

Análise da qualidade dos dados provenientes de um digitalizador tridimensional manual em comparação com o laser scanner terrestre para fins de modelagem e impressão 3D de patrimônio histórico de pequeno porte

RESUMO

Gláucia Justino dos Santos
glaucliajustiro@gmail.com.br
orcid.org/0000-0001-7815-4243
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

Juliana Moulin Fosse
jumoulin@ufrrj.br
orcid.org/0000-0002-4221-781X
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

Igor Guimarães Leal Messias Vieira de Souza
igorv_souza@hotmail.com
orcid.org/0009-0006-3994-9725
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

Um dos equipamentos utilizados para a obtenção das informações métricas dos detalhes arquitetônicos de uma edificação é o *Laser Scanner Terrestre* (LST), que tem um preço significativamente elevado. Desta forma este trabalho buscou uma alternativa de substituição de um LST por um Digitalizador Tridimensional Manual (DTM) para fins de aquisição de dados, modelagem e impressão 3D de feições de patrimônio histórico de pequeno porte. Para isso, foi utilizado um levantamento já realizado com o LST, modelo Leica RTC 360, no Castelo Mourisco, uma das edificações da sede da Fiocruz, no município do Rio de Janeiro, onde posteriormente foi feito um outro levantamento utilizando o DTM, modelo *XYZPrinting 3D Scanner Pro 1.0*. Assim, foi realizado o processamento e a modelagem dos dados provenientes dos dois levantamentos. Para comparar a qualidade dos modelos 3D gerados, foram estabelecidos dois parâmetros: análise estatística e qualidade visual. A análise estatística considerou as variáveis: média das distâncias máximas e o desvio padrão, a qual apontou que o DTM realizou uma captura 3D em pequenas áreas com uma acurácia similar à do LST. A qualidade visual considerou as medidas e diferenças entre os dois modelos 3D gerados, em escala para impressão, e a feição original da edificação, que também apontou que as principais características da peça original foram preservadas quando capturadas pelo DTM. Os resultados das análises apontaram que o DTM pode ser uma boa alternativa ao custo dos LST, para a obtenção de dados para a modelagem e impressão 3D de patrimônio histórico de pequeno porte.

PALAVRAS-CHAVE: Laser Scanner Terrestre. Digitalizador Tridimensional Manual. Modelagem 3D. Patrimônio Histórico.

INTRODUÇÃO

Patrimônio histórico é todo bem material ou natural considerado valioso a uma sociedade devido a sua importância histórica e cultural. Esses bens, sejam eles objetos, documentos ou edificações, guardam uma riqueza de informações sobre o passado de determinada localidade e das pessoas que lá habitavam, o que o torna um recurso cultural a ser preservado (COGIMA et al., 2020). O alto nível de detalhamento do objeto e suas características estéticas e históricas demandam o armazenamento de informações capazes de reproduzir fielmente o objeto a fim de conservá-lo adequadamente e prolongar, assim, sua funcionalidade (COGIMA, 2019). Quando se trata de edificações históricas, a dificuldade de se obter uma documentação de confiança do objeto, torna o levantamento a partir do objeto real, essencial para as ações de preservação, restauro e intervenção.

Nesse sentido, técnicas de medição e representação tridimensional têm sido desenvolvidas há décadas, em busca de capturar a realidade em 3D e reproduzi-la em modelos 3D. Dentre as técnicas de obtenção de dados 3D pode-se citar o laser scanner e a fotogrametria (BEIRÃO, 2011). Com estas técnicas, milhões de pontos de superfícies são medidos, por distância e ângulo, a fim de fornecer informações das suas características, cores e dimensões. De posse de todas essas informações é possível gerar um modelo 3D de alta resolução e geometricamente preciso (LEICA, 2018). Para a geração de um modelo 3D para fins de preservação do patrimônio histórico faz-se necessário a utilização de algum equipamento de captura da realidade e, dentre aqueles tem-se o Laser Scanner Terrestre (LST).

O LST tem aplicação em várias áreas de conhecimento, tais como arquitetura, construção civil, topografia, geologia e mineração (BORGES et al., 2018). Desta forma é importante que os estudantes dos cursos de Engenharia de Agrimensura e áreas afins tenham acesso a esses equipamentos ainda na condição de estudantes de graduação, para chegarem ao mercado de trabalho melhor preparados. Entretanto, uma das barreiras encontradas para a aquisição de um LST por pequenas empresas e universidades públicas é o seu preço, que é considerado elevado.

Os trabalhos de Muniz, Silva e Kindlein Júnior (2018), Bonfada (2019) e Pereira e Fosse (2020) apresentam o DTM como uma alternativa ao elevado custo dos LST, quando se trata da aquisição de dados para fins de modelagem 3D no contexto da preservação do patrimônio histórico. O DTM é um equipamento capaz de escanear feições em 3D. Ele se diferencia do LST pelo princípio de funcionamento, pela quantidade de pontos que consegue coletar e pela acurácia das coordenadas obtidas das feições presentes no levantamento realizado. Embora seja um equipamento menos robusto, eletronicamente mais simples e, conseqüentemente, mais barato, este trabalho objetiva comprovar o uso do DTM como alternativa para o levantamento de feições de áreas menores e com elevado grau de detalhamento.

Para este trabalho, foram utilizados os dados provenientes de um levantamento realizado em 2019, com o LST modelo Leica RTC 360, no Castelo Mourisco, uma das edificações da sede da Fiocruz, no município do Rio de Janeiro. Desta forma, foi feito um outro levantamento, da mesma região de estudo, utilizando o DTM modelo *XYZPrinting 3D Scanner Pro 1.0*. De posse dos dados dos dois levantamentos realizados com os dois equipamentos, fez-se o processamento

e a modelagem de ambos com o objetivo de avaliar a acurácia da modelagem 3D dos dados provenientes do DTM. Os dois modelos 3D gerados foram comparados por meio do parâmetro de análise estatística e do parâmetro qualidade visual e os resultados apontaram que o DTM pode ser uma boa alternativa ao custo dos LST para o uso específico aqui estudado.

DESENVOLVIMENTO

EQUIPAMENTOS USADOS E REGIÃO DE ESTUDO

O LST é um equipamento que mede a distância entre o sensor e o objeto e as coordenadas polares tridimensionais destes objetos. Com base na medição do intervalo entre a emissão do sinal e a recepção do retorno, obtém as coordenadas tridimensionais da superfície de um objeto automaticamente (SILVA et al., 2013). O tipo de sinal emitido e registrado pelo equipamento pode ser: um pulso laser (princípio de funcionamento baseado no *time of flight*), uma onda laser (princípio de funcionamento baseado na diferença de fase) ou a luz do pulso laser (princípio baseado na triangulação). Atualmente os equipamentos têm combinado a utilização desses princípios para otimizar sua performance. O equipamento utilizado neste trabalho foi o Leica RTC 360 (Figura 1), que utiliza como princípio de funcionamento a diferença de fase e o *time of flight* (LEICA, 2018). Ao conjunto de dados tridimensionais capturados denomina-se nuvem de pontos, pois pode ser representada por uma densa concentração de observações no espaço tridimensional (WUTKE, 2006).

