

Aplicações das tecnologias Laser Scan e aerofotogrametria por drone para museus

Applications of Laser Scan and drone aerial survey in museums

<http://dx.doi.org/10.1590/1982-02672019v27e25d1>

JORGE PIMENTEL CINTRA¹

<https://orcid.org/0000-0002-1369-6110>

Universidade de São Paulo / São Paulo, SP, Brasil

RODRIGO GONÇALES²

<https://orcid.org/0000-0002-3195-0178>

Universidade de São Paulo / São Paulo, SP, Brasil

1. Professor do Museu Paulista da Universidade de São Paulo (USP), atuando principalmente na Curadoria das Coleções Cartográficas. Doutor em Engenharia Civil e Urbanismo pela Universidade de São Paulo (USP). E-mail: <jpcintra@usp.br>.

2. Doutorando em Engenharia Civil pela USP. Possui graduação em Engenharia Cartográfica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho e mestrado em Engenharia pela USP. E-mail: <rodrigo.goncales@usp.br>

RESUMO: O presente trabalho apresenta alguns conceitos e diversas aplicações da tecnologia Laser Scan 3D (LS3D) para o levantamento de monumentos, peças de museu e esculturas, visando a obtenção de modelos, maquetes virtuais, filmes, exposições virtuais e maquetes em resina. Complementa-se, em alguns casos, com os levantamentos aerofotogramétricos com drone e situa-se na área que vem sendo conhecida como realidade virtual ou realidade aumentada.

PALAVRAS-CHAVE: Maquete eletrônica. Laser Scan 3D. Levantamentos com drone. Realidade virtual. Realidade aumentada.

ABSTRACT: This study introduces some concepts and several applications of 3D Laser Scan (3DLS) for the survey of monuments, museum pieces, and sculptures, aiming at obtaining models, virtual models, films, virtual exhibitions, and resin models. In some cases, laser scan is complemented by drone aerial surveys, which lies within the field currently known as virtual reality or augmented reality.

KEYWORDS: Electronic model. 3D Laser Scan. Drone surveys. Virtual reality. Augmented reality.

A operação de documentar, catalogar e gerar cópias de acervos de museus, principalmente tratando-se de objetos 3D, requer que medições sejam realizadas sobre o objeto para obter suas dimensões. Realizar tais medições sem a necessidade de tocá-los traz mais segurança e cria melhores condições para a preservação da peça. A obtenção de réplicas também ajuda a preservar o original e permite em alguns casos a experiência tátil. Tecnologias conhecidas como Laser Scanner 3D (LS3D) utilizam fontes *laser* para realizar medições remotas, sem contato, geram informações digitais sobre o objeto e possibilitam a documentação, a criação de maquetes eletrônicas e físicas (por meio de impressões 3D) e a reconstrução digital de peças que, por algum problema, tenham sido danificadas, como, por exemplo, quebradas em partes.

Em algumas aplicações como levantamentos topográficos e arquitetônicos de edifícios e monumentos, essa tecnologia complementa-se bem com a aerofotogrametria feita com o uso de veículo aéreo não tripulado (Vant), conhecido popularmente como drone.

O presente trabalho fornece as informações imprescindíveis para entender a tecnologia utilizada e diversos exemplos de aplicação dessa metodologia baseados na experiência dos autores.³

BALANÇO DE PESQUISAS NA ÁREA

Faz muitas décadas (desde os anos 1960) que a fotogrametria de curta distância vem sendo utilizada para modelar e construir réplicas de peças e objetos de museus. Os diversos métodos revitalizados foram potencializados pelas máquinas de controle numérico computadorizado (CNC) e manufatura auxiliada por computador (CAM, *Computer Aided Manufacturing*), que permitiam torner os objetos em diversos materiais, mas o grande desenvolvimento adveio com o Laser Scan terrestre.

Quando se pesquisam as aplicações dessa tecnologia, vê-se que a imensa maioria ocorre nos diversos ramos da engenharia: construção civil, topografia, refinaria, mineração, naval, mecânica e outros. Muitas pesquisas atuais enfatizam produtividade, melhoria do custo-benefício e diminuição de equipes.

Na engenharia mecânica, muitas aplicações são na área de carrocerias de veículos, motores e peças. Por derivação, surgiram aplicações em outras áreas que também necessitam de escaneamento 3D de peças para diversas

4. Cf. Xiao; Furukawa (2014).

5. Cf. Wachowiak; Karas (2009).

6. Cf. Clough (2013).

finalidades: modelagem computacional, construção de maquetes, obtenção de réplicas, construção de próteses em medicina e outros.

Nas aplicações de ciências humanas, o número de pesquisas e publicações ainda é escasso. Uns poucos exemplos são encontrados na área de Arqueologia e reconstrução de ruínas históricas, levantamento de edifícios, em si ou como base para projeto de restauro. As informações sobre isso costumam vir sob a forma de estudos de caso, fornecidos pelos fabricantes ou revendedores de equipamentos.

Na área de arquitetura, trabalha-se com levantamento e modelagem de interiores, BIM (*Building Information Model*) e outros. Daí passa-se facilmente para a reconstrução de interiores de museus e exposições virtuais, sendo necessário escanear também as peças do acervo que vão compor a exposição. Um exemplo disso pode ser visto em Xiao e Furukawa.⁴ Trata-se de um artigo com ênfase na eficiência dos algoritmos computacionais de construção das visões 3D, concretamente no algoritmo chamado construção inversa de geometria sólida (*inverse constructive solid geometry*). Descreve a aplicação dessa técnica no Metropolitan Museum of Art e visa a reconstrução de cenas de interiores (*indoor*) e combina fotos de boa resolução com levantamentos de interiores com LS3D para obter efeito fotorrealístico. Desenvolve um sistema de visualização que permite passar com facilidade da visão geral (planta do museu) para a visão de uma sala e seus objetos, com rapidez nos processos de ampliação e redução de detalhes (controle de *zoom*). É um trabalho útil para conhecer as potencialidades desse tipo de aplicação.

Wachowiak e Karas⁵ fazem uma pequena revisão do estado atual da obtenção de imagens 3D no campo do patrimônio cultural, dos métodos de duplicação de objetos, por meio de um equipamento específico de alta tecnologia e alta resolução (precisão submilimétrica) e que se aplica a objetos de alta complexidade dimensional e de formas, conseqüentemente com alto custo, muito mais que o LS3D. Equipara-se a um equipamento de laboratório e aplica-se a objetos relativamente pequenos, como crânios, estatuetas, placas, e não a edifícios, ruínas arqueológicas e esculturas de maior porte. Para o nosso meio é importante explorar o potencial de equipamentos de custo ou empréstimo relativamente acessível, com precisão suficiente e voltados também para grandes objetos.

Nos últimos dez anos, alguns museus e universidades estão iniciando pesquisas em áreas concretas, como se aponta a seguir.

O Smithsonian Institution promoveu a edição de um interessante livro sobre a questão: *Clough*.⁶ Essa obra, com foco em princípios e ideias mestras, relata também, ainda que de forma genérica, os esforços dessa instituição para empregar as diversas

tecnologias para disponibilizar suas coleções e programas para o grande público. Esse trabalho é uma boa visão geral desse esforço do museu, sem detalhar métodos, equipamentos e processos, pela natureza do trabalho e público a que se destina.

