

DIGITALIZAÇÃO 3D DO PATRIMÔNIO ARQUEOLÓGICO METÁLICO USANDO O KINECT

Thais Rodrigues de Souza *

Guilherme Lucio Abelha Mota **

Guadalupe do Nascimento Campos ***

Introdução

O patrimônio arqueológico é um recurso cultural não renovável, que abrange todos os vestígios relacionados às atividades humanas, evidenciados através dos métodos arqueológicos (CARTA DE LAUSANNE, 1990). Trata-se de um importante testemunho do passado, que fornece informações sobre os mais variados aspectos de um determinado grupo social, além de ser essencial para a construção da identidade cultural da sociedade (SCHMITZ, 2015). Portanto, é imprescindível garantir a sua preservação através do desenvolvimento de metodologias adequadas de coleta, documentação, acondicionamento e conservação. Dessa forma, esses acervos poderão ser utilizados em pesquisas posteriores e salvaguardados para as gerações futuras (CAMPOS; GRANATO, 2015a).

Preservar coleções arqueológicas requer uma metodologia multidisciplinar, utilizando técnicas e procedimentos específicos de acordo com a necessidade das distintas classes de artefatos. Assim, evita-se que sejam aplicados procedimentos equivocados aos artefatos, causando prejuízos na sua conservação.

A fragilidade característica e a variedade de materiais que compõem o patrimônio arqueológico estabelecem desafios para a sua preservação. Essas particularidades atraem o interesse de pesquisadores com diversas formações, com o intuito de documentar, analisar, caracterizar e minimizar o processo de deterioração dessas coleções. Nesse contexto, dentre as pesquisas multidisciplinares dedicadas ao

* Graduada em tecnologia em sistemas de informação pela Faculdade de Educação Tecnológica do Estado do Rio de Janeiro e mestre pelo Programa de Pós-graduação em Ciências Computacionais do Instituto de Matemática e Estatística da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (Uerj). thaisrodrigues25rj@gmail.com

** Graduado em Engenharia pela Uerj. Obteve os títulos de mestre e de doutor em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). É professor do Departamento de Informática e Ciência da Computação e do programa de mestrado em ciências computacionais da Uerj, onde leciona e pesquisa temas relacionados à visão computacional. guimota@ime.uerj.br

*** Museóloga pela Universidade do Rio de Janeiro, Arqueóloga, Mestre e Doutora em Ciência dos Materiais e Engenharia Metalúrgica (PUC-Rio), cujo foco das pesquisas foi a aplicação da arqueometria para artefatos arqueológicos metálicos. Realizou pesquisas de pós-doutorado em conservação de objetos arqueológicos metálicos no MAST. Desde 2010 é pesquisadora colaboradora do MAST. guadalupecampos@mast.br

patrimônio cultural existentes na literatura, destaca-se o desenvolvimento da tecnologia de digitalização 3D para aplicação no patrimônio arqueológico. Essas pesquisas vêm possibilitando a documentação da geometria de artefatos arqueológicos, tanto *in situ* quanto em laboratório, que agregam valor em várias etapas da pesquisa arqueológica; no trabalho de campo e laboratório, no gabinete e na divulgação.

O procedimento de digitalização 3D de um objeto pode ser dividido em três etapas. Primeiramente, a aquisição, na qual são obtidos conjuntos de coordenadas, sendo cada conjunto extraído em uma diferente pose ou perspectiva do objeto. Um conjunto de coordenadas obtido de uma dada perspectiva é comumente referido na literatura pelo termo nuvem de pontos. Em seguida, as nuvens de pontos são processadas. Em geral, o processamento envolve a eliminação das coordenadas relativas a objetos que não interessem à aplicação, além do registro das diversas nuvens de pontos de forma que estas se fundam. Por fim, pode-se efetuar a reconstrução da imagem do objeto (NIESSNER *et al.*, 2013), que gera um modelo virtual 3D.

Por viabilizar a modelagem sem risco à integridade dos objetos, a digitalização 3D possui grande potencial para auxiliar na preservação dos artefatos arqueológicos. Como essa tecnologia possibilita o registro de informações a respeito da geometria e da aparência dos objetos, viabiliza ao conservador a comparação e a observação ao longo do tempo de possíveis alterações do artefato e a identificação de deteriorações.

Doravante, em caso de dano por causas naturais, acidentais ou dolosas, modelos digitais poderão auxiliar no processo de restauração dos artefatos. Além disso, também permitem a divulgação de coleções de mídia digital, através de museus virtuais, e possibilita a criação de réplicas. Nos artefatos muito frágeis, cujo manuseio em laboratório é mais difícil, a impressão de réplicas é uma alternativa viável, pois, dessa forma, minimiza perdas e facilita a análise morfológica do acervo.

Os riscos à integridade do patrimônio arqueológico são diversos, passando por sua fragilidade inerente, assim como acidentes, como o ocorrido com a barba da máscara mortuária de Tutancâmon¹, além da destruição deliberada e fortuita de sítios arqueológicos, situados em locais submetidos a conflitos armados. Como exemplos de danos em regiões de conflitos armados, pode-se mencionar a destruição dos Budas de Bamiyan por militantes do Talibã², no Afeganistão, a explosão pelo Estado Islâmico do templo de Baal-Shamin, na Síria, e o uso como base militar de veículos pesados pelo

¹ Disponível em: <<http://g1.globo.com/mundo/noticia/2015/01/barba-de-tutancamon-e-colada-com-massa-em-museu-no-egito.html>>. Acesso em: 28 set. 2017.

² Disponível em: <http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2001/010302_buda.shtml>. Acesso em: 28 set. 2017.

exército estadunidense da área de um sítio arqueológico da Babilônia³, no Iraque. Nos casos em que houver disponibilidade, tentativas de restauração podem valer-se de modelos 3D dos artefatos a serem reconstruídos.

Em linhas gerais, um modelo 3D é uma representação matemática de um objeto que consiste simultaneamente em uma estrutura geométrica e de dados, que pode ser visualizada em 3D utilizando algum aplicativo específico (REMONDINO; EL-HAKIM, 2006). Nesse sentido, os modelos 3D são um mecanismo interessante para armazenar, replicar e representar objetos incluindo sítios e artefatos arqueológicos.

Diversas iniciativas na literatura (LEVOY *et al.*, 2000; IKEUCHI *et al.*, 2007; FONTANA *et al.*, 2002; GRUN; REMONDINO; ZHANG, 2004) relatam o uso de técnicas de modelagem 3D aplicada ao contexto do patrimônio cultural, e especificamente ao arqueológico. Nessas iniciativas é comum o dispêndio de considerável volume de recursos financeiros.

Alternativamente, sobretudo em áreas como, por exemplo, a robótica, nota-se na literatura o uso de sensores de baixo custo voltados à obtenção de modelos 3D de objetos. No campo da preservação do patrimônio cultural, esta tecnologia de digitalização 3D pode possibilitar o acesso de um número maior de pesquisadores, universidades, centros de pesquisa e demais agentes à essa ferramenta de preservação. Neste contexto, a relevância da pesquisa nessa área é reforçada, quando Fraile (FRAILE, 2007) afirma ser a digitalização 3D um fator primordial para a documentação de artefatos arqueológicos.

No caso de vestígios arqueológicos que não poderão ser deslocados para o laboratório ou necessitem ser documentados quando evidenciados, a aplicação de técnicas de digitalização 3D deverá ser realizada *in situ*. Dessa forma, é importante realizar uma minuciosa documentação dos vestígios revelados na escavação (OLIVEIRA, 2008), gerando informações essenciais para a melhor compreensão do sítio arqueológico.

A presente pesquisa se dedica à obtenção de modelos de artefatos arqueológicos metálicos a partir de dados coletados pelo sensor de profundidade do Kinect v1 (KHOSHELHAM, 2011), o qual aplica o princípio físico da luz estruturada. O estudo se justifica pela premissa de que artefatos arqueológicos metálicos são mais passíveis de degradação, devido ao processo de corrosão. Por conta da conseqüente fragilidade, é importante que esses artefatos sejam digitalizados logo após a limpeza mecânica, que irá

³ Disponível em: <<http://www.gaudiumpress.org/content/5990-Unesco-acusa-EUA-de-destruicao-de-sitio-arqueologico-da-Babilonia>>. Acesso em: 28 set. 2017.

retirar os sedimentos das suas superfícies. Nesse sentido, fica evidenciado o potencial da tecnologia empregada, pois, além de facilmente portátil, também apresenta preço acessível quando comparado ao uso de outros sensores (CAMPOS; GRANATO, 2015b).

Esse trabalho visa ao desenvolvimento de um método eficaz e econômico capaz de realizar a reconstrução 3D de artefatos arqueológicos metálicos a partir de nuvens de pontos geradas pelo sensor de profundidade do Kinect v1. Deve ser mencionado que, apesar da motivação do trabalho ser a digitalização dos artefatos arqueológicos metálicos, a aplicabilidade da técnica não se restringe apenas a esta classe de objetos.

1. Revisão Bibliográfica

Esse item compreende o levantamento realizado sobre as principais aplicações das tecnologias de digitalização em 3D como ferramenta de preservação do patrimônio arqueológico, histórico e artístico identificadas na literatura. De maneira geral, é preciso chamar atenção para algumas características comuns observadas ao longo da pesquisa bibliográfica. Primeiramente, o ambiente utilizado para a digitalização deve ser controlado, por vezes demandando a definição de pontos controle. Além disto, a aquisição e o respectivo planejamento logístico, por definição, pressupõem conhecimento prévio sobre a região de análise.

A respeito da etapa de processamento em laboratório, dos dados coletados em campo, é necessário reconhecer tratar-se de procedimento que requer a utilização de métodos que exigem grande poder de processamento de dados. Os métodos de otimização empregados não raro envolvem modelos mal condicionados, o que requer cuidados e conhecimento da equipe de laboratório.

Por fim, é preciso justificar o caráter inovador do uso do sensor Kinect para a digitalização de artefatos arqueológicos metálicos, uma vez que, a despeito do esforço, não foram encontradas na literatura pesquisas análogas ao estudo aqui apresentado.

1.1 - Digitalização 3D aplicada ao patrimônio histórico e artístico

Modelos 3D são uma representação matemática de objetos tridimensionais. Em linhas gerais, tais modelos podem ser gerados através de técnicas de reconstrução 3D ou ser criados virtualmente através de aplicativos como Maya, 3D Studio Max, Blender etc. (REMONDINO; EL-HAKIM, 2006).