Figura 1 – Leica RTC 360



Fonte: Leica (2018).

O LST Leica RTC 360 possui uma resolução espacial de 3 mm a uma distância de 10 metros do alvo com um alcance máximo de 130 metros, câmera de imageamento HDR (High Dynamic Range) de 480 x 800 pixel e uma velocidade de escaneio de dois milhões de pontos por segundo (LEICA, 2018). Segundo Beirão (2011), Andrade (2012), Dezen-Kempton et al. (2015), Cavalcante (2016) e Cogima et al. (2020) o LST é utilizado para obter, por meio de representações gráficas, as características e detalhes arquitetônicos presentes nas edificações, podendo ser futuramente utilizadas para restauração destes patrimônios, utilizando também desta documentação como ferramenta de preservação e memória.

O DTM é um aparelho capaz de capturar um objeto real e gerar um modelo 3D digital (THIAGO, 2017). Porém, diferentemente do LST este equipamento utiliza um sensor de profundidade composto por um sensor passivo (ou ativo) e um sensor monocromático que em conjunto fazem a coleta de pontos. Os DTM podem

realizar a digitalização com ou sem contato com o objeto por meio da emissão (sensor ativo) ou recepção (sensor passivo) de radiação (ZUÑIGA, 2014). Um exemplo de sensor ativo que emite luz infravermelha é o 3D Scanner Pro 1.0, da fabricante XYZPrinting (Figura 2), utilizado por Pereira e Fosse (2020) e neste trabalho. O processo de digitalização por luz infravermelha ocorre por meio da captura de nuvens de pontos (cenas) na superfície dos objetos nas regiões do infravermelho no espectro eletromagnético (THIAGO, 2017). Nas câmaras de infravermelho as cenas são transformadas para a faixa do visível (400 a 700 nm), assim as cenas da distribuição térmica gerada pelo objeto podem ser observadas pelos seres humanos (COSTA et al., 2015). Desta forma as imagens geradas por câmaras de infravermelho contêm informação RGB e de textura em alta resolução, mas não contêm qualquer informação métrica explícita sem as etapas de processamento complementares (FREITAS, 2006).

Figura 2 – 3D Scanner Pro 1.0



Fonte: XYZPrinting (2020).

O local escolhido para realização deste trabalho foi o Castelo Mourisco, sede da Fundação Oswaldo Cruz (Figura 3). O castelo foi inaugurado em 25 de maio de 1900, com a criação do Instituto Soroterápico Federal, na fazenda de Manguinhos, zona norte do Rio de Janeiro. Construído inicialmente para fabricar soros e vacinas contra a peste bubônica, a instituição experimentou, desde então, uma intensa trajetória, que se confunde com o próprio desenvolvimento da saúde pública no Brasil.

Figura 3 – Castelo Mourisco



Fonte: Agência Fiocruz (2018).

Em 2019 foi realizado um levantamento tridimensional por meio da coleta de pontos com o equipamento LST Leica RTC 360 no edifício Castelo Mourisco. Esse

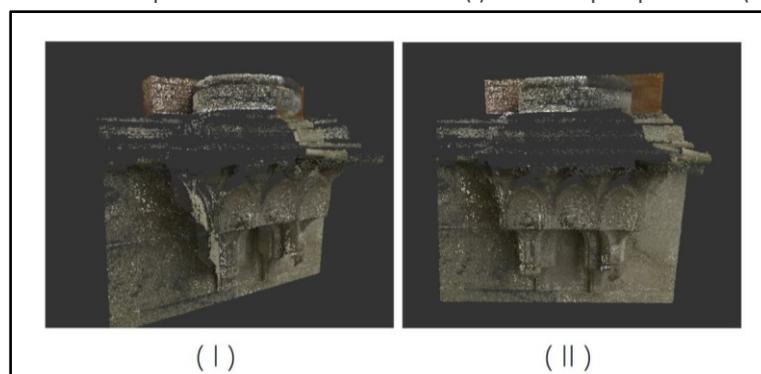
levantamento teve por finalidade identificar trincas e rachaduras nos detalhes de gesso e azulejos das paredes do castelo, além de gerar um modelo digital da edificação para posterior criação de um passeio virtual. Para fins deste trabalho foram usados os dados desse levantamento de campo, onde foi selecionado apenas uma parte do levantamento da edificação. Foi selecionada uma parte da edificação que continha o adorno arquitetônico de uma das pilastras da entrada de acesso principal, por possuir relevantes detalhes arquitetônicos e viabilidade de acesso para a realização do segundo levantamento. Assim, posteriormente, usando a mesma parte da edificação, foi realizado um novo levantamento, fazendo uso do DTM modelo *XYZPrinting 3D Scanner Pro 1.0*.

Foram gerados dois modelos 3D digitais, um proveniente do LST e outro do DTM. Com os modelos 3D digitais gerados, foi realizada a análise estatística da acurácia métrica entre eles. E, em paralelo, foi feita a impressão 3D dos modelos digitais para verificar a análise da qualidade visual, com base na acurácia visual de um dos autores deste trabalho. Para realizar estas etapas foram utilizados os softwares: *CloudCompare*, *Meshmixer*, *XYZscan Handy*, *PrusaSlicer* e o *GOM inspect 2019*, todos gratuitos.

GERAÇÃO E IMPRESSÃO DO MODELO 3D COM DADOS PROVENIENTE DO LST

De posse dos dados provenientes do LST, gentilmente cedidos pela Fiocruz para fins deste trabalho, empregando-se o *software CloudCompare*, e fez-se um recorte da cena da região de estudo, resultando em uma cena com aproximadamente quatorze milhões de pontos. A esse recorte aplicou-se o cálculo das normais para cada ponto da nuvem. É importante ressaltar que o cálculo das normais é um método usado pelo *CloudCompare* para converter uma nuvem de pontos em uma malha triangular. O *CloudCompare* é um *software* para processamento de nuvem de pontos 3D e malha triangular, que realiza esse cálculo automaticamente (LENARTOVICZ et al., 2014). Entretanto, na versão 2.11, é necessário usar a ferramenta inversão após o procedimento para que a malha triangular seja produzida no interior da nuvem. A Figura 4 ilustra a nuvem de pontos da área delimitada como região de estudo.

Figura 4 – Nuvem de pontos da área selecionada: (I) vista em perspectiva e (II) frontal.



Fonte: Autoria própria (2020).