A Ball State University, de Indiana (EUA), vem trabalhando na área de levantamento tridimensional de esculturas. Encontram-se no *site* dessa universidade⁷ informações básicas sobre o projeto, em andamento, de modelar esculturas com escâner de mão. Futuramente, esses modelos serão disponibilizados em um ambiente de realidade virtual 3D que permitirá ao usuário visitante visualizar, com óculos especiais, essas esculturas, incluindo um modelo do contexto em que se encontram.

O Shuler Museum of Paleontology, de Dallas (Texas), utiliza o Laser Scan para a reconstituição de esqueletos arqueológicos, como relata em seu site.⁸ Essa é uma das três áreas tecnológicas do museu, que dispõe de um LS3D portátil, voltado para objetos de dimensões submétricas. Não se fornecem mais detalhes, mas a informação de que estão pesquisando nessa área é de interesse para um possível contato. Um trabalho acadêmico na mesma área de Paleontologia é o de Kuzminsky e Gardiner,⁹ que aponta o potencial do LS3D nessa área, enfocando o estudo de esqueletos e a criação de modelos como forma de preservação e instrumento de estudo, substituindo o original. * * *

O Science Museum of London, em parceria com um laboratório de escaneamento, desenvolve trabalhos de galeria virtual, como a Galeria de Navios, enfocando o escaneamento de objetos como recurso para o conhecimento. Em seu *site*¹⁰ oferece exemplos de aplicações utilizando apenas fotografias coloridas comuns, sendo que a tecnologia para criar o objeto tridimensional, incluindo nuvem de pontos, são a aerofotogrametria clássica e a digital, das quais se serve também a tecnologia com uso de drone.

Por sua vez, o já mencionado Smithsonian Institution possui um programa para criar modelos virtuais de esqueletos e outros objetos. Destaca-se como principal realização a criação de réplicas de estátuas utilizando modelagem e impressão 3D, em vez da tradicional técnica de modelamento em borracha e fundição. Em concreto, foi feita uma réplica da estátua de bronze de Thomas Jefferson para uma exposição temporária em outro museu, sem que o original fosse desmobilizado de seu local original onde está exposto continuamente.¹¹ Para a elaboração da cópia foi contratada uma empresa especializada, à qual se enviou a nuvem de pontos gerada por um escâner 3D de altíssima resolução. A estátua, por seu tamanho natural, foi impressa em quatro partes (unidas a seguir), em um material termoplástico que alia resistência e durabilidade. Finalmente, o conjunto foi pintado em cor bronze e não se percebe a junção das partes.

7. Cf. Ball State University (2019).

8. Cf. Shuler Museum of... (2019).

9. Cf. Kuzminsky; Gardiner (2012).

10. Cf. McKenzie (2019).

11. Cf. Smithsonian Institution (2019).

12. Cf. Fitzwilliam Museum (2019).

13. Cf. Melbourne University (2019).

O Fitzwilliam Museum de Cambridge, Inglaterra, também trabalha com modelagem em 3D de obras de arte pertencentes ao seu acervo. Contrataram uma empresa especializada que possui equipamento específico para objetos de pequeno tamanho, tipicamente com menos de 50 cm.¹² A finalidade é a reprodução em jesmonita (uma combinação de gesso e resina acrílica) de réplicas fiéis, em grande quantidade, de seus dez pequenos objetos mais preciosos, para venda na loja do museu. São peças da Roma e do Egito antigos, cachorros da dinastia Han e uma escultura do renascimento. Trata-se de um processo de alta precisão, compatível com a política desse museu e que poderia ser aproveitado por outros.

A Universidade de Melbourne possui também um programa de criação de modelagem de objetos com ênfase na impressão 3D.¹³ Utilizam-se escâneres de tripé portáteis e um de mão, com resolução de 0,5 mm para objetos de tamanho médio, como bustos e pequeno mobiliário. Incluem no *site* um tutorial e diversos filmes que auxiliam o usuário. Trata-se de uma solução relativamente barata e de fácil uso.

O meio acadêmico também está despertando para a aplicação de drones ao patrimônio cultural e, por exemplo, uma revista (*Drones*, 2019) acaba de lançar a chamada de trabalhos para um número especial sobre o uso de drone em patrimônio cultural.

Como balanço dessas informações, parece-nos que há relatos de aplicações, todas válidas: criação de realidade virtual para visualização de peças e visitas a museus, criação de modelos tridimensionais como réplicas de esqueletos, bustos, esculturas e todo tipo de objeto, incluindo lembranças de museus, para venda ao público.

A constatação é que tanto a experiência de revendedores e prestadores de serviço (através de folhetos promocionais) como também os informativos de pesquisas no âmbito universitário disponíveis na internet fornecem poucos detalhes sobre os experimentos e as limitações e dificuldades encontradas, coisa que se faz no presente trabalho, principiando por apresentar a tecnologia para não especialistas. O presente trabalho também difere da maioria dos casos apresentados por tratar também de experiências com grandes objetos: ruínas arqueológicas, monumentos de grande porte e edifícios tombados pelo patrimônio histórico, além de maquetes, vídeos e outros produtos, apresentando de forma pioneira a integração de dados provenientes de LS3D e aerofotogrametria com drones.

Os equipamentos LS3D podem ser definidos como dispositivos de emissão de radiação laser que permitem obter e registrar coordenadas tridimensionais de objetos de interesse, as quais podem ser resumidas no conceito de uma densa nuvem de pontos pertencentes ao objeto que se quer levantar. Os equipamentos podem ser classificados em função do tamanho e da aplicação em dois grupos: escâneres de tripé ou de mão.

O esquema de um escâner de tripé pode ser visto na figura 1. A medição da distância p e dos ângulos α e θ permite, mediante cálculos matemáticos, obter as coordenadas x , y , z em relação à origem do sistema cartesiano (origem situada no eixo óptico do equipamento). Alguns modelos chegam a coletar em torno de 1.000.000 de pontos por segundo com um alcance de cerca de 80 metros, enquanto outros coletam até 200.000 pontos por segundo, com um alcance que pode chegar a alguns quilômetros. Outros equipamentos destinam-se a coletar dados de objetos em distâncias mais curtas, por exemplo, veículos, bustos, peças de museu, objetos de arte e outros de pequenos portes. Possuem capacidades semelhantes aos anteriores, em termos de taxa de coleta e densidade de pontos para modelar todo o objeto. Pode-se também especificar o espaçamento da malha final que vai representar o objeto, em função das dimensões dos detalhes que se quer levantar, como, por exemplo, o capitel de uma coluna coríntia.

A fase de processamento de dados, ou seja, manipular essa densa nuvem de pontos, exige equipamentos (computadores) com grande capacidade de memória e velocidade de cálculo. O leitor que quiser aprofundar em detalhes e princípios de funcionamento desses equipamentos e dos métodos de trabalho pode consultar Cintra e Gonçalves.¹⁴

Uma imagem de um equipamento em operação pode ser vista na figura 2.

Apenas o que está no campo de visada do sensor é coletado e, tratando-se de um objeto tridimensional, o equipamento deve ser posicionado em outras estações de coleta, em torno do objeto. Essa operação vai se repetindo até coletar informações de todas as partes. As figuras 3 e 4 exemplificam essa operação.

