

VESTÍGIOS – Revista Latino-Americana de Arqueologia Histórica
Volume 20 | Número 2 | Julho – Dezembro 2026
ISSN 1981-5875
ISSN (online) 2316-9699

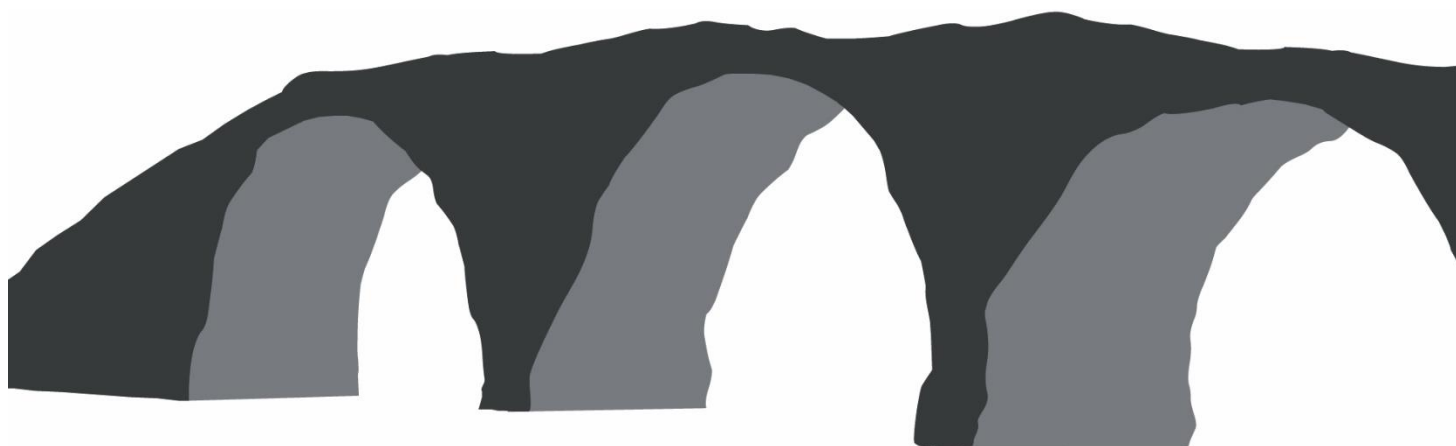
**ANÁLISE COMPARATIVA DE TECNOLOGIAS DE DIGITALIZAÇÃO 3D
APLICADAS AO ACERVO DE ÂNFORAS DO MAE-USP**

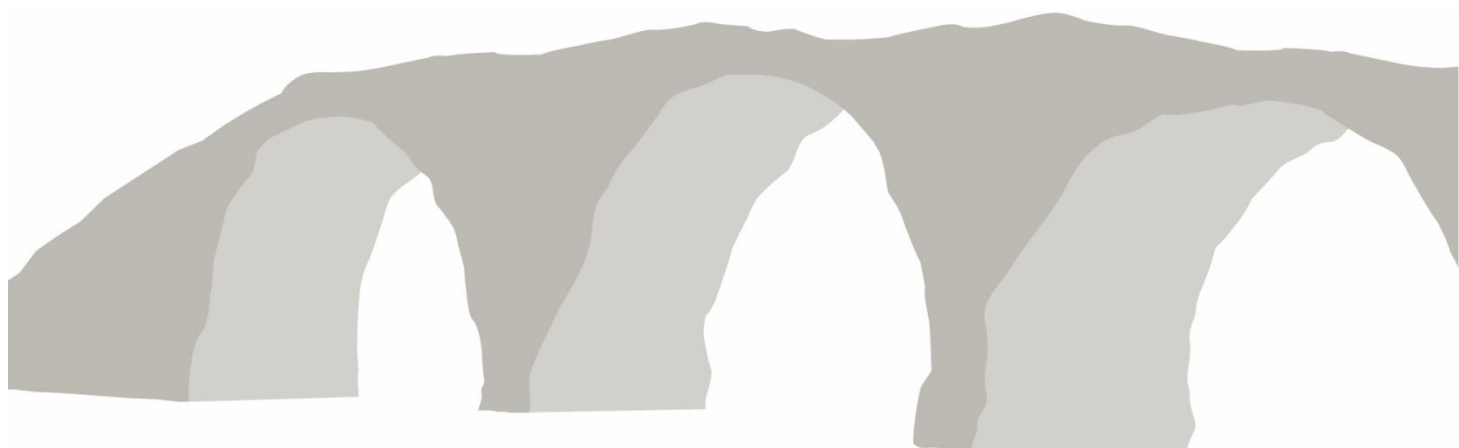
**ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE DIGITALIZACIÓN 3D
APLICADAS A LA COLECCIÓN DE ÂNFORAS DEL MAE-USP**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF 3D DIGITIZATION TECHNOLOGIES
APPLIED TO THE MAE-USP AMPHORA COLLECTION**

Matheus Morais Cruz

Jessica Silva Mendes





Submetido em 30/04/2026.

Revisado em: 01/06/2026.

Aceito em: 10/06/2026.

Publicado em 29/07/2026.

ANÁLISE COMPARATIVA DE TECNOLOGIAS DE DIGITALIZAÇÃO 3D APLICADAS AO ACERVO DE ÂNFORAS DO MAE-USP

ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE DIGITALIZACIÓN 3D APLICADAS A LA COLECCIÓN DE ÂNFORAS DEL MAE-USP

COMPARATIVE ANALYSIS OF 3D DIGITIZATION TECHNOLOGIES APPLIED TO THE MAE-USP AMPHORA COLLECTION

Matheus Morais Cruz¹

Jessica Silva Mendes²

RESUMO

Este artigo apresenta uma avaliação comparativa de tecnologias de digitalização tridimensional aplicadas ao estudo de ânforas do acervo do Museu de Arqueologia e Etnologia da Universidade de São Paulo (MAE-USP), no âmbito do projeto “Análise Multimodal de Ânforas do MAE-USP: Documentação 3D e Investigação Arqueométrica”. A pesquisa examina três ânforas completas e cinco fragmentos de alças estampadas, digitalizados por escaneamento 3D com sensores ativos (Artec Space Spider e NextEngine) e por fotogrametria digital, com processamento realizado nos softwares Agisoft Metashape e Artec Studio. A análise se fundamenta em critérios quantitativos – como densidade de malha, tempo de aquisição e processamento e desvio geométrico intermodelo – e qualitativos, relacionados à fidelidade visual, à resolução de superfície e à aplicabilidade arqueológica. Os resultados indicam que todas as abordagens produzem modelos geometricamente consistentes em escala submilimétrica, adequados para análises morfológicas e tipológicas. Entretanto, evidenciam-se diferenças significativas quanto à densidade de amostragem, à preservação da microtopografia e à qualidade das texturas. Os métodos baseados em sensores ativos demonstram maior precisão geométrica e melhor registro de detalhes finos, enquanto a fotogrametria apresenta superior homogeneidade cromática e resolução visual, ainda que com tendência à suavização de superfícies e maior incidência de facetamento em determinadas condições. Adicionalmente, observam-se contrastes relevantes na eficiência operacional e na robustez dos fluxos de trabalho, sobretudo no que diz respeito ao grau de automatização e à necessidade de intervenção manual. Conclui-se que a escolha tecnológica não constitui uma decisão meramente instrumental, mas condiciona a natureza dos dados produzidos e, consequentemente, as possibilidades analíticas e interpretativas, reforçando a necessidade de critérios metodológicos explícitos na arqueologia digital.

Palavras-chave: Digitalização 3D, Fotogrametria, Escaneamento 3D, Ânforas, Arqueologia Digital.

¹ Universidade de São Paulo, Brasil. E-mail: matheusmrcruz@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5821-6056>.

² Universidade de São Paulo, Brasil. E-mail: jessica.silva.mendes@alumni.usp.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9459-6340>.

RESUMEN

Este artículo presenta una evaluación comparativa de tecnologías de digitalización tridimensional aplicadas al estudio de ánforas del acervo del Museu de Arqueologia e Etnologia de la Universidade de São Paulo (MAE-USP), en el marco del proyecto “Análisis Multimodal de Ánforas del MAE-USP: Documentación 3D e Investigación Arqueométrica”. La investigación examina tres ánforas completas y cinco fragmentos de asas estampadas, digitalizados mediante escaneo 3D con sensores activos (Artec Space Spider y NextEngine) y fotogrametría digital, con procesamiento realizado en los programas Agisoft Metashape y Artec Studio. El análisis se fundamenta en criterios cuantitativos – como densidad de malla, tiempo de adquisición y procesamiento y desviación geométrica intermodelo – y cualitativos, relacionados con la fidelidad visual, la resolución de superficie y la aplicabilidad arqueológica. Los resultados indican que todos los enfoques producen modelos geoméricamente consistentes a escala submilimétrica, adecuados para análisis morfológicos y tipológicos. No obstante, se evidencian diferencias significativas en la densidad de muestreo, la preservación de la microtopografía y la calidad de las texturas. Los métodos basados en sensores activos muestran mayor precisión geométrica y mejor registro de detalles finos, mientras que la fotogrametría presenta mayor homogeneidad cromática y resolución visual, aunque con tendencia al suavizado de superficies y mayor presencia de facetado en determinadas condiciones. Asimismo, se observan contrastes relevantes en la eficiencia operativa y en la robustez de los flujos de trabajo, especialmente en lo que respecta al grado de automatización y a la necesidad de intervención manual. Se concluye que la elección tecnológica no constituye una decisión meramente instrumental, sino que condiciona la naturaleza de los datos producidos y, en consecuencia, las posibilidades analíticas e interpretativas, reforzando la necesidad de criterios metodológicos explícitos en la arqueología digital.

Palabras clave: Digitalización 3D, Fotogrametría, Escaneo 3D, Ánforas, Arqueología Digital.

ABSTRACT

This article presents a comparative evaluation of three-dimensional digitization technologies applied to the study of amphorae from the collection of the Museum of Archaeology and Ethnology of the University of São Paulo (MAE-USP), within the framework of the project “Multimodal Analysis of Amphorae from MAE-USP: 3D Documentation and Archaeometric Investigation.” The study examines three complete amphorae and five stamped handle fragments, digitized using active-sensor 3D scanning (Artec Space Spider and NextEngine) and digital photogrammetry, with data processed using Agisoft Metashape and Artec Studio. The analysis is based on quantitative criteria – such as mesh density, acquisition and processing time, and inter-model geometric deviation – and qualitative criteria related to visual fidelity, surface resolution, and archaeological applicability. The results indicate that all approaches produce geometrically consistent models at the submillimeter scale, suitable for morphological and typological analyses. However, significant differences are observed in sampling density, microtopographic preservation, and texture quality. Active-sensor methods demonstrate higher geometric accuracy and better recording of fine details, whereas photogrammetry provides superior chromatic homogeneity and visual resolution, albeit with a tendency toward surface smoothing and increased mesh faceting under certain conditions. Additionally, relevant

contrasts are observed in operational efficiency and workflow robustness, particularly regarding the degree of automation and the need for manual intervention. It is concluded that technological choice is not merely instrumental but conditions the nature of the data produced and, consequently, the range of analytical and interpretative possibilities, reinforcing the need for explicit methodological criteria in digital archaeology.

Keywords: 3D Digitization, Photogrammetry, 3D Scanning, Amphorae, Digital Archaeology.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a documentação tridimensional digital se consolidou como um componente central da prática arqueológica, acompanhando a incorporação mais ampla de tecnologias computacionais nos processos de registro, análise e extroversão de dados (Batistela *et al.*, 2017; Fleming *et al.*, 2017; Forte, 2010; Forte & Siliotti, 1997; Kraus, 2007; Limoncelli, 2012; Limoncelli & Schepis, 2024; Martire, 2017; Martire *et al.*, 2024; Martire & Porto, 2022; Moraes Wichers, Zanettini & Tega, 2017; Pina, 2025; Remondino, 2011; Remondino & Campana, 2014). Tradicionalmente, a documentação constitui a base interpretativa da disciplina; nesse contexto, a modelagem 3D amplia significativamente as possibilidades de registro ao permitir a preservação simultânea de métricas, morfologias e relações espaciais com níveis de precisão e replicabilidade superiores aos métodos bidimensionais convencionais. Essa ampliação, contudo, não corresponde apenas a um ganho técnico, mas implica transformações na própria natureza do dado arqueológico, uma vez que os modelos tridimensionais resultam de processos mediados por algoritmos, parâmetros técnicos e decisões operacionais.

