



Digitalização do património cultural: reconstrução 3D e comparação dos modelos de duas estátuas *d'el* Rei D. Dinis

Jorge SIMÕES* e Gil Rito GONÇALVES

Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra
Departamento de Matemática, Universidade de Coimbra

(uc2009012235@student.uc.pt; gil@mat.uc.pt)

Palavras-chave: drone, fotogrametria digital, structure from motion, nuvens de pontos densas, comparação dimensional, património cultural

Resumo:

Na temática da preservação e perpetuação do património cultural, as diferentes tecnologias de aquisição de dados de muito alta resolução são uma mais-valia na digitalização tridimensional (3D) de objetos de elevado interesse patrimonial. Estas tecnologias permitem armazenar em suporte digital modelos 3D de obras de arte com alta resolução e elevado detalhe foto-realístico, preservando um legado do passado e servindo de base para que, em momento futuro, seja possível proceder a eventuais restauros ou inclusivamente à sua completa reconstituição 3D, devido à ação de fatores naturais ou antrópicos.

Este estudo descreve o trabalho realizado na estátua bem conhecida da comunidade académica na Alta Universitária de Coimbra, a estátua *d'el* Rei D. Dinis, a qual foi comparada com o seu arquétipo em exposição no Museu José Malhoa, na cidade das Caldas da Rainha. A metodologia utilizada na digitalização 3D da estátua de Coimbra e do seu arquétipo consistiu em *workflows* fotogramétricos de *structure from motion* e *multiview-stereo* (SfM-MVS), utilizando um drone em Coimbra e fotogrametria terrestre com bastão, usando uma câmara *digital single-lens reflex* (DSLR), no museu das Caldas das Rainha.

Utilizando as nuvens de pontos densas geradas em cada *workflow* fotogramétrico, foi feita a comparação de ambas em 2D, 2.5D e em 3D. Para fazer a comparação 3D selecionaram-se pontos homólogos nas duas nuvens densas, testando dois métodos: o primeiro sem usar um fator de escala e o segundo aplicando diferentes escalas aos eixos XYZ. O último resultou numa matriz de transformação 4x4, o que permitiu chegar aos resultados que mostram as maiores diferenças posicionais e de escala da réplica para o seu arquétipo. Para os casos 2D e 2.5D foram criados ortofotos das duas estátuas em diferentes perspetivas, aplicando-lhes matrizes de rotação para as situar nas várias perspetivas, e daí lhes extrair os contornos e permitir uma comparação dimensional; no caso particular da comparação 2.5D fez-se a análise usando curvas de nível que permitiu extrair as características dimensionais a partir de uma perspetiva superior.

Por fim, fazendo uso dos pontos homólogos, ambas foram escaladas e sobrepostas, permitindo obter um mapa de distâncias absolutas entre uma e outra, resultando numa demonstração visual das diferenças e omissões da réplica para com o seu arquétipo, mostrando que a estátua de Coimbra é uma réplica muito aproximada da estátua em gesso no museu, não deixando de ser uma obra de maestria do seu escultor que conseguiu quase total igualdade nas suas facetas esculpidas em rocha branca, vítima dos elementos e de algum vandalismo. Por tais ataques é de todo importante a preservação e perpetuação deste legado para as gerações futuras.



1. Introdução

A digitalização tridimensional (3D) do património cultural, abrangendo elementos como estátuas, fachadas e objetos arqueológicos, emerge como uma ferramenta crucial para a conservação. Esta abordagem permite a criação de modelos fotorrealistas e detalhados, essenciais para a preservação a longo prazo. A transformação de objetos do mundo real em representações digitais, através de nuvens de pontos ou malhas triangulares, assegura não apenas um registo duradouro, mas também a capacidade de realizar análises periódicas, planear processos de restauro e até mesmo reproduzir réplicas, conforme destacado por Girelli et al. (2020).

A necessidade premente de conservar e perpetuar o património cultural motiva o recurso à digitalização, como salientado por Pieraccini et al. (2001). Além disso, diversos motivos justificam a adoção desta prática, incluindo a produção de arquivos digitais, evitando métodos tradicionais como desenhos manuais ou fotografia. Esses arquivos digitais não só facilitam a exposição de réplicas exatas como também protegem contra roubo ou vandalismo, enquanto servem como base para a restauração em caso de danos.

Outras motivações incluem a produção de réplicas de alta fidelidade para fins comerciais ou turísticos, a fruição remota das obras de arte através da disponibilização de modelos 3D online, a possibilidade de restauro digital para intervenções manuais posteriores e a monitorização constante do património cultural. Essa monitorização é particularmente crucial, uma vez que muitos danos só se tornam visíveis quando já estão avançados, tornando vital um levantamento inicial à fisionomia da obra, como ressaltado por diversos estudos (Girelli et al., 2020; Pieraccini et al., 2001).