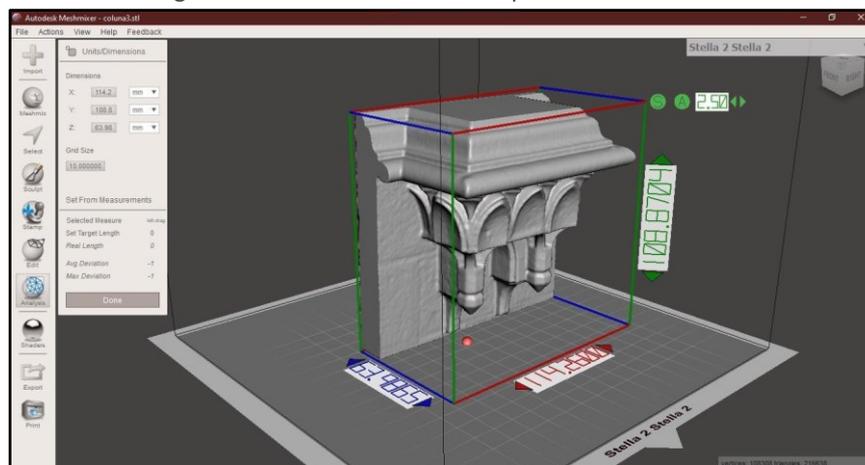
O tempo que o *software* necessita para calcular as normais varia de acordo com o poder de processamento do computador utilizado e com a quantidade de pontos processados, por isso também foi aplicada a função *Statistical Outlier Filter*

para retirar os pontos mais afastado da nuvem, o que resultou em uma nova nuvem de aproximadamente duzentos e dez mil pontos, a fim de facilitar o processamento dos dados em um computador pessoal. A função *Statistical Outlier Filter* também é necessária para retirar pessoas, insetos e outros objetos que eventualmente sejam escaneados e não fazem parte da peça original. Desta forma evita-se deformações na geral do modelo 3D digital.

Com a nuvem de pontos normalizada o próximo passo foi transformá-la em uma malha triangular. Para isso, o *software* utiliza o algoritmo proposto por Misha Kazhdan: a reconstrução de superfície de *poisson*. A reconstrução de superfície de poisson cria triângulos entre os pontos formando uma superfície sobre a nuvem de pontos. Para aplicar esse algoritmo, a nuvem de pontos 3D deve ter normais bem orientadas e forma 3D fechada, ou seja, possuir todas as faces. Entretanto, no *CloudCompare* é possível controlar a triangulação da nuvem de pontos e obter uma malha válida, mesmo em uma nuvem com forma 3D aberta. Tal procedimento é descrito no manual do *software*.

Vale ressaltar que a reconstrução de superfície de *poisson* possui parâmetros padronizados. São eles: *sample per node*, *full depth*, *point weight* e, o principal, *octree depth*. Este último parâmetro indica o tamanho da malha triangular a ser criada, ou seja, quanto maior o valor de *octree depth* melhor será o resultado obtido, porém também será maior o tempo necessário para sua conclusão (CLOUDCOMPARE, 2017). Por padrão, o *octree depth* tem valor 8. Neste trabalho, o melhor resultado de conversão, ou seja, a melhor definição dos detalhes da peça, foi obtido com a *octree depth* de valor 10. Com a malha triangular pronta, o modelo foi exportado para o *software Meshmixer* para transformá-lo em um modelo 3D sólido, em formato STL (Figura 5).

Figura 5 – Modelo 3D dos dados provenientes do LST



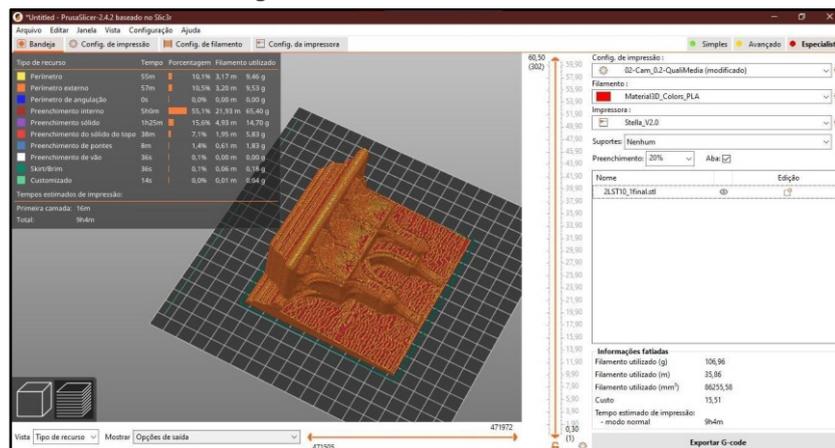
Fonte: Autoria própria (2022).

O *Meshmixer* é um *software* gratuito da *Autodesk* específico para edição de malha triangular (GHERARDINI e SIROCCHI, 2022). Com o *Meshmixer* é possível corrigir a posição e escala de impressão da peça (já que o *CloudCompare* trabalha com medidas reais), fazer recortes de alta qualidade na peça sem criar furos e tornar a malha sólida.

Após o procedimento de modelagem 3D da feição, a próxima etapa foi preparar o modelo para ser impresso. Com a malha transformada em um objeto

sólido foi possível utilizar um *software* de fatiamento para gerar o arquivo de impressão 3D. Esta etapa ocorreu por meio do *software PrusaSlicer*. O *software PrusaSlicer* é um *software* de fatiamento gratuito desenvolvido com base no projeto de código aberto *Slic3r* que prepara o modelo 3D digital, em formato STL, para dividi-lo em camadas por meio de parâmetros de impressão. O *layout* do *software* é apresentado na Figura 6, onde foram atribuídos ao modelo A, proveniente dos dados LST, os parâmetros de impressão, tais como o tipo e a densidade de preenchimento da peça, a altura das camadas, a temperatura do bico, a velocidade de impressão e outros.

Figura 6 – Fatiamento do modelo A



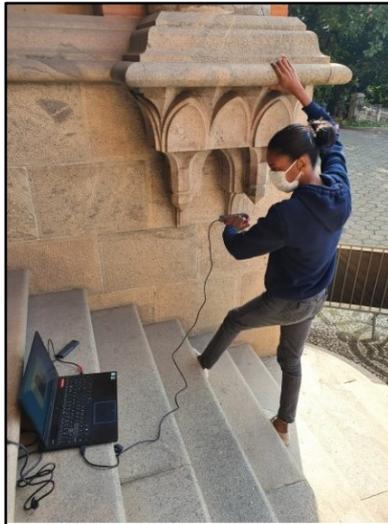
Fonte: Autoria própria (2022).

O arquivo G-Code gerado foi transferido para a impressora 3D Stella 2 por meio de um cartão de memória. Foi utilizado o material PLA na cor vermelha e preenchimento com densidade de 20% do tipo *Grid*. Todo o processo de impressão do modelo A, proveniente dos dados LST, durou aproximadamente nove horas e quarenta minutos, foi feito em 302 camadas e usou trinta e seis metros de filamento.

