REVISTA DESIGN & TECNOLOGIA
ISSN: 2178-1974
2026, Vol. 16, No. 32
DOI DOI 10.23972/det2026iss32pp98-113

PGDESIGN
www.pgdesign.ufrgs.br

Fotogrametria e escaneamento 3D por luz estruturada: análise comparativa entre diferentes tecnologias de *hardware* e *software*

Cleiton R. Oestreich[1]; Rodrigo De Nardin[1]; Vitor A. H. dos Santos[1]; Fabio P.da Silva[1]

1 *Programa de Pós-Graduação em Design, Departamento de Design e Exp. Gráfica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil*

RESUMO

A digitalização tridimensional consolidou-se como uma tecnologia avançada para captura e conversão de objetos físicos ou ambientes do mundo real em dados digitais. Na prática, a digitalização tridimensional pode ser realizada por diferentes técnicas e equipamentos, como fotogrametria digital e escaneamento por luz estruturada. Neste contexto, este estudo realiza uma análise comparativa qualiquantitativa entre essas duas abordagens, com foco na fotogrametria digital realizada por meio de dispositivos móveis. Foram utilizados três smartphones distintos (*Samsung Galaxy S23 Ultra*, *Apple iPhone 14* e *Motorola Moto G84*) e dois aplicativos específicos (*Polycam* e *RealityScan 3D*). A avaliação foi conduzida com base em parâmetros como funcionalidades dos aplicativos, qualidade da malha gerada, exatidão dimensional e nível de habilidade exigido do usuário, tendo como referência um modelo obtido com o *scanner* de luz estruturada *Artec Eva*. As malhas resultantes foram analisadas no *software Geomagic Wrap* para aferição de exatidão geométrica. Os resultados indicam que as soluções baseadas em dispositivos móveis oferecem praticidade e acessibilidade, porém apresentam limitações quanto à fidelidade geométrica e fidelidade das texturas. Conclui-se que, apesar dos avanços na área, os aplicativos testados ainda não alcançam a acurácia e o detalhamento proporcionados pela digitalização por luz estruturada.

PALAVRAS-CHAVE

Design;
Tecnologia;
Digitalização 3D;
Fotogrametria;
Luz Estruturada.

Photogrammetry and structured light 3D scanning: a comparative analysis of different hardware and software technologies

ABSTRACT

Three-dimensional digitization has become established as an advanced technology for capturing and converting physical objects or real-world environments into digital data. In practice, three-dimensional digitization can be performed using different techniques and equipment, such as digital photogrammetry and structured-light scanning. In this context, this study presents a qualitative and quantitative comparative analysis of these two approaches, with a focus on digital photogrammetry performed using mobile devices. Three different smartphones (Samsung Galaxy S23 Ultra, Apple iPhone 14, and Motorola Moto G84) and two specific applications (Polycam and RealityScan 3D) were used. The evaluation was conducted based on parameters such as application functionalities, quality of the generated mesh, dimensional accuracy, and the level of user skill required, using a model obtained with the Artec Eva structured-light scanner as a reference. The resulting meshes were analyzed in Geomagic Wrap software to assess geometric accuracy. The results indicate that mobile-based solutions offer practicality and accessibility; however, they present limitations in terms of geometric fidelity and texture fidelity. It is concluded that, despite advances in the field, the tested applications have not yet achieved the accuracy and level of detail provided by structured-light digitization.

KEYWORDS

Design;
Technology;
3D Digitization;
Photogrammetry;
Structured Light.

CONTATO: Cleiton R. Oestreich – *oestreich.cleiton@gmail.com*

© 2026 – Revista Design & Tecnologia

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a digitalização 3D estabeleceu-se como uma tecnologia avançada de levantamento, capaz de capturar com exatidão dados de objetos físicos e ambientes do mundo real, possibilitando sua análise, processamento e remodelação em ambiente digital (ASKAR; STERNBERG, 2023; BRENDLER et al., 2016). Amplamente empregada na indústria, especialmente na engenharia reversa, esta tecnologia tem se revelado uma ferramenta indispensável na preservação de artefatos (ATIK et al., 2023; GALLEGO ALARCÓN; SILVA, 2024; BOBOC et al., 2019; RICHETTI et al., 2022; BONFADA et al., 2020; ALENCASTRO et al., 2019; MUNIZ et al., 2018) e edificações de valor histórico (VIEIRA et al., 2023; CANUTO; SALGADO, 2020; COGIMA et al., 2020; CUPERSCHMID et al., 2019; MASCARO; DURANTE, 2022), bem como na avaliação e no monitoramento de materiais e estruturas (CALEGARI et al., 2017; MEDEIROS; SILVA, 2019; POHLMANN et al., 2016; ARMESTO-GONZÁLEZ et al., 2010; MUKUPA et al., 2017; ALVES et al., 2022; GROETELAARS, 2015; WANG et al., 2014).

Em razão de sua extensa aplicabilidade e abordagem multidisciplinar, a digitalização 3D tem viabilizado avanços em diversas áreas de pesquisa, incluindo ciências médicas e da saúde (HALEEM; JAVAID, 2019; DA SILVEIRA et al., 2003; GRANT et al., 2019; JAVAID et al., 2019), *design*, ergonomia e acessibilidade (ACKERMANN et al., 2025; PAGLIARI et al., 2025), produção de roupas e acessórios de moda (CHEN et al., 2024; MOSKVIN et al., 2025), e investigação e monitoramento da biodiversidade (FOL et al., 2023; ARRIZZA et al., 2024). Dentre as principais vantagens dessa tecnologia, destaca-se a capacidade de gerar modelos virtuais altamente detalhados, o que facilita a concepção, o desenvolvimento e a prototipagem de projetos, além de conferir maior eficiência e precisão aos processos.

Na prática, a digitalização 3D pode ser realizada por diferentes técnicas e equipamentos. Dentre os métodos mais utilizados, destacam-se os *scanners* de luz estruturada, os *scanners* a *laser* e a fotogrametria digital (BUGEJA et al., 2022; FAWZY, 2019; LEAL; BRUSCATO, 2024). Com comprimento de onda no campo óptico ou em faixas próximas à região do infravermelho, os *scanners* capturam informações geoespaciais de uma cena que está em sua linha de visão, fornecendo milhares de pontos com coordenadas cartesianas (x, y, z) ou esféricas (r, θ, ϕ) (BECERIK-GERBER et al., 2011). Além das informações espaciais de cada ponto, as nuvens de pontos podem incluir informações adicionais, como a intensidade do sinal do retorno, um indicativo da cor do ponto em função da refletância, que depende das características da superfície alvo e das condições de iluminação ambiente (WUTKE, 2006). Um quinto atributo, representando a cor verdadeira do ponto, pode ser obtido mediante o registro fotográfico de alta resolução do objeto, realizado no mesmo ângulo do escaneamento. A captura dessa informação é possível na maioria dos equipamentos por meio de uma câmera, seja ela acoplada ou independente, utilizando a escala de valores RGB.

Para capturar todos os detalhes de um objeto, é necessário realizar digitalizações de múltiplos pontos de vista, uma vez que um único ângulo de captura pode não ser suficiente para registrar todos os seus detalhes e características. Como resultado, obtêm-se diferentes nuvens de pontos que, quando combinadas, proporcionam uma representação completa da superfície do objeto.

A fotogrametria digital, por sua vez, diferentemente do escaneamento, que requer sensores de alto custo, possibilita a captura de imagens por meio de câmeras digitais de custo menos elevado (ATIK et al., 2023). Além disso, dependendo do objetivo, qualquer câmera pode ser utilizada, inclusive a de um telefone celular (EKLUND, 2016). O processo de reconstituição tridimensional ocorre através de *softwares* especializados que processam múltiplas fotografias de alta resolução do objeto, capturadas em diferentes ângulos. Estes programas utilizam algoritmos que, baseados em parâmetros como distância focal e distorção da lente, identificam *pixels* correspondentes entre as imagens e calculam as posições dimensionais precisas de cada ponto, gerando assim um modelo digital completo da superfície do objeto (BUGEJA et al., 2022). Além de soluções comerciais pagas, existem programas e aplicativos gratuitos e de código aberto capazes de produzir resultados de qualidade adequada para diversas aplicações (INÊS, 2022).

Neste contexto, considerando a rápida evolução dos recursos tecnológicos e o desafio enfrentado pela comunidade acadêmica para acompanhar essas transformações, esta pesquisa realiza uma análise comparativa qualiquantitativa entre as tecnologias de digitalização 3D baseadas em fotogrametria digital, implementada por meio de aplicativos para dispositivos móveis, e luz estruturada. O objetivo deste estudo é contribuir para a avaliação de metodologias emergentes, que vêm revolucionando os processos de documentação digital e tornando-os progressivamente mais acessíveis e democráticos.

Para tanto, o programa experimental concentra-se na digitalização 3D por fotogrametria, utilizando três *smartphones* distintos (*Samsung Galaxy S23 Ultra*, *Apple iPhone 14* e *Motorola Moto G84*) e dois aplicativos para captura e restituição fotogramétrica das imagens (*Polycam* e *RealityScan 3D*). A avaliação comparativa foi conduzida com base nos seguintes parâmetros: a) recursos disponibilizados pelos aplicativos, b) tamanho da malha gerada, c) qualidade de aquisição da textura, d) exatidão dimensional do modelo e e) nível de habilidade exigido do usuário.