Entre as técnicas atualmente empregadas, destacam-se o escaneamento tridimensional e a fotogrametria digital, ambos amplamente aplicados em atividades de campo, laboratório e em museus (Batistela *et al.*, 2017; Drap *et al.*, 2003; Forte *et al.*, 2012; Hoffmeister *et al.*, 2014; Kuzminsky & Gardiner, 2012; Limoncelli & Schepis, 2024; Magalhães *et al.*, 2018; Martire, 2017; Porter, Roussel & Soressi, 2016; Remondino & El-Hakim, 2006). No estudo de objetos cerâmicos, essas técnicas têm desempenhado papel relevante ao permitir análises morfológicas detalhadas, comparações tipológicas, estimativas volumétricas e produção de réplicas físicas ou digitais (Barreau *et al.*, 2014a; Barreau *et al.*, 2014b; Di Angelo *et al.*, 2022; Drap, Seinturier & Long *et al.*, 2003; Rodríguez González, Carbonell Pastor & Casals, 2019; Stamatopoulos & Anagnostopoulos, 2023; Wang *et al.*, 2023). Ainda que não substituam os objetos originais, os modelos 3D gerados por essas técnicas facilitam seu acesso remoto, reduzem a manipulação direta de materiais sensíveis e ampliam possibilidades de visualização e análise que ultrapassam os limites do registro fotográfico tradicional. Ao mesmo tempo, essas abordagens operam segundo princípios distintos de construção da geometria e da textura, o que implica diferenças na forma como a materialidade é digitalmente reconstruída e representada.

Nesse cenário, a adoção crescente dessas tecnologias evidencia um problema metodológico significativo: diferentes técnicas de aquisição e processamento produzem resultados distintos em termos de precisão geométrica, resolução de malha, fidelidade visual e custos operacionais. A escolha do método impacta diretamente o tipo e a qualidade do dado produzido, influenciando as possibilidades interpretativas subsequentes. Mais do que uma questão de desempenho técnico, trata-se de compreender como essas diferenças afetam a própria constituição do dado arqueológico digital e, consequentemente, as formas de conhecimento que dele derivam. Apesar da ampla utilização dessas ferramentas, a literatura aponta a necessidade de avaliações comparativas sistemáticas que examinem seu desempenho em contextos específicos, permitindo estabelecer critérios mais transparentes de seleção metodológica (Batistela *et al.*, 2017; Bezzi *et al.*, 2024; Felícisimo & Polo, 2022; Guidi *et al.*, 2007; Perrone Jr. & Williams, 2019; Remondino, 2011; Slizewski, Friess & Semal, 2010; Vizioli *et al.*, 2020).

Nesse sentido, a comparação entre diferentes tecnologias de digitalização tridimensional aplicadas à documentação arqueológica constitui uma etapa fundamental para compreender não apenas suas vantagens técnicas, mas também suas implicações práticas e analíticas. Investigações dessa natureza devem contribuir para o desenvolvimento de protocolos replicáveis e para a consolidação de práticas metodológicas mais críticas no

campo da arqueologia digital (Barreau *et al.*, 2014b; Lauro & Lombardo, 2023; Porter, Roussel & Soressi, 2016; Remondino, 2011; Remondino & El-Hakim, 2006).

Os resultados apresentados neste artigo se inserem no âmbito do projeto intitulado “Análise Multimodal de Ânforas do Acervo do MAE-USP: Documentação 3D e Investigação Arqueométrica”, desenvolvido no Museu de Arqueologia e Etnologia da Universidade de São Paulo (MAE-USP). A pesquisa tem por objetivo examinar uma pequena coleção de ânforas de transporte pertencente ao acervo institucional, composta por três exemplares completos e cinco fragmentos de alças com estampas. Nesse contexto, a investigação articula procedimentos de documentação tridimensional e análises arqueométricas, buscando caracterizar material e morfologicamente os artefatos e avaliar criticamente o desempenho das diferentes tecnologias de digitalização empregadas.

No que diz respeito a este último objetivo, o projeto busca, mais especificamente: (i) comparar o desempenho técnico dos métodos empregados, considerando aspectos relacionados à aquisição e ao processamento dos dados; (ii) avaliar a qualidade geométrica e visual dos modelos tridimensionais produzidos, incluindo resolução de malha, fidelidade morfológica e representação de superfície; e (iii) discutir a aplicabilidade arqueológica de cada abordagem, tendo em vista suas potencialidades e limitações no contexto da documentação, análise e difusão de coleções materiais.

Ao abordar essas questões, este trabalho procura contribuir para a reflexão metodológica sobre o uso de ferramentas digitais na arqueologia, enfatizando que a escolha tecnológica não constitui apenas uma decisão instrumental, mas um fator que influencia a natureza dos dados produzidos e, conseqüentemente, as possibilidades analíticas e interpretativas disponíveis ao pesquisador.

CONTEXTO ARQUEOLÓGICO E MATERIAL ANALISADO

O conjunto analisado neste estudo integra a ampla coleção de objetos arqueológicos provenientes do Mediterrâneo Antigo pertencente ao acervo do MAE-USP. O corpus é composto por três ânforas comerciais de transporte (nº. de tombo: 64/9.5, 64/9.6 e 64/11.3) e cinco fragmentos de alças estampadas (nº. de tombo: 64/11.18, 64/11.32, 75/1.41, 75/1.42 e 75/1.43), conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2.

Os objetos se distribuem em duas coleções distintas. A primeira resultou da doação, realizada em 1964 pelo governo italiano, de 536 artefatos arqueológicos. No caso específico das peças aqui examinadas, as ânforas e fragmentos provêm do *Museo Archeologico Nazionale di Firenze* (64/9.5 e 64/9.6) e do *Museo Archeologico Nazionale di Palermo* (64/11.3, 64/11.18 e 64/11.32). A segunda coleção tem origem na doação, efetuada em 1975, de parte do acervo pessoal de Ulpiano Bezerra de Meneses, figura central na fundação do MAE-USP.

O primeiro estudo sistemático dedicado a esse conjunto foi publicado por Funari (2001). Com base em análise morfológica e epigráfica, o autor elaborou um catálogo das peças, classificando as ânforas comerciais em categorias tipológicas e examinando as inscrições presentes nos selos, bem como as tipologias às quais os fragmentos de alça provavelmente pertenciam. Como resultado, duas ânforas foram identificadas como greco-italicas, uma como grega³, quatro fragmentos foram atribuídos a ânforas de Rodes e um a uma ânfora de Cnido.

³ A classificação desse exemplar encontra-se atualmente em processo de reavaliação, cujos resultados serão publicados em trabalho futuro. Para os fins deste artigo, optou-se por manter a classificação originalmente proposta.



Figura 1. Da esquerda para a direita, ânforas n° 64/9.5, 64/9.6 e 64/11.3. Sem escala. Fotografia: Ader Gotardo.



Figura 2. Da esquerda para a direita, de cima para baixo, fragmentos de alças de ânforas n° 64/11.32, 64/11.18, 75/1.42, 75/1.43 e 75/1.41 Fotografia: Jessica Silva Mendes.

As três ânforas comerciais apresentam estados de preservação distintos. Duas delas mantêm boa integridade morfológica, conservando elementos diagnósticos fundamentais para a classificação tipológica, como boca, pescoço, corpo e base. A terceira ânfora, contudo, apresenta uma fratura significativa na região do pescoço, preservando apenas o início dele e um segmento de uma das alças, estando ausentes a boca e o lábio.

As superfícies cerâmicas apresentam desgastes compatíveis com sua trajetória anterior à incorporação ao acervo do MAE-USP, mas mantêm legibilidade morfológica suficiente para análises métricas, registro fotográfico e modelagem tridimensional.

Das cinco alças estampadas, quatro apresentam inscrições integralmente legíveis, possibilitando a leitura completa das linhas preservadas e análise epigráfica consistente. Apenas uma delas conserva parcialmente a estampa, sendo possível ler integralmente apenas uma das duas linhas originalmente impressas.

Apesar de se tratar de um conjunto pequeno de exemplares cerâmicos, ele não apenas possui relevância histórica intrínseca, mas também configura uma amostra metodologicamente controlada e diversificada, adequada para validar procedimentos técnicos, comparar resultados e estabelecer protocolos aplicáveis a outros materiais do acervo do MAE-USP. Cumpre ressaltar, contudo, que em razão de limitações técnicas e logísticas, nem todas as peças foram submetidas aos mesmos procedimentos de captura de dados, conforme indicado na Tabela 1. Em consequência, a comparação entre as diferentes tecnologias de documentação tridimensional foi realizada apenas entre os exemplares que passaram por, pelo menos, dois dos métodos propostos.

Nº de tombo	Escaneamento (Artec Space Spider)	Escaneamento (NextEngine)	Fotogrametria
64/9.5 (ânfora)	Sim	Não	Não
64/9.6 (ânfora)	Sim	Não	Não
64/11.3 (ânfora)	Sim	Não	Não
64/11.18 (frag. alça)	Não	Sim	Sim
64/11.32 (frag. alça)	Não	Sim	Sim
75/1.41 (frag. alça)	Não	Sim	Sim
75/1.42 (frag. alça)	Não	Sim	Sim
75/1.43 (frag. alça)	Sim	Sim	Sim

Tabela 1. Distribuição dos métodos de captura tridimensional (escaneamento 3D e fotogrametria) entre os exemplares cerâmicos analisados.

TECNOLOGIAS DE DOCUMENTAÇÃO 3D

DIGITALIZAÇÃO 3D POR SENSORES ATIVOS

A digitalização 3D por sensores ativos constitui um conjunto de técnicas baseadas na emissão controlada de energia eletromagnética em direção ao objeto a ser documentado, com posterior registro da resposta refletida ou retroespalhada pela superfície (Kraus, 2007; Remondino & El-Hakim, 2006). Diferentemente dos métodos passivos, como a fotogrametria, esses sistemas não dependem exclusivamente da iluminação ambiente ou da textura natural do objeto, pois geram artificialmente o sinal necessário para a reconstrução geométrica.

O princípio físico central desses sistemas é a triangulação óptica ou, em alguns casos, a medição por tempo de voo (*time-of-flight*), dependendo da tecnologia empregada (Remondino, 2011). No caso da luz estruturada, projeta-se sobre a superfície um padrão luminoso conhecido – como grades, franjas ou sequências codificadas – cuja deformação é capturada por sensores ópticos posicionados em ângulo previamente calibrado em relação ao emissor. A análise matemática dessa deformação, associada a parâmetros internos de calibração (distância focal, *baseline*, matriz intrínseca e extrínseca da câmera), permite calcular coordenadas tridimensionais com elevada densidade amostral. O resultado inicial consiste em uma nuvem de pontos (*point cloud*), que pode posteriormente ser convertida em malha poligonal (*mesh*) por meio de algoritmos de reconstrução superficial, como *Poisson Surface Reconstruction* ou métodos baseados em *Delaunay triangulation*.

Do ponto de vista metrológico, a precisão desses sistemas está associada a variáveis como resolução espacial do sensor, qualidade da calibração geométrica, estabilidade térmica do equipamento, distância de trabalho e propriedades ópticas da superfície documentada. Em contextos controlados, é possível atingir resoluções submilimétricas, o que torna essa tecnologia particularmente adequada para análises morfológicas detalhadas, estudos de microtopografia, identificação de marcas de ferramenta e avaliação de processos de desgaste.

Entre as principais vantagens técnicas se destacam a elevada precisão geométrica, a independência parcial de condições externas de iluminação, a captura rápida de grande quantidade de dados e a possibilidade de controle sistemático de parâmetros de aquisição. Por se tratar de um método ativo, a obtenção de profundidade não depende exclusivamente da textura superficial, o que amplia sua aplicabilidade em objetos com baixo contraste visual.