LEVANTAMENTO DE CAMPO E IMPRESSÃO DO MODELO 3D COM DADOS PROVENIENTES DO DTM

Neste trabalho foi utilizado o *DTM 3D Scanner Pro 1.0*, o mesmo equipamento utilizado no trabalho de Pereira e Fosse (2020) cujo resultado dos testes o apontou como um DTM de baixo custo que produz bons resultados em comparação com outros digitalizadores. O levantamento de campo que utilizou o DTM foi feito na mesma região de estudo do modelo A. Para realizá-lo, foi necessário utilizar um computador em conjunto com o DTM, como ilustrado na Figura 7. Antes da digitalização, foi necessário instalar o *software XYZscan Handy* no computador, pois é o *software* requerido para o funcionamento do equipamento.

Figura 7 – Levantamento de campo



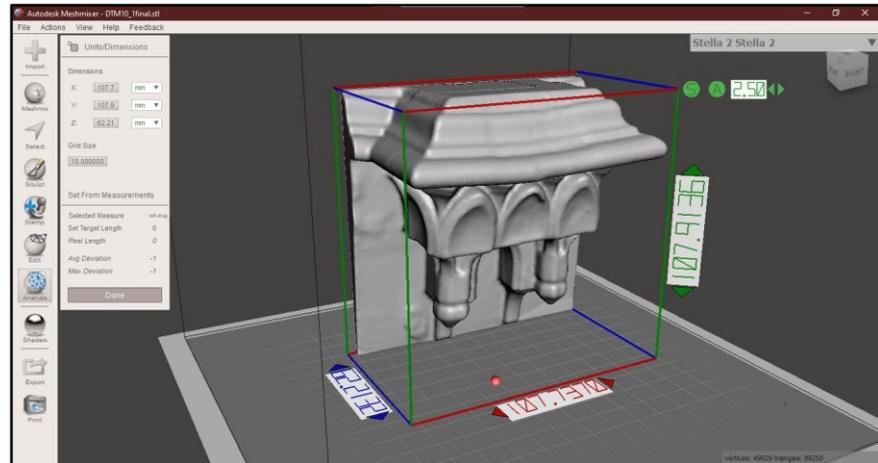
Fonte: Autoria própria (2022).

O software *XYZscan Handy* possui quatro modos de digitalização: cabeça (80 x 50 x 80 cm), objeto (60 x 60 x 30 cm), corpo (100 x 100 x 200 cm) e máscara (formato do rosto). Apesar do fabricante do equipamento informar que o modo corpo tem capacidade de digitalizar objetos com até dois metros de comprimento, na prática isso não foi possível. Mesmo com um *Notebook Dell G5 15-5590*, de processador *Intel 9ª* geração i7, 16GB de memória, placa de vídeo *NVIDIA(R) GeForce RTX (TM) 2060 6GB*, mais robusto e de acordo com as especificações indicadas pelo fabricante do DTM, o modo corpo de digitalização parava durante o processo de captura e não permitia completar a digitalização. Desta forma optou-se por utilizar o modo objeto e realizar a captura do adorno arquitetônico da pilastra por partes. Ao todo o adorno foi digitalizado em doze partes, gerando doze arquivos, no tempo de uma hora e vinte minutos de digitalização.

O software *XYZscan Handy* possibilita a visualização do objeto durante a digitalização e realiza o processamento da nuvem de pontos em paralelo. A transformação da nuvem de pontos para malha triangular ocorre de forma automática. Ao término da digitalização, parcial ou total do objeto, é necessário salvar o arquivo gerado.

De posse dos doze arquivos gerados, foi feita a união das partes para se ter um arquivo único e com o modelo completo. Para isso, foi usado o software *CloudCompare*. Vale ressaltar que o *CloudCompare* precisa que sejam indicados pelo usuário, no mínimo quatro pontos, em comum entre as malhas, para alinhá-las e calcular o erro. O procedimento é feito a cada par de malhas até se chegar ao modelo final. Depois o modelo 3D final foi exportado para o software *Meshmixer* e transformado em um modelo 3D sólido, em formato STL, conforme ilustra a Figura 8.

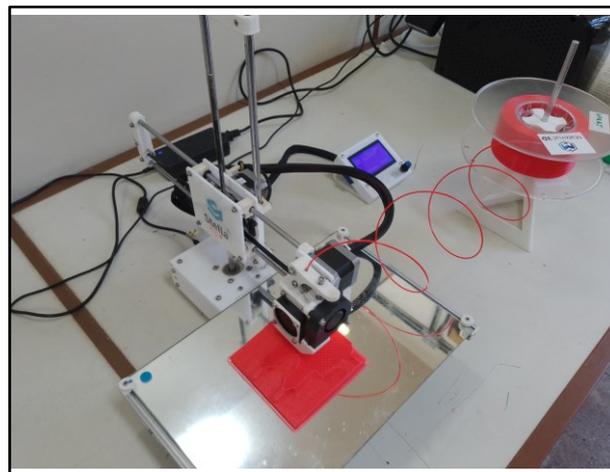
Figura 8 – Modelo 3D dos dados provenientes do DTM



Fonte: Autoria própria (2022).

Após o procedimento de modelagem 3D da feição, a próxima etapa foi preparar o modelo para ser impresso (Figura 9). Essa etapa também utilizou o *software PrusaSlicer* e foram aplicados os mesmos parâmetros de fatiamento e impressão utilizados para a impressão 3D do modelo A. O arquivo G-Code gerado foi transferido para a impressora 3D Stella 2 por meio de um cartão de memória. Todo o processo de impressão do modelo B, proveniente dos dados DTM, durou aproximadamente oito horas e quarenta e cinco minutos, foi feito em 306 camadas e usou trinta e cinco metros de filamento.

Figura 9 – Impressão do modelo em 3D



Fonte: Autoria própria (2022).

RESULTADOS

Com base nos trabalhos realizados em Thiago (2017) e Pereira e Fosse (2020), há necessidade de se utilizar um modelo como referência, fiel à geometria da região e estudo, ou seja, do adorno arquitetônico. Nesse caso, todas as comparações tiveram como referência os dados obtidos por meio do equipamento LST, além de dados complementares oriundos de fotos e medidas obtidas em

campo. Esses dados foram utilizados como base de análise dos parâmetros: análise estatística e qualidade visual.