A aplicação dessa tecnologia ao patrimônio histórico e artístico é razoavelmente recente, sendo o “Digital Michaelangelo Project” um dos projetos pioneiros na

digitalização 3D (LEVOY *et al.*, 2000). Esse projeto foi desenvolvido entre os anos de 1998 e 1999 por grupos de pesquisa das universidades de Stanford e de Washington e com apoio da empresa Cyberware. Nesse período, foram digitalizadas diversas esculturas de Michelangelo que fazem parte do acervo da galeria da Academia de Florença, na Itália. Como resultado, foram criados modelos 3D de alta definição através de um scanner laser de triangulação. Câmeras digitais de alta resolução permitiram a aquisição da textura das esculturas, na sua maioria esculpidas em mármore de Carrara. Para manter a aparência fidedigna das esculturas, os dados tridimensionais foram capturados numa resolução de um quarto de milímetro. Tal resolução garante a documentação de detalhes minuciosos da sua produção, como as marcas deixadas pelos cinzeis, que auxiliam na identificação das condições de degradação das esculturas. Dessa forma, a reconstituição em 3D ajudou os conservadores e restauradores na obtenção de diagnósticos mais precisos para a escolha dos devidos procedimentos para a restauração, que foram realizados em 2004, como o caso da escultura de David. Além da geometria detalhada, a textura original das esculturas também foi adicionada aos modelos finais, assim como as propriedades de reflexão, absorção e transmissão de luz da superfície do *Carrara Statuario* em que foram esculpidas, resultando em modelos digitais de altíssima fidelidade.

Outro projeto de destaque desenvolvido no patrimônio histórico e artístico é o *Minerva Project* (FONTANA *et al.*, 2002). Nesse projeto, pesquisadores italianos do Instituto Nacional de Ótica de Florença e do Instituto de Ciência da Computação de Pisa empregaram um scanner laser de triangulação para digitalizar em 3D a escultura de bronze *Minerva di Arezzo*, de 1,55m de altura, situada no Museu Arqueológico de Florença. O objetivo dos pesquisadores em realizar um modelo 3D, também foi de auxiliar os conservadores e restauradores no processo de restauração da escultura.

Ikeuchi *et al.* (2007) apresentam outro projeto interessante de preservação do patrimônio artístico. Nesse projeto, intitulado “O grande Buda de Kamakura”, foram digitalizadas, dentre outros objetos, três grandes esculturas de Buda, medindo entre 2,7m e 15m, situadas em Kamakura, no Japão. O projeto impunha vários desafios tecnológicos. Para tanto, foram desenvolvidas técnicas para o registro simultâneo de várias nuvens de pontos. Dois algoritmos foram implementados. O primeiro é dedicado à execução no campo, através do *hardware* gráfico, enquanto, que o segundo contempla uma versão em programação paralela a ser executada no laboratório, em um *cluster*. Os dados geométricos foram obtidos pelo scanner laser Cyrax. Esse projeto possibilitou o uso de novas técnicas de escaneamento de grandes esculturas, como o uso do algoritmo ICP (*Iterative Closest Points*) para o alinhamento das nuvens de pontos (BESL; MCKAY,

1992). A abordagem de alinhamento simultâneo tem a vantagem de evitar a acumulação de erros. Com isso, o acúmulo de erros de alinhamento é relativamente pequeno e pode ser ignorado.

Observam-se poucas publicações científicas com abordagens e técnicas economicamente mais acessíveis. Dentre as raras exceções, resalta-se o trabalho de Barmpoutis (BARMPOUTIS; BOZIA; FORTUNA, 2015), que, ainda que não tenha a pretensão de realizar uma reconstrução fiel dos objetos, utiliza sensores de baixo custo para a digitalização das esculturas greco-romanas do Palácio Altemp. Os sensores utilizados são especificamente o Kinect v1 e o *Structure Sensor*, ambos baseados na tecnologia de luz estruturada.

1.2 - Tecnologias de aquisição de dados 3D aplicadas ao patrimônio arqueológico

Através dos modelos 3D, os arqueólogos podem digitalizar e obter réplicas que representam de forma fidedigna os sítios arqueológicos e os seus vestígios. Por isso, a essa técnica tem sido, cada vez mais, considerada como importante ferramenta para a preservação do patrimônio arqueológico. Como consequência, na última década, inúmeros projetos foram desenvolvidos com o intuito de auxiliar a pesquisa arqueológica, permitindo novas análises, estudos e interpretações. Entretanto, a maioria das tecnologias de digitalização 3D tem um alto valor orçamentário para serem incorporadas aos projetos arqueológicos, além de exigirem conhecimentos muito especializados em computação. Contudo, seguem abaixo alguns exemplos de aplicações de alto e baixo custo de digitalização 3D neste campo.

O *Great Buddha of Bamiyan Project* (GRÜN; REMONDINO; ZHANG, 2004) foi desenvolvido em 2002 pelo Instituto Federal de Tecnologia da Suíça. A motivação do projeto foi o interesse em reconstituir as duas esculturas de Buda, de 38m e 53m de altura, esculpidas em uma vertente montanhosa de Bamiyan. Ambas as esculturas foram destruídas em 2001 por militantes do Talibã. Diferentemente dos projetos anteriormente enumerados, a modelagem das esculturas foi realizada por fotogrametria digital (COELHO; BRITO, 2007). Nessa iniciativa, devido à ausência da possibilidade de se fazer uma aquisição planejada de imagens métricas, foram utilizadas imagens obtidas por câmeras métricas e não métricas.

A pesquisa desenvolvida por Reu *et al.* (2013) relata o uso de um *software* fotogramétrico, o PhotoScan (Agisoft LCC), para a documentação 3D das escavações em um sítio arqueológico na região de Flandres, na Bélgica. Já a pesquisa realizada por Forte (2014) visou à documentação do sítio arqueológico de Çatalhöyük, localizado no sul

da Anatólia, que contém resquícios do período neolítico. Neste trabalho, foram utilizadas câmeras *single lens reflex* e scanners *time-of-flight*.

Como exemplo de abordagem de digitalização 3D utilizando o Kinect, ressaltam-se os trabalhos de Dawson *et al.* e de Rosales. Dawson *et al.* (2013) apresentam a aplicação de tecnologias imersivas, como a realidade virtual combinada com a captura de movimento, que objetiva divulgar sítios arqueológicos da Escócia, que estão em risco de degradação devido à erosão. Os sítios arqueológicos foram reconstituídos com intuito de proporcionar a manipulação virtual pelo público. Já Rosales (2015), desenvolveu um método para realizar a digitalização 3D de artefatos do sítio arqueológico “Caminho Inca”, utilizando dados obtidos pelo sensor Kinect v1.

2. Fundamentação Teórica

Na literatura as técnicas de digitalização 3D são classificadas em função do princípio físico aplicado na obtenção da geometria dos objetos de interesse. Dentre tais técnicas podemos enumerar:

- Microtomografia computadorizada por raios-X: gera imagens de cortes transversais de um objeto de interesse, permitindo a reconstrução da estrutura do mesmo com precisão (FLIN *et al.*, 2005).
- Luz estruturada: esse tipo de equipamento é composto basicamente por uma câmera e um projetor. O projetor emite padrões geométricos sobre o objeto de interesse, enquanto a câmera permite a estimação de sua forma a partir do princípio da triangulação (CHIA; CHEN; YUEH, 1996).
- Triangulação a LASER: o dispositivo emite um padrão sobre o objeto. O sensor ótico calibrado com o emissor identifica a posição deste padrão e calcula a informação de profundidade por triangulação (HERITAGE; LARGE, 2009).
- Fotogrametria: permite a realização de medidas da geometria a partir de um conjunto de fotografias de um objeto de interesse obtidas, em geral, por câmaras especiais cujos parâmetros intrínsecos são previamente determinados em laboratório. Uma vez adquiridas as fotografias é necessário estimar os parâmetros extrínsecos relativos a cada imagem. Em seguida, com base nas equações de colinearidade, pode efetuar-se a medição de quaisquer pontos que sejam visíveis simultaneamente num par de imagens (COELHO; BRITO, 2007).
- Time of flight: esse tipo de sensor envia pulsos de luz para o objeto alvo, a fim de medir a distância entre o emissor e a superfície do objeto (PAGLIARI; PINTO,

2015). Essa técnica estima coordenadas a partir do tempo decorrido entre a emissão e a recepção do feixe de luz.

Parte das tecnologias de sensores anteriormente apresentadas, incluindo a empregada pelo sensor Kinect v1, se baseia no princípio da triangulação. A seção a seguir apresenta este princípio.

2.1 - Princípio da triangulação

O princípio da triangulação se baseia na geometria de um triângulo cuja dimensão da base é conhecida. A assim chamada linha de base possui, portanto, comprimento fixo. O vértice oposto à linha de base corresponde ao ponto cujas coordenadas deseja-se inferir.

Por sua vez, em cada uma das extremidades da linha de base é possível identificar uma reta que representa o caminho pelo qual se expressa algum fenômeno físico. Por definição, os extremos da linha de base e o ponto indeterminado são coplanares. Assim, a partir dessas direções, podem-se prolongar as retas provenientes dos extremos da linha de base e determinar as coordenadas do ponto desconhecido. Deve-se mencionar que, a menos de uma situação particular onde estas direções sejam paralelas, tais retas se cruzam em algum ponto do referido plano. O processo de obtenção das coordenadas do ponto desconhecido pode ser realizado geometricamente ou através de modelos analíticos para as retas em questão. Assim sendo, a obtenção das coordenadas do vértice oposto à linha de base se resume identificação das direções das retas anteriormente mencionadas.

O uso do princípio da triangulação pode ser identificado em diferentes técnicas de obtenção de dados tridimensionais. São elas scanner laser de triangulação, fotogrametria e luz estruturada. Na seção a seguir apresentamos a técnica de luz estruturada, abordagem empregada pelo sensor Kinect v1.

2.2 - Sensores de luz estruturada

Em linhas gerais, o princípio da luz estruturada, apresentado na Figura 1, pressupõe o conhecimento preciso do comprimento da linha de base, que no caso interliga os centros óticos do emissor de energia eletromagnética e da câmera. Juntos, emissor e câmera formam um conjunto que por vezes na literatura é referido pelo termo sensor de profundidade.