Entretanto, há limitações inerentes ao método. Superfícies altamente reflexivas, translúcidas ou com propriedades ópticas anisotrópicas podem comprometer a qualidade da captura, uma vez que alteram o padrão de reflexão da energia projetada. A oclusão geométrica também constitui desafio recorrente, exigindo múltiplas aquisições a partir de diferentes ângulos e posterior alinhamento por registro iterativo (por exemplo, via algoritmo ICP - *Iterative Closest Point*). Além disso, a geração e o processamento de nuvens de pontos densas demandam capacidade computacional significativa e procedimentos rigorosos de calibração para garantir confiabilidade métrica.

FOTOGRAMETRIA DIGITAL

A fotogrametria digital constitui um método de reconstrução tridimensional baseado na inferência geométrica a partir de imagens bidimensionais, fundamentado na identificação de correspondências entre múltiplas projeções de um mesmo objeto. Embora suas origens remontem ao uso de fotografia *close-range* para a medição de construções em meados do século XIX (Luhmann *et al.*, 2020), foi a partir do final da década de 1970, com o desenvolvimento digital do teorema *Structure from Motion* (SfM) por Shimon Ullmann (1979), que se consolidaram as bases computacionais para a reconstrução tridimensional a partir de imagens. Esse avanço permitiu modelar matematicamente a relação entre diferentes projeções bidimensionais de um objeto, possibilitando a estimativa simultânea da posição das câmeras e da geometria da cena por meio da identificação de pontos correspondentes e do estabelecimento de relações geométricas entre eles (Duelis Viana, 2021; Franco & Naime, 2021; Luhmann *et al.*, 2020; Remondino, 2011; Ullman, 1979).

A lógica fundamental do método se manteve ao longo do tempo, mas foi progressivamente refinada com o desenvolvimento de algoritmos computacionais mais robustos. Nesse contexto, abordagens baseadas em SfM foram posteriormente complementadas por técnicas de detecção e correspondência de pontos, como o *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT), e por métodos de estimação robusta, como o *Random Sample Consensus* (RANSAC), que permitem identificar correspondências confiáveis entre imagens mesmo na presença de ruído. A partir dessas correspondências, o ajuste de feixes (*bundle adjustment*) possibilita a estimativa simultânea dos parâmetros das câmeras e da geometria da cena, resultando na geração de uma nuvem de pontos esparsa.

A etapa subsequente, baseada em algoritmos de *Multi-View Stereo* (MVS), promoveu a densificação dessa nuvem, permitindo a reconstrução de superfícies com maior resolução espacial (Coutinho, 2025; Franco &

Naime, 2021; Luhmann *et al.*, 2020). A partir dessa representação, são geradas malhas triangulares e aplicada a projeção de textura (*texture mapping*), resultando em modelos tridimensionais texturizados.

O funcionamento desse fluxo depende diretamente da redundância de imagens e da elevada sobreposição entre elas, condições essenciais para a identificação de pontos homólogos e para a estabilidade da solução geométrica. Nesses termos, a acurácia da reconstrução está associada não apenas à qualidade das imagens, mas também à geometria de aquisição, podendo alcançar, em condições controladas, precisões na ordem de subpixel.

Inicialmente aplicada sobretudo em contextos de grande escala (Stamatopoulos & Anagnostopoulos, 2023), como levantamentos arquitetônicos e mapeamento topográfico – muitas vezes combinados à tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR) (Franco & Naime, 2021) –, a fotogrametria se expandiu significativamente nas últimas décadas, sendo hoje amplamente empregada em diferentes contextos arqueológicos, incluindo o registro de escavações (Paukkonen, 2024), a análise morfológica de artefatos (Wang *et al.*, 2023) e a reconstrução de ambientes virtuais (Bazzurri & Picardello, 2018; Martire, 2017) e de objetos (Barreau *et al.*, 2014b). Adicionalmente, a técnica pode contribuir para diferentes frentes de atuação no campo do patrimônio, incluindo a restauração e a conservação digital, bem como a ampliação da acessibilidade e da replicabilidade de coleções e espaços em ambientes digitais (Coutinho, 2025; Frandanisa, 2026; Guedes, 2016).

Além de sua versatilidade, destaca-se também sua acessibilidade operacional. Em contextos de fotogrametria *close-range*, a aquisição pode ser realizada com equipamentos relativamente simples – como câmeras DSLR de entrada, tripés e iluminação controlada –, o que contribui para sua ampla difusão no campo da arqueologia. Essa combinação entre baixo custo, flexibilidade metodológica e resultados visualmente consistentes tem sido frequentemente apontada como um dos principais fatores responsáveis pela popularização do método (Batistela *et al.*, 2017; Falkingham, 2012; Paukkonen, 2023, 2024; Porter, Roussel & Soressi, 2016; Wang *et al.*, 2023).

METODOLOGIA

AQUISIÇÃO DE DADOS COM DIGITALIZAÇÃO 3D POR SENSORES ATIVOS

A aquisição de dados por meio da digitalização 3D por sensores ativos foi realizada com dois dispositivos especializados: o Artec Space Spider (Artec 3D, 2015), com processamento conduzido no software Artec Studio 20 Professional (v. 20.0.4.362), e o NextEngine 3D Scanner Ultra HD⁴ (NextEngine, 2016), cujos dados foram processados no software proprietário NextEngine ScanStudio (v. 2.0.2).

O Artec Space Spider consiste em um scanner portátil de alta precisão baseado em tecnologia de luz estruturada azul, com precisão de até aproximadamente 0,05 mm e resolução em torno de 0,1 mm. Essas características o tornam particularmente adequado para o registro de microdetalhes superficiais, como sulcos, inscrições e pequenas irregularidades geométricas. O sistema opera por meio da projeção de padrões luminosos

⁴ O NextEngine 3D Scanner Ultra HD se encontra atualmente descontinuado. A interrupção de sua fabricação e comercialização está relacionada ao encerramento das atividades da empresa responsável por sua produção, o que resultou também na desativação do suporte técnico oficial e dos serviços vinculados ao software proprietário ScanStudio. Como o funcionamento do equipamento dependia de ativação online e de servidores mantidos pela fabricante, a indisponibilidade dessa infraestrutura comprometeu a reinstalação e a reativação do programa, dificultando a utilização do hardware mesmo quando este permanece operacional. Nos últimos anos, iniciativas independentes de usuários, como o Project NextLife, buscaram contornar essas limitações por meio do compartilhamento de arquivos e soluções alternativas, mas não há, até o momento, suporte institucional ou atualização oficial do sistema.

sobre a superfície do objeto, cuja deformação é registrada por sensores ópticos, permitindo a reconstrução tridimensional da geometria. O equipamento também realiza captura cromática integrada, possibilitando a geração de modelos texturizados, e utiliza rastreamento híbrido baseado em geometria e textura, dispensando o uso de marcadores físicos.

Em razão de limitações logísticas associadas ao empréstimo temporário do equipamento, a aquisição de dados com o Artec Space Spider foi realizada em apenas quatro dos oito exemplares analisados: as três ânforas (64/9.5, 64/9.6 e 64/11.3) e um fragmento de alça (75/1.43). O procedimento de captura ocorreu em ambiente laboratorial controlado, com iluminação artificial.

Após a calibração do equipamento, os objetos foram escaneados a partir de múltiplos ângulos, mediante movimentação gradual sobre a superfície de trabalho, mantendo-se distância operacional adequada entre o sensor e o alvo (Figura 3). O controle dessa distância foi auxiliado pelo próprio software, que sinaliza eventuais perdas de rastreamento. O tempo de aquisição variou entre 10 e 15 minutos para as ânforas completas e aproximadamente 2 minutos para o fragmento de alça.

O segundo dispositivo utilizado foi o NextEngine 3D Scanner Ultra HD, um scanner de mesa equipado com plataforma giratória, baseado em tecnologia de triangulação a laser (*Multistripe Laser Triangulation-MLT*). O sistema foi projetado para a digitalização de objetos de pequeno e médio porte, combinando alta densidade de amostragem com captura simultânea de textura. Seu funcionamento se baseia na projeção de múltiplas faixas de laser sobre a superfície do objeto, cuja deformação é registrada por sensores ópticos, permitindo a reconstrução tridimensional por triangulação geométrica. O sistema utiliza lasers de estado sólido classe 1M, considerados seguros para uso em ambientes controlados, e sensores CMOS de aproximadamente 5 megapixels, responsáveis pela aquisição simultânea de dados geométricos e cromáticos.

Do ponto de vista metroológico, o equipamento apresenta precisão de até aproximadamente 0,127 mm no modo *Macro* e cerca de 0,381 mm no modo *Wide*, com resolução em torno de 0,1 mm. Essas características o tornam adequado para o registro de detalhes superficiais finos, como relevos sutis, inscrições e variações texturais. A densidade de pontos é maior no modo *Macro*, voltado a objetos menores e com maior exigência de detalhe, enquanto o modo *Wide* amplia o campo de captura com redução proporcional da resolução espacial.

Operacionalmente, o NextEngine foi concebido para uso em ambiente controlado, como laboratórios e acervos museológicos, dispensando infraestrutura técnica complexa. Essa característica favorece sua aplicação em coleções arqueológicas, permitindo a digitalização em condições estáveis e com menor necessidade de deslocamento das peças. O uso desse tipo de equipamento em contextos arqueológicos tem sido amplamente documentado na literatura (Felícisimo & Polo, 2022; Kuzminsky & Gardiner, 2012; Perrone Jr. & Williams, 2019; Slizewski, Friess & Semal, 2010; White, 2015), incluindo aplicações no próprio MAE-USP (Fleming *et al.*, 2017).

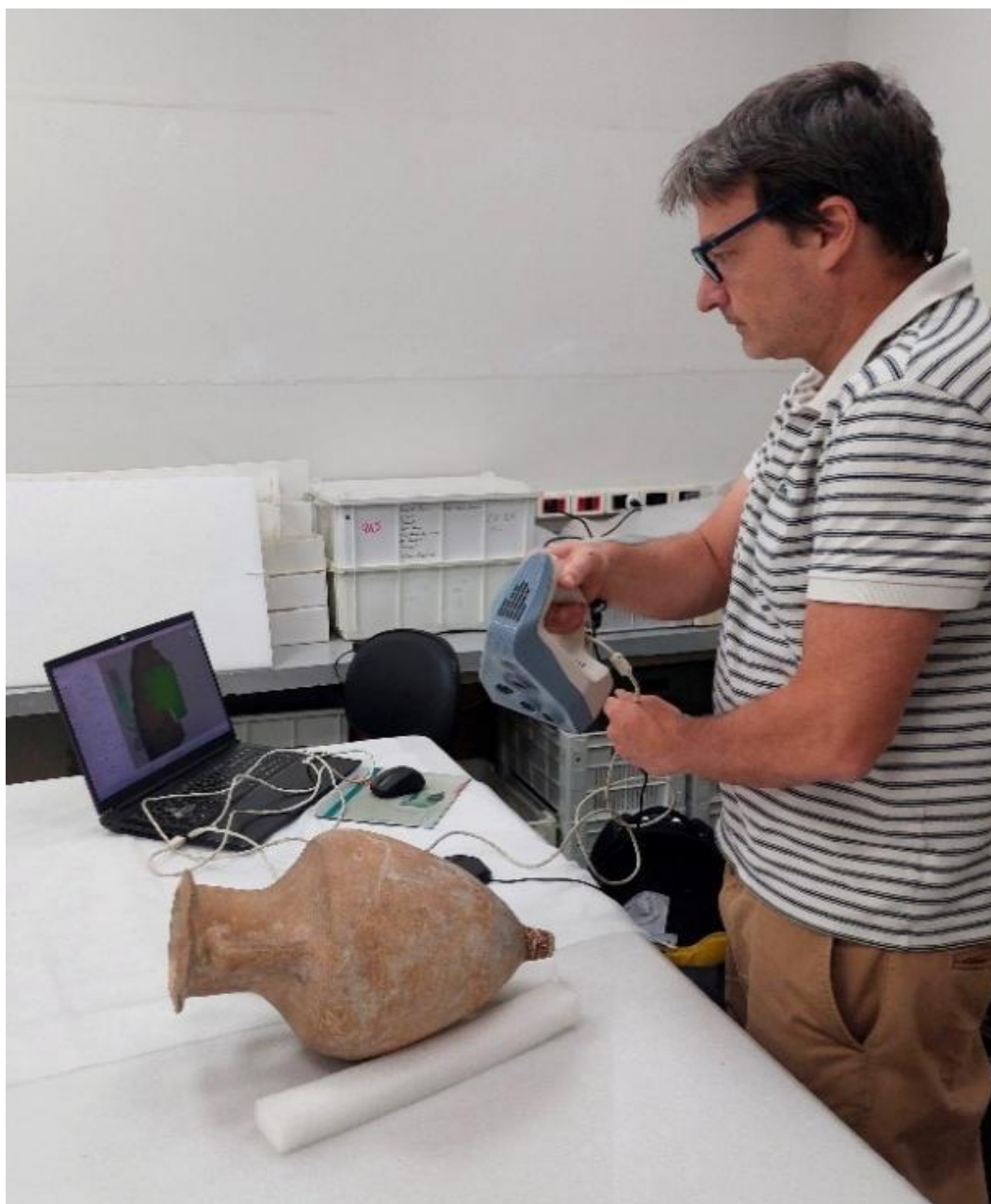


Figura 3. Processo de escaneamento de uma das ânforas com o Scanner Artec Space Spider. Fotografia: Matheus Morais Cruz.