ANÁLISE DOS PARÂMETROS: ANÁLISE ESTATÍSTICA

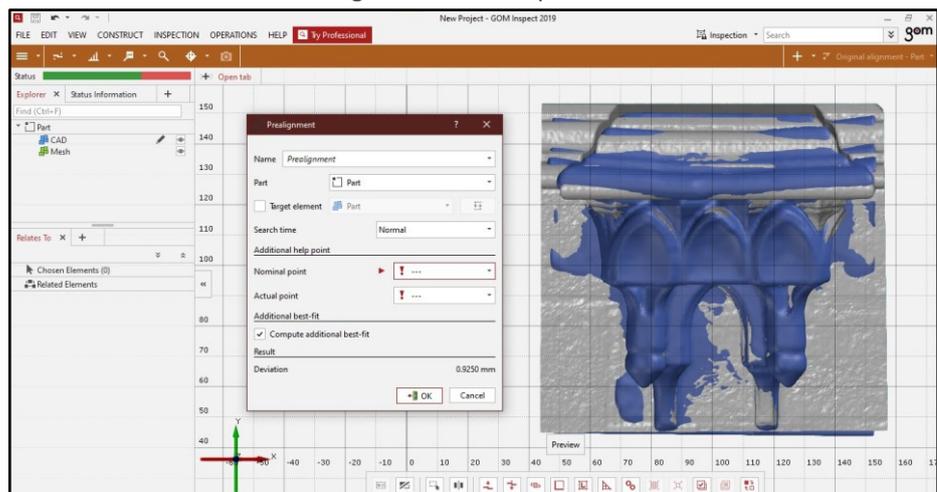
Para a análise estatística, foi utilizado o *software GOM Inspect 2019*. Este *software* realiza medições tridimensionais para análise de dados a partir de *scanners a laser* e outros tipos de digitalizadores, apresentando numericamente os resultados obtidos. Para isso, o *software* necessita que seja informado o modelo de referência e o modelo a ser inspecionado. Desta forma, foi indicado o modelo A como referência e o modelo B como sendo aquele a ser inspecionado.

Para a avaliação dos dados obtidos neste trabalho, seguiu-se os mesmos parâmetros usados em Pereira e Fosse (2020). Neste caso, foi atribuído ao *software*, o valor de referência de 6 milímetros, com tolerância de 0,1 milímetros. A partir desses parâmetros o *software* gerou o valor máximo positivo e o valor máximo negativo, apresentando uma escala visual com as diferenças entre o modelo A e o modelo B, além do desvio padrão.

É importante destacar que a escala de cores presente ao lado do modelo, na tela do *software*, segue o padrão usado nos estudos anteriores. A cor vermelha representa o valor máximo positivo e a cor azul representa o valor máximo negativo, já as áreas em cinza, representam as distâncias que ultrapassaram o valor previamente estipulado, ou seja, +/- 6 milímetros.

Ao realizar o alinhamento automático entre os modelos A e B, o *software* apontou que ocorreu um desvio padrão de 0,925 milímetros (Figura 10). Vale ressaltar que o desvio padrão de 0,925 milímetros avaliou os modelos A e B na escala de plotagem e não nas dimensões reais da peça, ou seja, está indicando o quanto os modelos STL para impressão são diferentes.

Figura 10 – Desvio padrão



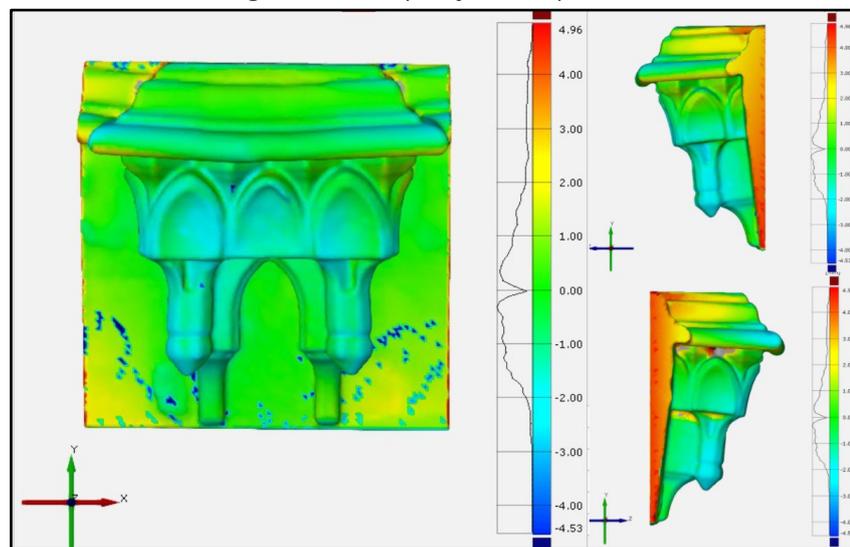
Fonte: Autoria própria (2022).

Após o alinhamento, foi realizada a comparação das superfícies. Nessa etapa o *software* calculou onde ocorreram distorções no modelo B e as representou em uma escala de cores (Figura 11). Na escala de cores apresentada pelo *software*, a

cor verde indica que as duas superfícies são iguais, e à medida que as cores são alteradas, significa que há uma maior diferença entre as medidas das duas superfícies.

No histograma apresentado na Figura 11 é possível observar que a maioria da área representada corresponde a cor verde e azul claro, ou seja, uma diferença de até ± 2 milímetros do modelo B em relação ao modelo A, o que indica uma boa semelhança no formato dos modelos. As poucas áreas em vermelho e amarelo indicam que o modelo B teve um afundamento, ou seja, essas regiões quando alinhadas ao modelo A ficaram no interior do modelo de referência. As áreas em azul escuro ilustram o oposto, indicando as regiões do modelo B que estão no exterior do modelo A.

Figura 11 – Comparação de superfície



Fonte: Autoria própria (2022).

No gráfico de cores é possível observar que o modelo B ficou dentro da tolerância da distância máxima exigida de 6 milímetros. As distâncias máximas calculadas pelo *software* foram -4,53 milímetros de elevação e 4,96 milímetros de depressão em relação ao modelo A. Assim a média das distâncias é de $4,745 \pm 0,925$ milímetros.

ANÁLISE DOS PARÂMETROS: QUALIDADE VISUAL

O parâmetro qualidade visual foi baseado na comparação das impressões 3D dos modelos A e B em relação ao adorno arquitetônico. Vale ressaltar que, a opção por comparar os modelos 3D impressos, e não os modelos 3D digitais, foi para facilitar a visualização dos modelos e otimizar o parâmetro qualidade visual, não entrando no mérito da qualidade da impressão 3D. Essa comparação visa apontar qual modelo melhor representa a peça original e, para realizá-la, foi necessário cumprir duas etapas.