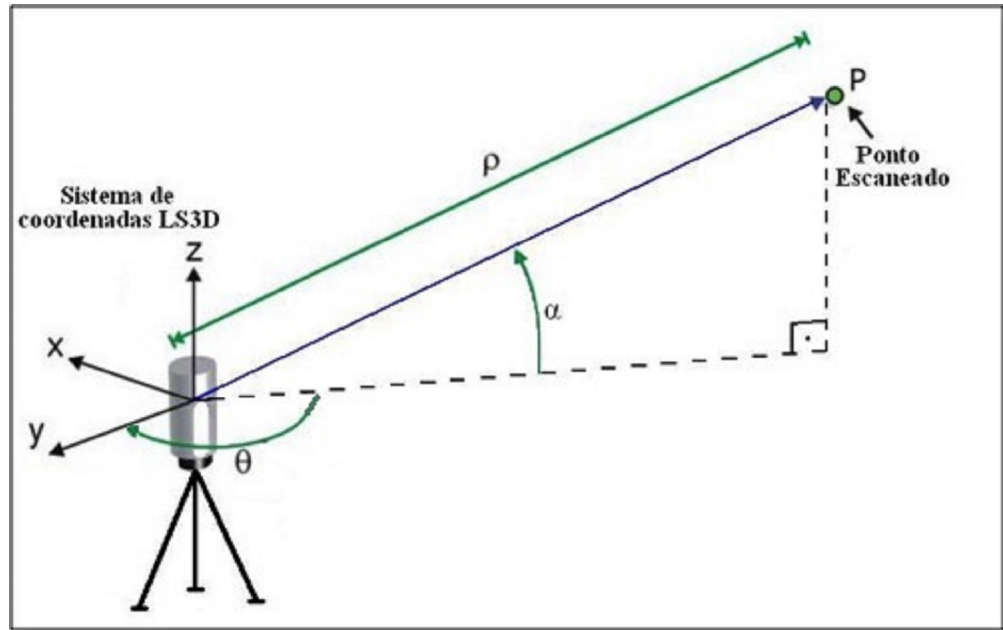


Figura 1 – Esquema perspectivo das observações LS3D. Adaptado de Gordon & Lichti, 2004



Figura 2 – LS3D modelo TX8 da Trimble, com o qual se realizaram diversas experiências para o presente trabalho.

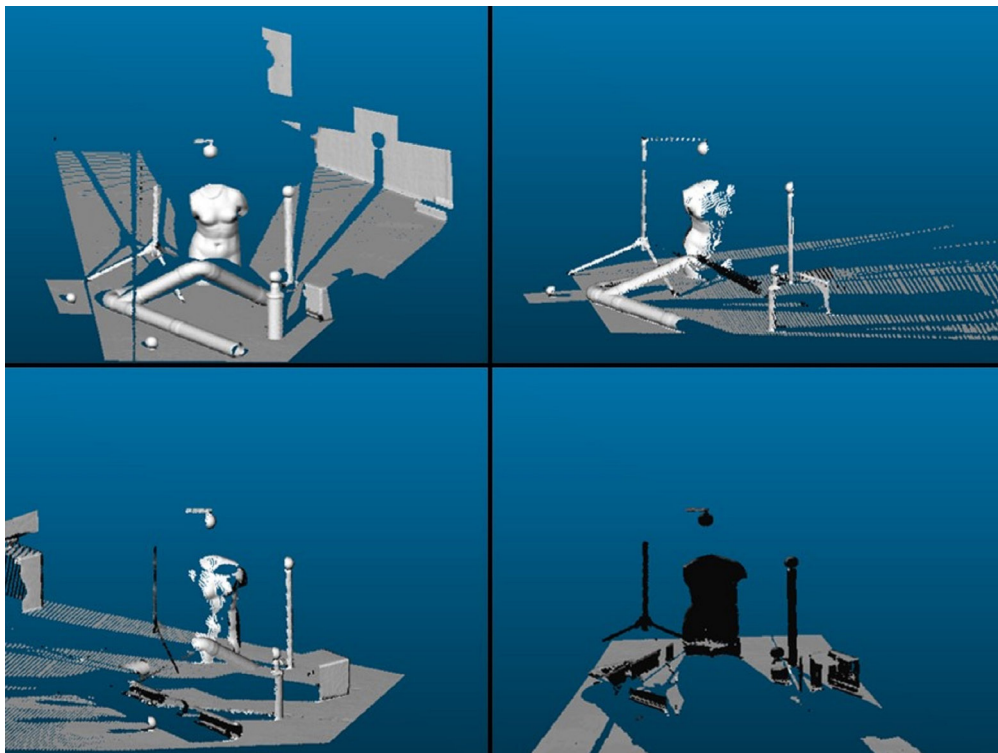


Figura 3 – Processo de coleta de dados a partir de quatro diferentes locais ou pontos de vista.
Fonte: Gonçalves (2007).

No exemplo apresentado na figura 3, para que seja possível gerar uma nuvem de pontos completa de todos os objetos, o equipamento de coleta foi posicionado em quatro pontos diferentes, propiciando vistas complementares para formar o todo. Por coletar somente informações dos objetos que estão *visíveis* ao sistema óptico do equipamento, áreas de sombra ou lacunas são geradas em cada estação de coleta, fazendo com que não se disponha de dados nesses locais. O correto posicionamento dos pontos de coleta permite formar uma nuvem de pontos completa, sem áreas de sombra. Esse processo de junção das nuvens parciais é chamado de registro, pelo fato de registrar num mesmo sistema de coordenadas, lembrando que cada estação gera um sistema local de coordenadas. A figura 4 mostra uma perspectiva da nuvem final de pontos registrada, reunindo os dados.

O registro das nuvens de pontos das diversas estações em uma só depende da identificação de pontos homólogos, ou seja, elementos facilmente identificáveis que apareçam e sejam reconhecidos em nuvens de pontos consecutivos (cantos,

arestas e outros). Isso pode ser feito ou complementado pela colocação de alvos nas regiões comuns às duas cenas. Por sua vez, o processo de cálculo e de registro dos dados é feito por meio de transformações matemáticas de coordenadas. Mais detalhes sobre esse processo podem ser vistos em Gonçalves.¹⁵