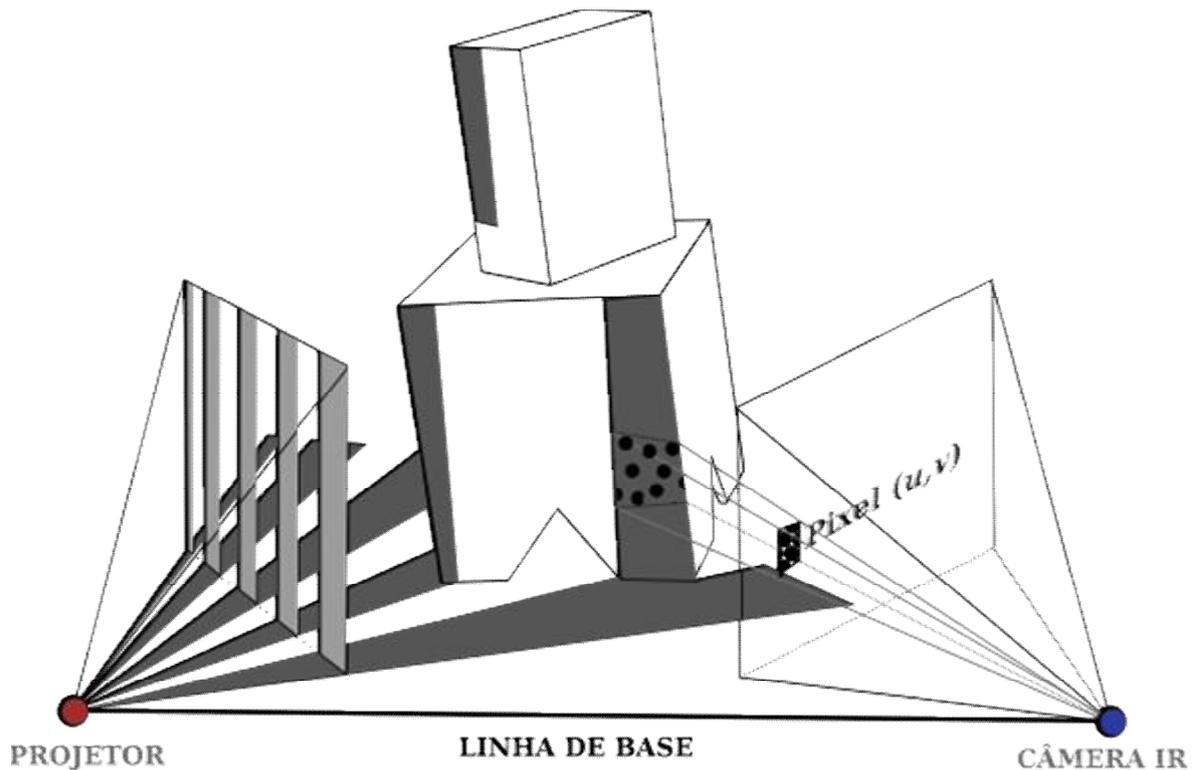


Figura 1 - Sensor de luz estruturada. **Ilustração:** Guilherme Abelha, 2017

A geometria de emissão de energia eletromagnética, em geral sob a forma de luz, deve também ser conhecida com precisão. Especificamente, o emissor, também referido pelo termo projetor, conforme expresso na Figura 1, deve ser capaz de emitir padrões distintos através de cada uma de suas colunas. Assim como no caso do projetor, a geometria do sensor e os parâmetros de orientação relativa em relação ao emissor precisam ser determinados de forma precisa. O processo de estimação de tais parâmetros é comumente referido na literatura pelo termo calibração.

De posse dos parâmetros de calibração, pode-se, para cada um dos pixels do sensor, determinar a direção de projeção, além também da coluna relativa ao emissor. Desta forma, estende-se o princípio da triangulação para o caso tridimensional, onde o vértice em que está localizado o projetor e sua geometria determinam um plano, expresso pelo padrão de barras no lado esquerdo da Figura 1, enquanto, o pixel (u,v) da câmera IR e o vértice correspondente do triângulo formam uma linha. Na porção direita da Figura 1, devido ao exagero nas dimensões do referido pixel, esta linha projetante é representada por uma pirâmide. Na Figura 1, pode-se observar também a projeção do pixel (u,v) no espaço objeto. O cruzamento do plano e da reta anteriormente mencionados definem a coordenada tridimensional do ponto indeterminado, correspondente ao vértice oposto à linha de base.

3. Materiais e Métodos

3.1 - Materiais

3.1.1 - Artefatos arqueológicos utilizados na pesquisa

O conjunto de artefatos estudado no âmbito deste trabalho é proveniente de uma pesquisa arqueológica desenvolvida no Sítio Funerário da Igreja São Gonçalo Garcia⁴, onde foram encontrados alguns sepultamentos de adultos e crianças⁵. A pesquisa realizada nos assentos de óbito da igreja confirmou a presença de um número significativo de escravizados, forros, africanos e crioulos, no espaço funerário da igreja. Dessa forma, possibilitou deduzir a provável procedência africana de alguns sepultamentos. Os materiais coletados nas escavações foram: acompanhamentos dos enterramentos (botões de osso e de metal, medalhas, alfinetes, fragmentos de mortalha), ferramentas, restos alimentares, louça européia dos séculos XVII, XVIII e XIX, cachimbos e contas de vidro, cerâmicas e fragmentos de garrafas de vidro do século XIX. Nesse conjunto, ressalta-se a ocorrência de uma quantidade expressiva de artefatos arqueológicos metálicos (CAMPOS; GRANATO, 2015a). Para a pesquisa de digitalização, foram selecionados três artefatos arqueológicos de metal ferroso que correspondem; um ferro de passar roupa, uma panela e uma lâmina de machado. O ferro de passar roupa tem as seguintes dimensões (170 × 110)mm e o peso de 2,043Kg, mostrado na Figura 2. Já a medidas da panela são de (340 × 90)mm, com uma alça de (26 × 39)mm e o seu peso corresponde a 779g, como está apresentada na Figura 3. A lâmina de machado mede (200 × 87)mm e pesa 1,875Kg, (Figura 4).



Figura 2 - Ferro de passar. Foto: Tuca Marques, 2014

⁴ O Projeto Levantamento Arqueológico Prospectivo da Biblioteca Pública do Estado do Rio de Janeiro BPE foi desenvolvido em 2013 sob a coordenação da Dra. Guadalupe Campos, com apoio financeiro da Secretaria de Cultura do Estado do Rio de Janeiro e o endosso institucional do Laboratório de Arqueologia Brasileira. O espaço funerário da Igreja de São Gonçalo Garcia está localizado atualmente no terreno da Biblioteca Parque do Rio de Janeiro.

⁵ Os sepultamentos foram identificados pelas bioarqueólogas Professora Dra. Andrea Lessa do PPGAr/ Museu Nacional e Laura Piedade do IBPA.



Figura 3 - Panela. Foto: Tuca Marques, 2014



Figura 4 - Lâmina do machado. Foto: Tuca Marques, 2014

3.1.2 - Sensor Kinect v1

O Kinect v1 é apresentado na Figura 5. Desenvolvido pelo centro de pesquisa da *Microsoft* em parceria com a empresa *PrimeSense*, em linhas gerais, o Kinect é usado primariamente como um sensor de movimento. Este equipamento foi criado para ser um acessório inovador para a indústria de jogos eletrônicos. A finalidade original era permitir que o usuário interagisse com os jogos do console Xbox 360 através de gestos e comandos de voz.

Rapidamente, o Kinect se tornou o periférico mais vendido pós-lançamento. No entanto, a *Microsoft* não poderia prever que se tornaria muito popular com pesquisadores em todo o mundo. Seis dias após seu lançamento, ele fora submetido a um procedimento de engenharia reversa. Com o sucesso obtido, a partir de então, desenvolvedores de diversos países criaram aplicações em distintas áreas, dentre as quais: reconstrução 3D (NIEBNER *et al.*, 2013); aplicações médicas (GALLO; PLACITELLI; CIAMPI, 2011); realidade aumentada (VERA *et al.*, 2011).

O Kinect v1 carrega uma câmera RGB, uma câmera infravermelho (IR), um projetor de laser infravermelho, microfones, um acelerômetro de três eixos e um pequeno controle para a inclinação do dispositivo. A seção a seguir apresenta os componentes do Kinect empregados na pesquisa.

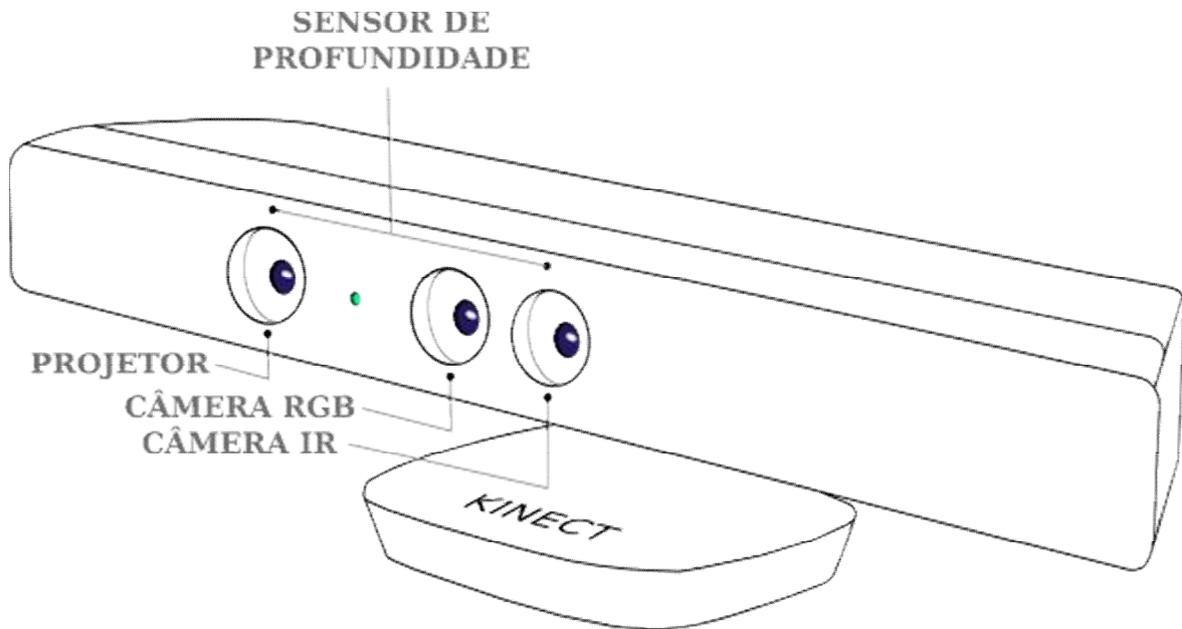


Figura 5 - Sensor Kinect v1. Ilustração: Guilherme Abelha, 2017.