O objeto de estudo selecionado foi uma escultura de madeira representando a figura de um capitão de navio, escolhida por suas características geométricas irregulares e detalhes superficiais variados. Como referência para as análises comparativas, adotou-se um modelo digital de alta precisão, obtido com o *scanner* de luz estruturada *Artec Eva*. Por fim, as malhas foram avaliadas no *software Geomagic Wrap*, visando verificar as diferenças geométricas e a exatidão dos modelos gerados.

2. BREVE OLHAR SOBRE A DIGITALIZAÇÃO 3D

A digitalização 3D é um processo não destrutivo e não intrusivo que utiliza a luz para registrar com precisão características da superfície de objetos ou ambientes do mundo real, convertendo-as em dados digitais. Na atualidade, o mercado dispõe de inúmeros tipos de digitalizadores tridimensionais, desenvolvidos com base em diferentes tecnologias para atender a múltiplas aplicações e cenários. Esses dispositivos apresentam variações em suas características, funcionalidades e faixas de preço, proporcionando soluções adaptáveis a diversos níveis de precisão e complexidade (KANTAROS et al., 2023). A escolha da técnica mais adequada depende da aplicação pretendida, do orçamento disponível, e das características do objeto ou ambiente a ser digitalizado.

Quanto à coleta de dados, as tecnologias de digitalização 3D podem ser categorizadas entre as que efetuam a medição por contato direto com a superfície do objeto (mecânicas) e as que operam sem contato (baseadas em radiação) (DANTAS et al., 2016; MEDEIROS; SILVA, 2023). Os sistemas sem contato, por sua vez, subdividem-se em sistemas ativos (equipamentos que emitem e recebem sua própria radiação eletromagnética) e passivos (que dependem de luz natural ou artificial). Em cada uma dessas categorias, existem ainda diferentes tipologias, conforme ilustrado na Figura 1.

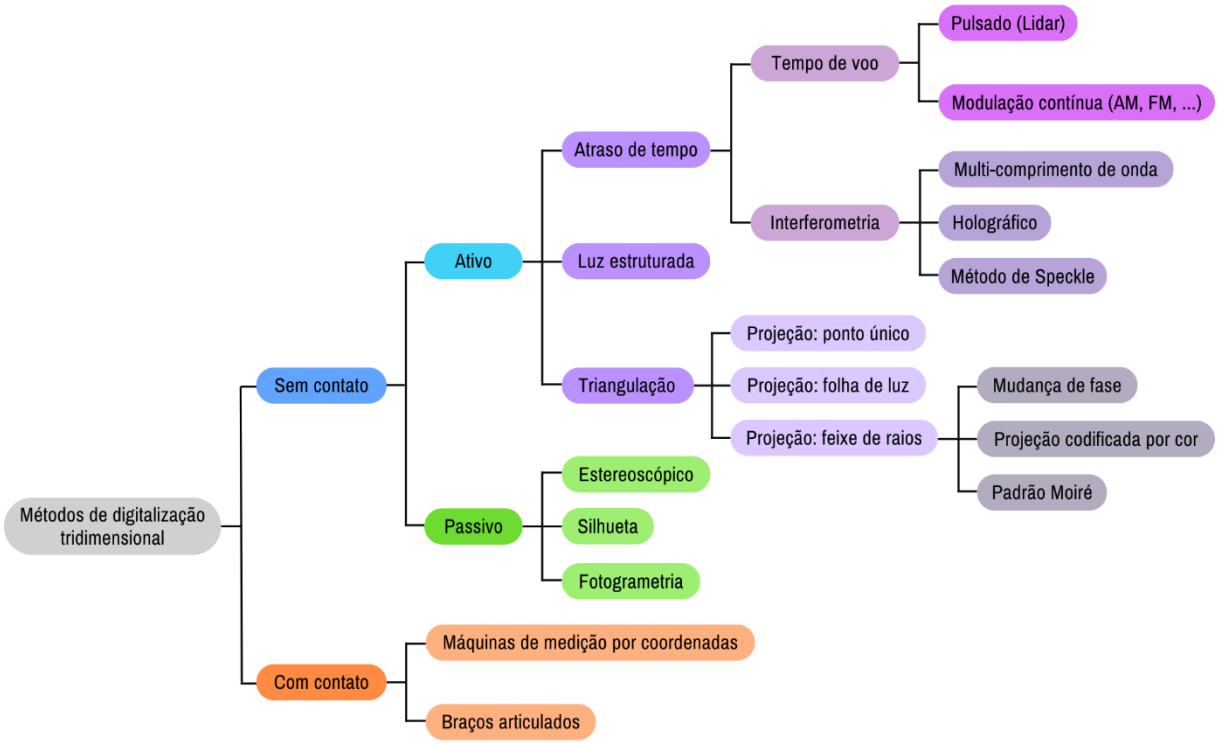


Figura 1 Tecnologias de digitalização tridimensional. (Fonte**:** Adaptado de (43)).

As tecnologias de digitalização 3D que operam sem a necessidade de contato, por exemplo, são capazes de capturar um grande volume de dados em um intervalo de tempo relativamente curto, além de possibilitarem a digitalização de objetos delicados ou de difícil manuseio (DANTAS et al., 2016). No contexto da arte e do *design*, as técnicas de digitalização mais utilizadas incluem os sistemas ativos baseados em triangulação, como os *scanners* a *laser*, e os *scanners* de luz estruturada, que podem operar com projeção de luz branca ou azul. No que se refere aos sistemas passivos, a fotogrametria se destaca devido à ampla disponibilidade de tecnologias de *hardware* e *software* de custo reduzido (BRENDLER et al., 2016; ALENCASTRO et al., 2019; BUGEJA et al., 2022).

2.1 Digitalização por luz estruturada

Tradicionalmente conhecidos como *scanners* de luz branca, os *scanners* de luz estruturada baseiam-se no mesmo princípio trigonométrico dos *scanners* a *laser*, uma vez que determinam a distância entre os sensores e a superfície do objeto por meio da projeção de um padrão luminoso sobre a área a ser escaneada (SZALAI, 2023). Contudo, diferentemente dos *scanners* a *laser*, que empregam luz coerente (fótons com a mesma frequência, fase e direção de propagação) e colimada (raios paralelos obtidos por meio de um conjunto de lentes), os *scanners* de luz estruturada utilizam fontes de luz incoerentes (que se propagam rapidamente em diferentes direções) e divergentes (que perdem intensidade à medida que se afastam da fonte), projetando padrões compostos por barras, faixas, blocos ou outras formas geométricas sobre a superfície do objeto (CONFALONE et al., 2023; MORAES, 2015). Portanto, o tipo de padrão projetado exerce um papel essencial na velocidade, resolução e precisão do sistema (BELL et al., 2014).

Os *scanners* a *laser*, embora possuam um custo mais elevado em comparação aos *scanners* de luz estruturada, são mais adequados para a digitalização de objetos ou ambientes de grandes dimensões. Por outro lado, os *scanners* de luz estruturada são mais indicados para pequenos objetos e aplicações de curta distância (KANTAROS et al., 2023).

Os *scanners* de luz estruturada que projetam padrões de faixas realizam medições ao longo do tempo, exigindo múltiplas projeções sequenciais e uma decodificação baseada em projeção temporal. Como resultado, seus dados não são capturados instantaneamente, e o dispositivo deve permanecer estático durante o processo. Em contrapartida, os *scanners* de luz estruturada que projetam padrões codificados permitem manuseio e movimentação, o que aumenta significativamente sua flexibilidade e facilidade de uso. Esses dispositivos oferecem resultados rápidos devido à sua ampla área de medição e à capacidade de decodificação do padrão de luz em cada quadro capturado pela câmera (SZALAI, 2023).

2.2 Fotogrametria

A fotogrametria é um método de digitalização tridimensional sem contato e passivo, uma vez que os dispositivos não possuem fonte de luz própria e dependem da iluminação ambiente para capturar informações do objeto. O processo ocorre por meio da captura de fotografias de múltiplos pontos de vista. Após essa etapa, a reconstituição estereoscópica da cena ou do objeto é realizada por meio de *softwares* especializados, que processam múltiplas fotografias de alta resolução a partir de princípios matemáticos e algoritmos complexos e identificam *pixels* correspondentes ou comuns entre as imagens (KASSER; EGELS, 2001; LINDER, 2009). Assim, para que a fotogrametria seja eficaz, é fundamental garantir uma sobreposição adequada de informações, permitindo a associação precisa de pontos. Além disso, parâmetros da câmera, como resolução, distância focal e distorção da lente, influenciam diretamente o nível de detalhe obtido (BUGEJA et al., 2022; MENDONÇA, 2017). Outras variáveis presentes na revisão de literatura (KASSER; EGELS, 2001; LINDER, 2009; FOSTER; HALBSTEIN, 2014) referem-se à:

a. Qualidade das imagens: fatores como iluminação inadequada, sombras, baixa resolução, baixo contraste e número insuficiente de fotografias podem comprometer a identificação de pontos essenciais para a modelagem do objeto;
b. Superfícies: materiais pouco texturizados, reflexivos ou translúcidos apresentam maior complexidade de digitalização, pois dificultam a associação precisa de pontos;

c. Movimentação: objetos em deslocamento reduzem a precisão da reconstituição, uma vez que variações entre as capturas podem comprometer a exatidão do modelo gerado;
d. Automação e processamento: apesar dos avanços tecnológicos, a técnica ainda requer intervenção manual em algumas etapas;
e. Processamento, armazenamento e recursos: a digitalização em alta resolução gera grandes volumes de dados, exigindo ferramentas de *hardware* e *software* com ampla capacidade de armazenamento e processamento.