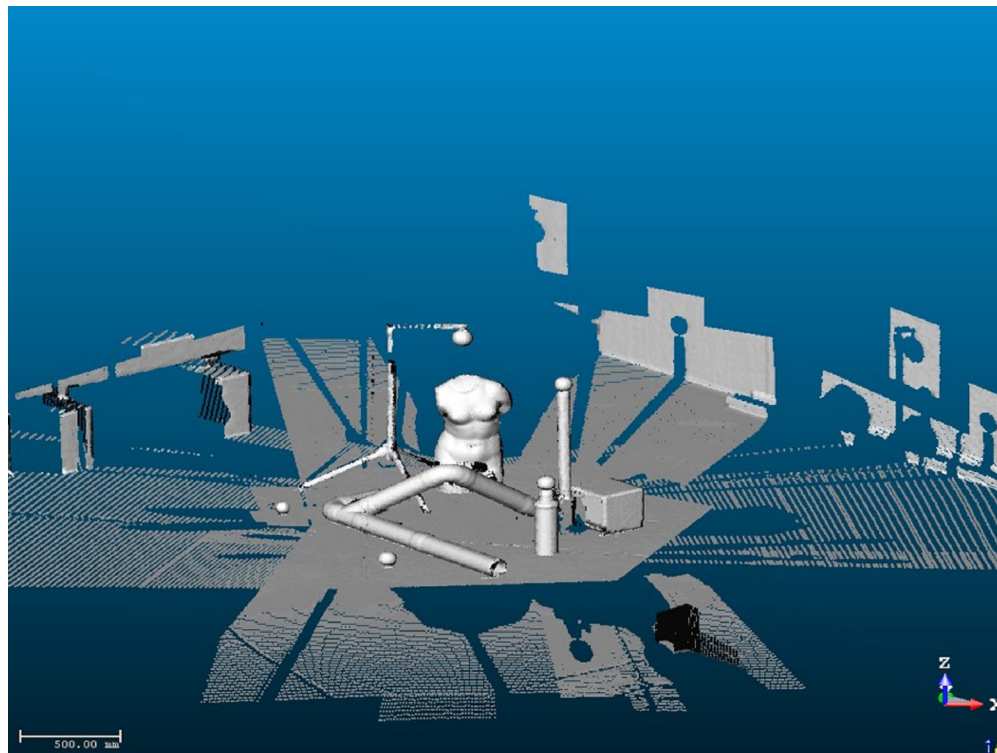


Figura 4 – Imagem completa, com todos os dados registrados. Fonte: Gonçalves (2007).

O processamento dos dados exige um programa específico, geralmente associado ao equipamento que produziu os dados, mas havendo, quase sempre, a possibilidade de converter os arquivos para um formato padrão de intercâmbio – é o que se chama interoperabilidade. O uso desse programa, de certa complexidade, exige também qualificação do usuário. Deve-se realizar inicialmente um controle de qualidade dos dados para verificar: se todos os objetos de interesse foram escaneados; se não há sombras que prejudiquem a interpretação dos dados; se a dimensão ou a abertura da malha, associada a densidades de pontos no levantamento, está compatível com o nível de detalhamento necessário; se o registro dos dados foi feito com sucesso.

Um primeiro exemplo, na área de engenharia, é o de uma adutora de água de 2.000 m de comprimento e de 11,4 m de diâmetro, escavada na rocha. O interior

da adutora foi escaneado em uma campanha que contou com cerca de 40 pontos de coleta, espaçados 50 m um do outro. A figura 5 apresenta uma tela do programa mostrando a nuvem de pontos consolidada e o eixo da adutora em amarelo.

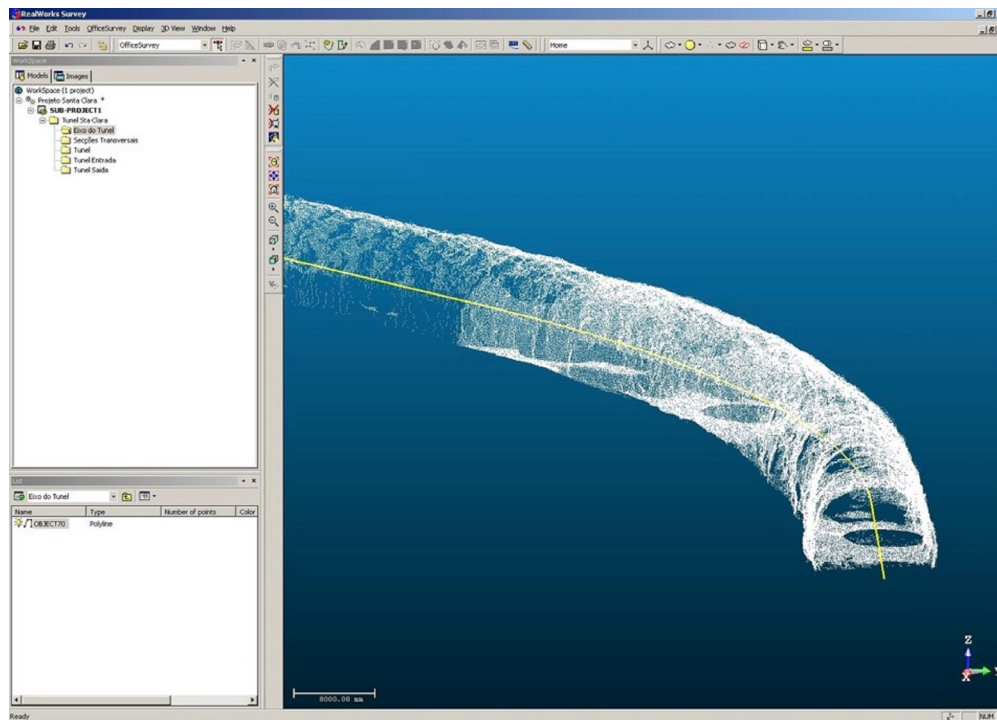


Figura 5 – Nuvem geral de pontos de um trecho da adutora e seu eixo.

Outro tipo de equipamento é o escâner de mão, como se observa na figura 6. Esse tipo de equipamento foi desenvolvido para contornar algumas das principais dificuldades dos equipamentos de tripé. Sua facilidade em relação a estes últimos são: dispensa instalação no terreno sobre tripé em posição fixa, pois o equipamento funciona na mão do operador. Este, obedecendo ao princípio de escanear toda a peça, deve apontar o equipamento para a peça e efetuar toda a varredura para coletar os dados por diversos ângulos.

No visor, que é um *tablet* normal, vão aparecendo pontos de cor amarela nos locais já levantados, os quais vão adquirindo a cor verde quando, segundo os cálculos, a amostra é suficiente para reproduzir a peça. O processo de medição pode se dar por encerrado quando toda a peça aparece em cor verde.



Figura 6 – Escâner de mão DPI-8, da Trimble. Fotografia dos autores.



Figura 7 – Operação do equipamento para escanear a peça em primeiro plano. Fotografia dos autores.



Figura 8 – Tela do equipamento, durante a operação, mostrando o que vai ser imageado. Fotografia dos autores

A figura 7 mostra, por meio de uma fotografia, o processo de escaneamento durante sua execução, enquanto a figura 8 mostra a tela do equipamento durante a operação. Um *tablet* comum, à escolha do usuário, deve ser acoplado ao equipamento.

Além de facilitar o trabalho de campo, simplifica-se muito o processamento: a correlação das imagens é feita automaticamente por um programa interno do equipamento (*firmeware*), à medida que a peça vai sendo escaneada. Ao final, já se dispõe de um modelo 3D da peça e do seu entorno. Um exemplo é dado na figura 9. Nela a intenção foi escanear o almofariz do século XVIII que aparece no centro da imagem. Contudo, devido ao processo, outras peças contíguas foram capturadas, inclusive um pilar do edifício, com uma faixa preta e outra amarela.

A tecnologia aplica-se a quase qualquer tipo de material ou objeto sólido opaco, podendo apresentar problemas com objetos altamente reflexivos, como água ou espelho.