A aquisição de dados 3D sobre as obras de património, frequentemente inacessíveis ao manuseamento direto devido a sua localização ou dimensão, é realizada à distância, utilizando métodos como feixes de laser, luz pulsada e câmaras fotográficas acopladas a *drones* ou a outros veículos. Estes métodos, conhecidos e utilizados em diversas aplicações topográficas, são adaptados para a digitalização do património cultural, oferecendo resultados comparáveis a equipamentos mais dispendiosos (Smith et al., 2016; Massimiliano & Costantino, 2021).

O presente estudo assume como objetivos a comparação de arquétipos e réplicas em diferentes dimensões (2D, 2.5D e 3D), destacando-se como uma iniciativa pioneira em Portugal. Inspirado por práticas internacionais, como a digitalização do rico património italiano, especialmente esculturas renascentistas, ou os levantamentos pré-incêndio à Catedral de Notre Dame em Paris, este trabalho visa contribuir para o avanço da preservação do património cultural em território português.

2. Materiais e métodos

2.1 Caso de estudo

A estátua *d'el rey* D. Dinis na Alta Universitária de Coimbra é uma peça de arte esculpida por Francisco Franco (1885-1955) durante a Reforma da Universidade de Coimbra (1942-1969) em pleno Estado Novo. O Rei D. Dinis foi rei de Portugal entre 1279 e 1325, que de muitos feitos no seu reinado destaca-se a instauração da Universidade de Coimbra, homenageando-se a sua pessoa sob aquela escultura em plena Praça D. Dinis, no topo das Escadas Monumentais, sendo inaugurada em 1943. Esta estátua foi desenhada em conta com a arquitetura envolvente, de estilo rígido e monumental, transmitindo soberania, austeridade e rigidez, típicos de um regime Salazarista e das obras feitas durante o seu vigor, do qual o seu escultor era obediente (Direção Geral de Cultura do Centro, 2018). Este rei é também conhecido como o cônjuge da padroeira da cidade de Coimbra, Rainha Santa Isabel, sendo que esta estátua mais do simplesmente uma referência histórica e de afeto dos coimbricenses, é uma referência de Coimbra para o exterior e um símbolo da História Académica da Universidade de Coimbra.

Esta estátua foi feita em calcário a partir do seu arquétipo em gesso situado no museu José Malhoa, nas Caldas da Rainha, com menor dimensão e em base de madeira de carvalho. Pouco é sabido deste arquétipo, mas como se virá a confirmar que a estátua de Coimbra é uma réplica tão próxima da estátua em gesso, acreditamos ser o esboço que está por trás da imponente estátua no topo de um pedestal de pedra maciça na Universidade de Coimbra.

A digitalização das duas estátuas urge e surge como uma necessidade de criar modelos digitais de ambas, com o fim de as comparar e perpetuar, uma vez que a estátua de Coimbra é alvo de ataque dos elementos e de algum vandalismo, como alguns elementos que a constituíam ter acabado quebrados. Por outro lado, no seu ponto mais alto, a coroa e cabeça encontram-se sob constante ataque de musgos, onde as superfícies mais aplanadas permitem a sua permanência e onde abundam. O ataque da poluição do ar em meio urbano sob o calcário é outro fator preocupante, pelo que uma combinação de água acidificada escorrente e musgos tornam o calcário negro, acelerado pelos musgos que contribuem para a acidificação da água que em si preservam para sobreviver. Isto urge em preservá-la digitalmente para quando a extrema necessidade de a restaurar se impor.



Figura 1 – estátua d'el rey D. Dinis na Alta Universitária de Coimbra, na praça denominada com o seu nome



Figura 2 - arquétipo da estátua de D. Dinis, em espaço do museu José Malhoa, nas Caldas da Rainha, e o método de aquisição de dados utilizado (*pole photogrammetry*)

2.2 Materiais utilizados

Para fazer a digitalização das duas estátuas foram usados dois diferentes métodos, utilizando-se os materiais do Quadro 1. Na estátua das Caldas da Rainha recorreu-se ao uso de um bastão onde se acoplou uma câmara DSLR (*Digital Single-Lens Reflex*) e na estátua de Coimbra a aquisição de dados foi feita por intermédio de *drone*.