Ainda assim, em comparação com a tecnologia de escaneamento, a fotogrametria pode ser a opção mais acessível para diversas aplicações científicas e industriais, pois requer apenas uma câmera digital e um *software* de pós-processamento, além de ser altamente portátil. As soluções atuais incluem o uso de câmeras de *smartphones* e aplicativos gratuitos ou de código aberto.

2.3 Pesquisas recentes

O estudo conduzido por Askar e Sternberg (2023) teve como objetivo avaliar a viabilidade de uso do *smartphone Apple iPhone 13 Pro*, equipado com a tecnologia *lidar*, como uma alternativa de baixo custo aos *scanners* a *laser* terrestres para documentação tridimensional de ambientes internos. Para tanto, fez-se uso de quatro aplicativos gratuitos (ou com versão gratuita disponível) de digitalização tridimensional: *3DScanner*, *Polycam*, *Scaniverse* e *SiteScape*. A precisão global das nuvens de pontos geradas foi avaliada por meio da comparação com dados obtidos por um *scanner* a *laser* terrestre, utilizando o método nuvem-nuvem do *software* de código aberto *CloudCompare*. Além disso, a precisão do sensor e a precisão local do sistema foram verificadas. Entre os aplicativos testados, o *PolyCam* demonstrou menor distorção em comparação aos demais, que apresentaram, por exemplo, bordas mais irregulares.

A pesquisa de Brendler *et al*. (2016) analisou comparativamente a precisão de medidas antropométricas obtidas por meio dos *scanners* portáteis *Artec EVA* (projetor de luz branca) e *Kinect* (projetor de infravermelho), avaliando suas implicações no desenvolvimento de projetos de produtos centrados no usuário. Para garantir a coerência e repetibilidade dos resultados, cada *scanner* foi utilizado em três digitalizações. Os seis modelos obtidos foram, posteriormente, importados para o *software Geomagic Qualify* para avaliação comparativa.

No estudo realizado por Atik *et al*. (2023), três instrumentos históricos de medição do século XVIII foram documentados, utilizando escaneamento tridimensional e fotogrametria digital. Para o processo de varredura, utilizou-se o *scanner* de luz estruturada *3D Next Engine*, com velocidade de varredura de 50.000 pontos/seg e precisão de ± 0,127 mm para o modo macro e ± 0,328 mm para o modo amplo. Para a captura das imagens, utilizou-se a câmera digital *Nikon D800*, e o pós-processamento foi realizado no *software Agisoft Photoscan*. Adicionalmente, comprimentos aferidos por um paquímetro de precisão de 1/100 mm foram empregados como referência para avaliar a exatidão dos modelos digitais. A acurácia também foi determinada pelo cálculo da raiz quadrada média do erro (RMSE).

Também no campo do patrimônio histórico, o estudo de Vieira *et al*. (2023) envolveu a digitalização tridimensional do Teatro José de Alencar por meio de uma abordagem integrada entre escaneamento a *laser* e fotogrametria, utilizando metodologia BIM para a criação de modelos digitais detalhados. Foram empregados os *scanners* a *laser Leica BLK360* e *Leica RTC360*, além de um drone *DJI Phantom 4 Pro* para a captura aérea. Devido à complexidade arquitetônica do teatro, fotos adicionais foram capturadas com câmeras *Canon EOS Rebel T7* e *Canon PowerShot SX540*. O processamento e alinhamento das nuvens de pontos foram realizados nos *softwares Leica Cyclone REGISTER 360*, *Autodesk Recap Pro* e *Revit 2021*.

O estudo recente de Leal e Bruscato (2024) sobre a digitalização tridimensional de artefatos históricos comparou o desempenho de *softwares* gratuitos e pagos na geração de malhas poligonais texturizadas, utilizando suas configurações padrão. As imagens, capturadas com a câmera de um *smartphone Motorola Edge 20*, foram processadas em três *softwares* gratuitos (*Colmap*, *Meshroom* e *Regard3D*) e três pagos (*3DF Zephyr*, *Agisoft Metashape* e *Photomodeler Premium*). Os resultados mostraram que os softwares gratuitos geraram modelos com maior número de vértices e faces, sugerindo maior precisão. No entanto, os softwares pagos, quando ajustados corretamente, atingiram precisão equivalente e ofereceram maior compatibilidade com diversos formatos de exportação.

Na mesma linha de pesquisa, o estudo de Inês (2022) investigou o uso de diversos programas gratuitos de fotogrametria, com foco na análise estrutural das descontinuidades em maciços rochosos. Na etapa experimental, foram utilizados o drone *DJI Mavic Air*, os telefones celulares *Apple iPhone 11 Pro* e *Xiaomi Redmi 9*. Os *softwares* empregados incluíram *VisualSFM*, *Autodesk Recap*, *Colmap*, *Meshroom*, *Regard3D*, *Metashape* e *CloudCompare*. O estudo comparativo identificou as limitações e potencialidades dos diferentes programas, determinando aquele mais adequado para a análise estrutural do objeto de estudo.

Sob essa perspectiva, considerando a popularidade e a praticidade dos dispositivos móveis, a comparação entre os métodos de digitalização tridimensional por fotogrametria e escaneamento por luz estruturada, proposta nesta pesquisa, justifica-se pela necessidade de analisar a precisão dos modelos gerados por restituição fotogramétrica. Diante do constante surgimento de novas soluções tecnológicas, esse processo possibilita avaliar se os aplicativos e dispositivos móveis mais recentes podem ser considerados uma alternativa viável e economicamente mais acessível.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Na etapa experimental, foram empregados três *smartphones* de fabricantes distintos (*Samsung Galaxy S23 Ultra*, *Apple iPhone 14* e *Motorola Moto G84*), além de dois aplicativos destinados à captura e restituição fotogramétrica das imagens (*Polycam* e *RealityScan 3D*). Para avaliar o funcionamento desses aplicativos, foi conduzido um teste de obstrução das câmeras, o qual revelou que ambos utilizam exclusivamente o sensor principal de cada dispositivo. Por sua vez, a digitalização por luz estruturada foi realizada por meio do *scanner* de luz branca *Artec EVA*. As especificações técnicas dos dispositivos empregados no estudo encontram-se detalhadas na Tabela 1. O objeto selecionado para o estudo foi uma escultura de madeira com 25,8 cm de altura, representando a figura de um capitão de navio, conforme ilustrado na Figura 2. A escolha desse artefato fundamentou-se em suas características geométricas irregulares e na presença de detalhes superficiais variados, aspectos que possibilitam uma análise mais abrangente da precisão dos métodos de digitalização tridimensional.

Com base no estudo de Mendonça (2017), verificou-se que a utilização de uma base circular colorida pode contribuir para a reconstituição fotogramétrica, visto que as variações de cor auxiliam os *softwares* na identificação de pontos correspondentes entre as fotografias. Além disso, a

segmentação do perímetro em ângulos facilita o controle dos registros pelos pesquisadores, uma vez que, ao posicionar o objeto sobre uma base giratória, as capturas podem ser realizadas em ângulos predefinidos. À vista disso, optou-se por utilizar um círculo impresso em folha A4, composto por 24 cores. distribuídas ao longo de 360°, resultando em divisões de 15° por segmento, conforme mostrado na Figura 3.

Tabela 1 Especificações técnicas dos *smartphones* e do *scanner Artec Eva*.

	Equipamento			
	iPhone 14	Moto G84	Galaxy S23 Ultra	Artec EVA
Imagem				
Fabricante	Apple	Motorola	Samsung	
Ano de lançamento	2022	2023	2023	
Sistema operacional	iOS 18.3	Android 14	Android 14	
Resolução da câmera	12 MP	50 MP	200 MP	
Abertura da lente	f/1.5	f/1.9	f/1.7	
Distância focal	26 mm	24.5 mm	24 mm	Método de escaneamento: Triangulação por luz estruturada
Tamanho do sensor	1/1.7"	1/1.5"	1/1.3"	Resolução: Até 0,1 mm
Tamanho dos pixels	1.9 µm	1.0 µm	0.6 µm	Distância do objeto: Até 1,0 mm
Autofoco	PDAF	PDAF	PDAF	Mobilidade: Portátil
Estabilização de imagem	Ótica	Ótica	Ótica	

(Fonte: Elaborado pelos autores)



Figura 2 Escultura de madeira a ser digitalizada. (Fonte: Elaborado pelos autores).

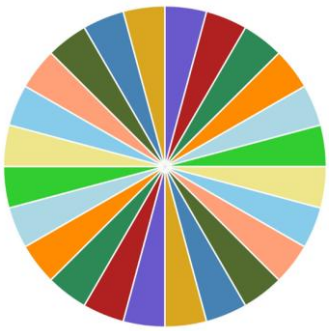


Figura 3 Base circular colorida. (Fonte: Elaborado pelos autores).