A primeira etapa foi, após o levantamento de campo utilizando o DTM, obter as medidas por trena do adorno da pilastra (Figura 12) e inspecionar os modelos 3D impressos (Figura 13). As medidas reais do adorno são 1,32 m de largura, 0,40

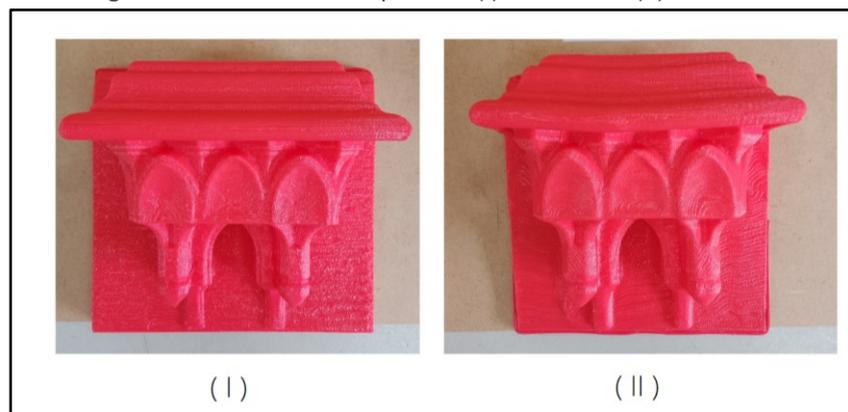
m de profundidade e 0,88 m de altura (1320 mm x 400 mm x 880 mm). Os modelos 3D impressos foram escalonados para 1/8 em relação à peça original. Essa proporção foi escolhida por causa do tamanho da bandeja de impressão da impressora 3D Stella 2, que é de 200 mm x 200 mm x 200 mm, respectivamente largura x profundidade x altura, essa ordem foi adotada para todas as medidas realizadas neste trabalho. Desta forma o modelo A impresso obteve as dimensões finais de 113,65 mm x 62,37 mm x 107,80 mm. Já o modelo B impresso obteve as dimensões finais de 107,73 mm x 62,85 mm x 107,22 mm. Com esses valores é possível afirmar que o modelo B impresso sofreu um achatamento na largura.

Figura 12 – Medição por trena do adorno



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 13 – Modelos 3D impressos: (I) modelo A e (II) modelo B

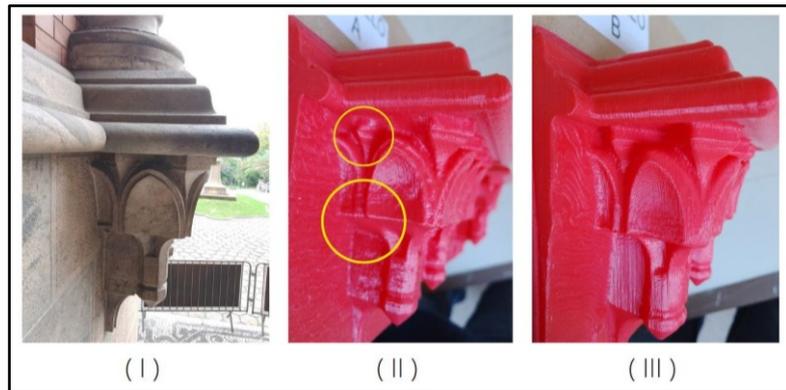


Fonte: Autoria própria (2022).

O resultado da impressão foi satisfatório, pois os modelos impressos preservaram as principais características da peça original. Entretanto, observa-se uma imperfeição do modelo A, causada por falhas de preenchimento na nuvem de pontos. Vale lembrar que o modelo A foi gerado a partir de um recorde na nuvem de pontos de um levantamento maior, que abrangeu toda a edificação. Nesse sentido, a posição do equipamento LST foi feita no centro do corredor de entrada do castelo, a uma distância aproximada de 3 metros da pilastra e em altura mais

elevada. Por esse motivo, ocorreu obstrução de sinal durante a captura dos pontos em um dado intervalo angular, gerando espaços vazios na nuvem. Consequentemente, mesmo após a reconstrução de *poisson*, a maior parte das áreas sem pontos foram preenchidas de forma simples, destoando da riqueza de detalhes apresentada no restante do modelo A impresso. Essas imperfeições estão ilustradas na Figura 14 (II), nos círculos em destaque. A Figura 14 (I) apresenta a lateral esquerda da peça original, (II) a lateral esquerda do modelo A preenchida pela reconstrução de *poisson* e a (III) lateral esquerda do modelo B.

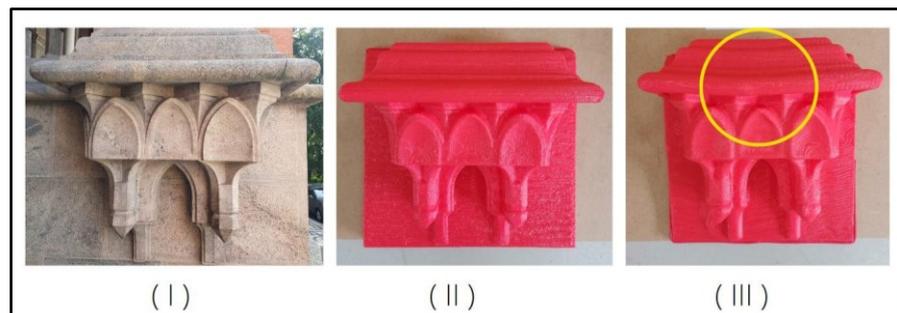
Figura 14 – Imperfeições no modelo A impresso: (I) peça original; (II) modelo A impresso e (III) modelo B impresso



Fonte: Autoria própria (2022).

Já o modelo B, apresentou algumas distorções na parte superior do adorno da pilastra. A principal distorção ocorrida foi uma curvatura na borda superior do modelo B, conforme pode ser observado na Figura 15 (III) no círculo em destaque. A Figura 15 (I) apresenta o objeto original em posição frontal e em (II) é apresentado o modelo A impresso, também em posição frontal. Uma das prováveis causas dessa distorção ocorrida no modelo B, foi a incidência de sol diretamente na câmera do digitalizador. A luz solar pode ter causado a reflexão do sinal da projeção de luz infravermelha prejudicando a precisão da digitalização, mesmo tendo sido usado uma proteção solar sobre o DTM no momento da digitalização. Outro fator de provável prejuízo ao modelo B foi o fato do levantamento ter sido realizado por partes. Este fato propiciou a ocorrência de erros durante o alinhamento das malhas triangulares. Na tentativa de minimizar esses erros cada alinhamento foi reajustado três vezes, os melhores resultados obtidos ficaram em torno de 0,6 milímetros.

Figura 15 – Imperfeições no modelo B impresso: (I) peça original; (II) modelo A impresso e (III) modelo B impresso



Fonte: Autoria própria (2022).

A segunda etapa da análise visual foi comparar os modelos com a peça original. Para tal, foi disponibilizada uma fotografia, em tamanho A4, do objeto original, ou seja, do adorno da pilastra, e os dois modelos 3D impressos, A e B, colocados lado a lado, fixados sobre uma chapa de fibra de madeira (Figura 16). Durante o procedimento, o observador procurou por diferenças entre os modelos impressos e a fotografia do objeto original, com o objetivo de verificar se os detalhes arquitetônicos do objeto original, visíveis a olho nu, foram registrados pelos equipamentos usados. É importante ressaltar que tal procedimento, por ser visual, depende da percepção de cada operador.

Figura 16 – Análise do parâmetro qualidade visual



Fonte: Autoria própria (2022).

Os dois modelos 3D impressos apresentaram virtudes e defeitos. O modelo A guardou os detalhes de arcos duplos presentes no meio da peça original e contém os contornos da base com boa definição. Já o modelo B apresentou toda a geometria da peça original mas sem a mesma qualidade na descrição das linhas retas, pois várias quinas tiveram seu formato arredondado. Assim, pode-se dizer que o modelo A melhor representou o adorno, pois os espaços vazios na nuvem de pontos não causaram uma diferença significativa em relação ao objeto original. Porém, pode-se dizer que a diferença ocorrida na curvatura na borda superior do modelo B foi significativa.

CONCLUSÕES

Ao observar a nuvem de pontos do adorno, oriunda do levantamento do LST, é possível perceber que os dados são uma junção de duas cenas: uma escaneada a partir do corredor e a outra escaneada a partir da calçada. É possível verificar que no lado esquerdo, na região abaixo do nível do corredor existem locais sem pontos, enquanto no lado direito a nuvem de pontos é bastante densa, o que indica a dificuldade do LST de escanear áreas muito abaixo da altura onde ele está estacionado. Infelizmente, não foi possível preencher esses espaços vazios durante o processamento dos dados, resultando em imperfeições no lado esquerdo do modelo A. Já o DTM apresentou dificuldade de digitalização em dias ensolarados, o que também causou imperfeições no modelo B.

De acordo com análise estatística, a média da diferença máxima entre os modelos 3D digitais gerados é de 4,7 milímetros, e menor do que o valor indicado na literatura para comparação de superfícies, que é de 6 milímetros com tolerância de 0,1 milímetro. Com esse resultado é possível afirmar que o DTM *3D Scanner Pro*

1.0 realizou uma captura 3D, com uma precisão similar ao LST Leica RTC 360, sob as condições deste trabalho, ou seja, considerando áreas pequenas, elevado grau de detalhes e para o modelo escalonado voltado para a impressão 3D.

Na análise visual, pode-se dizer que, mesmo com a ocorrência de distorções dimensionais no modelo B impresso na borda superior com uma curvatura e o achatamento do modelo na largura, o DTM preservou muitos detalhes do adorno. A captura do detalhamento foi possível devido à facilidade de operar o DTM. Uma vez que o equipamento é manual, permite uma digitalização de todos os ângulos e direções, desde que haja uma distância para a captura da imagem, que é entre 30 e 50 cm do objeto. Desta forma pode-se concluir que os parâmetros de análise são complementares, pois as distorções pontuadas pela análise visual também foram calculadas pelo *software GOM Inspect 2019*, já mencionado no parágrafo anterior. O mesmo pode ser concluído sobre os modelos A e B pois, onde um apresenta imperfeições, o outro tem bons resultados. Portanto, para trabalhos futuros sugere-se a utilização desses equipamentos em conjunto.

Segundo informações da equipe que fez o levantamento de campo com o LST, foi necessário cerca de uma semana para capturar todo o prédio do Castelo Mourisco. Não foi possível precisar o tempo de escaneamento do adorno arquitetônico da pilastra, pois as áreas de fachada e escadaria foram capturadas a partir dos corredores e calçadas, ao longo de toda a semana. Já a digitalização com o DTM durou uma hora e vinte minutos. Desta forma pode-se afirmar que, guardada as devidas proporções, os dois equipamentos produzem bons resultados com pouco tempo de levantamento.

Vale ressaltar que boa parte do tempo necessário para a execução do levantamento com o DTM foi gasto na tentativa de minimizar os efeitos da reflexão do sinal da projeção de luz infravermelha. O levantamento de campo foi planejado para um horário em que a incidência de luz solar não estivesse sobre o adorno, porém o DTM precisou ser movimentado e mantido a uma certa distância padrão do objeto a ser escaneado, o que resultou na dificuldade de captura da cena. Infelizmente a luz solar atrapalhou a projeção de luz infravermelha gerando imperfeições no modelo B. Portanto, recomenda-se em trabalhos futuros evitar a digitalização em dias muito ensolarados.

Considerando que o LST custa em torno de 70.000 dólares e consegue escanear uma área de milhares de metros quadrados com elevada acurácia, obter um resultado de um levantamento proveniente do DTM próximo ao resultado do levantamento proveniente do LST é um ganho, uma vez que o DTM *3D Scanner Pro 1.0* custa cerca de 500 dólares. Portanto, pode-se considerar que o uso de equipamentos DTM é uma boa alternativa aos equipamentos LST, para fins de geração de modelos 3D de áreas pequenas de elevado grau de detalhamento em escala para impressão.

Quality analysis of data from a handheld three-dimensional scanner compared to a terrestrial laser scanner for modeling and 3D printing purposes of small historical heritage

ABSTRACT

The cost of preserving a historical heritage is often linked to the storage of architectural details information that are present on the site. One of the equipment used to obtain the metric information of the architectural details of a building is the Terrestrial Laser Scanner (TLS), which has a significantly high price. Thus, this research sought an alternative to the cost of TLS based on an analysis of a 3D model from a Handheld 3D Scanner. In this way, a survey already carried out with the TLS, model RTC360, at Fiocruz headquarters in the city of Rio de Janeiro - RJ was used and, in the same place, another survey was carried out using the Handheld 3D Scanner, model 3D Scanner Pro 1.0 . Subsequently, the processing and modeling of the data from the two surveys took place. To compare the quality of the generated digital 3D models, two parameters were established: statistical analysis and visual quality. Statistical analysis considered the variables: average of maximum distances and standard deviation. The result of this statistical analysis pointed out that the Handheld 3D Scanner performed a 3D capture in small areas with a similar metric accuracy to that of the TLS. The visual quality considered the measurements and similarities between the two generated 3D models and the original building feature, which demonstrated that the characteristics of the original part were preserved by the Handheld 3D Scanner. The result showed that the quality of the data from the Handheld 3D Scanner, 3D Scanner Pro 1.0, and the TLS, RTC 360, were similar for small areas with a high degree of detail.

KEYWORDS: Terrestrial Laser Scanner. Handheld 3D Scanner. 3D Modeling. Historical Heritage.

AGRADECIMENTO

À FioCruz por apoiar e disponibilizar os dados LST utilizados neste trabalho e pela a disponibilidade de datas para a realização dos levantamentos de campo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA FIOCRUZ. Construções históricas tornam-se patrimônio da saúde pública brasileira. Agência FioCruz de notícias, Rio de Janeiro, 25 mai. 2018. Disponível em: <https://agencia.fiocruz.br/construcoes-historicas-tornam-se-patrimonio-da-saudepublica-brasileira>. Acesso em: 01 jun. 2020.

ANDRADE, H. J. L. F. de. **Varredura a laser aplicada na reconstrução 3D de bens materiais do patrimônio histórico de Igarassu e Olinda**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2012. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/10218/1/Dissertacao_Versao_Definitiva_Henrique%20Jose%20Lins%20Ferreira%20de%20Andrade.pdf. Acesso em: 01 jun. 2020.

BEIRÃO, C. C. B. **O potencial do laser scanner terrestre para o inventário do patrimônio arquitetônico**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/95470/300159.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 jun. 2020.

BONFADA, C. de F. **Digitalização 3D de peças em bronze do patrimônio cultural de Porto Alegre para confecção de réplicas em caso de desaparecimento**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/204575/001109327.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 jun. 2020.

BORGES, P. A. F. et al. Avaliação da precisão posicional de um Sistema Laser Scanner Terrestre AM-CW a partir de uma placa de esferas 3D. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 70, n. 3, p. 906-931, 2018. <https://doi.org/10.14393/rbcv70n3-45706>. Acesso em: 01 jul. 2023.

CAVALCANTE, R. B. L. A utilização do 3d laser scanning para levantamento de fachadas do centro histórico de Porto Nacional –TO. **Revista Interface**, Tocantins, n. 09, p. 88-94. 2016. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/interface/article/view/1914/8559>. Acesso em: 01 jun. 2020.

CLOUDCOMPARE. CloudCompare Version 2.6.1: User manual. 2017. Disponível em: <http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>. Acesso em: 20 set. 2020.

COGIMA, C. K. **BIM aplicado ao patrimônio histórico baseado em levantamento híbrido com multisensores**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=481215>. Acesso em: 01 jun. 2020.

COGIMA, C. K.; NASCIMENTO, R. V. C.; PAIVA, P. V. V.; CARVALHO, M. A. G.; DEZEN-KEMPTER, E. Scan-to-HBIM aplicado à igreja da Pampulha de Oscar Niemeyer. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.15, n.1, p.117-134, jan. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.116/gtp.v14i1.152828>. Acesso em: 01 jun. 2020.

COSTA, A. B. da; CRUZ, D. R. N.; ALESSIO, K. O.; GARCIA, A. D.; ROTHMUND, K.; CARVALHO, F. S. de; BARIN, J. S.; TEDESCO, L. P.. Aplicação da termografia por infravermelho para titulações termométricas. **Orbital: The Electronic Journal of Chemistry**, v. 7, n. 2, p. 196–201, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/orbital/article/view/17890>. Acesso em: 01 jun. 2020.

DEZEN-KEMPTER, E.; SOIBELMAN, L.; CHEN, M.; MÜLLER, A.V. Escaneamento 3D a laser, fotogrametria e modelagem da informação da construção para gestão e operação de edificações históricas. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 113-124. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v10i2.102710>. Acesso em: 01 jun. 2020.

FREITAS, G. **Metodologia e aplicabilidade da digitalização 3D a laser no desenvolvimento de moldes para calçados e componentes**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/10982/000603126.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 jun. 2020.

GHERARDINI, F.; SIROCCHI, S. Systematic integration of 2D and 3D sources for the virtual reconstruction of lost heritage artefacts: the equestrian monument of Francesco III d'Este (1774–1796, Modena, Italy). **Heritage Science**, v. 10, n. 1, p. 96, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40494-022-00711-8>. Acesso em: 01 jul. 2023.

LEICA. LEICA RTC 360 Versão 1.0: User manual. [S.l.], 2018. Disponível em: https://www.geooptic.ru/static/files/870891_Leica_RTC360_UM_v1.0.1_en.pdf. Acesso em: 01 jun. 2020.

LENARTOVICZ, I. R.; VEIGA, L. A. K.; FAGGION, P. L.; NADAL, C. A.; SOARES, M. A. Potential evaluation of the Terrestrial Laser Scanner in structural monitoring: case study Maua HPP. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 66, 2014. DOI: 10.14393/rbcv66n0-44744. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44744>. Acesso em: 8 jul. 2023.

MUNIZ, G. R.; SILVA, F. P. da; KINDLEIN JÚNIOR, W. Design, tecnologia e patrimônio: digitalização tridimensional como ferramenta de preservação de elementos de prédios históricos. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 13, n. 2, p. 53–66, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v13i2.138358>. Acesso em: 01 jun. 2020.

PEREIRA, I. S.; FOSSE, J. M. Avaliação de Digitalizadores Tridimensionais de Baixo Custo para Reprodução de Produtos Cartográficos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 3, p. 415-427, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/rbcv72n3-53867>. Acesso em: 01 jun. 2020.

SILVA, M. N.; BUCK, A. L. B.; LINGNAU, C.; MACHADO, A. M. L.; MARTINS NETO, R. P.; PESCK, V. A. Laser Scanner Terrestre para medições florestais - princípios e aplicações. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 065/6, p. 1143-1152, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Rorai-Pereira-Martins-Neto/publication/270703366_Terrestrial_Laser_Scanner_for_Forestry_Measurements_-_Principles_and_Applications/links/54b32c400cf2318f0f953f6c/Terrestrial-Laser-Scanner-for-Forestry-Measurements-Principles-and-Applications.pdf. Acesso em: 01 jun. 2020.

THIAGO, B. B. **Análise de sistemas de digitalização de baixo custo para utilização no desenvolvimento de órteses de membros superiores para crianças com deficiência sensorio motora**. Trabalho de conclusão — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10471/1/CT_DAMEC_2017_1s_41.pdf. Acesso em: 01 jun. 2020.

WUTKE, J. D. **Métodos para a Avaliação de um Sistema Laser Scanner Terrestre**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2006.

XYZPRINTING. 3d Scanner Pro 1.0. XYZPrinting, 2020. Disponível em: <https://www.xyzprinting.com/pt-BR/product/3d-scanner-pro>. Acesso em: 20 mai. 2020.

ZUÑIGA, L. D. O. **Método de verificação do desempenho do scanner laser usando um artefato tridimensional**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2014. Disponível em:

https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/17016/1/2013_LauraDanielaOrdieretzZ%c3%ba%c3%b1iga.pdf. Acesso em: 20 mai. 2020.

Recebido: 07 mar. 2023

Aprovado: 01 jul. 2023

DOI: 10.3895/rbgeo.v12n1.16504

Como citar: SANTOS, G. J.; FOSSE, J. M.; SOUZA, I. G. L. M. V.. Análise da qualidade dos dados provenientes de um digitalizador tridimensional manual em comparação com o laser scanner terrestre para fins de modelagem e impressão 3D de patrimônio histórico de pequeno porte. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 12, n. 1, p. 018-037, jan./jun. 2024. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Gláucia Justino dos Santos

Rua das Camélias, Lt.05 Qd.12, nº5, CEP 23855-220, Itaguaí, Rio de Janeiro, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