Quadro 1 - materiais usados para digitalização das estátuas e especificações técnicas das câmaras

	Coimbra	Caldas da Rainha
Tipo de equipamento	<i>Drone</i> DJI Phantom 4 Pro	Câmara DSLR
Modelo da câmara	Câmara aérea FC6310	Canon EOS 77D
Escala horizontal	Régua/mira de nivelamento geométrico	
Medição de escalas	Fita métrica	
Acessórios	Bastão telescópico	
Especificações das câmaras		
Sensor	CMOS 1"	22.3 mm x 14.9 mm CMOS
Pixels efetivos	~ 20 megapixels	~ 24.2 megapixels
Tamanho do pixel	3.72 μ m	2.41 μ m
Rácio / tamanho da imagem (pixels)	3:2 \rightarrow 5472 x 3648 4:3 \rightarrow 4864 x 3648 16:9 \rightarrow 5472 x 3078	3:2 \rightarrow 6000 x 4000 4:3 \rightarrow 5328 x 4000 16:9 \rightarrow 6000 x 3368 1:1 \rightarrow 4000 x 4000
Distância focal	De 8.8 mm a 24 mm	Até 17 mm

Para proceder à construção dos modelos digitais das estátuas foi usado um *software* proprietário (comercial) e para o tratamento dos dados e construção das comparações foram usados *softwares* de acesso livre, ou FOSS (*free and open source software*):

- Agisoft Metashape (comercial): processamento dos blocos de imagens usando SfM-MVS e obtenção de nuvens de pontos;
- CloudCompare (FOSS): alinhamento grosseiro e fino das nuvens de pontos, extração de ortofotos em diferentes planos coordenados, visualização, obtenção de distâncias entre nuvens (3D);
- QGIS (FOSS): extração de contornos a partir dos ortos (2D) e obtenção de curvas de nível (2.5D).



2.3. Metodologia

O procedimento para obter os modelos digitais das duas estátuas seguiu um *workflow* genérico fotogramétrico em SfM-MVS, tal como definido em Massimiliano & Costantino, 2021 ou em Pérez-Alvárez et al., 2019, passando pelos passos enunciados na Figura 3. O *workflow* divide-se em duas partes: 1) captura das fotografias às duas estátuas e obtenção de medições (escalas) para posicionamento de ambas nos diferentes planos coordenados; 2) tratamento dos dados em laboratório, onde se inclui o planeamento da aquisição fotogramétrica, análise dos dados e controlo de qualidade externa à estátua de Coimbra, por intermédio de uma nuvem adquirida por TLS (*terrestrial laser scanning*) para fins de um outro estudo prévio a este.

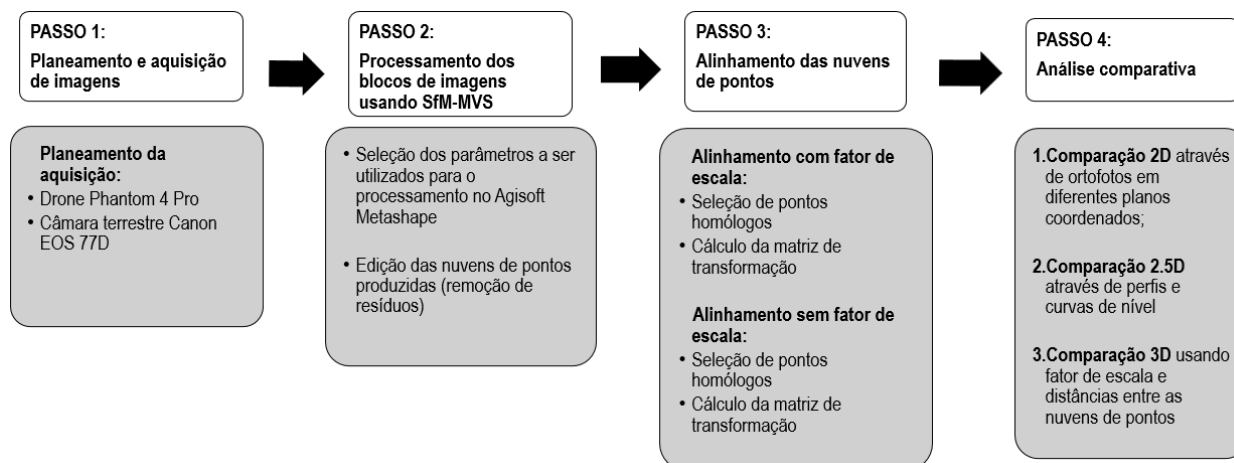


Figura 3 - *workflow* aplicado neste estudo

2.3.1 Planeamento e aquisição de imagens

A aquisição das imagens para o processamento fotogramétrico foi feita tendo em conta uma distância constante às duas estátuas, com uma distância focal e sensibilidade do obturador fixos. Dado que a estátua de Coimbra é de muito maior dimensão que a estátua das Caldas da Rainha, o voo por *drone* foi planeado sob a forma de anéis em torno da estátua, usando as coordenadas do recetor GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) incorporado, e uma régua de nivelamento geométrico foi deitada à frente da estátua para definir uma escala; nas Caldas da Rainha, a base de madeira foi medida nas quatro arestas superiores, definindo-se a escala e o eixo do X num plano nivelado XY, e na parede usaram-se dois pontos para definir o plano vertical. Usando o bastão, as fotografias foram adquiridas mantendo o bastão em altura constante face ao corpo do operador, assumindo uma sobreposição considerável entre fotografias; estando a câmara longe do alcance do operador para disparar o obturador, a ligação com a câmara foi feita via emparelhamento Wi-Fi com um tablet, onde foi possível disparar o obturador remotamente. De ressaltar que não se obtiveram fotografias nas costas da estátua, uma vez que não nos foi possível afastar a estátua da parede, conforme é possível constatar na Figura 2.