A captura e o processamento das imagens obtidas por meio dos *smartphones* foram realizados diretamente na interface de cada aplicativo, eliminando a necessidade de um computador. Já no escaneamento por luz estruturada, a nuvem de pontos foi processada no *software Geomagic Studio*, utilizando um computador portátil equipado com um processador *Intel Core i7* de 3,0 GHz, 8 GB de memória RAM, placa de vídeo dedicada e sistema operacional de 64 *bits*. Após a conversão para o formato de malha, o arquivo resultante foi enviado, juntamente com os modelos obtidos por restituição fotogramétrica, ao *software Geomagic Wrap* para a análise comparativa. Nesta etapa, utilizou-se um computador do tipo *desktop* equipado com dois processadores *Intel Xeon* de 2,66 GHz de 6 núcleos, 32 GB de memória RAM, uma placa de vídeo *Nvidia Quadro K4200* e sistema operacional de 64 *bits*.

3.1 Estrutura do programa experimental

A estrutura do programa experimental foi organizada em quatro etapas, como mostrado na Figura 4. As duas primeiras etapas corresponderam às digitalizações por fotogrametria nos aplicativos *Polycam* e *RealityScan 3D*. Para cada aplicativo, foram realizadas três digitalizações com dispositivos móveis distintos, resultando em um total de seis modelos. Cada modelo recebeu um código que inclui o aplicativo utilizado, o nome do dispositivo e um número de identificação. Na terceira etapa, empregou-se o escaneamento por luz estruturada, resultando no modelo de referência para as análises realizadas na quarta etapa. Informações detalhadas sobre cada fase são apresentadas nos tópicos seguintes.

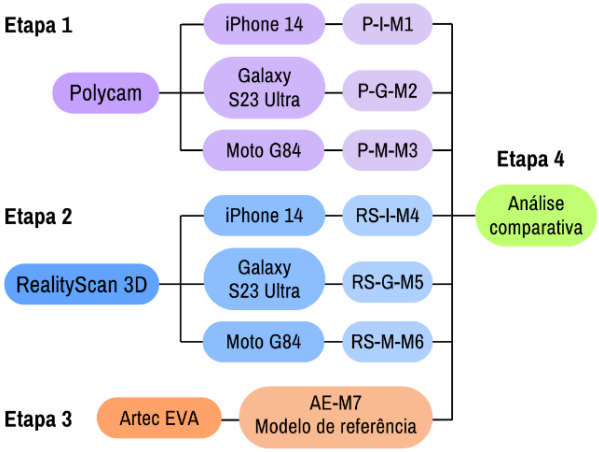


Figura 4 Estrutura do programa experimental organizada em etapas. (Fonte: Elaborado pelos autores).

3.2 Digitalização com o aplicativo *Polycam*

A captura das imagens foi realizada diretamente na interface do aplicativo, enquanto o processamento do modelo ocorreu na nuvem, de forma *online*. O procedimento, padronizado para os três dispositivos, contou com o auxílio de um tripé e um anel de luz para minimizar sombras e garantir maior qualidade na digitalização.

Em síntese, o processo de digitalização consistiu no posicionamento do objeto no centro de uma base giratória, alinhada às divisões do círculo guia. No total, foram registradas 72 fotografias, distribuídas em três séries de 24 imagens, cada uma capturada em uma altura diferente. Na primeira bateria de capturas, os dispositivos foram fixados e posicionados à frente do objeto, iniciando a sequência a partir de uma posição de referência, onde foi feito o registro da primeira fotografia. Em seguida, o disco foi girado manualmente até que o setor seguinte se alinhasse à guia, momento em que uma nova imagem era capturada, como pode ser visto na Figura 5. Esse procedimento foi repetido três vezes, ajustando-se a altura do tripé para que a câmera registrasse imagens de três perspectivas distintas: próximas à base, na posição intermediária e no topo do objeto.



Figura 5 Sequência de capturas realizada com o aplicativo *Polycam*. (Fonte**:** Elaborado pelos autores).

As imagens foram capturadas no modo manual da versão 2.0.7 do aplicativo para o sistema *Android* e na versão 5.0.0 para *iOS*, ambas na modalidade gratuita, que limita o uso a 16 projetos de digitalização. Para obter bons resultados, o *software* sugere a realização de 50 a 100 capturas. Além disso, embora o aplicativo ofereça diversas opções de formatos de saída, incluindo nuvens de pontos (PLY, LAS, PTS, XYZ e DXF), e malhas (OBJ, GLTF, FBX, DAE, STL e USDZ), a modalidade gratuita restringe a exportação ao formato GLTF. O aplicativo também permite a remoção de imagens antes do processamento na nuvem. Após a conversão em malha, é possível recortá-la para manter apenas o objeto de interesse. No entanto, as regiões apagadas não podem ser recuperadas.

3.3 Digitalização com o aplicativo *RealityScan 3D*

Para a digitalização com o aplicativo *RealityScan 3D*, o procedimento de captura das imagens utilizando a base giratória precisou ser ajustado, uma vez que sua aplicação em um cenário desprovido de elementos de referência dificultou a reconstituição das imagens, resultando em erros no modelo, conforme ilustrado na Figura 6. Dessa forma, verificou-se que, de acordo com as recomendações do aplicativo, a captura deve ser realizada com o operador deslocando-se ao redor do objeto.

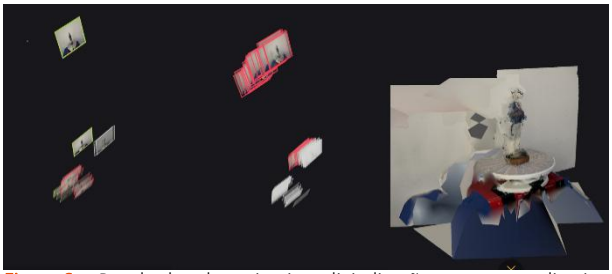


Figura 6 Resultado da primeira digitalização com o aplicativo *RealityScan 3D*. (Fonte**:** Elaborado pelos autores).

Com o intuito de auxiliar no referenciamento das imagens, foram distribuídas formas geométricas irregulares em torno da escultura de madeira. A base foi elevada e centralizada sobre uma mesa, cujo perímetro recebeu 32 marcações uniformemente distribuídas. Assim, cada dispositivo foi operado manualmente e movimentado ao redor da base, registrando uma fotografia em cada ponto de referência. Esse processo foi repetido três vezes para cada *smartphone*, com capturas direcionadas para a base, para uma posição intermediária e para o topo do objeto, totalizando 96 imagens, conforme ilustrado na Figura 7.



Figura 7 Disposição das capturas realizadas durante o deslocamento em torno do objeto. (Fonte**:** Elaborado pelos autores).

Antes do processamento, é possível selecionar a área digitalizada, excluindo regiões desnecessárias e otimizando a geração da malha. Uma vez criada, a malha pode ter partes ocultadas sem que sejam permanentemente removidas do modelo.

3.4 Digitalização com o *scanner Artec Eva*

Com capacidade para capturar até 2 milhões de pontos por segundo, incluindo informações cromáticas do objeto, o *scanner* de luz estruturada *Artec EVA* possui um alcance de 40 a 100 cm. O dispositivo opera por meio de projeções de luz branca (até 16 quadros por segundo) que incidem sobre o objeto. A partir da distorção desse padrão, o sistema calcula as coordenadas cartesianas da superfície do objeto. Portátil e de operação manual, o *scanner* é acoplado a um *notebook*, sendo a digitalização efetuada por uma câmera embutida. Após a captura, os dados adquiridos são processados pelo *software Artec Studio*.

O escaneamento realizado com o *scanner Artec EVA* empregou uma combinação dos procedimentos adotados nas digitalizações anteriores. Assim, para auxiliar o *software* na identificação de regiões homólogas, a escultura foi posicionada no centro da base elevada, com as mesmas formas geométricas

irregulares dispostas ao seu redor. Durante a digitalização, a base foi manualmente rotacionada, enquanto o *scanner* era movimentado na direção vertical. O procedimento foi realizado três vezes, e as nuvens de pontos foram posteriormente combinadas no *software Artec Studio* para a criação da malha tridimensional.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No aplicativo *Polycam*, as digitalizações foram processadas com nível completo de detalhamento e sem mascaramento do objeto. No *RealityScan* 3D, por sua vez, optou-se por nível alto de detalhamento, filtragem de malha detalhada e textura em resolução 4K.

Os dados indicam que, em todos os *smartphones* avaliados, apesar das diferenças de resolução entre os sensores, ocorreu uma redução significativa no tamanho dos arquivos após o processamento das imagens, com variações entre 81,85% e 98,10%. Esse fato pode implicar uma perda na qualidade dos modelos, especialmente na textura, uma vez que independentemente da qualidade das imagens capturadas, os arquivos gerados apresentarão tamanhos similares, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 Informações dos modelos gerados pelos aplicativos de fotogrametria.

	Modelos					
	P-I-M1	P-G-M2	P-M-M3	RS-I-M4	RS-G-M5	RS-M-M6
Tamanho do arquivo antes do processamento	103,3 MB	39,9 MB	40,1 MB	241,0 MB	541,0 MB	163,0 MB
Tamanho do arquivo após o processamento	7,60 MB	7,24 MB	6,69 MB	10,9 MB	10,3 MB	11,0 MB
Percentual de redução	92,64%	81,85%	83,32%	95,48%	98,10%	93,25%
Nível de detalhe	Completo	Completo	Completo	Alto	Alto	Alto
Número de capturas	72	72	72	96	96	96
Número de vértices	44300	33854	36700	14353	15252	15356

(Fonte: Elaborado pelos autores)

4.1 Análise dos modelos obtidos com os aplicativos *Polycam* e *RealityScan* 3D

A partir da restituição fotogramétrica realizada no aplicativo *Polycam*, verificou-se que os modelos P-I-M1 e P-M-M3 apresentaram problemas em isolar a região do chapéu em relação ao plano de fundo da imagem, como pode ser verificado nas Figuras 8 e 10. Isso se deve, em parte, à dificuldade do pós-processamento em diferenciar tons muito próximos entre os diferentes planos.



Figura 8 Modelo P-I-M1. (Fonte: Elaborado pelos autores).

Embora essa ocorrência não tenha sido observada no modelo P-G-M2, o qual apresentou melhor contraste em relação ao plano de fundo e tonalidades menos saturadas, mais próximas ao modelo real, como pode ser visto na Figura 9, todos os modelos apresentaram dificuldades na segmentação da região da âncora, conforme destacado na Figura 11, bem como nos demais detalhes em vermelho.

Quanto á aquisição da textura, verifica-se o aplicativo *Polycam* apresentou desempenho superior quando utilizado no *Galaxy S23 Ultra* (modelo P-G-M2). Isso se deve ao fato de que as cores obtidas nesse dispositivo se mostraram mais realistas e menos saturadas, ou seja, mais próximas da aparência do objeto real. Essa correspondência cromática favoreceu a qualidade geral do modelo, permitindo uma reconstituição mais precisa da região do chapéu, que se mostrou fortemente dependente da correta captura de tonalidades para preservar e reconstituir sua volumetria.



Figura 9 Modelo P-G-M2. (Fonte: Elaborado pelos autores).



Figura 10 Modelo P-M-M3. (Fonte: Elaborado pelos autores).



Figura 11 Detalhe do modelo P-G-M2. (Fonte: Elaborado pelos autores).

Quanto aos modelos gerados pelo aplicativo *RealityScan* 3D, observa-se a ausência dos erros de processamento de malha presentes nos modelos obtidos por meio do *Polycam*. No entanto, no modelo RS-G-M5, mostrado na Figura 13, identificam-se diversos pontos com perda significativa na qualidade da aquisição da textura, destacados nos círculos vermelhos. Além disso, a inspeção visual permite identificar outras inconsistências, como a ausência de volumetria nas regiões do nariz, no modelo RS-I-M4, e na região da âncora, no modelo RS-M-M6, como mostrado nas Figuras 12 e 14.

Além disso, ao comparar modelos gerados por aplicativos diferentes no mesmo dispositivo, observou-se, por exemplo, que o modelo P-G-M2 apresentou melhor desempenho na aquisição de textura em relação ao modelo RS-G-M5. Esse resultado evidencia a necessidade de repetibilidade, ou seja, de realizar testes adicionais com cada aplicativo, a fim de conduzir uma avaliação mais rigorosa e consistente, capaz de identificar limitações e vantagens específicas de cada solução.



Figura 12 Modelo RS-I-M4. (Fonte: Elaborado pelos autores).



Figura 13 Modelo RS-G-M5. (Fonte: Elaborado pelos autores).



Figura 14 Modelo RS-M-M6. (Fonte: Elaborado pelos autores).

4.2 Análise dos modelos obtidos com o *Artec* Eva

O modelo AE-M7, mostrado nas Figuras 15 e 16, foi utilizado como referência para a comparação dimensional com os demais modelos tridimensionais. Como foi obtido por meio do *scanner* de luz estruturada, verifica-se uma maior densidade de pontos e, consequentemente, uma malha poligonal com um maior número de faces e polígonos. Esse aspecto está em conformidade com os dados apresentados na Tabela 3 e pode ser visualmente constatado na comparação entre os modelos P-G-M2, RS-M-M6 e AE-M7, conforme ilustrado nas Figuras 17 e 18.



Figura 15 Modelo AE-M7. (Fonte: Elaborado pelos autores).



Figura 16 Detalhes do modelo AE-M7. (Fonte: Elaborado pelos autores).

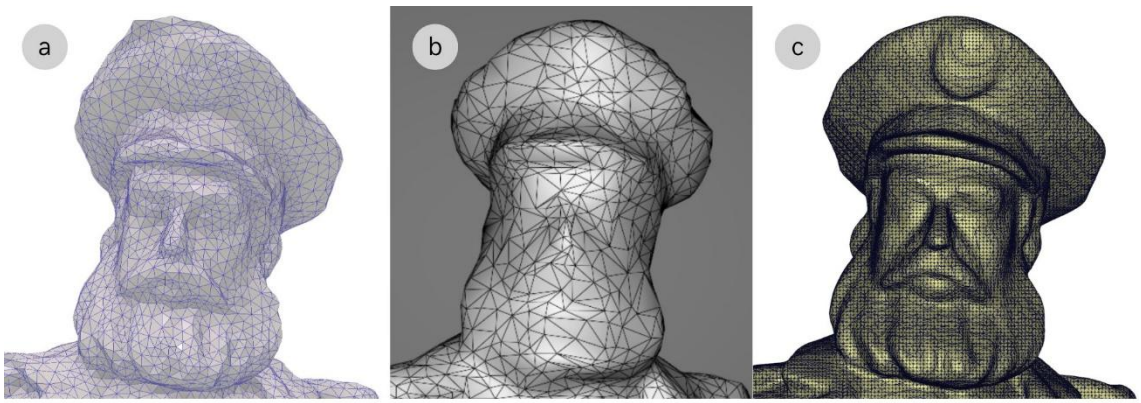


Figura 17 Comparativo de malha entre os modelos P-G-M2 (a), RS-M-M6 (b) e AE-M7 (c). (Fonte: Elaborado pelos autores).

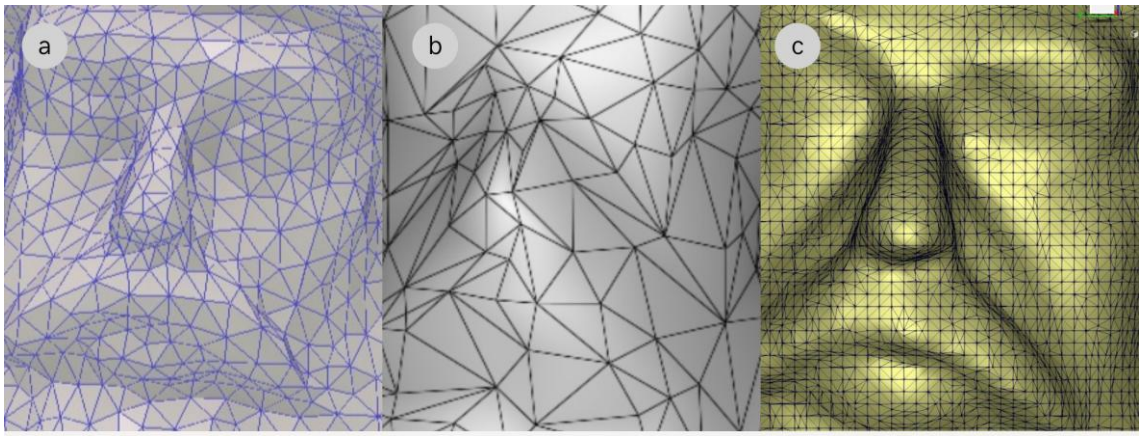


Figura 18 Comparativo de malha ampliada entre os modelos P-G-M2 (a), RS-M-M6 (b) e AE-M7 (c). (Fonte: Elaborado pelos autores).

Com a ocultação da textura, torna-se possível verificar a restituição estereoscópica da geometria de cada modelo em relação ao modelo de referência, apresentados nas Figuras 19 e 20. Por meio de inspeção visual, observa-se que o modelo P-G-M2 apresentou, uma captura mais precisa dos detalhes, enquanto os modelos P-I-M1 e P-M-M3 apresentaram falhas mais significativas, ao reconstituírem áreas inexistentes no modelo original.



Figura 19 Comparativo dos modelos sem a presença de textura. (Fonte: Elaborado pelos autores).

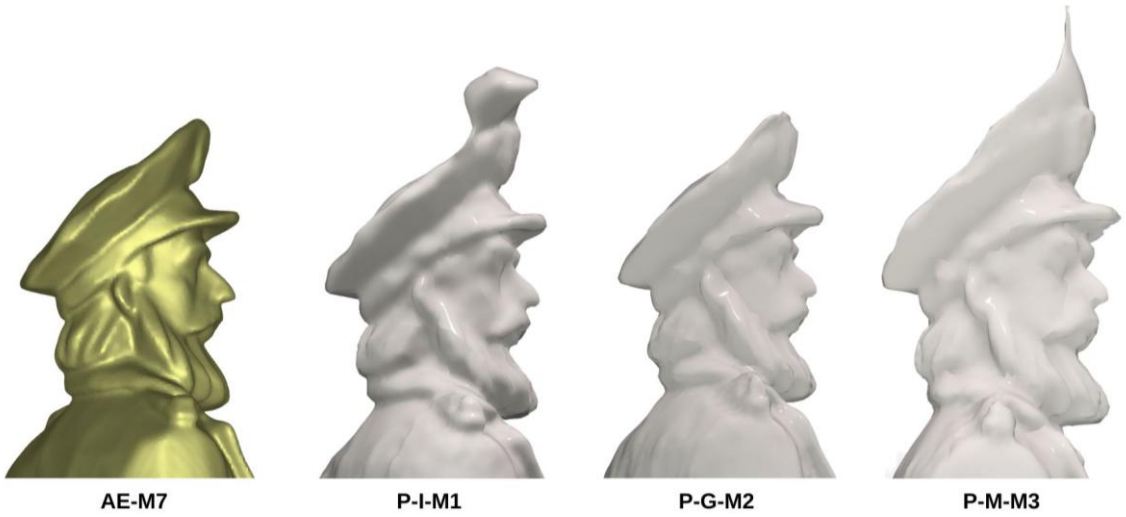


Figura 20 Comparativo da vista lateral direita sem a presença de textura. (Fonte: Elaborado pelos autores).