Em razão de limitações logísticas e visando minimizar riscos ao acervo, apenas os fragmentos de alças foram digitalizados com esse dispositivo (Figura 4). Para ampliar a cobertura geométrica, cada peça foi escaneada em duas posições distintas, com aquisição completa em 360° subdividida em 16 posições angulares. As capturas foram realizadas com parâmetros de alta definição, priorizando a máxima densidade de amostragem e mantendo condições de aquisição compatíveis com as propriedades ópticas dos objetos e com a distância operacional recomendada para o modo *Macro* (9,5 polegadas $\approx$ 24,13 cm). Com esse protocolo, cada sessão de escaneamento teve duração média de aproximadamente 82 minutos, totalizando cerca de 164 minutos por peça.



Figura 4. Processo de escaneamento de um fragmento de alça com o NextEngine 3D Scanner Ultra HD. Fotografia: Matheus Moraes Cruz.

AQUISIÇÃO DE DADOS COM FOTOGRAMETRIA DIGITAL

A aquisição de dados por fotogrametria digital foi realizada segundo o método *close-range*, adequado à documentação de objetos de pequena e média escala, em ambiente controlado (Luhmann *et al.*, 2020). A captura foi conduzida com uma câmera Nikon D7000 equipada com lente de 18-105 mm ($f/3.5-5.6$), montada em tripé estável, garantindo consistência geométrica entre as tomadas.

O protocolo de aquisição foi estruturado com base no princípio de redundância fotogramétrica, assegurando elevada sobreposição entre imagens (superior a 80%) e cobertura completa da superfície dos objetos. Para isso, conforme sugestão de Coutinho (2025) e Porter *et al.* (2016), os artefatos foram posicionados sobre uma plataforma giratória com marcações angulares regulares, permitindo a captura sistemática de imagens em intervalos de aproximadamente $7,5^\circ$ no plano horizontal e em múltiplos níveis verticais ($\sim 22,5^\circ$). Cada objeto foi registrado em duas posições distintas, de modo a minimizar oclusões geométricas e garantir visibilidade das diferentes faces. As peças foram mantidas centralizadas na plataforma e, quando necessário, estabilizadas com suportes de Ethafoam esculpido, a fim de evitar deslocamentos durante a rotação e assegurar a consistência geométrica entre as imagens.

As primeiras imagens de cada conjunto incluíram escala métrica e carta de calibração cromática (*ColorChecker*), utilizadas no pré-processamento para controle dimensional e correção de balanço de branco, contribuindo para a acurácia métrica e a fidelidade cromática dos modelos resultantes.

O controle da iluminação foi realizado por meio de uma tenda difusora translúcida (60×60 cm), associada a fontes de luz contínua posicionadas lateralmente – um flash ULANZI LM07 LED Photography Light de 5W e um painel Greika LEDMAX (45W) com intensidade controlável –, com o objetivo de reduzir sombras duras e minimizar variações de exposição. A própria tenda atuou como difusor, promovendo uma distribuição mais homogênea da luz incidente, enquanto o fundo escuro contribuiu para o isolamento visual do objeto (Figura 5). A homogeneidade da iluminação constitui fator crítico na fotogrametria, uma vez que interfere diretamente na detecção de pontos homólogos e na consistência da textura final.



Figura 5. Montagem do setup para a fotogrametria. Fotografia: Matheus Morais Cruz.

Os parâmetros de captura foram mantidos constantes ao longo das sessões, com ISO 640, abertura $f/9$ e velocidade de obturador de $1/13$ s. A escolha desses parâmetros visou equilibrar profundidade de campo, controle de ruído e estabilidade da imagem (Coutinho, 2025; Robinson, 2024). A abertura $f/9$ permitiu manter toda a superfície do objeto em foco, condição essencial para a identificação consistente de *features*, enquanto o uso de tripé possibilitou tempos de exposição mais longos sem introdução de desfoque por movimento.

As imagens foram capturadas em formato RAW (NEF), permitindo maior controle no pré-processamento. Antes da reconstrução, foi realizada correção de balanço de branco com base no *ColorChecker*, além de ajustes de exposição, contraste e correção de lente no software Adobe Lightroom Classic (versão

14.5.1). Esses procedimentos visaram reduzir inconsistências cromáticas e distorções ópticas, que poderiam afetar tanto a qualidade da textura quanto a robustez do matching entre imagens.

PROCESSAMENTO⁵

Após a calibração do Artec Space Spider e a captura das superfícies dos objetos a partir de diferentes ângulos, iniciou-se a etapa de processamento dos dados no Artec Studio. Em razão do caráter integrado do sistema, o registro inicial das capturas e a remoção preliminar de elementos externos foram realizados automaticamente durante a aquisição.

Na sequência, procedeu-se ao alinhamento automático (*auto-alignment*) das diferentes capturas, etapa responsável por estabelecer a correspondência espacial entre as diversas tomadas. Após o alinhamento, realizou-se a fusão (*fusion*) das capturas em uma única malha tridimensional, com parâmetros voltados à preservação de detalhes geométricos e à geração de um modelo fechado (*watertight*).

O pós-processamento incluiu a simplificação controlada da malha, por meio do método de erro linear configurado em 0,010mm, e a geração da textura, com preenchimento automático de lacunas cromáticas em áreas não capturadas. O tempo total dessas etapas variou entre 40 e 60 minutos, dependendo da complexidade de cada peça.

A Tabela 2 apresenta o número de faces e o tamanho dos arquivos dos modelos finais exportados em formato OBJ⁶.

Nº de tombo	Número de faces	Geometria (MB)	Textura JPEG (MB)
64/9.5	6.960.500	522,897	1,668
64/9.6	7.771.804	583,795	5,271
64/11.3	15.706.530	1.193,198	6,690
75/1.43	4.811.634	356,403	3,460

Tabela 2. Número de faces e tamanho dos arquivos dos modelos tridimensionais gerados a partir do escaneamento com o Artec Space Spider.

No caso do NextEngine 3D Scanner Ultra HD, o processamento dos dados foi realizado no software proprietário ScanStudio. Após a digitalização de cada peça em duas posições distintas, procedeu-se ao alinhamento (*alignment*) manual das capturas, por meio da seleção de pontos homólogos, de modo a estabelecer a correspondência espacial entre as duas tomadas.

Em seguida, realizou-se o recorte (*trimming*) das malhas, com o objetivo de remover elementos externos à peça, como a base giratória. Posteriormente, as capturas foram integradas por meio da etapa de fusão (*fuse*), resultando em um único modelo tridimensional.

⁵ Todas as etapas de processamento dos dados foram realizadas em um único dispositivo computacional, consistindo em um notebook Avell A70 ION, equipado com processador Intel® Core™ i7-13700H (13ª geração, 2.40 GHz), 64 GB de memória RAM e placa de vídeo NVIDIA GeForce RTX 4060 Laptop GPU, com 8 GB de memória dedicada (VRAM).

⁶ Todos os modelos 3D gerados no âmbito desta pesquisa foram exportados no formato OBJ, incluindo arquivos de geometria e textura associados, e posteriormente disponibilizados no perfil do MAE-USP na plataforma Sketchfab, que permite visualização interativa em ambiente online. Os modelos podem ser acessados por meio do seguinte link: <https://sketchfab.com/maeusp>. A disponibilização dos dados visa garantir maior transparência metodológica, reprodutibilidade dos resultados e ampliação do acesso ao conjunto analisado.

A fusão foi conduzida pelo método de *mesh reconstruction*, no qual a malha é gerada diretamente a partir da geometria da nuvem de pontos, por meio da conexão entre pontos vizinhos conforme a forma local detectada. Esse procedimento difere do método *volume merge*, baseado em uma representação volumétrica implícita, a partir da qual a superfície é posteriormente extraída.

A geração da textura foi realizada de forma integrada ao processo de fusão, com parâmetros voltados à obtenção de um modelo fechado e texturizado incluindo ajuste de *texture blending* configurado em 25 pixels. Esse parâmetro controla a transição entre diferentes imagens projetadas sobre a malha, podendo influenciar a homogeneidade cromática e a nitidez dos detalhes superficiais. Etapas adicionais de pós-processamento, como suavização ou simplificação da malha, não foram necessárias, uma vez que os modelos apresentaram qualidade adequada para os objetivos analíticos do estudo.

Em função da necessidade de intervenção manual em diferentes etapas do fluxo de trabalho, o tempo total de processamento variou conforme as características de cada peça, com média de aproximadamente 90 minutos por exemplar.

A Tabela 3 apresenta o número de faces do modelo final e o peso do arquivo final exportado em formato OBJ de cada objeto:

Nº de tombo (frag. alças)	Número de faces	Geometria (MB)	Textura JPEG (MB)
64/11.18	3.905.816	354,931	27,652
64/11.32	3.294.693	297,970	28,015
75/1.41	3.039.938	278,217	27,983
75/1.42	471.862	898,738	27,699
75/1.43	3.671.477	335,592	28,491

Tabela 3. Número de faces e tamanho dos arquivos dos modelos tridimensionais gerados a partir do escaneamento com o NextEngine 3D Scanner Ultra HD.

No caso da reconstrução tridimensional por fotogrametria, dois softwares foram utilizados: o Artec Studio 20 Professional (v. 20.0.4.362), que incorpora ferramentas baseadas em inteligência artificial para processamento de imagens e vídeos, e o Agisoft Metashape Professional (v. 2.3.0), amplamente empregado em fluxos de trabalho fotogramétricos.

Apesar de organizarem o processamento de formas distintas, ambos os programas seguem princípios semelhantes de reconstrução tridimensional a partir de fotografias digitais. De modo geral, esse processo envolve a detecção automática de pontos homólogos entre imagens, o alinhamento das câmeras no espaço tridimensional, a geração de nuvens de pontos (esparsas e densas), a construção da malha poligonal e a projeção das informações cromáticas sobre a superfície, resultando em um modelo tridimensional texturizado (Kraus, 2007; Remondino, 2011; Remondino & El-Hakim, 2006).

No Agisoft Metashape, o fluxo de trabalho foi estruturado segundo o paradigma clássico da fotogrametria baseada em SfM e MVS (Duelis Viana, 2021). Os conjuntos de imagens correspondentes às diferentes posições de captura foram inicialmente organizados em unidades independentes (*chunks*), sendo posteriormente

alinhados e integrados a partir da detecção de pontos homólogos (*tie points*)⁷. Esse procedimento permitiu estimar a posição e orientação das câmeras e gerar uma nuvem de pontos consistente.