2.3.2 Processamento dos dados

Os dados foram processados no *software* Agisoft Metashape, usando para ambas as estátuas os seguintes parâmetros:

- alinhamentos das fotos e obtenção de nuvens esparsas: alta exatidão, limite de 60 mil pontos de interesse (*key points*) e 6 mil pontos de ligação (*tie points*);
- construção de nuvens densas: qualidade alta, filtragem em profundidade agressiva.

O dimensionamento do modelo foi feito utilizando distâncias conhecidas (barras de escalas), resultando em duas nuvens de pontos de diferentes densidades, conforme observável no Quadro 2; foi também feita uma limpeza manual a ambas as nuvens para remover *outliers* (pontos discrepantes). Como a diferença de densidades de pontos entre ambas é notória, a nuvem de maior densidade (Caldas da Rainha) foi alvo de uma reamostragem no CloudCompare, aproximando-se à densidade da estátua de Coimbra.

2.3.3 Alinhamento das nuvens de pontos

Para permitir comparações, as duas nuvens foram alinhadas no *software* CloudCompare pelo uso de quatro pontos homólogos, em locais de fácil observação, resultando numa matriz de transformação feita com coordenadas homogéneas, isto é, uma matriz 4x4 que permite rotação, translação e fator de escala a partir de uma só matriz. No exemplo da Figura 6, redimensionou-se a estátua de Coimbra à estátua das Caldas da Rainha, para permitir comparar detalhes entre as duas estátuas; aproveitaram-se os mesmos pontos homólogos para repetir o processo sem fator de escala, alinhando-as somente, resultando em nuvens de



pontos de diferentes dimensões para depois fazer as comparações 2D e 2.5D (Figura 7). Usando as duas nuvens grosseiramente alinhadas com fator de escala, procedeu-se à aplicação do algoritmo ICP (*Iterative Closest Points Algorithm*) para fazer o registo (ou alinhamento 3D) fino, e assim permitir fazer o cálculo das distâncias entre as duas nuvens.

2.3.4 Extração de contornos e de curvas de nível

Para proceder à extração dos contornos e curvas de nível, foi utilizado um processo automático implementado em QGIS (Figura 4) que nos permitiu apresentar os dados expostos na Figura 7. Esta extração partiu de uma extração prévia de ortofotos a partir do CloudCompare, usando os vários planos coordenados e aplicando uma matriz de rotação ao longo do eixo Z para extrair as diferentes vistas laterais, frontal e posterior. Rapidamente se concluiu que qualquer extração lateral direita era simétrica da lateral esquerda, ou a posterior simétrica da frontal, somente no que diz respeito aos contornos.

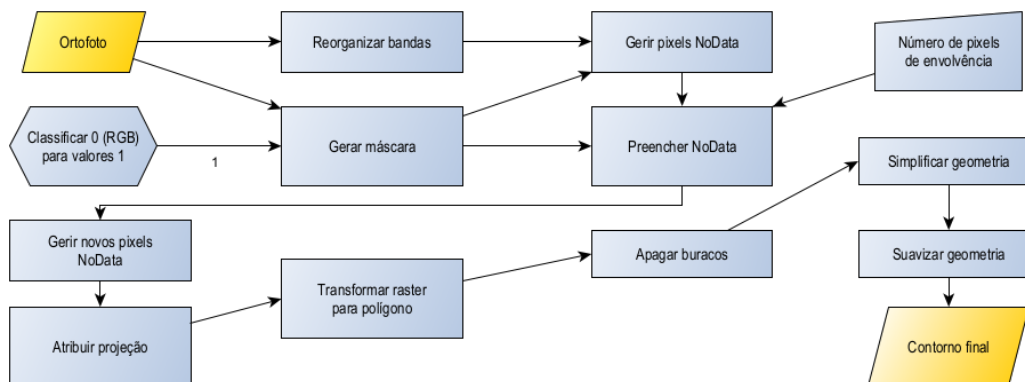


Figura 4 - algoritmo aplicado em software QGIS para extração dos contornos para a comparação 2D

Para a extração das curvas de nível na comparação 2.5D apenas se usou o plano Z, extraíndo ortofotos desta vez não com valores RGB para os pixels, extraíndo, no entanto, as alturas dos pixels das duas estátuas.

3. Resultados e discussão

Através do processamento dos dados, obteve-se as duas nuvens de pontos conforme dispostas na figura 5, demonstrando a geometria do bloco de imagens da reconstrução fotogramétrica para as duas estátuas.

