- [14] CREALITY. *CR-Scan Ferret 3D Scanner*. 2023. Website: <https://www.creality.com/products/cr-scan-ferret-3d-scanner>.

- [15] IZADI, S. et al. Kinectfusion: real-time 3d reconstruction and interaction using a moving depth camera. In: *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA: ACM, 2011. (UIST '11), p. 559–568.
- [16] SCHENK, T. Introduction to photogrammetry. *The Ohio State University, Columbus*, v. 106, n. 1, p. 1, 2005.
- [17] GRIWODZ, C. et al. Alicevision Meshroom: An open-source 3D reconstruction pipeline. In: *Proceedings of the 12th ACM Multimedia Systems Conference - MMSys '21*. [S.l.]: ACM Press, 2021.
- [18] ZHOU, Q.-Y.; PARK, J.; KOLTUN, V. Open3D: A modern library for 3D data processing. *arXiv:1801.09847*, 2018.
- [19] HUTTENLOCHER, D.; KLANDERMAN, G.; RUCKLIDGE, W. Comparing images using the hausdorff distance. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 15, n. 9, p. 850–863, 1993.