3.1.2.1 - Sensor de profundidade

O sensor de profundidade é na verdade derivado da junção de dois componentes: o projetor laser infravermelho e a câmera de infravermelho. De acordo com o fabricante, tal conjunto permite reconstruir o espaço tridimensional com precisão da ordem de um milímetro. A câmera IR opera em 30 fps, com resolução de (640 x 480) pixels, com 11-bits de profundidade. O campo de visão do sistema é de 58 graus horizontal, 45 graus vertical e diagonal de 70 graus, e a faixa operacional do sensor de profundidade é entre 0,8m e 3,5m.

Para estimar a profundidade dos pixels na cena, o sensor de profundidade do Kinect v1 utiliza a tecnologia de luz estruturada, portanto, correspondendo a um sensor remoto ativo. Embora este método de luz estruturada não seja novo na literatura, como pode ser observado nos trabalhos de (CHIAZ. CHEN, 1996; VUYLSTEKE; OOSTERLINCK, 1990), o Kinect v1 demonstra a maturidade da tecnologia.

Para atingir seu máximo desempenho, o Kinect v1 requer que o projetor e a câmera infravermelho estejam calibrados com precisão. A calibração consiste na estimação dos parâmetros geométricos dos sensores infravermelho e RGB (parâmetros intrínsecos), além da orientação relativa entre ambos os sensores.

3.1.2.2 - Câmera RGB

A câmera RGB do Kinect v1 opera em 30 quadros por segundo com resolução de (640 x 480)pixels. Por outro lado, para 15 quadros por segundo, é possível trabalhar em uma resolução de (1280 x 1024)pixels. O ângulo de abertura da câmera RGB é de aproximadamente 62 graus na horizontal e 48,6 graus na vertical. A distância aproximada entre as câmeras infravermelho e RGB é de 2,5cm e a distância focal corresponde a aproximadamente 4,8mm.

3.1.3 - Componentes mecânicos do sistema de digitalização 3D

O primeiro dos componentes mecânicos do sistema de digitalização 3D a ser citado é o tripé. Neste trabalho, o Kinect permanece fixado ao tripé ao longo de todo o procedimento. O outro componente mecânico empregado é uma mesa giratória. Nela encontram-se fixadas marcações ArUco (GARRIDO-JURADO *et al.*, 2014) que indicam pontos de controle definidos no sistema do espaço objeto. Durante a digitalização, o artefato a ser analisado é posicionado sobre a mesa giratória, lá permanecendo ao longo de todo o processo.

3.2 - Método

O método proposto visa à digitalização 3D de artefatos e foi motivado pela necessidade de digitalização de artefatos arqueológicos metálicos. O sistema que implementa o método proposto é composto por diversos componentes. O mais significativo corresponde ao sensor Kinect. No protótipo, o Kinect permanece fixado ao tripé e conectado ao *notebook* responsável por executar o software. Os artefatos são posicionados sobre a mesa giratória, que, no caso, possui dimensões (20 × 45)cm. A mesa evita manipulação do objeto durante sua digitalização. A Figura 6 ilustra a organização dos componentes do sistema de digitalização 3D.

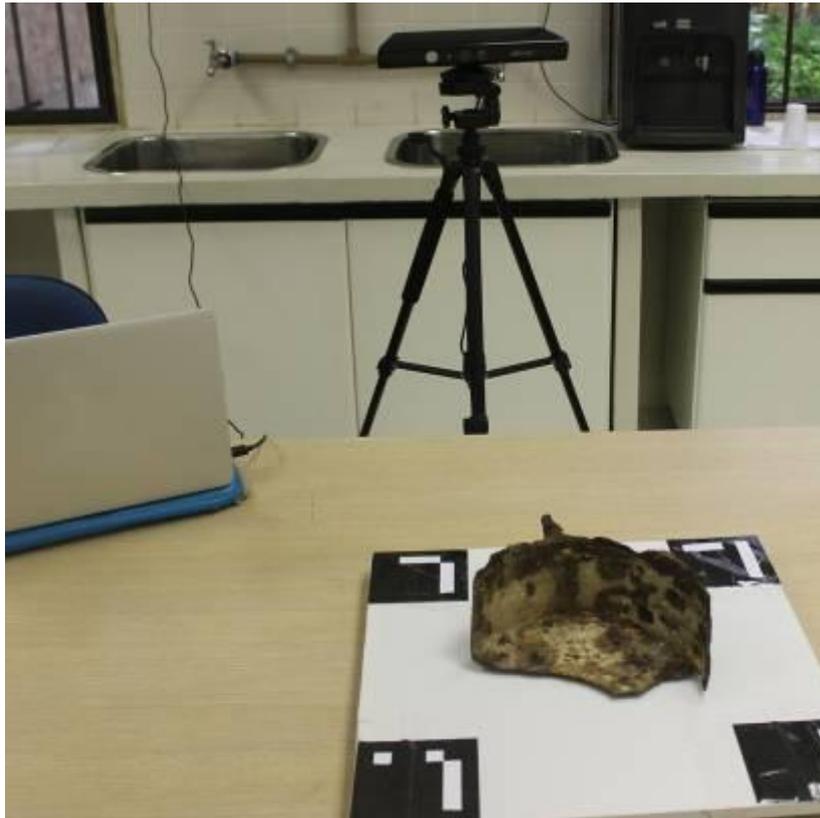


Figura 6 - Componentes do sistema de digitalização 3D. **Foto:** Thais Rodrigues de Souza, 2016

Do ponto de vista conceitual, podem ser identificadas tarefas manuais e funcionalidades implementadas em software. A estrutura simplificada dos componentes funcionais do método proposto é apresentada na Figura 7.

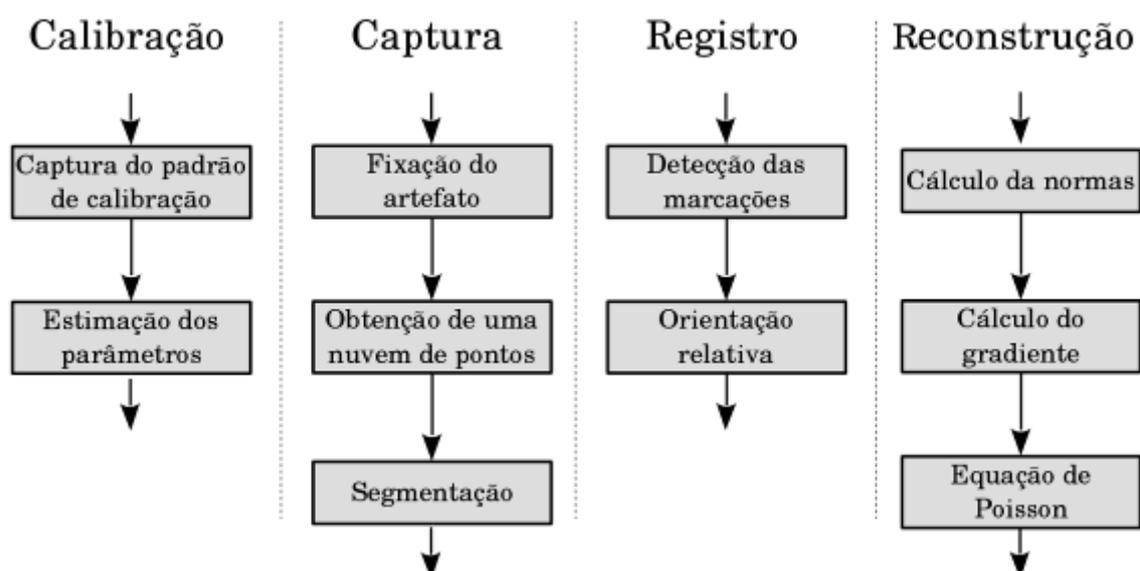


Figura 7 - Visão geral do método proposto (SOUZA, 2016)

Cada coluna da Figura 7 compreende um caso de uso (LARMAN, 2004) do sistema proposto. No caso de uso calibração, utiliza-se um padrão para a obtenção dos parâmetros intrínsecos e relativos da câmera em relação ao sensor de profundidade. Obtidos os parâmetros de calibração, é possível realizar a captura de diferentes nuvens de pontos compreendendo perspectivas distintas do objeto de interesse. Uma vez capturadas diversas perspectivas, cada observação é registrada em relação a um sistema de coordenadas único. Isso compreende o caso de uso Registro. Por fim, utiliza-se um conjunto de nuvens de pontos transformadas para a modelagem e visualização do objeto de interesse, o que corresponde ao caso de uso reconstrução.

Esta proposta se diferencia de outras como, por exemplo, o *Kinect Fusion* (NEWCOMBE *et al.*, 2011) pelo uso de pontos de controle sobre a mesa giratória. Desta forma, evita-se a acumulação de erros devidos à realização de transformações relativas consecutivas. Assim, neste trabalho, todas as nuvens de pontos são transformadas para o sistema global definido a partir das marcações ArUco sobre a mesa giratória.

3.2.1 - Calibração

A combinação de dados obtidos por câmeras convencionais e sensores de profundidade permite discriminar objetos de uma maneira mais fácil do que com somente sensores que operem na região da luz visível como na abordagem descrita no trabalho de Nicolae (2014). Contudo, é preciso considerar que no Kinect os dados de profundidade retornam informações da cena obtidas a partir de um ponto de vista ligeiramente diferente do da câmera RGB, fato que precisa ser compensado.

A diferença do ponto de vista e da geometria dos sensores é determinada a partir do processo de calibração. Deve ser mencionado que este procedimento precisa ser executado uma única vez, a menos que haja alguma alteração na estrutura de suporte mecânico dos sensores. Por outro lado, é preciso enfatizar que, sem calibração, as câmeras RGB e de profundidade do Kinect retornam valores incoerentes, tornando as correspondências entre os pontos imprecisas. Por conseguinte, as informações de profundidade e de cor não poderiam ser combinadas coerentemente. Uma vez que estão em câmeras fisicamente separadas, este requisito precisa ser atendido antes do início da captura das nuvens de pontos.

Após a obtenção dos parâmetros intrínsecos e relativos de calibração entre as câmeras RGB e de profundidades, eles são salvos. Dessa forma, cada vez que o protótipo é executado, tais valores são recuperados. No presente trabalho, a calibração foi realizada através do aplicativo Kinect RGBDemo (KRAMER *et al.*, 2012).