Figura 9 – Resultado do escaneamento de um almofariz, ao centro. Fotografia dos autores

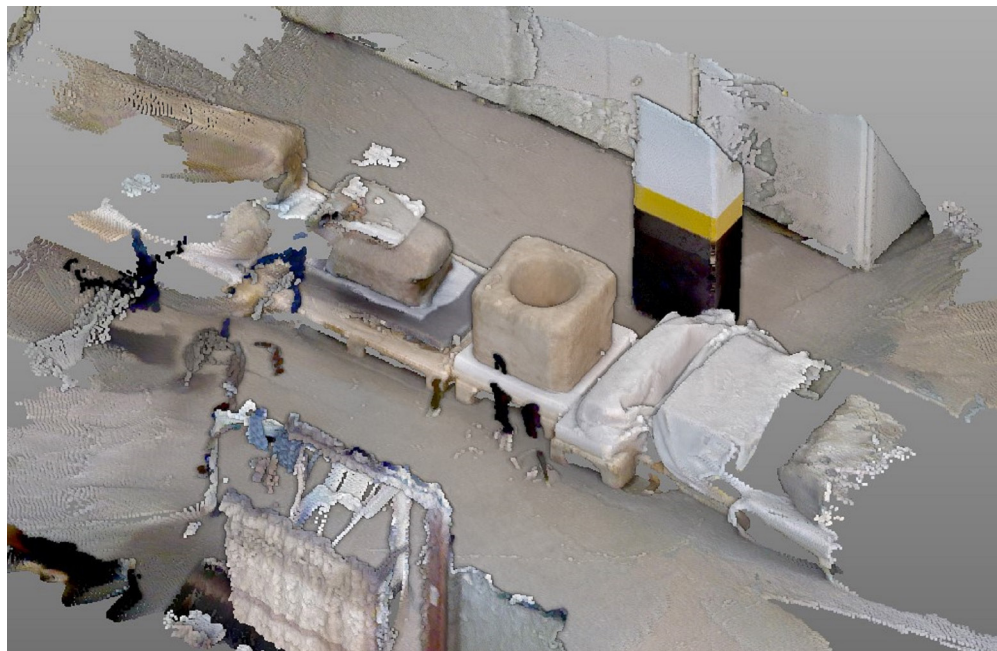


Figura 10 – Nuvem de pontos recortada apresentando apenas o almofariz. Fotografia dos autores



Comparando o equipamento de tripé com o manual, este, embora menos preciso, permite o levantamento em locais de difícil acesso, pois não depende de instalação de tripé fixo e pode ser facilmente manuseado para levantar regiões recônditas. O resultado sempre é uma nuvem de pontos de todo o objeto levantado, a qual pode ser manipulada e gerar os mais diversos produtos, como se detalha mais adiante neste artigo.

MAQUETES ELETRÔNICAS

As nuvens de pontos geradas constituem uma maquete eletrônica. O modelo 3D da adutora é o da figura 11 e por meio dele pode-se identificar e medir rugosidades indesejáveis, acima de certo limite, como a indicada nessa figura por um círculo vermelho. Pode-se também desenhar automaticamente seções transversais, calcular áreas, volumes e outros indicadores.

No entanto, o LS3D terrestre possui um inconveniente para obras e edificações de grandes dimensões: em muitos casos não se consegue escanear o telhado ou o teto da edificação. No caso da adutora, todo o teto (interior) é visível para o escaneamento, mas em muitos outros casos, não, como, por exemplo, edificações: somente as paredes laterais são visíveis para escaneamento feito sobre o terreno. Para complementar e formar um modelo híbrido, deve-se utilizar outra tecnologia, como a aerofotogrametria com o uso de drones, como se explica mais adiante.

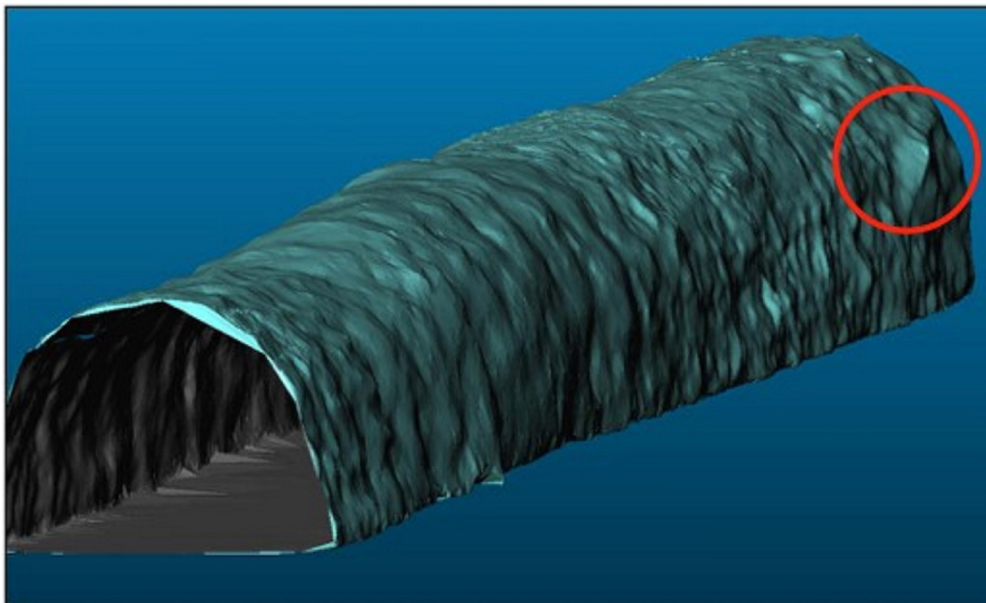


Figura 11 – Modelo 3D de uma adutora de água permitindo análises e quantificações.

Logicamente, no caso de escâneres de mão em objetos relativamente pequenos não se necessita da complementação de levantamento por drone.

COMPARAÇÃO ENTRE A MAQUETE ELETRÔNICA E A FÍSICA

Pode ser feita uma comparação da maquete eletrônica com a física ou convencional. Para isso, pode-se analisar alguns itens. A convencional custa mais caro, exige maior tempo para sua elaboração, mas tem a vantagem de já ser um objeto em 3D e convenientemente montada pode ser vista por todos os ângulos, como é o caso da maquete da cidade de São Paulo do Museu Paulista ou a da cidade de Jerusalém no Museu de Israel. Além disso, a maquete convencional permite escolher os materiais de que será composta.

A maquete eletrônica tem que ser vista em um computador ou televisão, tendo seu tamanho limitado às dimensões da tela. Embora proporcione a sensação de 3D, podendo ser vista de qualquer ângulo, mediante os comandos apropriados, na realidade ela é uma representação plana de um objeto tridimensional e, por isso, na área de computação gráfica, costuma-se empregar a expressão imagem 2 ½ D. Tem como recurso adicional a possibilidade de produzir um filme. O resultado parece a filmagem feita por um drone, mas na realidade é um voo simulado. Define-se, sobre o modelo, um trajeto através de pontos com coordenadas horizontais e verticais e o programa interpola uma infinidade de pontos nesse trajeto, e, depois, fazendo cálculos sobre o modelo, produz os diversos fotogramas que vão compor o filme. Assim, com muita facilidade, simulam-se e aperfeiçoam-se os voos, podendo-se acrescentar música, legendas, créditos e outras imagens. Como é sabido, as imagens e animações, em nossa época, chamam poderosamente a atenção.

A partir da maquete eletrônica, pode-se gerar uma maquete física em resina. Para grandes objetos, como um edifício, e pensando em uma escala grande, existe a limitação de tamanho, imposto pelas impressoras 3D. Pode-se imprimir por partes e inclusive projetar as peças de encaixe (macho e fêmea), solução muito conveniente também para o transporte. Por exemplo, o edifício do Museu Paulista, de cerca de 150 m, poderia ser modelado na escala de 1:100, gerando uma maquete de 1,5 m a ser impressa em três partes de 0,5 m. Como atualmente não existe impressora 3D colorida, esse serviço deve ser feito manualmente, após a impressão. Ou seja, a maquete física, para grandes tamanhos, ainda é um processo vantajoso.