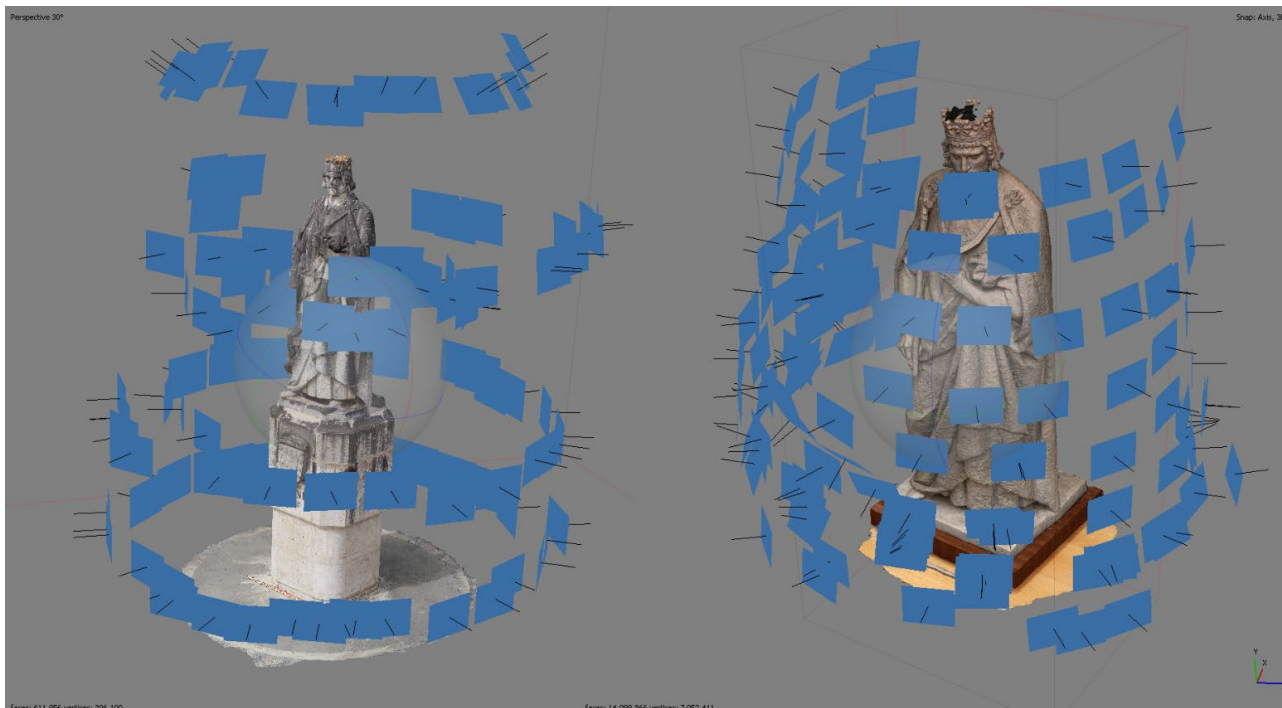


Figura 5 - disposição de fotografias adquiridas por drone em torno da estátua de Coimbra (esquerda) e por *pole photogrammetry* à estátua das Caldas da Rainha (direita), de acordo com a reconstrução fotogramétrica no Agisoft Metashape



Enquanto na estátua de Coimbra foi possível fazer levantamento integral a 360°, na estátua das Caldas da Rainha não foi possível efetuar a cobertura da estátua na parte anterior, resultando em iatos no manto. Para fazer as comparações entre as estátuas, o pedestal e base de madeira respetivos foram eliminados, tendo também sido feita uma reamostragem à estátua das Caldas da Rainha, aproximando-a à densidade de pontos da estátua de Coimbra.

Quadro 2 - estatísticas das duas nuvens de pontos processadas

Estátua de Coimbra	Estátua das Caldas da Rainha	
6.774.838 pontos (com pedestal) → > 9 fotos por ponto → 2.16 mm/pix no plano YZ 2.266.660 pontos (sem pedestal)	84.405.133 pontos (com base) → > 9 fotos por ponto → 0.257 mm/pix	<u>Subsample</u> distância mínima entre pontos de 1 mm: 11.916.320 pontos (com base) 9.313.995 pontos (sem base)

Após o registo grosseiro das duas nuvens de pontos a partir dos pontos homólogos, aplicou-se o ICP que baixou o erro global de 0.67m (para estátuas escaladas) para 0.15m, aproximadamente. Este valor traduz, por um lado, a sensibilidade do escultor para fazer a estátua de pedra de Coimbra a partir do seu arquétipo em gesso, como demonstra a falta de um elemento na estátua de Coimbra, em falta desde tempos que não sabemos precisar; por outro lado, estes valores são também reflexo dos iatos nas costas da estátua das Caldas, precisamente por não ter sido possível fazer uma reconstrução fotogramétrica como era ambicionado, bem como faltaram detalhes na coroa, não alcançados também pela mesma razão.

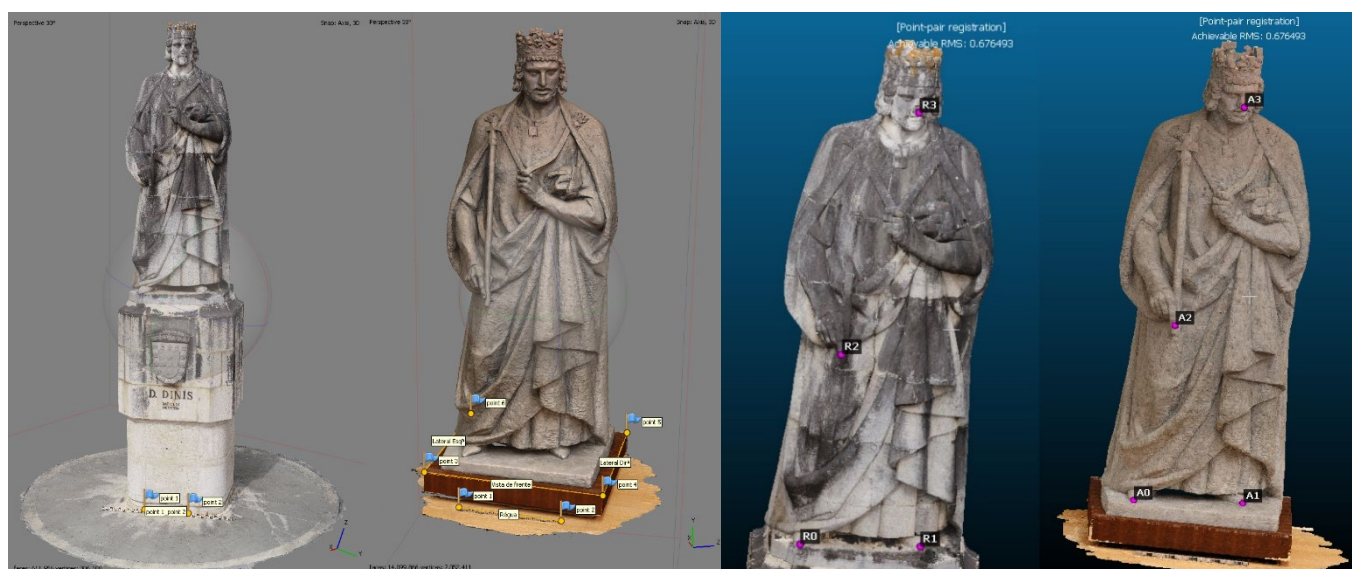


Figura 6 – as duas nuvens de pontos processadas com as respetivas escalas (esquerda); localização dos pontos homólogos utilizados nas duas estátuas e suas coordenadas usadas para fazer o registo grosseiro no CloudCompare (direita)

Com as duas estátuas alinhadas e escaladas, fez-se as comparações em 2D, 2.5D e 3D, apenas a partir das nuvens de pontos. Os resultados a partir da comparação 2D mostram que as semelhanças são enormes, embora em diferentes dimensões, notando-se apenas um ligeiro inclinar da cabeça na estátua das Caldas da Rainha; denota-se algumas imperfeições nos contornos ao nível do manto na parte traseira da estátua original, justificado pela falta de cobertura fotográfica na parte posterior por causa da proximidade com a parede. Os resultados da comparação 2.5D reforçam este facto, pelo que em modo geral, a fisionomia é muito semelhante em ambas, excetuando a presença do cetro, claramente destacado nas curvas de nível da estátua original.

Como forma de permitir comparação 3D das duas estátuas, foi necessário aplicar um fator de escala à nuvem da estátua de Coimbra, usando-se a ferramenta *cloud to cloud distances* do CloudCompare para quantificar as diferenças entre ambas. Daqui conclui-se que, tendo em conta a Figura 9, as maiores diferenças se apresentam na ausência do cetro na estátua de Coimbra (elemento desaparecido por causa de vandalismo), o cinto do manto que o Rei na sua pose segura com a mão esquerda, na estátua de Coimbra encontra-se esticado e na estátua das Caldas da Rainha encontra-se vergado, bem como que na estátua de Coimbra, a cara encontra-se mais erguida ao invés do arquétipo, que se encontra mais abaixada, porventura uma adaptação do seu escultor para impor seriedade e rigidez na pose, imposição do Regime Salazarista. Quanto a outros detalhes, as diferenças são ínfimas, pondo-se pequenos detalhes na transformação de uma estátua de menor dimensão para outra em pedra, de consideráveis maiores dimensões, mas não alterando a fisionomia da escultura original.

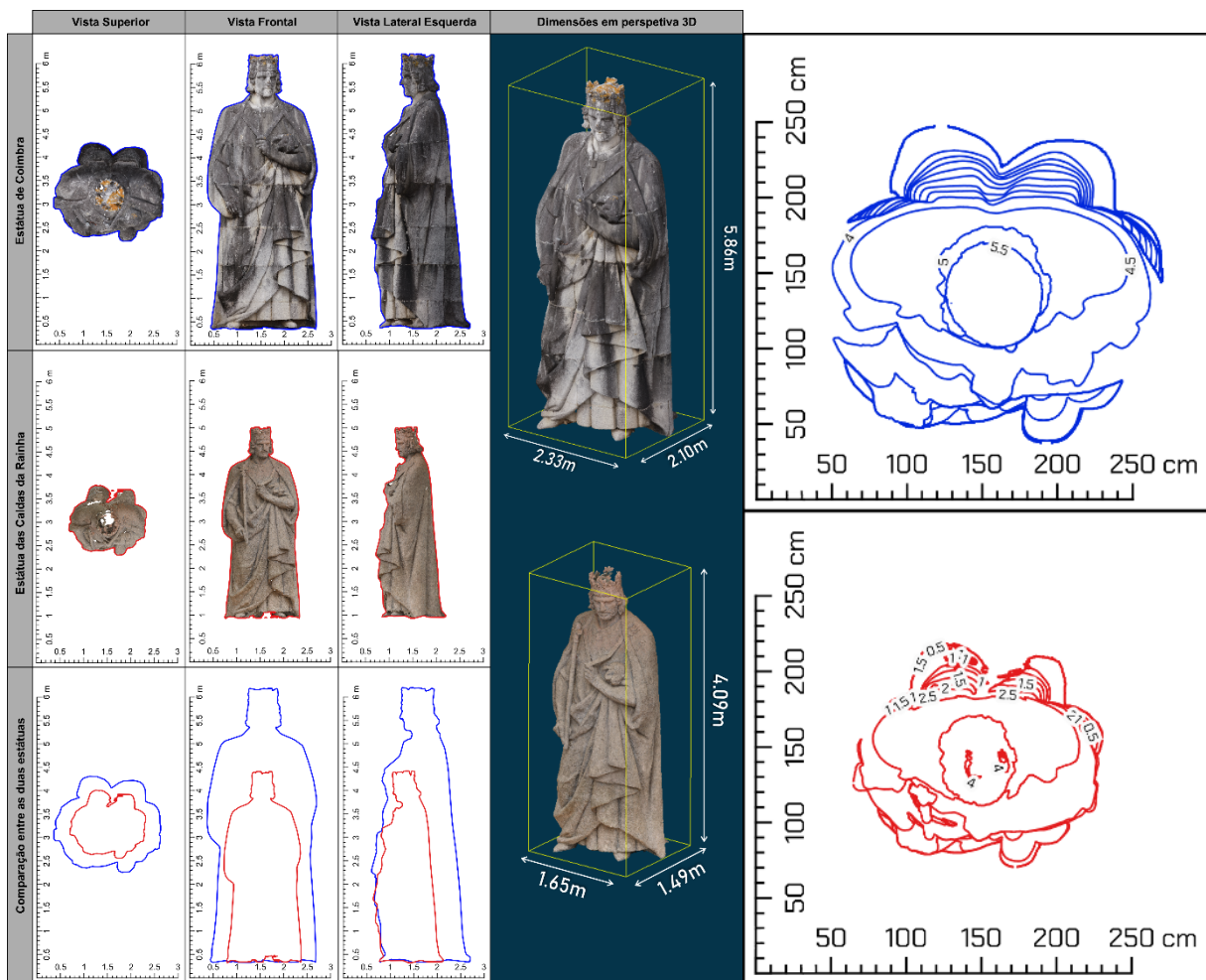


Figura 7 – nuvens de pontos das duas estátuas, sem pedestal e base: contornos (comparação 2D), dimensões extraídas a partir da bounding box dos ortos nos diferentes planos coordenados e curvas de nível (comparação 2.5D)

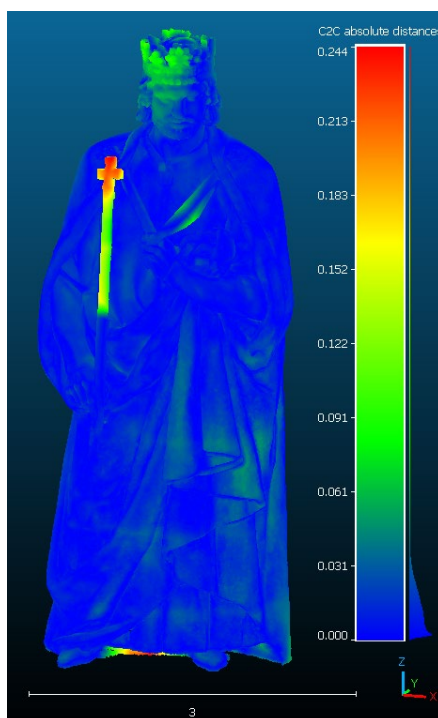


Figura 8 - distâncias absolutas entre as nuvens de pontos das duas estátuas, escalando a estátua de Coimbra ao seu arquétipo



Conclusões

Este trabalho permitiu-nos perceber as possibilidades da aplicação das metodologias de SfM-MVS à monitorização de património cultural, alavancando o tipo de trabalhos que poderão ser realizados a outras obras patrimoniais de elevado valor histórico-cultural ou afetivo dos povos. Foi realizada uma comparação dimensional, não tendo sido possível ainda realizar uma reconstrução tridimensional da estátua tendo por base os elementos existentes das duas estátuas, seja pela presença de iatos (*data gaps*), seja pela ainda não intervenção em estúdio 3D da correção das texturas.

Os resultados alcançados permitiram-nos concluir que, embora de diferentes dimensões, as duas estátuas têm grande similaridade, resultado da mestria de quem as esculpiu, predispondo apenas das habilidades da sua arte e escalando para maiores dimensões as feições de um arquétipo já de si de elevado detalhe; podemos afirmar com bastante certeza que a réplica é uma cópia quase perfeita do seu arquétipo. Denotou-se algumas alterações a nível da posição da cabeça ou do cinto do manto que, a nosso ver, nada mais serão que adaptações do seu escultor, por gosto pessoal ou por imposição de quem encomendou a obra, dando outra visão estética da estátua ao meio em que iria ser enquadrada quando concluída; este tipo de pressões externas acreditamos ser as razões pelas quais as réplicas de obras de arte muitas vezes não correspondem ao arquétipo que lhes deu origem.

No caso específico de levantamentos em SfM-MVS, quando se trabalhar com entidades competentes pela preservação do património e estas exigirem dados tridimensionais, como recomendação nossa, nos seus cadernos de encargos deverão constar parâmetros mínimos como a resolução da nuvem de pontos, a textura das superfícies ou a geometria do bloco de imagens.

Dados os resultados obtidos, pretendemos utilizar a metodologia desenvolvida por Gonçalves et al. (2023) para a deteção de iatos e posterior reconstrução da estátua digitalizada, comparando posteriormente com uma nova reconstrução quando tivermos possibilidade de afastar a estátua da parede e lhe fazer nova aquisição fotográfica.

Referências bibliográficas

- Benassi, F., Dall'Asta, E., Diotri, F., Forlani, G., di Cella, U. M., Roncella, R., & Santise, M. (18 de Fevereiro de 2017). Testing Accuracy and Repeatability of UAV Blocks Oriented with GNSS-Supported Aerial Triangulation. *Remote Sensing*(9).
- Direção Geral de Cultura do Centro. (2018). *D. Dinis*. Obtido de <https://www.culturacentro.gov.pt/pt/museus/museu-virtual-de-arte-publica/coimbra/coimbra/d-dinis/>
- Eisenbeiss, H., & Sauerbier, M. (Dezembro de 2011). Investigation of UAV Systems and Flight Modes for photogrammetric applications. *The Photogrammetric Record*(26).
- Girelli, V., Tini, M., D'Apuzzo, M., & Bitelli, G. (2020). 3D digitisation in cultural heritage knowledge and preservation: the case of the neptune statue in Bologna and its archetype. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*(XLIII-B2-2020), pp. 1403-1408. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1403-2020>
- Gonçalves, D., Gonçalves, G., Pérez-Alvárez, J. A., & Andriolo, U. (22 de Setembro de 2023). 3D cliff reconstruction by drone: An in-depth analysis of the image network. *Measurement*, 222, 113606. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113606>
- J. Fernández-Hernandez, J., González-Aguilera, D., Rodríguez-González, P., & Mancera-Taboada, J. (8 de Janeiro de 2014). Image-Based Modelling from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry: An Effective, Low-Cost Tool for Archaeological Applications. *Archaeometry*, 57(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/arcm.12078>
- Massimiliano, P., & Costantino, D. (2021). Techniques, Tools, Platforms and Algorithms in Close Range Photogrammetry in Building 3D Model and 2D Representation of Objects and Complex Architectures. *Computer-Aided Design & Applications*, 18(1), pp. 42-65. <https://doi.org/doi:10.14733/cadaps.2021.42-65>
- Pérez-Alvárez, J. A., Gonçalves, G. R., & Cerrillo-Cuenca, E. (Junho de 2019). A protocol for mapping archaeological sites through aerial 4k videos. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 13. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00101>
- Pieraccini, M., Guidi, G., & Atzeni, C. (2001). 3D digitizing of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 2(1), pp. 63-70. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(01\)01108-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1296-2074(01)01108-6)
- Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2016). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40(2), pp. 247-275.