A reconstrução da geometria foi realizada com base em mapas de profundidade (*depth maps*), com parâmetros voltados à maximização da qualidade do modelo e à obtenção de uma malha com elevada resolução. Após a limpeza de ruídos e a remoção de elementos externos, procedeu-se à geração da textura a partir das imagens originais, utilizando estratégias de mapeamento e mesclagem voltadas à preservação da homogeneidade cromática e à redução de artefatos visuais, incluindo o uso de *mosaic blending* (com resolução de textura fixada em 8192) e filtragem de inconsistências (*ghosting filter*).

A Tabela 4 apresenta o tempo de processamento, o número de faces do modelo final, e o peso do arquivo final exportado em formato OBJ de cada objeto:

Nº de tombo (frag. alças)	Tempo de processamento (min)	Número de faces	Geometria (MB)	Textura JPEG (MB)
64/11.18	82	427.538	34,608	6,679
64/11.32	104	459.812	37,178	6,198
75/1.41	98	447.805	36,303	5,963
75/1.42	82	471.862	38,131	5,282
75/1.43	94	601.702	49,463	7,335

Tabela 4. Tempo de processamento, número de faces e tamanho dos arquivos dos modelos 3D obtidos por fotogrametria no Agisoft Metashape Professional.

Por outro lado, no Artec Studio 20 Professional, a reconstrução tridimensional por fotogrametria, embora também baseada em fotografias, foi realizada por meio de um fluxo de trabalho mais automatizado e integrado ao ecossistema de escaneamento 3D da Artec. As imagens foram inicialmente organizadas em dois conjuntos correspondentes às diferentes posições de captura de cada peça, estruturados no software como *photosets*.

A partir desses conjuntos, o programa emprega algoritmos de alinhamento assistidos por inteligência artificial para estimar automaticamente a geometria do objeto e gerar uma nuvem de pontos preliminar (*photo scan*) por meio da ferramenta *Create Preview*. O processamento foi configurado para objetos com variação de posição entre os conjuntos fotográficos, com agrupamento automático de câmeras, campo de visão (*default FOV*) fixado em 60.000 e parâmetros ajustados conforme as características de cada exemplar⁸.

⁷ No processamento realizado no Agisoft Metashape Professional, todas as fotografias tecnicamente adequadas foram mantidas no fluxo de trabalho. Antes do processamento, realizou-se apenas uma triagem manual básica destinada à exclusão de imagens comprometidas por problemas evidentes de aquisição, como borramento, falha de flash ou interferência de elementos externos no enquadramento. Não foram empregados, contudo, filtros automáticos de exclusão baseados nas métricas de qualidade disponibilizadas pelo software, como os parâmetros associados à ferramenta *Estimate Image Quality*. O alinhamento foi executado com os parâmetros *Highest Accuracy*, *Generic Preselection: Yes* e *Reference Preselection: No*, mantendo-se os limites padrão de 40.000 *key points* e 4.000 *tie points*. Durante o processamento, o software realizou internamente procedimentos automáticos de correspondência, pré-seleção e filtragem de pontos homologáveis, incluindo a exclusão automática de *tie points* estacionários.

⁸ No Artec Studio 20 Professional, realizou-se apenas uma triagem manual básica para exclusão de imagens comprometidas por borramento, falha de flash ou interferências externas. Não foram aplicados filtros automáticos adicionais de qualidade, sendo as fotografias restantes integralmente processadas pelo software. Entre os *photo scans* produzidos, o conjunto 64/11.32 apresentou o maior valor de erro máximo (*max. error*), registrando 2,5, enquanto os demais permaneceram entre 1 e 1,6.

Esse procedimento permite o processamento simultâneo dos diferentes *photosets*, resultando, em condições ideais, na geração de uma única nuvem de pontos preliminar. Entretanto, observou-se que o alinhamento automático não foi bem-sucedido em todos os casos. Em um dos modelos analisados (64/11.32), a integração entre os *photosets* não pôde ser concluída de maneira satisfatória, resultando em uma nuvem de pontos fragmentada e sem coerência geométrica global (Figura 6).



Figura 6. Nuvem de pontos preliminar (*photo scan*) gerada no Artec Studio 20 Professional para o fragmento 64/11.32, evidenciando falha no alinhamento automático entre *photosets*. Fonte: elaborado por Matheus Morais Cruz.

A análise do conjunto de imagens indica que a aquisição apresentou elevada sobreposição (superior a 80%) e intervalos angulares regulares (aproximadamente $7,5^\circ$), permitindo descartar insuficiência de redundância visual como causa da falha. Esse diagnóstico é reforçado pelo fato de que o mesmo conjunto de imagens produziu um modelo consistente quando processado no Agisoft Metashape, indicando a adequação dos dados de entrada e do protocolo de captura adotado.

Nessas condições, o insucesso no Artec Studio sugere limitações específicas do algoritmo de alinhamento, particularmente na integração de múltiplos *photosets*. Verificou-se que, embora o alinhamento interno de cada conjunto tenha sido parcialmente bem-sucedido, o sistema não foi capaz de estabelecer correspondências suficientes entre eles para a construção de uma solução geométrica unificada. Esse comportamento pode estar associado à presença de superfícies relativamente homogêneas e a ambiguidades geométricas, como curvaturas contínuas e formas parcialmente simétricas, que dificultam a correspondência robusta entre diferentes regiões do objeto.

Adicionalmente, destaca-se que o fluxo de trabalho automatizado do Artec Studio oferece recursos limitados de intervenção manual no alinhamento fotogramétrico, o que restringe a possibilidade de correção em casos de falha e compromete a continuidade do processamento.

Uma vez obtida a nuvem de pontos preliminar, procedeu-se à geração do modelo tridimensional (*Create Model*), com parâmetros voltados à obtenção de uma malha de alta resolução. Em seguida, realizou-se a fusão (*fusion*) e a geração da textura, com priorização de imagens de maior nitidez e preenchimento automático de lacunas cromáticas.

A Tabela 5 apresenta o tempo de processamento, o número de faces do modelo final, e o peso do arquivo final exportado em formato OBJ de cada objeto:

Nº de tombo (frag. alças)	Tempo de processamento (min)	Número de faces	Geometria (MB)	Textura JPEG (MB)
64/11.18	106	1.038.142	72,866	4,551
64/11.32	n/d	n/d	n/d	n/d
75/1.41	68	1.154.237	81,251	4,576
75/1.42	46	1.103.582	76,782	3,937
75/1.43	142	2.083.522	147,137	5,366

Tabela 5. Tempo de processamento, número de faces e tamanho dos arquivos dos modelos 3D obtidos por fotogrametria no Artec Studio 20 Professional.

ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS DE DIGITALIZAÇÃO

A comparação entre as tecnologias de digitalização empregadas neste estudo foi conduzida a partir de um conjunto de critérios técnicos, métricos e operacionais, com o objetivo de garantir rigor metodológico e permitir uma avaliação sistemática do desempenho de cada abordagem. A análise integrou parâmetros quantitativos – como número de faces, tempo de aquisição e processamento e desvio geométrico entre modelos – e critérios qualitativos relacionados à fidelidade visual, à resolução de superfície e à aplicabilidade arqueológica.

PROCEDIMENTOS DE COMPARAÇÃO GEOMÉTRICA

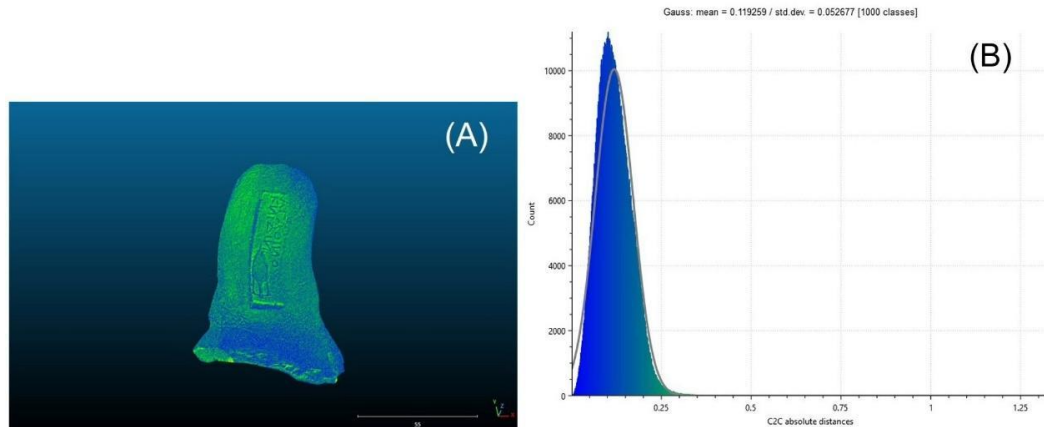
Para permitir a comparação direta entre modelos produzidos por diferentes técnicas de digitalização, foi realizado um processo de alinhamento e análise de desvio geométrico entre as malhas.

Inicialmente, os modelos foram alinhados e ajustados em escala no software Artec Studio, tomando-se como referência um modelo com escala métrica conhecida, por meio de um procedimento em duas etapas: um alinhamento manual, baseado na seleção de pontos homólogos, seguido de refinamento automático (*auto-align*), que identifica correspondências entre as superfícies.

Em seguida, os modelos foram exportados para o software CloudCompare, onde cada malha foi convertida em nuvem de pontos, de modo a padronizar o formato para a comparação geométrica. O

alinhamento foi então novamente refinado por meio do algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP), sem ajuste de escala, com o objetivo de minimizar discrepâncias residuais entre os modelos.

Posteriormente, foi realizado o cálculo de desvio geométrico utilizando a ferramenta *Cloud-to-Cloud Distance* (C2C) (Figura 7), que estima a distância absoluta entre pontos correspondentes de duas nuvens. Em todas as comparações, os modelos obtidos por escaneamento com o NextEngine foram adotados como referência, em razão de sua escala métrica direta e elevada densidade de amostragem.



QUALIDADE GEOMÉTRICA E RESOLUÇÃO DE MALHA

A qualidade geométrica dos modelos foi avaliada com base na densidade da malha (número total de faces), no tamanho final dos arquivos e na consistência métrica da superfície reconstruída, articulando parâmetros quantitativos e observações qualitativas da morfologia digitalizada.

Os fragmentos de alça escaneados com o NextEngine apresentaram malhas significativamente mais densas, com valores superiores a três milhões de faces na maioria dos exemplares. Em contraste, os modelos gerados por fotogrametria no Agisoft Metashape variaram entre aproximadamente 427 mil e 601 mil faces, enquanto aqueles produzidos no Artec Studio apresentaram maior variabilidade, alcançando mais de dois milhões de faces no exemplar 75/1.43.

Por sua vez, os modelos obtidos com o Artec Space Spider apresentaram malhas substancialmente mais densas, com valores entre aproximadamente 4,8 e 15,7 milhões de faces (Tabela 2). Esses valores, no entanto, se referem majoritariamente às ânforas completas, que foram digitalizadas exclusivamente com esse equipamento, o que limita a possibilidade de comparações diretas entre objetos de maior dimensão e os fragmentos de alça digitalizados por outras técnicas. A exceção é o exemplar 75/1.43, também escaneado com esse dispositivo, que apresentou a maior densidade geométrica entre as alças. Esse resultado sugere, portanto, que, caso as demais alças tivessem sido submetidas ao mesmo procedimento de digitalização, seria plausível esperar um padrão semelhante de elevada densidade de malha.

Esses resultados evidenciam diferentes níveis de densidade de amostragem geométrica entre as técnicas. No entanto, a densidade de malha, embora frequentemente utilizada como indicador de qualidade, não se

traduz diretamente em maior fidelidade morfológica. Parte dessa densidade pode resultar de processos de refinamento superficial ou preenchimento de lacunas durante o processamento, enquanto etapas de simplificação controlada da malha podem reduzir o número de polígonos sem alterar significativamente a resolução geométrica efetiva.