AEROFOTOGRAMETRIA POR DRONE E SEUS PRODUTOS

16. Cf. Andrade (2003).

17. Cf. Piteri; Rodrigues (2011).

Os drones são cada vez mais populares e inúmeros modelos de diferentes fabricantes são lançados anualmente. Esses equipamentos são capazes de voar a grandes alturas (no Brasil, a legislação não permite voos acima de 120 m) e coletam imagens em alta definição.

Existe uma similaridade grande entre a aerofotogrametria convencional e a feita com drone. Este possui a bordo um sistema de posicionamento por satélite (GNSS, nome genérico que inclui o GPS e outros sistemas) e uma câmera fotográfica, além de outros sensores auxiliares. Pode ser operado manualmente via controle remoto, ou de maneira pré-programada, através de um aplicativo em celular. O usuário faz o planejamento do voo marcando a área de interesse sobre um produto de tipo cartográfico (imagem do Google, por exemplo) e o programa calcula as faixas de voo e as superposições longitudinais e transversais para cobrir toda a área e obter a imagem de cada região em pelo menos duas fotos, para, assim, possibilitar a estereoscopia e a visão 3D, como no processo clássico. A programação do voo é transmitida (via rádio) para o drone, que executa o voo programado e retorna ao ponto de origem.

O GPS fornece a posição da câmara no instante de cada foto, caracterizando o que se chama voo apoiado. Por meio da correlação de imagens e outras técnicas de reconhecimento de padrões e visão computacional, o programa identifica pontos comuns em fotos vizinhas, na mesma faixa de voo e nas laterais e consegue calcular as altitudes de cada ponto do objeto, formando um modelo digital do terreno e das construções e árvores sobre ele. Para mais detalhes sobre fotogrametria, pode-se consultar Andrade,¹⁶ e sobre visão computacional, Piteri e Rodrigues.¹⁷

A figura 12 mostra o esquema do voo pré-programado.

Com esses dados de insumo, podem ser obtidos diversos produtos. O primeiro são as fotos individuais, corrigidas das distorções provocadas pelo relevo (ortofoto ou foto retificada). Unindo diversas fotos, consegue-se obter um fotomosaico, ou fotografia única, corrigida das distorções, de toda a região. Outro produto é a maquete eletrônica, na aparência muito semelhante àquela produzida com o LS3D, com a vantagem de representar também o teto das edificações. Com a maquete eletrônica consegue-se produzir filmes simulando voo, como no caso do LS3D. No entanto, a precisão métrica é inferior, da ordem de dez vezes, como mostra a prática.

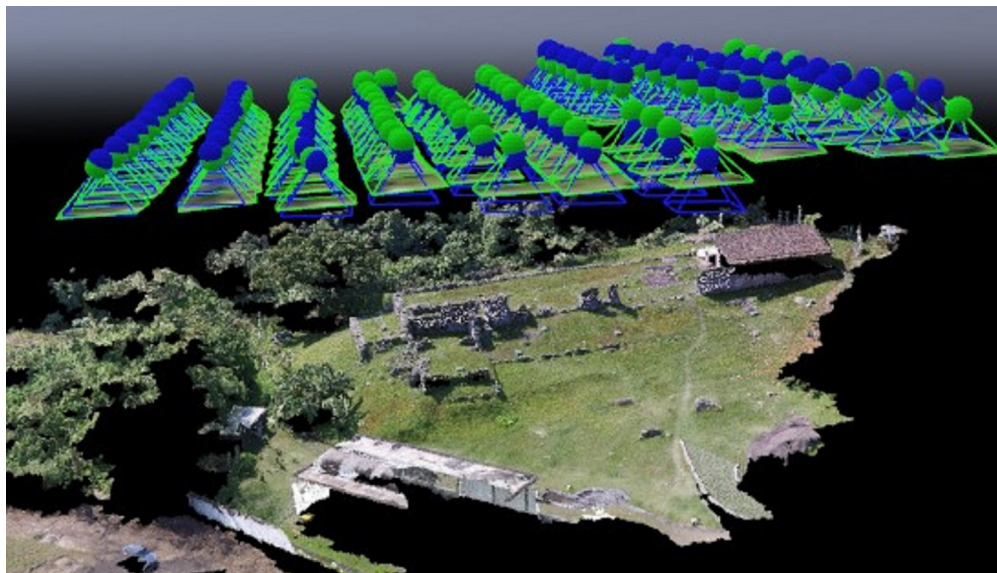


Figura 12 – Esquema de voo pré-programado. As pequenas bolas e os tetraedros associados, em azul e verde, mostram a posição em que será tomada cada fotografia.

A operação do equipamento e aplicativo, de custo bastante reduzido se comparado com qualquer outra tecnologia, é bastante simples, e o processamento é muito automatizado, de tal forma que essa tecnologia vem sendo utilizada em substituição da técnica convencional em muitos levantamentos de pequena extensão. Há equipamentos em várias faixas de valor. Os de rotores (quadricópteros e assemelhados, na faixa de US\$ 2.000) têm bateria com autonomia para cerca de 30 minutos e alcance relativamente limitado. Quando a energia cai abaixo de certo patamar (15%), ele retorna e pousa automaticamente no ponto de origem. Já os de asa fixa (na faixa de U\$ 70.000 ou mais) têm maior velocidade, autonomia e alcance, sendo utilizados para levantamentos maiores. Tem-se registrado queda de equipamentos, não sendo encontrados ou, quando recuperado, com perda total devido à queda.

O sistema não é simplesmente um brinquedo e vem melhorando aceleradamente. O programa emite um relatório muito completo, semelhante aos da aerofotogrametria convencional, por meio do qual especialistas conseguem avaliar a precisão interna ou relativa dos elementos representados nas ortofotos com boa precisão absoluta, ou seja, com relação a um sistema de coordenadas de referência (latitude e longitude). A próxima melhoria em curso, muito promissora, é o emprego do método DGPS, ou seja, GPS diferencial, que deve aumentar bastante a precisão e, no médio prazo, substituir o *laser* terrestre em diversas aplicações.

No Brasil, pesquisas vêm sendo desenvolvidas para avaliar a qualidade de representação e dimensional dos produtos gerados com essa tecnologia. Atualmente a precisão dimensional ainda deixa a desejar, de maneira que, neste momento, em vez de pensar em concorrência, é preferível falar em integração e complementaridade de tecnologias, utilizando o LS3D para obter a precisão dimensional para toda a nuvem, com o complemento das imagens por drone para as regiões inacessíveis. Os dados do drone são integrados e corrigidos pelos dados do *laser*.

Medições diretas de dimensões sobre o terreno (por exemplo, largura de vias ou dimensões de lotes urbanos) e sua comparação com aquelas das ortofotos fornecem uma primeira avaliação simples para o usuário, verificando se atende ou não os requisitos da sua aplicação. Foi empregada por nós com sucesso.