3.2.2 - Captura

A captura é realizada através do protótipo do aplicativo desenvolvido nesse trabalho. Na Figura 8, é possível observar sua interface gráfica durante a execução do caso de uso Captura. No lado esquerdo da Figura 8 é apresentada a imagem da câmera RGB e do lado direito, empregando uma paleta em pseudocor, são apresentados os dados fornecidos pelo sensor de profundidade.

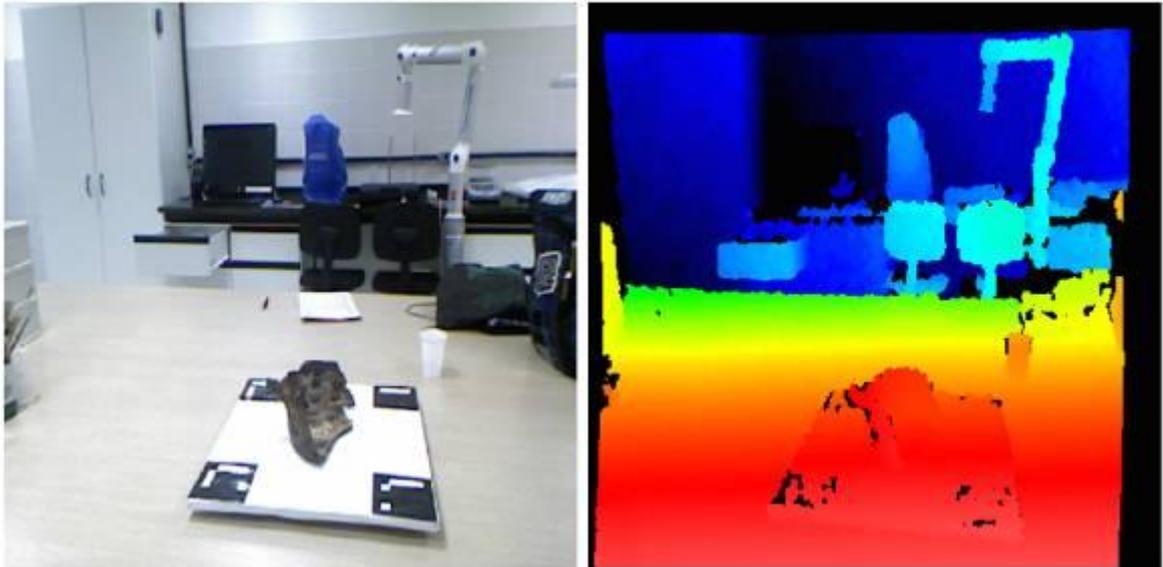


Figura 8 - Captura de dados óticos e coordenadas tridimensionais. **Fotos:** Thais Rodrigues de Souza, 2016

Conforme mencionado anteriormente, o Kinect é fixado a um tripé enquanto o artefato a ser digitalizado é posicionado sobre uma mesa giratória retangular. O procedimento de captura considera as limitações na precisão do sensor Kinect v.1 apontadas em (PAGLIARI; PINTO, 2015). Assim, duas medidas foram adotadas com intuito de minimizar os potenciais erros na aquisição das nuvens de pontos: todas as aquisições foram realizadas em ambiente no qual a iluminação pudesse ser reduzida para evitar interferência no padrão de luz estruturada e, em todas as digitalizações, os objetos estavam a uma distância do sensor entre 85cm e 100cm, faixa onde o erro produzido pelo Kinect na medida da distância apresenta valores mínimos. É preciso enfatizar que, na realização desse trabalho, o técnico de conservação foi o responsável por colocar os artefatos sobre a mesa e manipulando com luvas, diminuindo os riscos de danos aos mesmos.

No momento da captura, a mesa é movimentada em diferentes perspectivas até que a aquisição de todo o artefato seja realizada. Cada frame é salvo em uma pasta que

será utilizada para o alinhamento. Por fim, uma segmentação manual das nuvens de pontos é realizada. Neste procedimento, os pontos não pertencentes ao objeto de interesse, como, por exemplo, os correspondentes à mesa giratória, são removidos pelo usuário. Assim, espera-se que apenas as coordenadas do artefato permaneçam na nuvem de pontos. É importante frisar que a segmentação foi executada utilizando o aplicativo MeshLab (CIGNONI *et al.*, 2008).

As nuvens de pontos obtidas são salvas no formato PLY, que foi desenvolvido para o armazenamento de dados obtidos por intermédio de scanners 3D. Ele permite o armazenamento de diferentes propriedades do artefato como, por exemplo, informações de cor, transparência, normais e coordenadas da textura, tanto para a face frontal quanto para a posterior.

3.2.3 - Registro

O registro compreende a estimação dos parâmetros da transformação Euclideana $3D_n \rightarrow 3D_0$, que converte pontos definidos no sistema de coordenadas local n , definido a partir da câmera RGB em sua posição corrente, relativa ao espaço da mesa giratória, para o sistema global. Assim sendo, coordenadas expressas no sistema n podem ser convertidas para o sistema global, referido pelo índice 0. Essa transformação é rígida e pode ser parametrizada por seis parâmetros, três momentos de translação e três ângulos de Euler.

O sistema global foi arbitrado como o relativo ao primeiro frame capturado. Na mesa giratória, marcadores ArUco foram utilizados com o intuito de auxiliar a etapa de registro. Para evitar o risco da dessincronização das câmeras do Kinect, a mesa foi movimentada ao invés da câmera.

O método empregado na pesquisa realiza o registro de cada nuvem diretamente para o sistema global definido pela mesa giratória. Assim, para a realização do registro, é necessário localizar, na imagem da câmera RGB do Kinect, os marcadores ArUco fixados à mesa. Na Figura 9, são apresentados os quatro marcadores utilizados neste trabalho. Uma vez localizadas ao menos três destes marcadores, a posição e os ângulos de atitude da câmera podem ser estimados.

Uma característica da presente abordagem é que, diferentemente do algoritmo ICP (BESL; MCKAY, 1992), utilizado no Kinect Fusion, esta elimina a necessidade de efetuarem-se aquisições em sequência com variação suave do ponto de vista entre si. Tal possibilidade deriva diretamente do fato da proposta realizar a orientação absoluta anteriormente descrita.

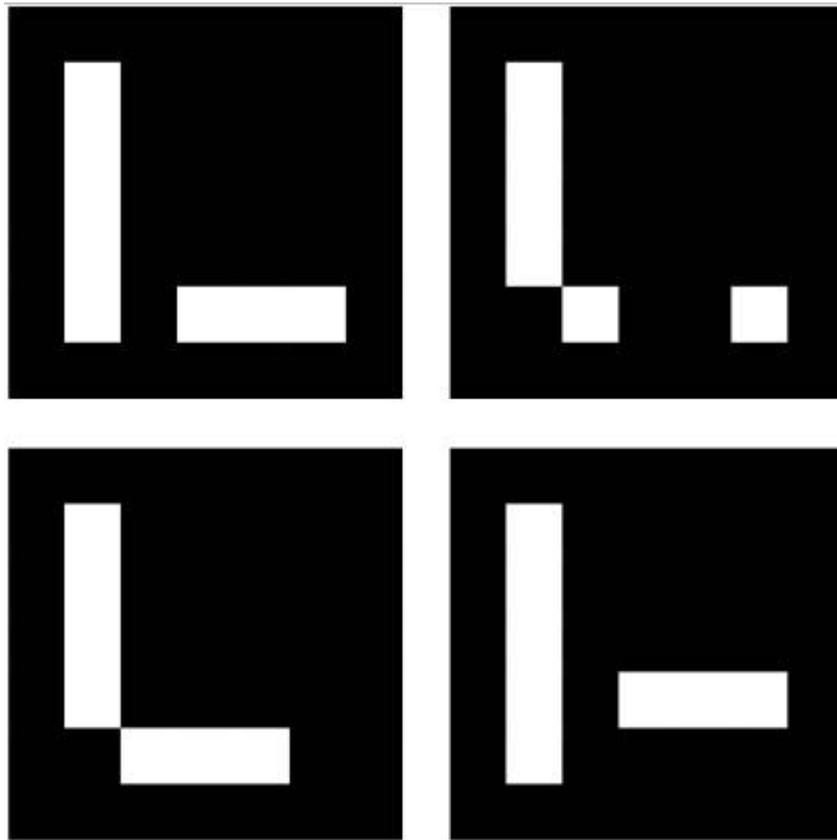


Figura 9 - Marcadores ArUco empregados na pesquisa (SOUZA, 2016)

3.2.4 - Reconstrução 3D

A etapa de reconstrução 3D compreende o procedimento responsável por reconstituir um artefato através de um conjunto de pontos pertencentes à sua superfície. Nesta abordagem, para a reconstrução da superfície correspondente aos pontos obtidos na etapa de registro, é empregado o método de Poisson (KAZHDAN; HOPPE, 2013), que gera malhas poligonais fechadas, aproximando os dados através da equação de Poisson.

O procedimento de reconstrução realizado pelo algoritmo de Poisson pressupõe que o campo de pontos orientados do contorno da superfície de um sólido pode ser considerado o gradiente de sua função indicadora. Em linhas gerais, o algoritmo de Poisson pode ser subdividido em três etapas. Primeiramente, devem-se estimar os vetores normais para cada ponto do conjunto de dados. Para isso, utilizou-se o algoritmo desenvolvido por Rusu (RUSU, 2009), que consiste em aproximar o vetor normal de um ponto como sendo a normal de um plano tangente à superfície nesse ponto. Dada uma nuvem de pontos orientada, o método, em seguida, calcula uma função indicadora X_M que aponta os elementos pertencentes a um subconjunto M . No caso, X_M define que os pontos dentro do modelo 3D serão indicados com o valor 1 e fora dele com o valor 0. Por fim, é extraída a isossuperfície correspondente, revelando o contorno do objeto.

Vários parâmetros afetam os resultados da reconstrução do modelo, dentre os quais podemos destacar: (1) a profundidade da árvore usada para a reconstrução - quanto maior o valor de profundidade maior o grau da superfície; (2) profundidade em que um bloco de Gauss-Seidel é utilizado para resolver a equação de Laplace.

A formulação da reconstrução de superfícies como um problema de Poisson oferece diversas vantagens. Enquanto muitos métodos de aproximação de superfícies segmentam os dados em regiões, ajustando-as localmente para depois combiná-las, o método de Poisson considera todo o conjunto de dados de uma vez. Dessa forma, a abordagem cria superfícies bem suavizadas, mesmo quando submetida a ruído. Esta característica torna-a uma abordagem adequada para a reconstrução de superfícies a partir de dados obtidos por intermédio do sensor Kinect.

3.3 - Procedimento experimental

A avaliação do método que será apresentada na próxima seção se baseia em experimentos realizados com o uso dos três artefatos arqueológicos metálicos apresentados respectivamente nas Figuras 3, 4 e 5. Para cada um deles, foi aplicado o mesmo procedimento experimental.



Figura 10 - Artefato sendo posicionado sobre a mesa giratória pelo técnico em conservação
Foto: Thais Rodrigues de Souza, 2015

Primeiramente, o Kinect foi posicionado em cima de um tripé. Em seguida, o técnico de conservação posiciona o artefato na mesa giratória, conforme ilustra a Figura 10. A partir deste ponto, a captura é realizada e as nuvens de pontos são salvas. As nuvens de pontos para cada um dos artefatos foram adquiridas em diferentes perspectivas. Antes de cada aquisição, a mesa giratória foi movimentada cerca de 90 graus. Assim, foram adquiridas ao menos quatro nuvens de pontos por artefato. Para detalhes mais críticos, como cavidades e detalhes proeminentes nos artefatos, adicionalmente, tiveram que ser feitas outras aquisições.

Especificamente na etapa de aquisição das nuvens de pontos, considerando as limitações na precisão do sensor Kinect v.1 apontadas em (PAGLIARI; PINTO, 2015), foram tomados alguns cuidados que precisam ser destacados. Assim, com intuito de minimizar os potenciais erros na aquisição das nuvens de pontos, foram tomadas duas medidas. Inicialmente, todas as aquisições foram realizadas em laboratório em ambiente no qual a iluminação pudesse ser reduzida para evitar interferência no padrão de luz estruturada. Posteriormente, em todas as digitalizações, os objetos estavam a uma distância do sensor entre 85cm e 100cm, faixa na qual o erro na medida de distância produzida pelo sensor apresenta valores mínimos.

No procedimento experimental adotado, as capturas de nuvens de pontos são realizadas no aplicativo desenvolvido ao longo desta pesquisa. Em seguida, uma segmentação manual foi realizada com uso do software Meshlab versão 1.3.3. Exemplos de nuvens de pontos após a segmentação são apresentados na Figura 11. Nota-se que todo o fundo e a própria mesa giratória foram excluídos juntamente com os demais pontos não pertencentes ao objeto de interesse.

O aplicativo produzido ao longo da pesquisa realizada é também utilizado para o registro das nuvens de pontos. Por outro lado, a reconstrução 3D com base na equação de Poisson foi igualmente realizada no aplicativo MeshLab.

Nas seções a seguir, são apresentados os resultados de dois experimentos. O primeiro enfoca o procedimento até o registro das nuvens de pontos. O segundo experimento, por sua vez, expõe à análise o resultado final da reconstrução 3D dos artefatos.

4. Resultados e Análise

Os experimentos apresentados nessa seção foram realizados com o intuito de validar o método proposto. A análise realizada procura avaliar e validar a abordagem através de comparações visuais entre os artefatos e os resultados obtidos.

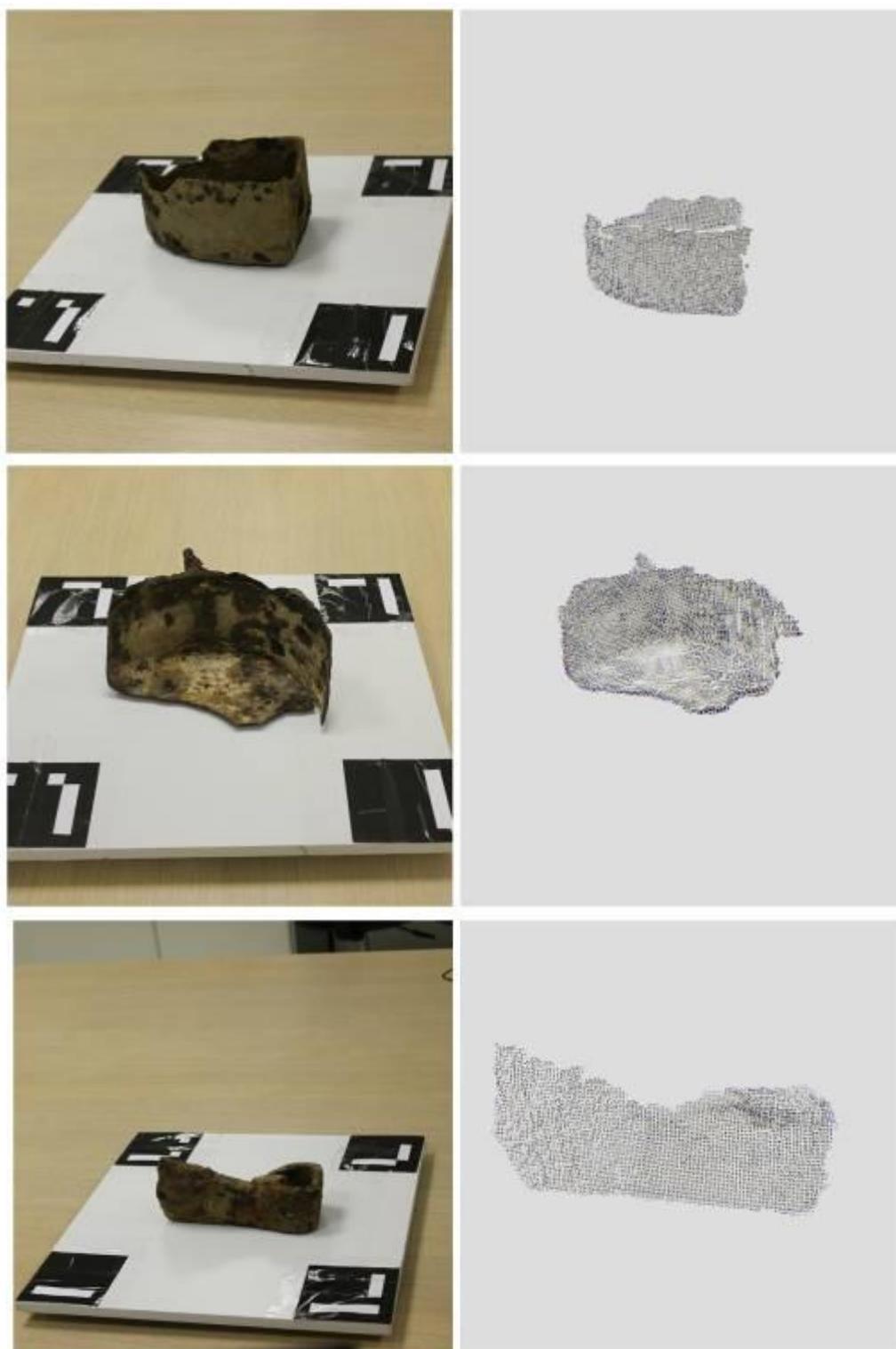


Figura 11 - Captura de uma nuvem de pontos para cada um dos artefatos (SOUZA, 2016). **Fotos:** Thais Rodrigues de Souza, 2016

4.1 - Registro das nuvens de pontos

A Figura 12, a seguir, apresenta em diferentes perspectivas a nuvem de pontos completa obtida para a panela.

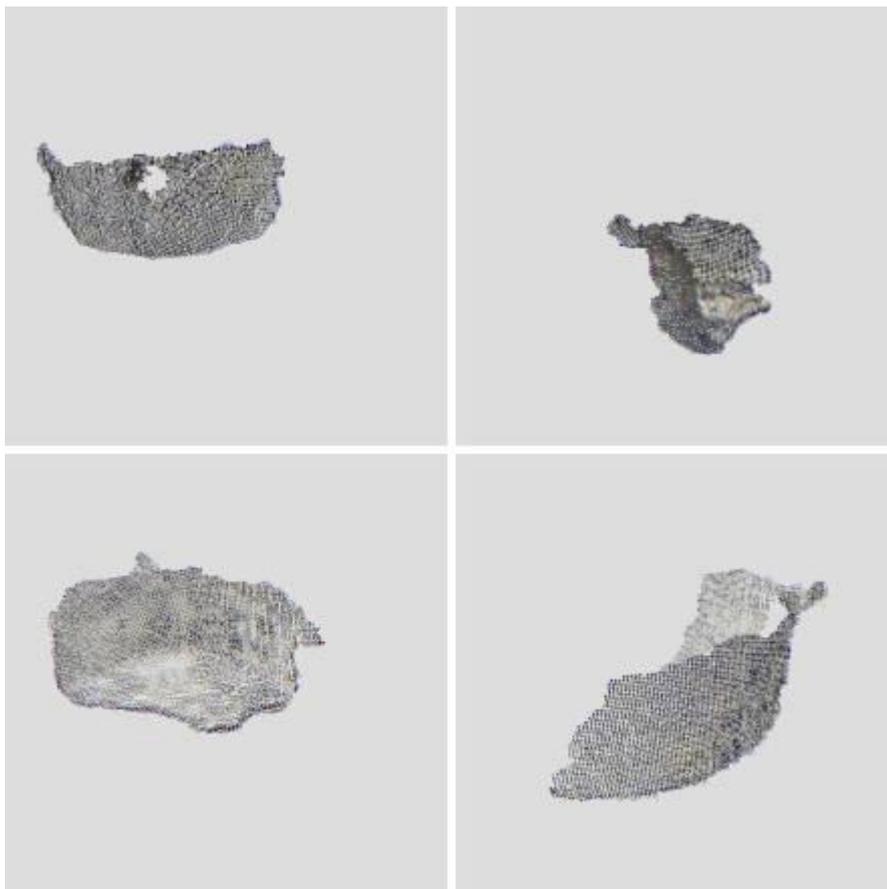


Figura 12 - Captura de nuvens de pontos em diversas perspectivas para a panela (SOUZA, 2016)

Um ponto crítico do resultado apresentado na Figura 12 foi cabo da panela. Conforme se observa no quadrante superior esquerdo da citada Figura, há densidade insuficiente de pontos na conexão entre o cabo e a superfície da panela. É provável que a razão para isso se deva à própria dimensão da linha de base (7,5cm). Esta dimensão pode acarretar, no caso de detalhes proeminentes como o cabo da panela, na impossibilidade do emissor projetar os padrões infravermelho sobre partes do entorno do cabo da panela, provocando ausência de pontos nessa região.

Uma vez obtidas as nuvens de pontos, pode-se efetuar o registro das mesmas. A Figura 13 apresenta o resultado do registro das nuvens de pontos para a panela, onde as setas vermelhas indicam as regiões em que nota-se imprecisão do registro. Esses problemas no registro provocam o exagero da espessura da parede da panela. Tal imprecisão pode ser verificada comparando-se as nuvens de pontos apresentadas na Figura 12 com o registro observado na Figura 13. Uma inspeção visual do resultado apresentado Figura 13 tendo como parâmetro a fotografia do artefato (Figura 3) revela que a espessura da parede da panela é de fato mais delgada que apresenta o modelo. Este problema se dá possivelmente por insuficiência na exatidão do registro obtido.

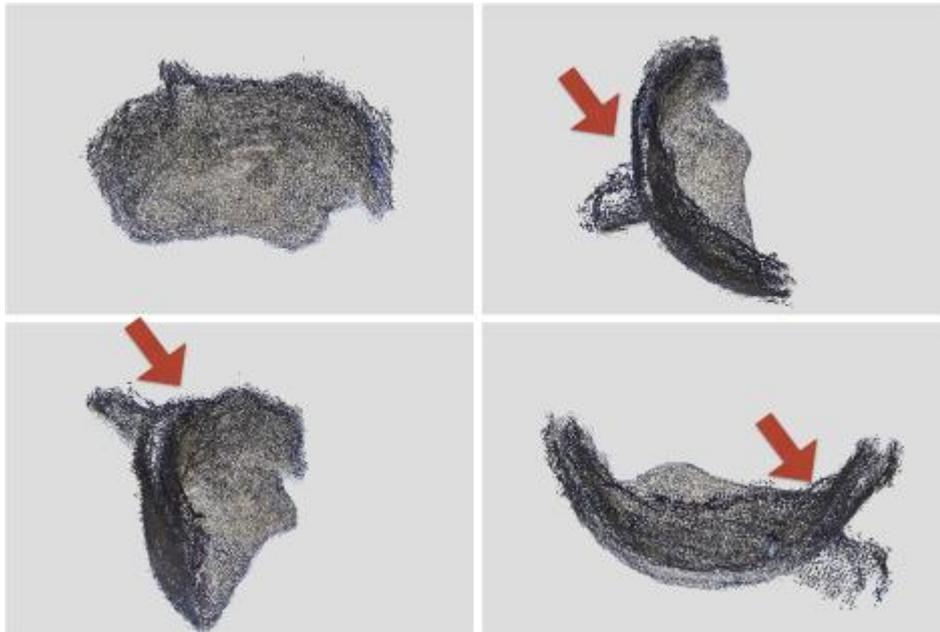


Figura 13 - Resultado do registro das nuvens de pontos para o artefato panela (SOUZA, 2016)

4.2 - Reconstrução dos Artefatos

Os resultados da reconstrução com base no método de Poisson para a panela e o machado são apresentados na Figura 14. Pode-se observar a qualidade do método de Poisson em produzir, a partir das nuvens de pontos registrados, uma reconstrução coerente para ambos os artefatos.

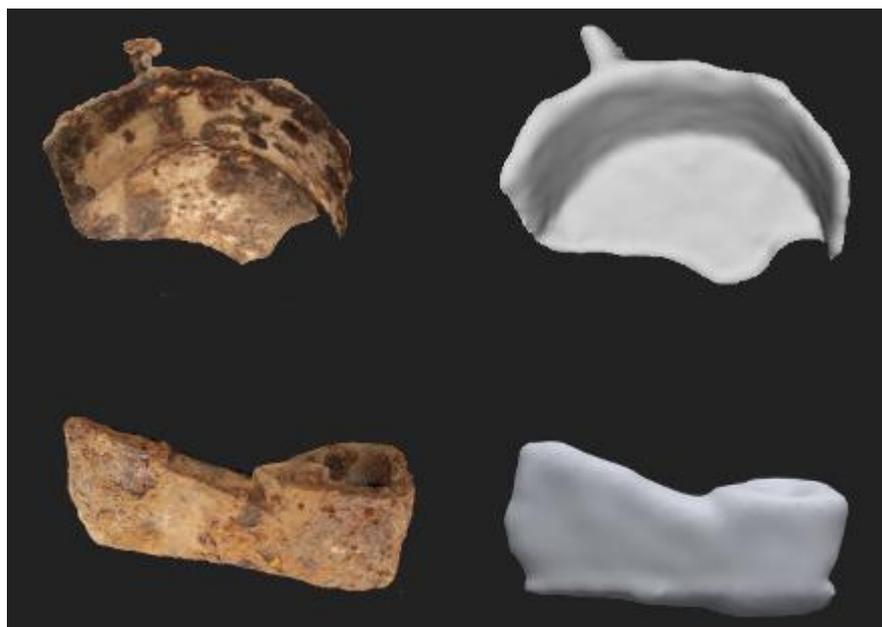


Figura 14 - Reconstrução dos artefatos panela e machado (SOUZA, 2016). **Fotos:** Tuca Marques, 2014

A Figura 15 apresenta a reconstrução do ferro de passar para diferentes valores da profundidade da Octree. Dentre os resultados obtidos, o considerado mais próximo da realidade foi o fornecido pelo valor 7. Esse mesmo valor de profundidade da Octree também produziu os melhores resultados para o machado e a panela.

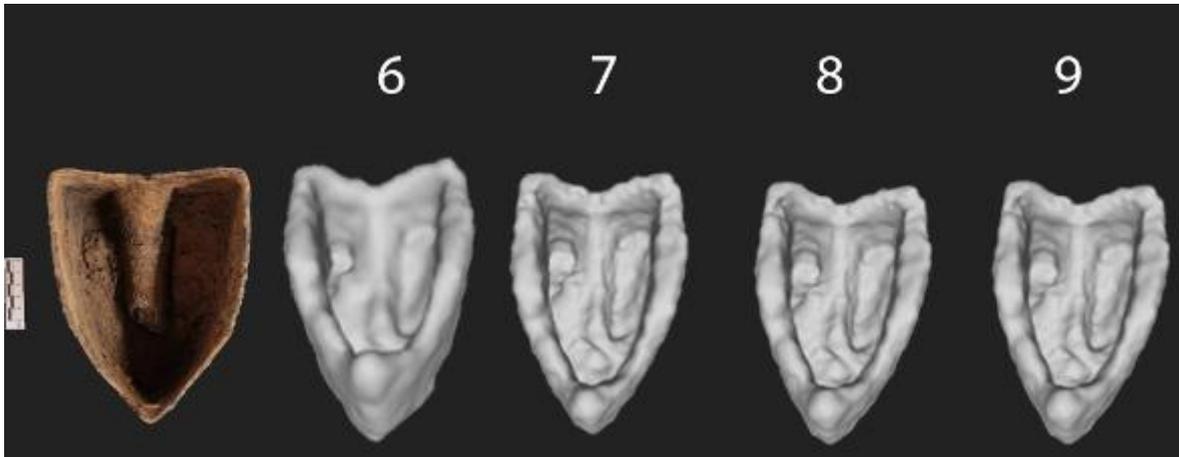


Figura 15 - Reconstrução da panela para Octrees de profundidades 6, 7, 8 e 9 (SOUZA, 2016).

Foto: Tuca Marques, 2014

Para verificar qual o melhor conjunto de valores para esses parâmetros, foi necessária a realização de diversos experimentos até que se chegassem a valores que aproximam adequadamente a superfície. É preciso mencionar que, em função da menor densidade de pontos dos modelos obtidos nos experimentos realizados, esperava-se obter valores ótimos de profundidade da árvore distintos dos fornecidos pelo Kinect Fusion fato confirmado pelos resultados.

5. Conclusão

O estudo realizado se dedica à reconstrução 3D de artefatos arqueológicos metálicos. O método proposto se vale do sensor Microsoft Kinect v1, um acessório de relativamente baixo custo, produzido originalmente para a indústria de jogos eletrônicos, como forma de possibilitar uma experiência de interação entre jogador e o console sem necessidade de uso dos tradicionais controles.

Uma técnica bastante presente na literatura voltada à aquisição de modelos 3D corresponde à fotogrametria. Quando comparada à alternativa ora apresentada, a

fotogrametria requer, além das orientações interior e exterior⁶, que de certa forma também fazem parte deste estudo, a medição precisa de pontos homólogos, que serão utilizados pelas equações de colinearidade. Ao fim do processo, são obtidas as coordenadas tridimensionais dos pontos homólogos em termos do espaço objeto. Em contrapartida, estas últimas etapas são desnecessárias nos sensores capazes de adquirir dados 3D, como no caso da abordagem ora proposta. Assim, em tese é possível obter uma melhor precisão com sensores 3D, por diminuir a possibilidade de propagação de erros ao longo de etapas consecutivas. Portanto, ainda que o Kinect apresente limitações, o horizonte de possibilidade de aumento de precisão justifica sua aplicação em pesquisas futuras.

A pesquisa evidenciou que, apesar de ser uma opção de baixo custo, o dispositivo Microsoft Kinect v1 é capaz de fornecer dados tridimensionais precisos com exceção de cavidades e detalhes proeminentes dos objetos. Esta dificuldade se origina na distância da linha de base entre o emissor infravermelho e a câmera de infravermelho, que formam os componentes funcionais mais importantes do sensor de profundidade.

A implementação do registro utilizando marcações na mesa giratória foi ineficiente em alguns casos. Um exemplo disso foi o erro de registro encontrado no artefato machado. O principal candidato à fonte dos problemas no registro é o uso da informação do sensor de profundidade como entrada para o cálculo da orientação relativa entre duas aquisições. Na sequência da pesquisa, o alinhamento será estabelecido em relação ao sistema da mesa giratória de forma a que as marcações ArUco formalizem a métrica do sistema global de coordenadas.

Verificou-se nos experimentos que o método de reconstrução de Poisson apresentou os melhores resultados para o valor da octree 7. Os modelos obtidos ainda apresentam muito ruído, com limitações, sobretudo para as cavidades e bordas dos objetos.

Durante a execução da pesquisa foram identificadas algumas possibilidades de caminhos futuros relacionados à sequência das pesquisas aqui apresentadas. Um dos aperfeiçoamentos possíveis é o uso de um filtro para eliminação dos *outliers* provenientes da câmera de profundidade. Outra possibilidade é o desenvolvimento de um método de descarte semiautomático dos pontos medidos na mesa giratória e no restante do ambiente. Além dessas, a utilização de outro sensor com tecnologia *time of flight*, como o do Kinect v2, utilizado no console Xbox One, pode possibilitar um caminho interessante para a continuidade dos estudos.

⁶ Alternativamente à orientação exterior em termos absolutos pode ser realizada a orientação relativa entre as imagens fotogramétricas.

Referências

- BARMPOUTIS, Angelos; BOZIA, Eleni; FORTUNA, Daniele. Interactive 3D digitization, retrieval, and analysis of ancient sculptures, using infrared depth sensors for mobile devices. In: ANTONA, Margherita; STEPHANDIS, Constantine (Orgs.). *Universal Access in Human-Computer Interaction: Access to the Human Environment and Culture*, Lecture notes in computer science v. 9178, 1 ed. Berlin: Springer International Publishing, 2015. p.03-11.
- BESL, Paul J.; MCKAY, Neil D.. A Method for Registration of 3-D Shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v.14, n.2, p.239-256, fev. 1992.
- CAMPOS, Guadalupe do Nascimento; GRANATO, Marcus. A preservação de coleções científicas de objetos arqueológicos metálicos. In: GRANATO, Marcus (Org.). *Museologia e Patrimônio*. Coleção MAST: 30 anos de pesquisa, v. 1. Rio de Janeiro: Museu de Astronomia e Ciências Afins, 2015a. p.270-296.
- CAMPOS, Guadalupe do Nascimento; GRANATO, Marcus. *Cartilha de orientações gerais para preservação de artefatos arqueológicos metálicos*. Rio de Janeiro: Museu de Astronomia e Ciências Afins, 2015b. 16p.
- CHIA, Tsorng-Lin; CHEN, Zen; YUEH, Chaur-Jou. Curved surface reconstruction using a simple structured light method. In: International Conference on Pattern Recognition, 13, ago. 1996, Viena, Áustria. *Proceedings...* Los Alamitos, EUA, IEEE Computer Society, 1996. p.844-848.
- CIGNONI, Paolo; CALLIERI, Marco; CORSINI, Massimiliano; DELLEPIANE, Matteo; GANOVELLI, Fabio; RANZUGLIA, Guido. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. In: Eurographics Italian Chapter Conference, 2008, Salerno, Itália. *Proceedings...* Genebra: The Eurographics Association, 2008. p.129-136.
- COELHO FILHO, Luiz C. T.; BRITO, Jorge L. N.. *Fotogrametria digital*. 2. ed. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007. 196p.
- DAWSON, T.; VERMEHREN, A.; MILLER, A.; OLIVER, I.; KENNEDY, S. Digitally enhanced community rescue archaeology. In: Digital Heritage International Congress, 1, out. 2013, Marseille, França, *Proceedings...* USA, IEEE society, 2013. p.29-36.
- DE REU, Jeroen; PLETS, Gertjan; VERHOEVEN, Geert; DE SMEDT, Philippe; BATS, Machteld; CHERRETTÉ, Bart; DE MAEYER, Wouter; DECONYNCK, Jasper; HERREMANS, Davy; LALOO, Pieter; VAN MEIRVENNE, Marc; DE CLERCQ. Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science*, v.40, n.2, p.1108-1121, fev. 2013.
- FLIN, Frédéric; BRZOSKA, Jean-Bruno; COEURJOLLY, David; PIERITZ, Romeu A.; LESAFFRE, Bernard; COLÉOU, Cécile; LAMBOLEY, Pascal; TEYTAUD, Olivier; VIGNOLES, Gérard L.; DELESSE, Jean-François. Adaptive estimation of normals and surface area for discrete 3-D objects: application to snow binary data from X-ray tomography. *IEEE Transactions on Image Processing*, v.14, n.5, p.585-596, maio 2005.
- FONTANA, Raffaella; GRECO, Marinella; MATERAZZI, Marzia; PAMPALONI, Enrico; and PEZZATI, Luca; ROCCHINI; SCOPIGNO, Roberto. Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo. *Journal of Cultural Heritage*, v.3, n.4, p.325-331, out./dez. 2002.
- FORTE, Maurizio. 3D archaeology: New perspectives and challenges: the example of Çatalhöyük. *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies*, v.2, n.1, 1, p.01-29, jan./mar. 2014.
- FRAILE, Francisco J. L., La infografía 3D como sistema de documentación y divulgación. In: Simposio de la Investigación y Difusión Arqueopaleontológica en el Marco de la Iniciativa Privada, 1, Madri, Espanha. *Proceedings...* Madri: AUDEMA, 2007. p.429-444.

- GARRIDO-JURADO, S; MUÑOZ-SALINAS, R.; MADRID-CUEVAS, F. J.; MARÍN-JUMÉNEZ, M. J.. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, v.47, n.6, p.2280-2292, jun. 2014.
- GALLO, L; PLACITELLI, P.; CIAMPI, M. Controller-free exploration of medical image data: Experiencing the Kinect. In: International Symposium on Computer-Based Medical Systems. 24, 2011, Bristol, Reino Unido, *Proceedings...* Bristol: IEEE, 2011. p.01-6.
- GRUEN, Armin; REMONDINO, Fabio; ZHANG, Li. Photogrammetric Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. *The Photogrammetric Record*, v.19, n.107, p.177-199, set. 2004.
- HERITAGE, George L.; LARGE, Andrew R. G. *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. West Sussex, UK: Wiley-Blackwell, 2009. 288p.
- IKEUCHI, K.; OISHI, T.; TAKAMATSU, J.; SAGAWA, R.; NAKAZAWA, A.; KURAZUME, R.; NISHINO, K.; KAMAKURA, M.; OKAMOTO, Y.. The great buddha project: Digitally archiving, restoring, and analyzing cultural heritage objects. *International Journal of Computer Vision*, v.75, n.1, p.189-208, out. 2007.
- KAZHDAN, Michael; HOPPE, Hugues. Screened Poisson Surface Reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*, v.32, n.3, p.29:1-29:13, jul. 2013.
- KHOSHELHAM, K. Accuracy analysis of Kinect depth data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v.XXXVIII, n.5, p.133-138, ago. 2011.
- KRAMER, Jeff; BURRUS, Nicolas; ECHTLER, Florian; HERRERA C., Daniel; PARKER, Matt. *Hacking the Kinect*. New York: IT eBooks, 2012. 268p.
- LARMAN, C.. *Utilizando UML e Padrões*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. 607p.
- LEVOY, Marc; PULLI, K.; CURLESS, B.; RUSINKIEWICZ, S.; KÖLLER, D.; PEREIRA, L.; GINZTON, M.; ANDERSON, S.; DAVIS, J.; GINSBERG, J.; SHADE, J.; FULK, D. The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues, In: Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2000. *Proceedings...* 2000. p.131-144.
- NEWCOMBE, R. A.; IZADI, S.; HILLIGES, O.; MOLYNEAUX, D.; KIM, D.; DAVISON, A. J.; KOHI, P.; SHOTTON, J.; HODGES, S.; FITZGIBBON, A. KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking, In: *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 10, mar. 2011, Basel, Suíça, *Proceedings...* USA, IEEE society, 2011. p.127-136
- NICOLAE, C.; NOCERINO, E.; MENNA, F. Photogrammetry applied to Problematic artefacts. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v.XL, n.5, p.451-456, jun. 2014.
- NIESSNER, Mathias; ZOLLHOEFER, Michael; IZADI, Shahram; STAMMINGER, Marc. Real-time 3D Reconstruction at Scale Using Voxel Hashing. *ACM Transactions on Graphics*, v. 32, n.6, p.169:1-169:11, nov. 2013.
- OLIVEIRA, Mario M. de. *A Documentação como ferramenta de Preservação da Memória: Cadastro, Fotografia, Fotogrametria e Arqueologia*. 1 ed. Brasília: IPHAN/Programa Monumenta, 2008. 144p.
- PAGLIARI, Diana; PINTO, Livio. Calibration of Kinect for Xbox One and Comparison between the two generations of Microsoft Sensors. *Sensors*, v.15, n.11, p.27569-27589, out. 2015.
- REMONDINO, Fabio; EL-HAKIM, Sabry. Image-based 3D modelling: A review. *The Photogrammetric Record*, v.21, n.115, p.269-291, set. 2006.

ROSALES, M. A. Q. Registro de una secuencia temporal de nubes de puntos utilizando tecnologia Kinect para la reconstrucción tridimensional de material arqueológico. 2014. 64p. *Trabalho de conclusão* (Graduação), Engenharia Eletrônica, Pontifícia Universidade Católica do Peru, Lima, 2014. Orientadores: Prof. Dr. Benjamín Castañeda; Engenheiro Fernando Zvietcovich

RUSU, Radu Bogdan. Semantic 3D Object Maps for Everyday Manipulation in Human Living Environments. 2009. 284p. *Tese* (Doutorado), Instituto de Informática, Universidade Técnica de Munique, Munique, 2009. Orientador: Prof. Dr. Michael Beetz.

SARBOLANDI, Hamed; LEFLOCH, Damien; KOLB, Andreas. Kinect range sensing: Structured-light versus Time-of-Flight Kinect. *Computer Vision and Image Understanding*, v.139, p.01-20, Out. 2015.

SCHMITZ, Pedro I. O patrimônio arqueológico brasileiro. *Revista de Arqueologia*, Sociedade Brasileira de Arqueologia, v.5, n.1, p.10-18, nov. 1988.

SOUZA, Thais Rodrigues de. Digitalização 3D do patrimônio arqueológico metálico utilizando o Kinect. 2016. 66f. *Dissertação* (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Ciências Computacionais, Instituto de Matemática e Estatística, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Orientadores: Profs. Drs. Guilherme Lucio Abelha Mota e Guadalupe do Nascimento Campos.

VERA, Lúcia; GIMENO, Jesús; COMA, Inmaculada; FERNÁNDEZ, Marcos. Augmented Mirror: Interactive Augmented Reality System Based on Kinect. In: CAMPOS, Pedro; GRAHAN, Nicholas; JORGE, Joaquin; NUNES, Nuno; PALANQUE, Philippe; WINCKLER, Marco (Orgs.). *Lecture notes in computer science v.6949 - Human-Computer Interaction -- INTERACT 2011: 13th IFIP TC 13 International Conference*, Lisbon, Portugal, September 5-9, 2011, Proceedings, Part IV. 1 ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. p.483-486.

VUYLSTEKE, P.; OOSTERLINCK, A. Range Image Acquisition with a Single Binary-Encoded Light Pattern. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v.12, n.2, p.148-164, fev. 1990.