As observações qualitativas da superfície reforçam essa distinção. Modelos gerados por fotogrametria tendem a apresentar leve a moderada suavização (*smoothing*), especialmente em áreas com baixa variação cromática ou elevada complexidade morfológica, como bordas e superfícies de fratura em objetos cerâmicos (Figura 8). Esses efeitos decorrem do caráter inferencial da reconstrução fotogramétrica, baseada na interpolação geométrica a partir de correspondências entre imagens, o que pode resultar na atenuação de irregularidades finas e na suavização de transições abruptas.

Adicionalmente, observa-se nos modelos fotogramétricos maior incidência de facetamento, caracterizado pela visibilidade dos triângulos da malha em regiões de maior variação topográfica. Esse aspecto não implica necessariamente menor qualidade geométrica, mas reflete o processo de discretização da superfície e a forma como a geometria é reconstruída a partir de dados amostrais.

Em contraste, os modelos obtidos por escaneamento com sensores ativos tendem a preservar com maior fidelidade a microtopografia da superfície, registrando variações geométricas de menor escala com maior nitidez e consistência. Isso se deve ao fato de que esses sistemas realizam medições diretas da geometria, ao passo que a fotogrametria reconstrói a superfície de forma indireta, a partir da correspondência entre imagens.

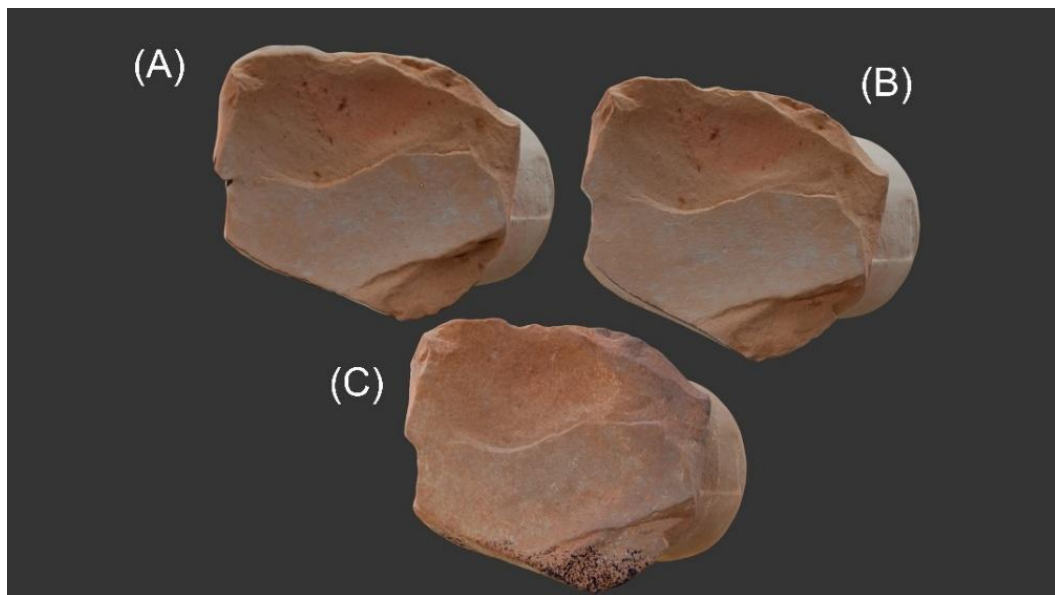


Figura 8. Comparação de superfícies do fragmento de alça 75/1.42 obtidas por diferentes técnicas de digitalização: (A) fotogrametria processada no Artec Studio 20 Professional; (B) fotogrametria processada no Agisoft Metashape; (C) escaneamento tridimensional realizado com o NextEngine 3D Scanner Ultra HD. Observa-se, nos modelos (A e B), a presença de leve a moderada suavização (*smoothing*), com atenuação de irregularidades finas e transições mais contínuas, especialmente em áreas de fratura. Fonte: elaborado por Matheus Cruz.

CONSISTÊNCIA GEOMÉTRICA E DESVIO INTER-MODELO

Nos casos em que uma mesma peça foi digitalizada por mais de uma tecnologia – situação aplicável aos fragmentos de alça – procedeu-se à sobreposição das nuvens de pontos e ao cálculo de desvio geométrico ponto a ponto.

A análise considerou os valores médios de distância (*mean*) e o desvio padrão (*std. dev.*) das distâncias absolutas entre as nuvens comparadas, permitindo avaliar tanto a magnitude média das diferenças geométricas quanto a sua distribuição ao longo da superfície. Enquanto os valores médios indicam a consistência geométrica global entre os modelos, o desvio padrão permite identificar a presença de variações localizadas mais acentuadas, evidenciando que as discrepâncias não se distribuem de forma homogênea ao longo da superfície.

Os resultados (Tabela 6) obtidos indicam que, na maioria dos casos, as diferenças geométricas entre os modelos permanecem em escala submilimétrica, o que sugere elevada consistência métrica entre as diferentes técnicas de digitalização.

Peça	Comparação	Mean (mm)	Std. Dev. (mm)
64/11.18	Scanner NextEngine x Fotogrametria (Artec)	0.095	0.057
	Scanner NextEngine x Fotogrametria (Metashape)	0.083	0.049
64/11.32	Scanner NextEngine x Fotogrametria (Metashape)	0.089	0.071
75/1.41	Scanner NextEngine x Fotogrametria (Artec)	0.077	0.037
	Scanner NextEngine x Fotogrametria (Metashape)	0.072	0.034
75/1.42	Scanner NextEngine x Fotogrametria (Artec)	0.277	0.198
	Scanner NextEngine x Fotogrametria (Metashape)	0.092	0.509
75/1.43	Scanner NextEngine x Scanner Artec	0.108	0.042
	Scanner NextEngine x Fotogrametria (Metashape)	0.117	0.044
	Scanner NextEngine x Fotogrametria (Artec)	0.119	0.052

Tabela 6. Valores médios de desvio geométrico (*mean*) e desvio padrão (*std. dev.*) entre modelos 3D obtidos por diferentes métodos de digitalização.

De modo geral, os valores médios de desvio situam-se entre aproximadamente 0,07 mm e 0,12 mm, indicando variações geométricas reduzidas entre os métodos. Desvios mais elevados foram observados em casos específicos, como no exemplar 75/1.42. Nesse caso, embora o valor médio permaneça reduzido, o desvio padrão significativamente elevado (0,509 mm) indica grande dispersão local das diferenças geométricas. Esse comportamento sugere a presença de discrepâncias pontuais mais acentuadas, provavelmente concentradas em regiões específicas da superfície, como bordas ou áreas de maior complexidade geométrica.

A análise dos mapas de distância revela que as discrepâncias tendem a concentrar-se em regiões de borda, nas reentrâncias dos selos epigráficos ou em áreas de maior complexidade geométrica, enquanto superfícies

amplas e contínuas apresentam maior concordância entre os modelos. Esse padrão sugere que as diferenças entre as técnicas não se distribuem de forma homogênea, mas estão relacionadas a condições locais de aquisição e reconstrução.

Considerados em conjunto, esses resultados indicam que, apesar das diferenças nos processos de captura e reconstrução, as técnicas analisadas convergem para soluções geometricamente equivalentes em escala macroscópica (Figura 9) (Stamatopoulos & Anagnostopoulos, 2023). No entanto, divergências locais persistem em nível microtopográfico, podendo tornar-se relevantes em análises que dependem da identificação de detalhes finos, como marcas de ferramenta ou microirregularidades da superfície.

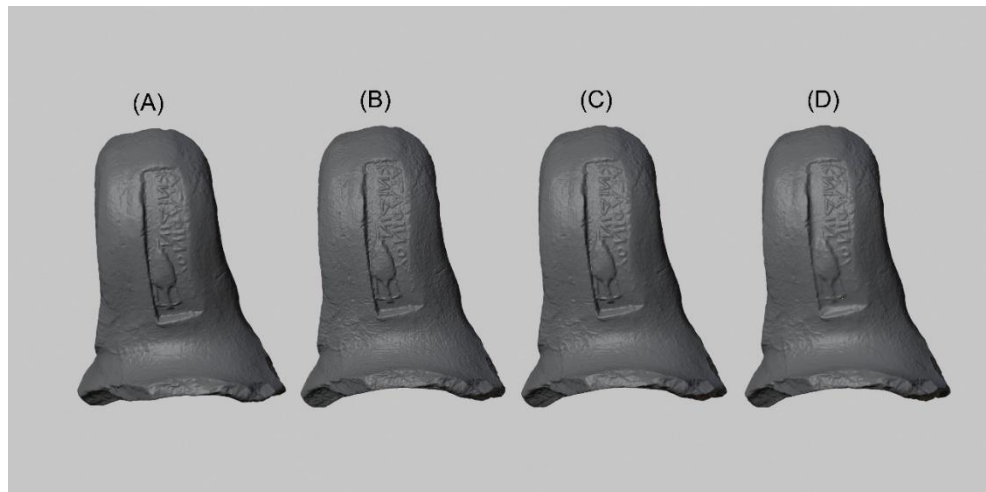


Figura 9. Comparação visual da geometria entre modelos 3D da alça 75/1.43 obtidos por diferentes técnicas de digitalização. (A) escaneamento com NextEngine; (B) escaneamento por luz estruturada com Artec Space Spider; (C) fotogrametria processada no Agisoft Metashape; (D) fotogrametria processada no Artec Studio. Observa-se elevada similaridade morfológica entre os modelos, com variações sutis restritas a detalhes superficiais e regiões de maior complexidade geométrica. Fonte: elaborado por Matheus Cruz.

FIDELIDADE VISUAL E TEXTURA

A avaliação da fidelidade visual considerou a resolução das texturas, a nitidez das inscrições e a presença de artefatos gráficos, entendidos como imperfeições na projeção das imagens sobre a malha tridimensional que não correspondem ao objeto real, tais como descontinuidades, borramentos e distorções locais. A Figura 10 apresenta uma comparação visual entre modelos 3D da alça 75/1.43 obtidos pelas diferentes técnicas analisadas.

Como evidenciado na Figura 10 (B), observa-se uma variação cromática significativa em relação aos demais modelos, caracterizada por tonalidade mais escura e menor saturação das cores. Essa discrepância não decorre de diferenças materiais do objeto, mas está associada às condições de aquisição e ao processamento da textura no escaneamento por luz estruturada com o Artec Space Spider. Embora o equipamento apresente elevada precisão geométrica, a captura cromática depende da iluminação ambiente e dos sensores RGB integrados, que não são otimizados para reprodução fiel de cor. Variações na intensidade e na direção da iluminação durante a aquisição, bem como a ausência de calibração colorimétrica, podem resultar em diferenças de exposição e balanço de branco entre as capturas. Durante a etapa de fusão e geração de textura, essas variações são integradas pelo algoritmo de *texture mapping*, podendo produzir tonalidades mais escuras e menor homogeneidade cromática.

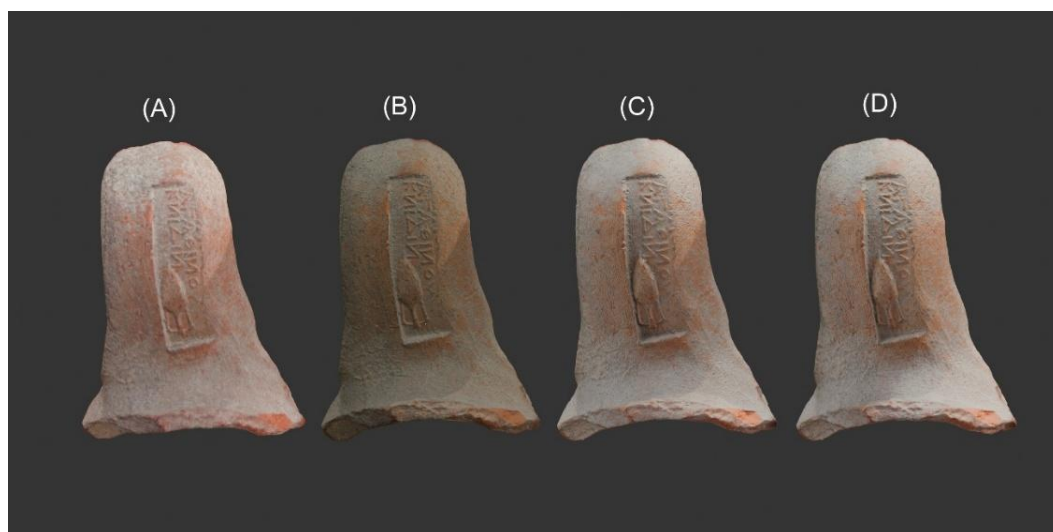


Figura 10. Comparação da fidelidade visual entre modelos 3D da alça 75/1.43 gerados por diferentes métodos de digitalização. (A) escaneamento com NextEngine; (B) escaneamento por luz estruturada com Artec Space Spider; (C) fotogrametria processada no Agisoft Metashape; (D) fotogrametria processada no Artec Studio. Observam-se diferenças na resolução da textura, na homogeneidade cromática e na nitidez das inscrições. Fonte: elaborado por Matheus Cruz.

De modo geral, para além das variações pontuais observadas, os modelos gerados por fotogrametria apresentaram maior homogeneidade cromática e melhor resolução visual, especialmente quando processados no Agisoft Metashape com estratégias de mesclagem do tipo *mosaic* e uso de filtragem de inconsistências (*ghosting filter*). Esses resultados refletem o fato de que a textura é diretamente derivada das imagens fotográficas, favorecendo a preservação de variações cromáticas sutis (Porter, Roussel & Soressi, 2016; Remondino & El-Hakim, 2006). Entretanto, em áreas de sobreposição complexa, observou-se perda pontual de nitidez, particularmente nas bordas de elementos em baixo-relevo dos selos epigráficos.

O Artec Space Spider apresentou elevada consistência entre geometria e textura, com boa definição de sulcos e relevos; contudo, conforme discutido, sua fidelidade cromática pode ser limitada em função das condições de aquisição e da ausência de calibração colorimétrica.

Já o NextEngine, apesar de capturar textura simultaneamente à geometria, apresentou variações cromáticas entre tomadas, presença de sombras residuais (como se observa no modelo (C) da Figura 8) e perda significativa de nitidez nas áreas dos selos, comprometendo a legibilidade de determinados elementos epigráficos (Figura 11). Essas limitações parecem estar associadas tanto às condições de aquisição – especialmente à interação entre iluminação e geometria – quanto aos processos de fusão e mesclagem de textura (*texture blending*) adotados pelo software.

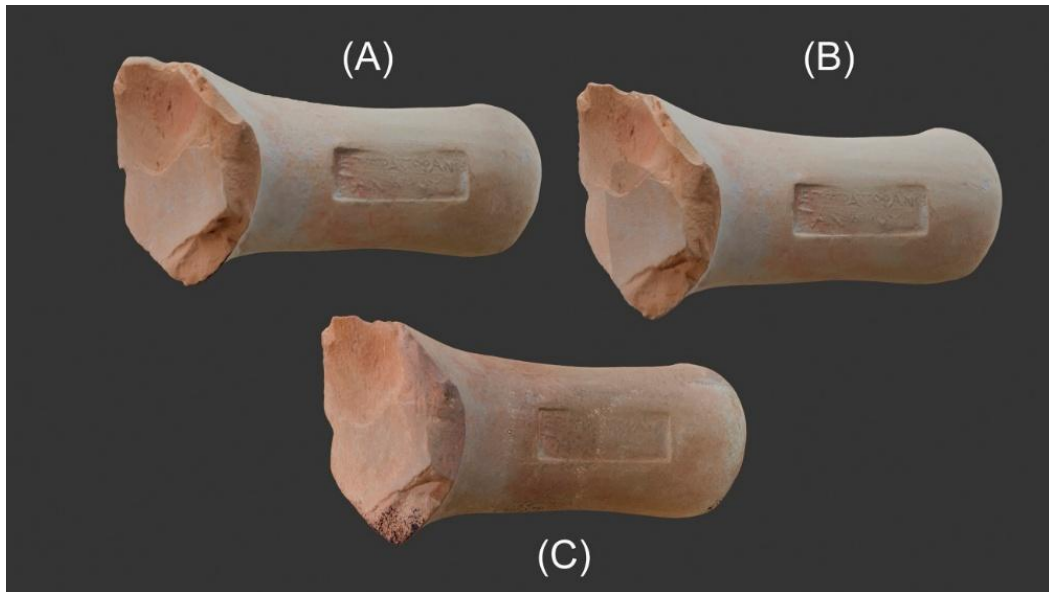


Figura 11. Comparação da qualidade da textura e da legibilidade epigráfica em modelos 3D da alça 75/1.42 obtidos por diferentes técnicas de digitalização. (A) fotogrametria processada no Artec Studio; (B) fotogrametria processada no Agisoft Metashape; (C) escaneamento com NextEngine. Observam-se diferenças na homogeneidade cromática e na nitidez das inscrições, com destaque para a redução da legibilidade epigráfica no modelo (C). Fonte: elaborado por Matheus Cruz.

TEMPO DE AQUISIÇÃO E EFICIÊNCIA OPERACIONAL

O tempo de aquisição evidenciou diferenças significativas entre os métodos analisados. O Artec Space Spider apresentou maior agilidade, com tempos médios entre 10 e 15 minutos para ânforas completas e cerca de 2 minutos para fragmentos de alça. Em contraste, o NextEngine demandou aproximadamente 82 minutos por varredura, totalizando cerca de 164 minutos por peça, em função da necessidade de múltiplas divisões angulares e da realização de capturas em diferentes posições.

A fotogrametria apresentou tempo de aquisição variável, condicionado ao número de imagens capturadas e à necessidade de reposicionamento do objeto entre sessões fotográficas. No que se refere ao processamento, os fluxos variaram entre aproximadamente 68 e 142 minutos por peça na fotogrametria, enquanto o pós-processamento dos modelos do NextEngine demandou, em média, cerca de 90 minutos por objeto, incluindo etapas de alinhamento e recorte.

Esses resultados indicam que a eficiência operacional não depende exclusivamente da velocidade de aquisição, mas também do grau de intervenção manual exigido ao longo do fluxo de trabalho. Nesse sentido, métodos mais automatizados tendem a reduzir o tempo total de processamento, enquanto abordagens que oferecem maior controle paramétrico frequentemente implicam maior investimento temporal.

INTEGRIDADE DA MALHA E INTERPOLAÇÃO GEOMÉTRICA

Embora não tenham sido realizados cálculos volumétricos comparativos, observaram-se diferenças relevantes na natureza da geometria reconstruída por cada método, particularmente no que se refere à presença de superfícies inferidas e ao tratamento de lacunas.

Nos modelos fotogramétricos, a geometria é reconstruída a partir da correspondência entre imagens, o que implica um processo inerentemente inferencial. Em regiões com menor cobertura fotográfica ou baixo

contraste visual, esse processo pode resultar na interpolação de superfícies, gerando áreas cuja geometria não corresponde diretamente a medições, mas a estimativas derivadas do modelo.

Por outro lado, os modelos obtidos por escaneamento com sensores ativos baseiam-se em medições diretas da superfície, apresentando maior confiabilidade geométrica nas regiões efetivamente capturadas (Remondino, 2011). Ainda assim, limitações relacionadas à oclusão ou ao posicionamento do objeto podem gerar lacunas que também demandam preenchimento durante o processamento.

Nesse sentido, embora as análises de desvio indiquem elevada consistência métrica global entre os modelos, a distinção entre superfícies medidas e superfícies inferidas torna-se relevante na interpretação de variações locais, especialmente em aplicações que dependem de alta fidelidade microgeométrica.

ROBUSTEZ DO WORKFLOW E LIMITAÇÕES PRÁTICAS

O Artec Studio apresentou maior grau de automatização e menor necessidade de intervenção manual, favorecendo um fluxo de trabalho mais rápido e intuitivo. O Agisoft Metashape, embora mais técnico, oferece maior controle paramétrico sobre qualidade de reconstrução e densidade da malha.

O NextEngine demonstrou estabilidade em ambiente controlado, porém mostrou-se mais sensível a oclusões geométricas, exigindo múltiplas tomadas e alinhamento manual.

Entre as principais limitações observadas destacam-se as oclusões em superfícies curvas contínuas, a necessidade de reposicionamento do objeto durante a captura, a sensibilidade da fotogrametria à homogeneidade de iluminação e o tempo elevado de aquisição no modo de maior resolução do NextEngine.

DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que diferentes tecnologias de digitalização tridimensional não apenas produzem modelos com características técnicas distintas, mas também implicam diferentes regimes de construção do dado arqueológico digital. Nesse sentido, os modelos 3D não devem ser compreendidos como representações neutras ou cópias diretas dos objetos, mas como resultados de processos mediadores que articulam aquisição, processamento algorítmico e decisões operacionais.

A comparação entre escaneamento por sensores ativos e fotogrametria digital demonstra que essas abordagens diferem fundamentalmente na forma como a geometria é produzida (Di Angelo *et al.*, 2022; Porter, Roussel & Soressi, 2016; Remondino & El-Hakim, 2006; Robinson, 2024). Enquanto os sistemas de escaneamento realizam medições diretas da superfície, registrando a microtopografia com elevada precisão, a fotogrametria baseia-se em um processo inferencial, no qual a geometria é reconstruída a partir da correspondência entre imagens. Essa distinção se reflete na presença de suavizações, interpolações e variações locais mais acentuadas nos modelos fotogramétricos, especialmente em regiões de baixa textura ou maior complexidade geométrica.

Apesar dessas diferenças, os baixos valores médios de desvio geométrico indicam que as técnicas convergem para soluções consistentes em escala macroscópica. Isso sugere que, para análises morfológicas e tipológicas, os modelos produzidos por diferentes métodos podem ser considerados equivalentes do ponto de vista métrico. No entanto, a análise do desvio padrão e dos mapas de distância evidencia que essa equivalência não se estende de maneira uniforme à escala microgeométrica, na qual diferenças localizadas podem tornar-se relevantes.

Essa distinção entre consistência global e variabilidade local tem implicações diretas para a interpretação arqueológica. Em contextos nos quais a análise depende da identificação de detalhes finos – como marcas de ferramenta, inscrições ou microirregularidades –, a escolha da tecnologia de digitalização e dos parâmetros de processamento assume papel central na confiabilidade dos dados. Assim, a noção de “qualidade” do modelo não pode ser reduzida à densidade de malha ou à resolução aparente, devendo considerar também a natureza dos processos de reconstrução envolvidos.

Adicionalmente, os resultados evidenciam que a fidelidade visual e a qualidade geométrica não são necessariamente correlatas. Enquanto a fotogrametria apresentou melhor desempenho na reprodução de textura e variações cromáticas, os sistemas de escaneamento mostraram maior consistência na captura da geometria. Essa dissociação reforça a ideia de que diferentes tecnologias produzem diferentes tipos de informação, cada uma com potencialidades e limitações específicas.

Por fim, observa-se que o grau de automatização dos fluxos de trabalho influencia diretamente o controle sobre o processo de reconstrução (Remondino, 2011). Sistemas mais automatizados, como o Artec Studio, tendem a oferecer maior agilidade, mas menor capacidade de intervenção em casos de falha, enquanto softwares mais flexíveis, como o Agisoft Metashape, permitem maior controle paramétrico, ainda que à custa de maior complexidade operacional. Essa relação entre automatização e controle destaca o papel do pesquisador como agente ativo na construção do modelo digital, cujas decisões metodológicas impactam diretamente o resultado final.

Nesse contexto, a digitalização tridimensional na arqueologia deve ser compreendida não apenas como um processo técnico de documentação, mas como uma prática interpretativa, na qual os modelos resultantes constituem representações situadas do registro material, condicionadas pelas tecnologias empregadas e pelas escolhas realizadas ao longo do fluxo de trabalho.

CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que diferentes tecnologias de digitalização tridimensional, embora produzam modelos geometricamente consistentes em escala submilimétrica, geram dados com propriedades distintas, que condicionam suas potencialidades analíticas. Mais do que apontar uma técnica superior, a análise evidenciou que cada método opera segundo lógicas específicas de aquisição e reconstrução, resultando em diferentes formas de representar a materialidade arqueológica.