4.3 Análise dimensional comparativa

Para a análise dimensional comparativa, os modelos gerados por fotogrametria foram importados para o *software Geomagic Wrap*, onde foram sobrepostos ao modelo de referência, obtido por meio do escaneamento por luz estruturada. Esse procedimento permitiu a verificação das diferenças dimensionais e a determinação do desvio-padrão, exibidos na Tabela 3.

Para a apresentação dos resultados, nos gráficos a seguir, a cor verde indica áreas de compatibilidade dimensional. As tonalidades que variam do amarelo ao vermelho, por sua vez, representam diferenças positivas, ou seja, regiões em que o modelo comparado apresenta dimensões superiores (ou se projeta para fora das malhas) em relação ao modelo de referência. Por outro lado, os tons de azul indicam diferenças negativas, correspondentes a áreas em que o modelo comparado apresenta dimensões inferiores às do modelo de referência.

Tabela 3 Resultados da análise dimensional dos modelos gerados por fotogrametria em relação ao modelo de referência.

	Modelos					
	P-I-M1	P-G-M2	P-M-M3	RS-I-M4	RS-G-M5	RS-M-M6
Diferença média positiva	0,24	0,33	0,22	0,84	0,35	0,57
Diferença média negativa	-0,12	-0,29	-0,14	-0,91	-0,37	-0,55
Desvio padrão	0,75	0,45	0,49	1,02	0,50	0,82

Na sobreposição dos modelos P-I-M1 e AE-M7, apresentada na Figura 21, a média da diferença dimensional positiva foi de 0,24 mm, enquanto a diferença negativa foi de -0,12 mm, indicando uma boa compatibilidade com o modelo de referência. Embora essa aproximação seja satisfatória, o desvio padrão de 0,75 está associado às regiões com erros de processamento, como no topo do chapéu, onde as diferenças atingiram 12,90 mm e -12,89 mm, respectivamente. Ressalta-se, contudo, que o valor positivo, por exemplo, está associado à região em que ocorreu a geração de uma malha inexistente no objeto real. Como explicitado ao longo do texto, esse equívoco decorreu da similaridade de cor entre o objeto e o plano de fundo, o que levou o aplicativo a interpretar equivocadamente essa área como parte do modelo.



Figura 21 Comparativo entre os modelos P-I-M1 e AE-M7. (Fonte: Elaborado pelos autores).

Na sobreposição entre os modelos P-G-M2 e AE-M7, apresentado na Figura 22, a média da diferença dimensional positiva foi de 0,33 mm, a negativa de -0,29 mm e o desvio padrão de 0,45. Em regiões de difícil restituição estereoscópica, esses valores atingiram 9,70 mm e -4,97 mm, respectivamente. Além disso, foram identificadas várias regiões com diferenças dimensionais negativas, representadas por tonalidades azuladas, indicando que o modelo obtido possui dimensões menores que o modelo de referência.



Figura 22 Comparativo entre os modelos P-G-M2 e AE-M7. (Fonte: Elaborado pelos autores).

De maneira similar à comparação com o modelo gerado pelo *Apple iPhone 14*, a sobreposição entre os modelos P-M-M3 e AE-M7, apresentada na Figura 23, revelou uma diferença dimensional média de 0,22 mm para valores positivos e -0,14 mm para negativos. Com desvio padrão moderado de 0,49 (similar ao de M2), verifica-se boa compatibilidade dimensional. Nas áreas onde houve dificuldade em isolar o objeto do cenário, da mesma forma que em M1, as diferenças dimensionais foram de 12,90 mm e -10,36 mm.



Figura 23 Comparativo entre os modelos P-M-M3 e AE-M7. (Fonte: Elaborado pelos autores).

Em relação ao aplicativo *RealityScan 3D*, a sobreposição entre os modelos RS-I-M4 e AE-M7, apresentada na Figura 24, revelou que a média das diferenças dimensionais positivas foi de 0,84 mm e de -0,91 mm para as negativas. Adicionalmente, o modelo apresentou o desvio padrão mais alto entre os analisados (1,02), indicando maior dispersão dos dados em relação à média. Também foi observado o predomínio de diferenças dimensionais negativas em comparação às positivas, conforme evidenciado pelo excesso de tonalidades azuladas, o que sugere que o modelo obtido possui dimensões significativamente menores em relação ao modelo de referência.

Quanto à sobreposição entre os modelos RS-G-M5 e AE-M7, apresentada na Figura 25, verificaram-se diferenças dimensionais médias de 0,35 mm e -0,37 mm. Observou-se, também, diferenças máximas de 4,97 mm e -3,14 mm, com desvio padrão de 0,50 mm. Além disso, embora a média dos desvios se mantenha próxima de zero, verifica-se que há regiões com uma maior concentração de regiões positivas no topo do modelo e de regiões negativas na base.

Na sobreposição entre os modelos RS-M-M6 e AE-M7, vista na Figura 26, foi observada uma diferença dimensional média positiva de 0,57 mm e uma negativa de -0,55 mm, com valores máximos de 11,07 mm e -12,05 mm, respectivamente,

e desvio padrão de 0,82. As áreas de maior complexidade para a restituição estereoscópica, especialmente na região inferior dos braços, foram aquelas em que predominaram as maiores diferenças dimensionais positivas. Além disso, observa-se uma maior ocorrência de diferenças dimensionais negativas distribuídas ao longo de toda a peça, indicando que o modelo gerado, assim como o RS-I-M4, apresenta dimensões inferiores às do modelo obtido com o *scanner* de luz estruturada.



Figura 24 Comparativo entre os modelos RS-I-M4 e AE-M7. (Fonte: Elaborado pelos autores).



Figura 25 Comparativo entre os modelos RS-G-M5 e AE-M7. (Fonte: Elaborado pelos autores).

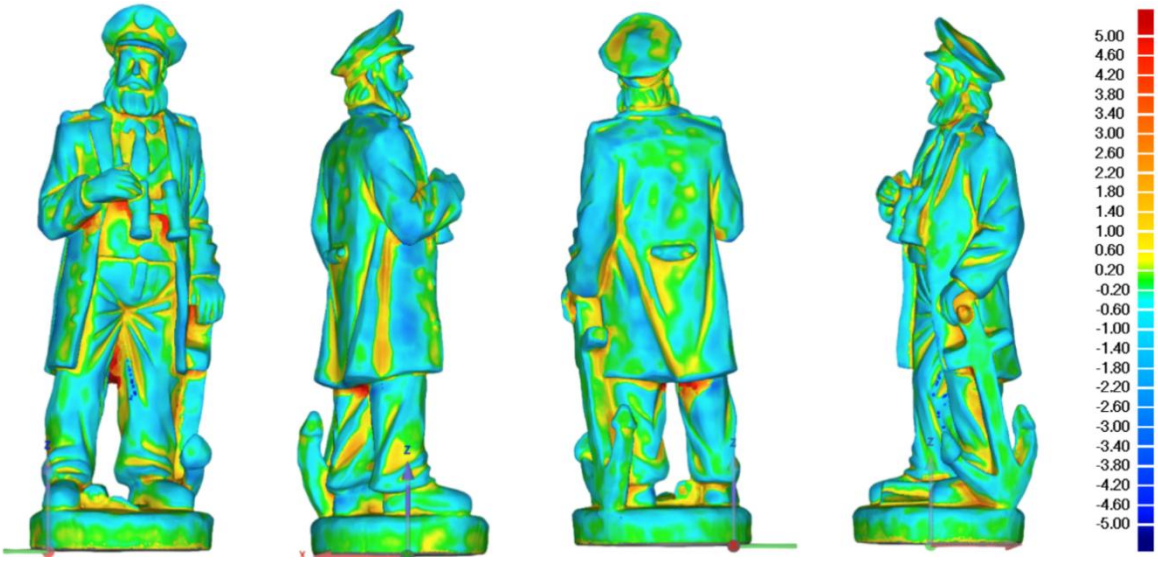


Figura 26 Comparativo entre os modelos RS-M-M6 e AE-M7. (Fonte: Elaborado pelos autores).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A digitalização tridimensional consolidou-se como uma ferramenta valiosa para o registro digital de objetos e ambientes do mundo real. Neste estudo, foi realizada uma análise comparativa entre um *scanner* de luz estruturada e diferentes dispositivos móveis com aplicativos de fotogrametria, considerando aspectos como qualidade da textura, exatidão dimensional e nível de habilidade exigido do usuário. As principais conclusões foram sintetizadas na **Tabela 4**. As classificações qualitativas apresentadas nessa tabela possuem caráter comparativo e foram estabelecidas a partir dos resultados obtidos na investigação, considerando o desempenho relativo das tecnologias avaliadas e adotando o modelo gerado pelo *Artec EVA* como referência. Para os atributos relacionados à geometria, foram considerados conjuntamente a densidade de pontos e a regularidade da malha, a preservação visual dos detalhes superficiais, a ocorrência de oclusões ou áreas reconstruídas incorretamente e os desvios dimensionais verificados na sobreposição dos modelos. A avaliação da textura e da fidelidade cromática baseou-se na inspeção visual dos modelos em relação ao objeto original, considerando perdas de informação, saturação e correspondência das cores. Os atributos operacionais, por sua vez, foram classificados a partir das condições observadas durante o procedimento experimental, incluindo facilidade de operação, necessidade de equipamentos auxiliares e mobilidade do sistema. Assim, as categorias “alta”, “média” e “baixa” expressam uma comparação relativa entre as soluções testadas, não correspondendo a faixas metrológicas ou limites absolutos de desempenho.