18. Cf. Gonçalves (2019).

19. Escola Politécnica da... (2016?).

EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DE MAQUETES E VÍDEOS

Um exemplo de aplicação é o levantamento feito da escultura ou *Monumento a Minerva*, de Denise Milan no *campus* da USP em São Paulo, representando a planta e o capacete da deusa grega (Palas Atenas). Na figura 13, pode-se ver uma perspectiva desse monumento obtida a partir da nuvem de pontos gerada pelo LS3D, e, na figura 14, outra perspectiva, pelo levantamento aéreo por drone, ao qual se sobrepôs o plano de voo. Foi esse o primeiro experimento que mostrou que a precisão do LS3D é cerca de dez vezes melhor que a do drone, e que este, no entanto, recobre regiões não visíveis e, portanto, não levantadas pelo LS3D, e daí surge a conveniência da integração das duas tecnologias.¹⁸

O segundo exemplo foi o projeto de levantamento do Monumento Nacional Ruínas do Engenho São Jorge dos Erasmos, em Santos, pertencente à USP. Foram utilizadas as duas tecnologias de forma integrada. A imagem da figura 15 foi produzida a partir da maquete eletrônica.

Com essa maquete eletrônica produziu-se um vídeo que pode ser visto em <<https://bit.ly/2OJpxi2>>.¹⁹

O terceiro exemplo, em projeto financiado pela Associação *Amigos da Poli*, é um levantamento do Riacho do Ipiranga, visando estudos de despoluição, no trecho amostral que vai da Rua Coronel Diogo até sua foz no Tamanduateí. Foram 338 fotos, um modelo digital, um ortomosaico (mosaico de fotos retificadas para a posição ortogonal e não inclinada, apresentando-se um

recorte dele na figura 16), uma nuvem de pontos, dois vídeos (um feito com a nuvem de pontos, outro com a maquete eletrônica) e diversos relatórios técnicos.

Figura 13 – Nuvem de pontos LS3D do Monumento a Minerva, junto ao prédio da Engenharia Civil, da Escola Politécnica, no *campus* da USP de São Paulo.



Figura 14 – Maquete obtida por drone mostrando o plano de voo.

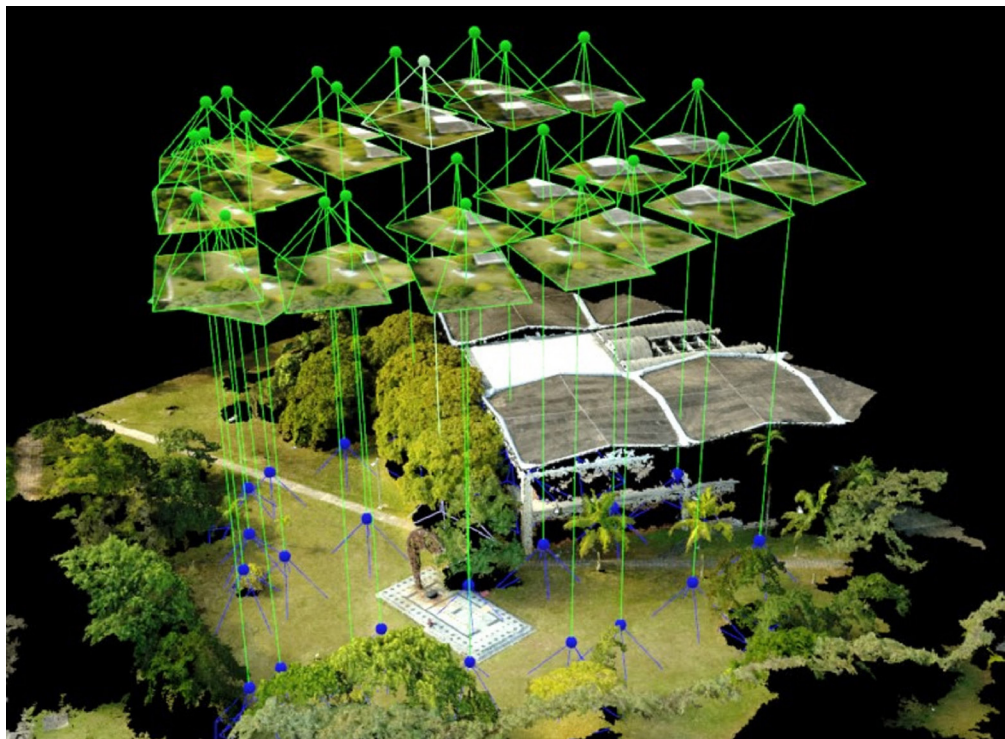




Figura 15 – Vista perspectiva do Monumento Nacional Ruínas do Engenho São Jorge dos Erasmos, produzida a partir da maquete eletrônica (levantamento aéreo com drone).



Figura 16 – Trecho do ortomosaico do Riacho do Ipiranga, na região do Parque da Independência.

Outro projeto, associado a esse, foi o levantamento do Parque da Independência, onde se insere o edifício-monumento do Museu do Ipiranga. Foram gerados produtos semelhantes, com mais de mil fotos. Na figura 17, pode-se ver uma foto de parte desse edifício e do jardim fronteiro. A partir da maquete também foi gerado um vídeo artístico representando um sobrevoo do parque. Na figura 18, pode-se ver a nuvem de pontos da fachada do museu (parcial), obtida por LS3D a partir de uma única estação.



Figura 17 – Foto aérea parcial, por drone, do edifício-monumento e o jardim fronteiro. Fotografia dos autores



Figura 18 – Nuvem de pontos da fachada do Museu Paulista, no Ipiranga.

Por sua vez, a figura 19 mostra a maquete produzida pelo levantamento aéreo.



Figura 19 – Maquete eletrônica gerada por levantamento aéreo (drone) do edifício-monumento do Museu Paulista.

EXEMPLOS DE MAQUETE DE PEÇAS, EXPOSIÇÃO VIRTUAL E ACESSIBILIDADE

Num último experimento, foram escaneadas diversas peças do acervo lítico do Museu Paulista, com escâner de mão.

As peças recortadas do entorno constituem um conjunto de modelos tridimensionais que podem ser aproveitados, por exemplo, em exposições virtuais. Elas podem ser projetadas individualmente em telas de grande formato, girando para mostrar os diversos ângulos, ou em conjunto, montando-se uma exposição virtual em que o visitante passeia pelo ambiente. Pode-se escanear e modelar, ou mesmo criar, uma sala típica e dispor as peças numa determinada sequência de locais simulando o percurso, com os respectivos dizeres identificando a peça e seu significado. Ou seja, possibilita também simulações durante o planejamento e produção museal expositiva. A cada uma das peças pode estar associado um código de barras bidimensional (QR

code) que remete a mais informações. A figura 20 mostra diversas peças e por ela o leitor pode avaliar o potencial delas para compor uma exposição.



Figura 20 – Peças escaneadas para montar uma exposição virtual. No sentido horário, a partir do canto superior esquerdo: Pia batismal de Itanhaém; Pia de água benta do Pátio do Colégio; Marco de sesmaria; Verga da Matriz de São Vicente (fragmento). Objetos do Acervo do Museu Paulista

Avaliando o trabalho do escâner de mão, nessa primeira experiência com os resultados da figura 20, vê-se que eles podem ser melhorados, aumentando a quantidade de pontos para que a inscrição seja mais visível, por exemplo. Compare-se na figura 21 a imagem escaneada de um objeto (Lápide sepulcral de Afonso Sardinha) com sua fotografia. Espera-se que o escâner de tripé seja mais sensível para essas inscrições, por poder se aproximar mais do objeto (até 60 cm, como distância mínima), por escanear com maior densidade de pontos (menor espaçamento na malha de representação) e por fornecer maior precisão em profundidade. Esses resultados são parciais e espera-se melhorar o resultado do escâner de mão, em função de suas inúmeras vantagens na fase de operação de campo.