Nesse contexto, a digitalização 3D deve ser compreendida não como um procedimento neutro, mas como um processo mediado por escolhas técnicas e operacionais. A seleção de uma determinada abordagem implica a adoção de um regime específico de produção de dados, com implicações diretas para a análise e a interpretação dos objetos.

Do ponto de vista metodológico, os resultados reforçam a importância da explicitação dos fluxos de trabalho e da avaliação crítica das tecnologias empregadas, contribuindo para maior transparência e reprodutibilidade na arqueologia digital. Além disso, indicam que a articulação entre diferentes técnicas pode constituir uma estratégia produtiva, ao explorar a complementaridade entre precisão geométrica e fidelidade visual.

Por fim, este trabalho contribui para o debate sobre o papel das tecnologias digitais na arqueologia ao destacar que os modelos tridimensionais não devem ser entendidos apenas como ferramentas de documentação, mas como componentes ativos na construção do conhecimento arqueológico.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecemos imensamente à Professora Maria Isabel D'Agostino Fleming pelo apoio concedido ao projeto desde sua concepção, bem como pelo auxílio nas questões burocráticas envolvidas em seu desenvolvimento. Agradecemos também a Alex da Silva Martire e Amanda Daltro Viveiros Pina pela organização desse dossiê. Estendemos ainda nossos agradecimentos a Maximilian Adelman, da Scansystem, pelo empréstimo do scanner Artec Space Spider e por providenciar uma licença do software Artec Studio 20 Professional. Por fim, agradecemos a Ana Carolina Delgado Vieira, do MAE/USP, por providenciar o acesso ao acervo e intermediar o contato com a Scansystem.

REFERÊNCIAS

- Barreau, J.-B., Bruniaux, G., Petit, E., Petit, Q., Bernard, Y., Gagne, R., & Gouranton, V. (2014a). Photogrammetry based study of ceramics fragments. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3(4), 643-656.
- Barreau, J.-B., Nicolas, T., Bruniaux, G., Petit, E., Petit, Q., Bernard, Y., Gagne, R., & Gouranton, V. (2014b). Ceramics fragments digitization by photogrammetry, reconstructions and applications. *International Conference on Cultural Heritage, EuroMed*. Chipre: Universidade de Tecnologia de Chipre.
- Batistela, G. C., Moraes, C. A. da C., & Miamoto, P. (2017). Comparação entre cinco sistemas de digitalização 3D por fotogrametria aplicados à Antropologia Forense e Odontologia Legal. *Revista Brasileira de Odontologia Legal*, 4(3), 24-33.
- Bazzurri, F., & Picardello, M. A. (2018). Optimization techniques for photogrammetry applied to cultural heritage and the action of transformation groups. Em De Paolis, L. T. & Bourdot, P. (eds.). *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics* (pp. 332-348). Cham: Springer.
- Bezzi, L., Bezzi, A., Gietl, R., Moraes, C. A. da C., Naponiello, G., Airò, S., Putzer, A., & Silvestri, E. (2024). Digital twins of archaeological finds: open Source technologies applied to 3D scanning. *Archeologia e Calcolatori*, 35(2), 203-214.
- Coutinho, Y. B. (2025). *Desenvolvimento e aplicação de um protocolo de fotogrametria em um contexto laboratorial de acervos arqueológicos*. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- Di Angelo, L., Di Stefano, P., & Guardiani, E. (2022). Preview of computer-based methods for classification and reconstruction of 3D high-density scanned archaeological pottery. *Journal of Cultural Heritage*, 56, 10-24.
- Drap, P., Seinturier, J., & Long, L. (2003). Archaeological 3D Modelling using digital photogrammetry and Expert System. The case study of Etruscan amphorae. *Proceedings of the VIth Infographie Interactive et Intelligence Artificielle International Conference*. Limoges: Universidade de Limoges.
- Drap, P., Sgrenzaroli, M., Canciani, M., Cannata, G., & Seinturier, J. (2003). Laser Scanning and close range photogrammetry: Towards a single measuring tool dedicated to architecture and archaeology. *CIPA XIXth International Symposium*. Antalya: Universidade Técnica de Istambul.
- Duelis Viana, C. (2021). *Fotogrametria digital multi-escala para aquisição de dados estruturais*. Dissertação (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo.

- Falkingham, P. L. (2012). Acquisition of high resolution three-dimensional models using free, open-source, photogrammetric software. *Palaeontologia Electronica*, 15(1), 1-15.
- Felícisimo, Á. M., & Polo, M.-E. (2022). Measurement and control of colour fidelity in scanned 3D models for heritage conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 56, 159-166.
- Fleming, M. I. D., Abreu, T. B. A. de, Teixeira-Bastos, M., Martire, A. da S., & Gregori, A. M. (2017). A importância das novas tecnologias para a arqueologia e suas possibilidades de uso. A impressão 3D e os projetos do LARP. *Vestígios - Revista Latino-Americana de Arqueologia Histórica*, 11(1), 55-79.
- Forte, M. (ed.). (2010). *Cyber-Archaeology*. Oxford: British Archaeological Reports.
- Forte, M., Dell'Unto, N., Issavi, J., Onsurez, L., & Lercari, N. (2012). 3D Archaeology at Çatalhöyük. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 1(3), 351-378.
- Forte, M., & Siliotti, A. (eds.). (1997). *Virtual archaeology: re-creating Ancient Worlds*. Nova Iorque: Abrams.
- Franco, G. G., & Naime, A. (2021). Structure from Motion (SFM) – Uma breve revisão histórica, aplicações nas geociências e perspectivas futuras. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44(40853), 1-10.
- Frandanisa, G. R. B. (2026). Restauro virtuale delle edicole-naiskoi e dei segnacoli dipinti di Lilibeo: Metodologie, applicazioni e risultati. Em Cangemi, M. & Schepis, L. (eds.). *Archeologia virtuale all'Università di Palermo: Le attività di didattica e ricerca dell'insegnamento di Archeologia Virtuale (2022-2025)* (pp. 65-80). Palermo: Palermo University Press.
- Funari, P. P. A. (2001). MAE-USP amphora collection: vessels and inscriptions. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia*, 11, 275-282.
- Guedes, C. M. (2016). Tecnologias de processamento fotogramétrico e restauro digital como ferramentas de preservação e conservação do patrimônio arqueológico: um estudo de caso do contexto brasileiro. Em Campos, G. do N. & Granato, M. (orgs.). *Anais do 4º Seminário Preservação de Patrimônio Arqueológico* (pp. 253-267). Rio de Janeiro: Museu de Astronomia e Ciências Afins.
- Guidi, G., Remondino, F., Morlando, G., Del Mastio, A., Ucheddu, F., & Pelagotti, A. (2007). Performances evaluation of a low cost active sensor for cultural heritage documentation. *8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques* (pp. 59-69). Zurique: Instituto Federal de Tecnologia de Zurique.
- Hoffmeister, D., Zellmann, S., Kindermann, K., Pastoors, A., Lang, U., Bubenzer, O., Weniger, G.-C., & Bareth, G. (2014). Geoarchaeological site documentation and analysis of 3D data derived by terrestrial laser scanning. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5, 173-179.
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry. Geometry from Images and Laser Scans*. Berlim: Walter de Gruyter.
- Kuzminsky, S. C., & Gardiner, M. S. (2012). Three-dimensional laser scanning: potential uses for museum conservation and scientific research. *Journal of Archaeological Science*, 39, 2744-2751.
- Lauro, V., & Lombardo, V. (2023). The cataloging and conservation of digital survey in archaeology: a photogrammetry protocol in the context of digital data curation. *Heritage*, 6, 3113-3136. DOI: 10.3390/heritage6030166.
- Limoncelli, M. (2012). *Il restauro virtuale in archeologia*. Roma: Carocci editore.
- Limoncelli, M., & Schepis, L. (2024). *Virtual restoration 3.1. Architecture. Principles and methods for virtual archaeological reconstruction of ancient monuments*. Roma: L'Erma Di Bretschneider.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2020). *Close-range photogrammetry and 3D imaging*. Berlim: De Gruyter.
- Magalhães, A. J. F. de, Berredo, A. L., & Gaspar, M. (2018). De volta ao passado: a aplicação da fotogrametria para registro arqueológico 3D. *Revista de Arqueologia*, 31(1), 185-207.

- Martire, A. da S. (2017). *Ciberarqueologia em Vipasca: o uso de tecnologias para a reconstrução-simulação interativa arqueológica*. Dissertação (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Martire, A. da S., Pina, A. D. de V., Jordani, A. B., Ávila, C. de, Moura, C. H. de, Branco, L. O. de A., Cruz, M. M., Cafagne, T. P., & Carvalho, V. M. (2024). *Cultura material e digital em diálogo*. São Paulo: Museu de Arqueologia e Etnologia/USP.
- Martire, A. da S., & Porto, V. C. (orgs.). (2022). *(Des)construindo arqueologias digitais*. São Paulo: Museu de Arqueologia e Etnologia/USP.
- Moraes Wichers, C. A. de, Zanettini, P., & Tega, G. (2017). Entre seres e coisas: a aplicação de tecnologias 3D como ponte entre patrimônio arqueológico e sociedade. *Vestígios - Revista Latino-Americana de Arqueologia Histórica*, 11(1), 80-106.
- Paukkonen, N. (2023). Towards a mobile 3D documentation solution. Video-based photogrammetry and iPhone 12 Pro as fieldwork documentation tools. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 6(1), 143-154. DOI: 10.5334/jca.135.
- Paukkonen, N. (2024). This is how we do it in the field: photogrammetry as a fieldwork documentation tool on a Finnish archaeological project in Greece. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 29(1), 1-15. DOI: 10.17690/024291.1.
- Perrone Jr., R. V., & Williams, J. L. (2019). Dimensional accuracy and repeatability of the NextEngine laser scanner for use in osteology and forensic anthropology. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 25, 308-319.
- Pina, A. D. de V. (2025). *Etnoarchaeogaming: o desenvolvimento e a aplicação de jogos que conectam Arqueologia, patrimônio e almas*. Dissertação (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Porter, S. T., Roussel, M., & Soressi, M. (2016). A simple photogrammetry rig for the reliable creation of 3D artifact models in the field lithic examples from the Early Upper Paleolithic Sequence of Les Cottés (France). *Advances in Archaeological Practice*, 4(1), 71-86.
- Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3, 1104-1138. DOI: 10.3390/rs3061104.
- Remondino, F., & Campana, S. (2014). *3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage. Theory and best practices* (V. 2598). Oxford: British Archaeological Reports International Series.
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: a review. *The Photogrammetric Record*, 21(115), 269-291.
- Robinson, M. G. P. (2024). *Photogrammetry for archaeological objects. A manual*. Sydney: Sydney University Press.
- Rodríguez González, E., Carbonell Pastor, S., & Casals, J. R. (2019). Lost colours: photogrammetry, image analysis using the DStretch plugin, and 3-D modelling of post-firing painted pottery from the south west Iberian Peninsula. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 13, e00093.
- Slizewski, A., Friess, M., & Semal, P. (2010). Surface scanning of anthropological specimens: nominal-actual comparison with low cost laser scanner and high end fringe light projection surface scanning systems. *Quartär - Internationales Jahrbuch zur Erforschung des Eiszeitalters und der Steinzeit*, 57, 179-187.
- Stamatopoulos, M. I., & Anagnostopoulos, C.-N. (2023). Digital modelling of ceramic sherds by means of photogrammetry and macrophotography: uncertainty calculations and measurement errors. *Scientific Culture*, 9(3), 73-87.
- Ullman, S. (1979). The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 203(1153), 405-426.
- Vizioli, S. H. T., Adami, A., Hiilesmaa, L., & Carvalho, L. C. (2020). Comparative study of the photogrammetry process in different hardware. *Congreso SIGraDi 2020* (pp. 425-432). Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.

- Wang, J., Hou, Z., Qian, W., & Chen, G. (2023). Morphological analysis of pottery based on the turning function using photogrammetry. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 51, 1-7.
- White, S. (2015). Virtual archaeology – the nextengine desktop laser scanner. *Archaeology International*, 18, 41-44.