Tabela 4 Síntese dos resultados obtidos através dos métodos de digitalização.

	Polycam	*RealityScan 3D*	*Artec EVA*
Densidade de pontos	Média	Média a baixa	Alta
Topologia da malha	Triangular e regular	Triangular e irregular	Triangular e regular
Fidelidade geométrica	Média	Baixa	Alta
Exatidão dimensional	Média a baixa	Média a baixa	Alta
Cobertura	Podem faltar partes	Podem faltar partes	Alta
Aquisição de textura	Média a baixa	Baixa	Alta
Fidelidade cromática	Cores mais saturadas que o modelo original	Cores menos saturadas que o modelo original	Cores menos saturadas que o modelo original
Facilidade de uso	Muito fácil	Muito fácil	Requer treino
Portabilidade	Alta	Alta	Média

Os resultados demonstraram que, em relação à densidade de pontos, o modelo gerado pelo *scanner* de luz estruturada *Artec EVA* apresentou a maior concentração por unidade de área, resultando em alto nível de detalhamento geométrico. As soluções voltadas para dispositivos móveis, por sua vez, apresentaram uma menor densidade de pontos, sobretudo o *RealityScan 3D*. Além disso, a topologia das malhas obtidas com o *Artec EVA* mostrou-se mais regular, caracterizando-se pela distribuição uniforme dos polígonos. Embora o *Polycam* também tenha apresentado certa regularidade na construção das malhas, no *RealityScan 3D* observaram-se maiores variações no tamanho dos triângulos que compõem a estrutura do modelo.

No que diz respeito à fidelidade geométrica, os dados obtidos com o *Artec EVA* mantiveram maior fidelidade à forma real do objeto. Já os modelos gerados em dispositivos móveis apresentaram perdas de detalhamento superficial, mais evidentes em regiões de difícil restituição estereoscópica. Deste modo, sob uma perspectiva prática, os resultados indicam que a fotogrametria baseada em *smartphones* pode constituir uma alternativa aos *scanners* dedicados quando a finalidade da digitalização admite menor rigor geométrico e dimensional e quando fatores como baixo custo, portabilidade, rapidez de aquisição e facilidade de operação são prioritários. Nesse contexto, sua utilização mostra-se particularmente promissora para usos didáticos, visualização tridimensional, produção de modelos digitais para comunicação e registro preliminar de objetos. Por outro lado, a substituição de *scanners* dedicados não é recomendável quando a aplicação exige elevada exatidão dimensional, reprodução consistente de detalhes geométricos, cobertura completa de regiões de difícil acesso ou maior controle metrológico, como em determinadas aplicações de engenharia reversa, documentação técnica e inspeção dimensional.

A cobertura das digitalizações também variou de maneira significativa. O *Artec EVA* possibilitou modelos mais completos, com desempenho superior na captura de áreas de difícil acesso, beneficiado pela flexibilidade de movimentação do operador e pelo monitoramento em tempo real. Nos aplicativos móveis, entretanto, a cobertura foi limitada pelas restrições de ângulo de captura, resultando em regiões ausentes ou mal definidas.

Quanto à aquisição de textura, o *scanner* de luz estruturada apresentou desempenho superior, favorecido pela maior densidade da malha. Em termos de fidelidade cromática, contudo, o modelo gerado pelo *Polycam* no *smartphone Galaxy S23 Ultra* destacou-se pela alta correspondência na reprodução das cores. Nos modelos produzidos por esse aplicativo em outros *smartphones*, as cores mostraram-se mais saturadas em comparação ao objeto real, enquanto, no *RealityScan 3D*, observaram-se tonalidades menos intensas e com tendência ao avermelhado. Neste contexto, é importante ressaltar que a qualidade dos resultados está fortemente condicionada tanto às condições de iluminação quanto aos diversos parâmetros das câmeras e aos respectivos algoritmos de reprodução cromática.

Sob o ponto de vista operacional, a fotogrametria apresentou vantagens relevantes em relação ao escaneamento por luz estruturada. As soluções móveis destacaram-se pela simplicidade de uso e pelo menor tempo de aquisição de dados, oferecendo interfaces intuitivas e acessíveis mesmo para usuários não especializados. Já no *Artec EVA*, embora o manuseio seja relativamente intuitivo, exige maior familiaridade tanto com o equipamento quanto com o *software* de pós-processamento.

No que se refere à portabilidade, constatou-se que a fotogrametria apresenta grande praticidade, pois não requer alto poder computacional, utilizando os sensores e o

processador do próprio *smartphone*. Esse fator também a configura como uma alternativa de menor custo. Embora o *Artec EVA* seja classificado como um *scanner* portátil, seu funcionamento depende de um computador dedicado e de alimentação elétrica, o que restringe seu uso em ambientes externos ou em locais com infraestrutura limitada. Ademais, verificou-se que, em situações em que não é possível circundar o objeto, mas há possibilidade de movimentá-lo, o *Polycam* mostrou-se a opção mais adequada.

Por fim, conclui-se, que, embora os aplicativos de fotogrametria ainda não atinjam o nível de exatidão proporcionado por tecnologias mais consolidadas, como o escaneamento por luz estruturada, eles se configuram como soluções consistentes em termos de portabilidade, acessibilidade e fidelidade de cores. A pesquisa evidenciou, ainda, que o planejamento prévio do cenário, a definição da estratégia de digitalização e do método de captura das imagens são etapas determinantes para otimizar tanto a qualidade dos modelos quanto a eficiência do processo de aquisição dos dados.

Como limitação, destaca-se que o programa experimental foi conduzido com um único objeto de estudo, constituído por uma escultura de madeira com características geométricas específicas, três modelos de *smartphones* e dois aplicativos de fotogrametria móvel. Além disso, cada combinação entre *smartphone* e aplicativo foi avaliada a partir de uma aquisição utilizada na comparação final, não tendo sido investigada a repetibilidade dos resultados para essas combinações. Dessa forma, os resultados obtidos devem ser interpretados à luz das condições experimentais adotadas, considerando-se as particularidades dos dispositivos, aplicativos, objetos, escalas, condições de iluminação, entre outros fatores. Estudos futuros devem ampliar o número de objetos e materiais avaliados, incluir dispositivos com diferentes características de câmera e sensores, incorporar outros aplicativos e realizar aquisições repetidas para avaliar a variabilidade e a repetibilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS

1. ASKAR C, STERNBERG H. Use of smartphone lidar technology for low-cost 3D building documentation with iPhone 13 Pro: A comparative analysis of mobile scanning applications. Geomatics, Vol. 3, pp. 563-579, 2023.
2. BRENDLER CF, MÜLLER MS, SILVA FP, TEIXEIRA FG. Uso da digitalização 3D do corpo humano para desenvolvimento de produtos personalizados: Análise comparativa entre os scanners Artec EVA e o Kinect. Estudos em Design, Vol. 24, n. 2, pp. 24-43, 2016.
3. ATIK ME, DURAN Z, YANALAK M, SEKER DZ, AK A. 3D modeling of historical measurement instruments using photogrammetric and laser scanning techniques. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, Vol. 30, n. 286, pp. 1-10, 2023.
4. GALLEGO ALARCÓN AF, SILVA FP. Aplicação de tecnologias 3D para reconstituição de artefatos de cerâmica Tupi-Guarani a partir de fragmentos. In: Gaiger de Oliveira, Geísa; Núñez, Gustavo Javier Zani; Passos, Jaire Ederson (Org.). Design em pesquisa, Porto Alegre: Marcavisual, Vol. 6, pp. 149-158, 2024.
5. BOBOC RG, GÎRBACIA F, POSTELNICU CC, GÎRBACIA T. Evaluation of using mobile devices for 3D reconstruction of cultural heritage artifacts. In VR Technologies in Cultural Heritage; Duguleană, Mihai; Carrozzino, Marcello; Gams, Matjaž; Tanea, Iulian (Eds.). Communications in Computer and Information Science, Springer International Publishing: Cham, Swizterland, Vol. 904, pp. 46-59, 2019.
6. RICHETTI A, SILVA FP, ROLDO L. 3D Scanning of Porto Alegre Museum Artifacts: The Crockery of the Rocco Bakery. Muzeologia A Kulturne Dedicstvo-Museology and Cultural Heritage, Vol. 10, pp. 43-59, 2022.
7. BONFADA CF, KAUFFMANN AR, SILVA FP. Desenvolvimento e avaliação de réplicas em resinas de bens do patrimônio cultural com uso de digitalização 3D e fabricação digital. Gestão e Tecnologia de Projetos, Vol. 15, n. 1, pp. 42-53, 2020.
8. ALENCASTRO YO, DANTAS PVF, SILVA FP, JACQUES DE JACQUES J. Ferramentas de digitalização 3D faça-você-mesmo na preservação do patrimônio cultural. Interações, Vol. 20, n. 2, pp. 435-448, 2019.
9. MUNIZ GR, SILVA FP, KINDLEIN JÚNIOR W. Design, tecnologia e patrimônio: digitalização tridimensional como ferramenta de preservação de elementos de prédios históricos. Gestão e Tecnologia de Projetos, Vol. 13, pp. 53-66, 2018.
10. VIEIRA MM, RIBEIRO G, PAULO R, BESSA M, SOUSA FR, MOREIRA E, MESQUITA E. Strategy for HBIM implementation using high-resolution 3D architectural documentation based on laser scanning and photogrammetry of the José de Alencar theatre. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, Vol. 30, n. 287, 2023.
11. CANUTO CL, SALGADO MS. Modelo BIM do Palácio Gustavo Capanema 1937-1945: pela preservação digital do patrimônio moderno. Gestão e Tecnologia de Projetos, São Carlos, Vol. 15, n. 1, pp. 101-116, 2020.
12. COGIMA CK, NASCIMENTO RVC, PAIVA PVV, CARVALHO MAG, DEZEN-KEMPTER E. Scan-to-HBIM aplicado à igreja da Pampulha de Oscar Niemeyer. Gestão e Tecnologia de Projetos, Vol.15, n.1, pp. 117-134, 2020.
13. CUPERSCHMID ARM, FABRICIO MM, FRANCO JR JC. HBIM Development of a Brazilian Modern Architecture Icon: Glass House by Lina Bo Bardi. Heritage, Vol. 2, n. 3, pp. 1927–1940, 2019.
14. MASCARO LP, DURANTE LC. Experiências de estudos de bens culturais de Mato Grosso utilizando HBIM e fotogrametria. Engineering and Science, Vol. 11, n. 3, pp. 73-92, 2022.
15. CALEGARI EP, PUPIM VM, LEAL MA, SILVA FP. A digitalização tridimensional como método de verificação da deformação do MDF ocasionada pela absorção de água. DAPesquisa, v. 12, n. 18, pp. 14-29, 2017.
16. MEDEIROS ATT, SILVA FP. O uso da digitalização tridimensional no mapeamento de danos dos ladrilhos hidráulicos do Paço dos Açorianos de Porto Alegre (RS). Labor e Engenho, Campinas, SP, Vol. 13, n. 19017, pp. 1-13, 2019.
17. POHLMANN M, DUARTE LC, KINDLEIN JÚNIOR W, SILVA FP. Use of three-dimensional laser scanning for the mapping of dimensional errors generated during the manufacturing process of investment casting. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol. 6, pp. 35-40, 2016.

18. ARMESTO-GONZÁLEZ J, RIVEIRO-RODRÍGUEZ B, GONZÁLEZ-AGUILERA D, RIVAS-BREA MT. Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. Journal of Archaeological Science, Vol. 37, n. 12, pp. 3037-3047, 2010.

19. MUKUPA W, ROBERTS GW, HANCOCK C, AL-MANASIR K. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. Survey Review, Vol. 49, n. 5, pp. 99–116, 2017.

20. ALVES SSO, VEIGA LAK, MEDINA AS. Avaliação da qualidade posicional de varreduras laser terrestre para aplicações em arquitetura. PARC Pesq. em Arquit. e Constr., Campinas, SP, Vol. 13, pp. 1-20, 2022.

21. GROETELAARS NJ. Criação de modelos BIM a partir de "nuvens de pontos": Estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

22. WANG W, ZHAO W, HUANG L, VIMARLUND V, WANG Z. Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: A review. Journal of Traffic and Transportation Engineering (Eng. Ed.), Vol. 1, n. 5, pp. 325-337, 2014.

23. HALEEM A, JAVAID M. 3D scanning applications in medical field: A literature-based review. Clinical Epidemiology and Global Health, Vol. 7, pp. 199-210, 2019.

24. DA SILVEIRA AC, DAW JL JR, KUSNOTO B, EVANS C, COHEN M. Craniofacial applications of three-dimensional laser surface scanning. The Journal of Craniofacial Surgery, Vol. 14, n. 4, pp. 449–456, 2003.

25. GRANT CA, JOHNSTON M, ADAM CJ, LITTLE JP. Accuracy of 3D surface scanners for clinical torso and spinal deformity assessment. Medical Engineering & Physics, Vol. 63, pp. 63–71, 2019.

26. JAVAID M, HALEEM A, KUMAR L. Current status and applications of 3D scanning in dentistry. Clinical Epidemiology and Global Health, Vol. 7, Issue 2, pp. 228-233, 2019.

27. ACKERMANN A, WISCHNIEWSKI S, BONIN D, GAIDA AK, JAITNER T. Validation of a 3D whole-body scanning system to collect anthropometric data from a working-age population for ergonomic design. International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 105, pp. 1-11, 2025.

28. PAGLIARI C, MONTALTI A, FRIZZIERO L, LIVERANI A. Enhancing ergonomic comfort: A study on customized cushion design using 3D scanning and additive manufacturing. Results in Engineering, Vol. 25, pp. 1-9, 2025.

29. CHEN X, ZHANG L, GU B. 3D young female waist-leg modelling based on a hybrid 3d-scan and 2d-image approach. International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 103, pp. 1-11, 2024.

30. MOSKVIN A, MOSKVINA M, KUZMICHEV V. A study on levels of detail for presenting 3D models of historical costumes online. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, Vol. 36, pp. 1-13, 2025.

31. FOL CR, KÜKENBRINK D, REHUSH N, MURTIYOSO A, GRIESS VC. Evaluating state-of-the-art 3D scanning methods for stem-level biodiversity inventories in forests. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 122, pp. 1-12, 2023.

32. ARRIZZA S, MARRAS S, FERRARA R, PELLIZZARO G. Terrestrial Laser Scanning (TLS) for tree structure studies: a review of methods for wood-leaf classifications from 3D point clouds. Remote Sensing Applications: Society and Environment, Vol. 36, pp. 1-18, 2024.

33. BUGEJA A, BONANNO M, GARG L. 3D scanning in the art & design industry. Materials Today: Proceedings, Vol. 63, pp. 718-725, 2022.

34. FAWZY HED. 3D laser scanning and close-range photogrammetry for buildings documentation: A hybrid technique towards better accuracy. Alexandria Engineering Journal, Vol. 58, pp. 1191-1204, 2019.

35. LEAL RL, BRUSCATO LM. Fotogrametria de baixo custo para digitalização 3D de ornatos arquitetônicos – comparativo entre softwares gratuitos e pagos. Revista Caderno Pedagógico, Vol. 21, n. 3, pp. 1-38, Studies Publicações e Editora Ltda., Curitiba, 2024.

36. BECERIK-GERBER B, JAZIZADEH F, KAVULYA G, CALIS G. Assessment of target types and layouts in 3D laser scanning for registration accuracy. Automation in Construction, Vol. 20, n. 5, pp. 649-658, 2011.

37. WUTKE JD. Métodos para avaliação de um sistema laser scanner terrestre. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

38. EKLUND A. 3D Scanning with a mobile phone and other methods. 2016. Degree thesis (Degree Programme in Plastteknik) – ARCADA, Helsinki, 2016.

39. INÊS MAMCV. Digitalização 3D por meio de fotogrametria: uma análise comparativa. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Braga, Portugal, 2022.

40. KANTAROS A, GANETSOS T, PETRESCU FIT. Three-Dimensional Printing and 3D Scanning: Emerging Technologies Exhibiting High Potential in the Field of Cultural Heritage. Applied Sciences, Vol. 13, n. 4777, pp. 1-25, 2023.

41. DANTAS PVF, RIBEIRO TRR, BRUSCATO UM, SILVA FP. Protótipo de dispositivo facilitador para digitalização 3D por fotogrametria com smartphones. SIGraDi 2016, XX Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, pp. 297-305, Buenos Aires, Argentina, 2016.

42. MEDEIROS ATT, SILVA FP. Design, Digitalização Tridimensional & Ladrilho Hidráulico: O Patrimônio Cultural de Porto Alegre – RS. Uma Revisão Sistemática para o Gerenciamento da Pesquisa. Arquitetura e Lugar, Vol. 1, n. 1, pp. 32-49, 2023.

43. SZALAI V. 3D Scanning Imperfection Measurements for FEM Analysis of Steel Links. Advance Design of Steel and Composite Structures, The Polytechnic University of Timisoara, 2023.

44. CONFALONE GC, SMITS J, KINNARE T. 3D Scanning for advanced manufacturing, design, and construction. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2023.

45. MORAES RF. Laser: A luz que revolucionou a Tecnologia. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Física) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, 2015.

46. BELL T, KARPINSKY N, ZHANG S. Real-Time 3D Sensing with Structured Light Techniques. In: Interactive Displays: Natural Human-Interface Technologies, Chapter 5, pp. 181-213, Wiley, 2014.
47. KASSER M, EGELS Y. Digital Photogrammetry. London: CRC Press, 2001.
48. LINDER W. Digital Photogrammetry: A Practical Course. Heidelberg, Springer Berlin, 2009.
49. MENDONÇA VMNSV. Reconstrução 3D biomédica: fotogrametria versus varrimento por laser. 2017. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2017.
50. FOSTER S, HALBSTEIN D. Integrating 3D Modeling, Photogrammetry and Design. Springer London, 2014.