Neste ponto, é interessante constatar que também em nível internacional sente-se essa dificuldade, relatada de forma indireta. Por exemplo, a Johns Hopkins University desenvolve o projeto Digital Hammurabi, que escaneia placas com escrita cuneiforme para criar réplicas em vários materiais, visando o estudo e a preservação, diminuindo a necessidade de acesso ao original. Para isso foi desenvolvido e construído um equipamento específico, que não se baseia na tecnologia *laser*.²⁰ Essa alternativa, ainda que cara, pode ser usada para as peças que possuem inscrições, se os processos convencionais não derem bons resultados nas experiências que estamos conduzindo. Por sua vez, a Universidade de Indiana com a ajuda do Politécnico de Milão desenvolveram um projeto para digitalizar 1.250 esculturas antigas. A tecnologia, para os locais em que o drone não pode ser utilizado, baseou-se na tomada de fotos de diversos ângulos e a realização de um processo de tratamento semelhante ao utilizado na metodologia do drone, que é uma adaptação da metodologia da fotogrametria clássica. Em alguns poucos casos foi utilizada a tecnologia *laser*. Detalhes podem ser vistos em Malik e Guidi.²¹

A obtenção de melhores imagens não é só questão de legibilidade da inscrição para os estudiosos, mas deve ser um auxílio de leitura para o grande público e para acesso aos deficientes visuais. Tendo em conta que existe um plano básico da face da lápide, pode-se fazer um tratamento que identifique os pontos abaixo dessa cota média e pintá-los de vermelho no modelo digital, que seria apresentado também numa tela digital, ao lado da peça física. Também se pode elaborar uma maquete em resina, em tamanho natural (20 x 40 x 60 cm, aproximadamente), pintando de vermelho as letras; e apresentar como complemento uma placa, em que se reproduz os dizeres, letra a letra, e por extenso, quando for o caso. Essa maquete pode ser tátil, para ser sentida por todos os públicos, incluindo os deficientes visuais, complementando-se com os mesmos dizeres em Braille.



20. Cf. Johns Hopkins University (2019).

21. Cf. Malik; Guidi (2019).

Figura 21 – Lápide sepulcral de Afonso Sardenha. À esquerda, imagem do escâner manual; à direita, foto com celular. Objetos do Acervo do Museu Paulista

Com essa tecnologia, podem ser produzidas também maquetes sensoriais de elementos da arquitetura do edifício, de valor educativo: palmetas, rosetas, capitéis coríntios e outros. Nossas pesquisas também caminham nessa direção.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho, por meio de uma série de exemplos, mostrou o potencial e as limitações dessas duas tecnologias para a produção de imagens individuais, mosaicos retificados, maquetes eletrônicas, filmes, exposições virtuais e maquetes em resina, com funções educativas e de acessibilidade.

Os poucos artigos internacionais encontrados e analisados não contemplam nem a integração das tecnologias nem essa gama de aplicações, nas áreas de museus, esculturas de grande porte e edifícios históricos.

AGRADECIMENTOS

A Trimble do Brasil pela colaboração e empréstimo dos equipamentos de campo para a realização dos experimentos.

REFERÊNCIAS

LIVROS, ARTIGOS E TESES

ANDRADE, José Bittencourt de. *Fotogrametria*. Curitiba, PR: SBEE, 2003.

CINTRA, Jorge Pimentel; GONÇALES, Rodrigo. Tunnel surveying with terrestrial laser scanner: a case study. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 23, n. 1, p. 115-133, jan./mar. 2017.

CLOUGH, Gerald Wayne. *Best of Both Worlds: Museums, Libraries, and Archives in a Digital Age* [e-book]. Washington: Smithsonian Institution, 2013. Disponível em: <<https://s.si.edu/31g02HJ>>.

GONÇALES, Rodrigo. *Dispositivo de varredura laser 3D terrestre e suas aplicações na engenharia, com ênfase em túneis*. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007. Disponível em: <<https://bit.ly/33vMZU4>>.

GONÇALES, Rodrigo. *Integração e controle de qualidade de Laser scanner terrestre e de Drone para levantamentos de edifícios, monumentos e ruínas arqueológicas*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

GORDON, Stuart; LICHTI, Derek. Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural hering recording. *Fig working week*, v. 4, 2004.

KUZMINSKY, Susan C.; GARDINER, Megan S. Three-dimensional laser scanning: potential uses for museum conservation and scientific research. *Journal of Archaeological Science*. v. 39, n. 8, p. 2744-2751, ago. 2012.

MALIK, Umair Shafqat; GUIDI, Gabriele. *Massive 3D digitization of sculptures: Methodological approaches for improving efficiency*. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., v. 364, 012015, 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/2MfoW5P>>.

PITERI, Marco Antônio; RODRIGUES, José Carlos (coords.). *Fundamentos de Visão Computacional*. Presidente Prudente: Gráfica Viena, 2011. Disponível em: <<https://bit.ly/2VRM5yN>>.

WACHOWIAK, Melvin J.; KARAS, Basilic Vicky. 3d Scanning and Replication for Museum and Cultural Heritage Applications. *Journal of the American Institute for Conservation*, v. 48, n. 2, p. 141-158, 2009.

XIAO, Jianxiong; FURUKAWA, Yasutaka. Reconstructing the World's Museums. *Int. J. Comput. Vis.* v. 110, n. 3, p. 243-258, dez. 2014. Disponível em: <<https://bit.ly/35ulP1L>>.

SITES

BALL STATE UNIVERSITY (2019). 3D Laser Scanning. Disponível em: <https://bit.ly/2MljPKt>. Acesso em 19 set. 2019.

DRONES (2019). Special Issue *Drone Inspection in Cultural Heritage*. Disponível em: <<https://bit.ly/2P6iuAc>>. Acesso em 21 out.2019.

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP. [S. l.: s. n.], [2016?]. 1 vídeo (3min25). Publicado pelo canal Escola Politécnica da USP. Disponível em: <<https://bit.ly/2OJpxi2>>.

FITZWILLIAM MUSEUM (2019). 3D Replication for Feathercast and the Fitzwilliam Museum. Disponível em: <<https://bit.ly/2MfVnRT>>. Atualizado em: 23 fev. 2014. Acesso em: 19 set. 2019.

JOHNS HOPKINS UNIVERSITY (2019). Digital Hammurabi. Disponível em: <<https://bit.ly/2INRvoP>>.

MCKENZIE, Emilia. 3D object scans as a museum learning resource. In: SCIENCE MUSEUM OF LONDON (2019). Disponível em: <<https://bit.ly/2OLPtch>>. Atualizado em 16 ago. 2017. Acesso em 19 set. 2019.

MELBOURNE UNIVERSITY (2019). 3D scanning. Disponível em: <<https://bit.ly/319ICwo>>. Acesso em: 19 set. 2019.

SHULER MUSEUM OF PALEONTOLOGY (2019). Facilities. Disponível em: <<https://bit.ly/2MK5Qm>>. Acesso em 19 set. 2019.

SMITHSONIAN INSTITUTION (2019). The world's largest museum goes digital with 3D scanning and 3D printing. Disponível em: <<https://bit.ly/32izk2i>>. Acesso em 19 set. 2019.

Artigo apresentado em 26/02/2019. Aprovado em 24/09/2019.



All the contents of this journal, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution License