

A fotogrametria aérea como base da criação de modelos BIM e Digital Twins: Revisão da literatura

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.38>

**Diogo F. R. Parracho¹, João Poças Martins^{2,3},
João M. P. Q. Delgado⁴, João Santos Baptista^{5,6}**

¹ CONSTRUCT-GEQUALTEC, Departamento de Engenharia Civil (DEC),
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP),
Porto, Portugal. 0000-0003-0413-6178

² CONSTRUCT-GEQUALTEC, DEC-FEUP,
Porto, Portugal. 0000-0001-9878-3792

³ BUILT CoLAB – Laboratório Colaborativo para o Ambiente Construído do Futuro, Porto

⁴ CONSTRUCT-LFC, DEC-FEUP, Porto, Portugal. 0000-0002-1026-4523

⁵ LAETA – Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeronáutica,
Departamento de Engenharia de Minas (DEM), FEUP,
Porto, Portugal. 0000-0002-8524-5503

⁶ LABIOME – Laboratório de Biomecânica do Porto,
Faculdade de Desporto da Universidade do Porto (FADEUP), Porto, Portugal

Resumo

Nos últimos anos tem-se notado um crescimento da utilização de aeronaves não tripuladas (“drones”) para diversos fins, trazendo consigo um conjunto de vantagens interessantes inclusivamente para o setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC). Pelo facto de estarem equipadas com câmaras fotográficas, estas aeronaves podem ser utilizadas como forma de adquirir informação “*as-is*” do ambiente construído através de técnicas não destrutivas e sem contacto como é o caso da fotogrametria. Como tal, ao permitirem a digitalização da geometria dos ativos, torna-se útil a sua potencial interligação com a metodologia BIM e/ou de monitorização em tempo real.

Este artigo tem como objetivo apresentar uma análise da literatura atual no que toca à utilização de drones como passo inicial para o desenvolvimento de modelos BIM e/ou de Digital Twins. A fotogrametria aérea com drones é amplamente utilizada na criação de modelos BIM (e HBIM), contudo, o mesmo não se aplica aos Digital Twins. Além disso, é comum utilizar-se outras ferramentas de *reality capture* (e.g., laser scanners) como apoio ao levantamento aéreo.

1. Introdução

Atualmente, o mundo está inserido na chamada quarta revolução industrial (Indústria 4.0) que tem vindo a alterar o paradigma de inúmeros setores, incluindo o da construção, graças à adoção de novas tecnologias como a robótica, impressão 3D, *big data*, sensores, realidade estendida (virtual, aumentada e mista), entre outros [1]. Neste “novo” mundo, também as aeronaves não tripuladas (vulgarmente conhecidas como “drones”) têm ganho popularidade para variadas aplicações, fruto da sua flexibilidade e custos moderados [2].

Apesar de originalmente terem sido desenvolvidos para fins militares [2]–[4], os drones hoje em dia são utilizados em áreas tão distintas como a agricultura, ciências da natureza, buscas e salvamento, desporto, arqueologia, indústria da construção e do património [3]–[5].

A área da engenharia é aquela que alberga uma maior proporção dos artigos relacionados com drones [6]. Uma destas áreas de aplicação, e em claro crescimento, é o setor da construção civil [7], [8], tendo uma considerável aceitação pública quanto ao uso destes aparelhos [5].

Apesar de não ser considerada uma tecnologia tão impactante no setor como o BIM ou a prefabricação [9], as aeronaves não tripuladas podem ser utilizadas em qualquer fase do ciclo de vida de uma construção [1], [10], [11]. A título de exemplo, os drones podem ser aplicados para efetuar o levantamento das zonas a construir numa fase pré-construção, fazer a monitorização da obra e da segurança da mesma e, numa fase posterior, efetuar inspeções, análises energéticas e até atividades relacionadas com marketing [10], [12].

Freeman et al. [11] relatam um uso crescente da utilização de drones para a criação de modelos digitais para obras de engenharia civil. De facto, já foi discutido na literatura o potencial da utilização destas aeronaves com o BIM na cadeia de valor da construção [13]; contudo, a interligação entre drones, BIM e Digital Twins não está ainda completamente explorada. Recentemente foi efetuada uma revisão sistemática da literatura sobre a utilização de tecnologias digitais com a temática da Construção 4.0 [8], no entanto, os autores apenas utilizaram uma base de dados para o estudo (a Scopus no caso), pelo que importa ampliar esta análise.

Assim, este artigo pretende responder à lacuna identificada na literatura atual sobre a utilização dos drones para a criação de modelos BIM e Digital Twins na indústria AEC, procurando identificar diferentes práticas em termos de abordagens.

2. Metodologia

Nesta secção é apresentada a metodologia utilizada para se proceder a esta revisão da literatura. A revisão apresentada neste artigo surge como parte de uma análise mais abrangente (*scoping review*) que pretendeu estudar o uso dos drones aliados ao

BIM e aos Digital Twins. Assim sendo, a revisão original seguiu as recomendações da PRISMA para as *scoping reviews* [14].

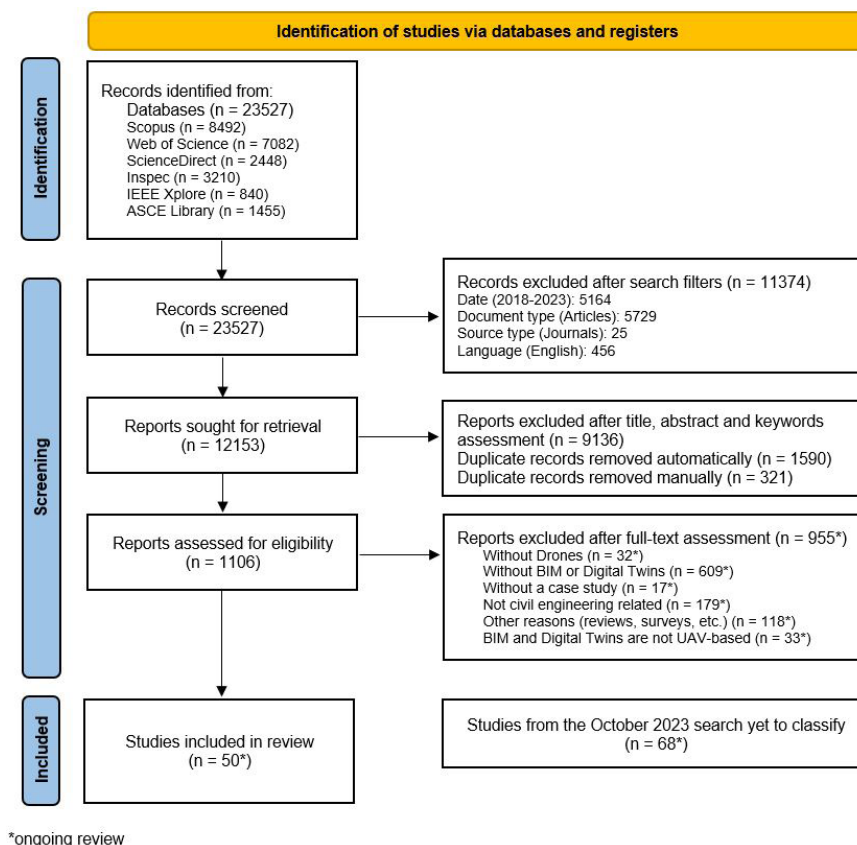
A revisão começou por recolher artigos em seis bases de dados: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Inspec, IEEE Xplore e ASCE Library. As primeiras três estão entre as maiores bases de dados multidisciplinares a nível mundial, enquanto as demais estão relacionados com a engenharia, com a ASCE Library a debruçar-se sobre a principal área de estudo deste estudo – a engenharia civil. Quatro grupos de palavras-chave foram criados para gerar combinações de palavras para a pesquisa, onde o primeiro correspondia ao grupo dos drones e seus sinónimos, o segundo aos modelos BIM e Digital Twins, sendo que os demais grupos albergavam palavras ligadas à digitalização em geral (e.g., fotogrametria e Scan-to-BIM). Procedeu-se de seguida à combinação destas palavras-chave, sendo de salientar que em todas as instâncias se incluiu as palavras provenientes do grupo dos drones por se pretender que todos os artigos incluíssem estes equipamentos, pois é esse o objetivo deste estudo. Na Figura 1 é possível observar o gráfico de resumo da metodologia adotada, sendo esta descrita em seguida.

A recolha de artigos foi iniciada em março 2023, tendo sido efetuada uma segunda recolha em outubro do mesmo ano, de forma a incluir mais artigos do ano em questão. Foram identificadas 23527 potenciais referências a partir das combinações de palavras nas bases de dados, sendo que posteriormente foram excluídas 11374 ao serem incluídos filtros na pesquisa. De seguida, leu-se o título, palavras-chave e resumo dos restantes 12153 artigos, tendo sido excluídos 9136 neste processo. Nesta fase o critério foi bastante abrangente por conta dos vários “modelos 3D” mencionados nos resumos que poderiam ser úteis para esta revisão. Os 3017 artigos que cumpriam com o critério adotado foram introduzidos num gestor de referências bibliográficas (o Mendeley), que automaticamente excluiu 1590 duplicados, tendo sido ainda necessário excluir 321 artigos duplicados manualmente, perfazendo assim 1106 artigos para analisar.

Dado o critério inicial lato para evitar perdas de informação relevante, foram retiradas bastantes referências nesta fase posterior. Como esta é uma revisão ainda em curso, ainda há 68 artigos por analisar que cumpriram com os critérios de elegibilidade. Assim, esta revisão aborda os 50 artigos analisados ao detalhe referentes à primeira iteração da pesquisa, em março 2023.

Figura 1

Fluxograma da revisão de literatura, baseado no esquema PRISMA 2020.



3. Discussão e resultados

3.1. Dados gerais

Os artigos selecionados no final do método descrito previamente serão analisados nesta secção.

Quanto à distribuição geográfica dos casos de estudo analisados nos artigos, é possível constatar nas Figuras 2 e 3 o forte impacto europeu nesta análise, com algum destaque para a Ásia também. O país com maior número de ocorrências é Itália (15), seguindo-se Espanha (9).

Quanto à distribuição cronológica, constata-se na Figura 4 a evolução no uso dos drones na metodologia BIM e Digital Twins, com um crescimento significativo desde 2020. Tal situação pode ser explicada pelo investimento em novas tecnologias no setor AEC provocado pela pandemia de COVID-19 [2]. Salienta-se que não foi apenas para estes usos que a sua utilização aumentou recentemente no setor [7], [8], sendo os Estados Unidos o país que mais usa estes equipamentos na construção civil, com destaque para o Brasil em termos lusófonos [2].

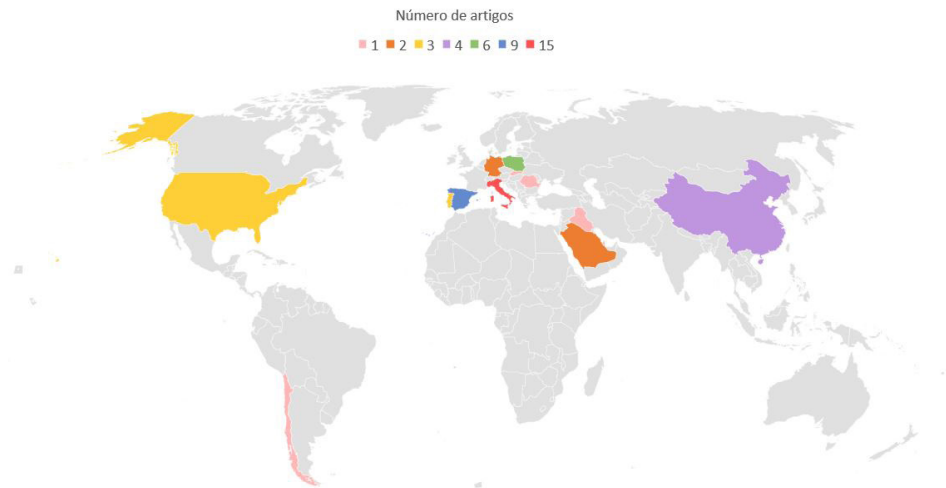


Figura 2
Distribuição geográfica no mapa dos casos de estudo dos artigos analisados.

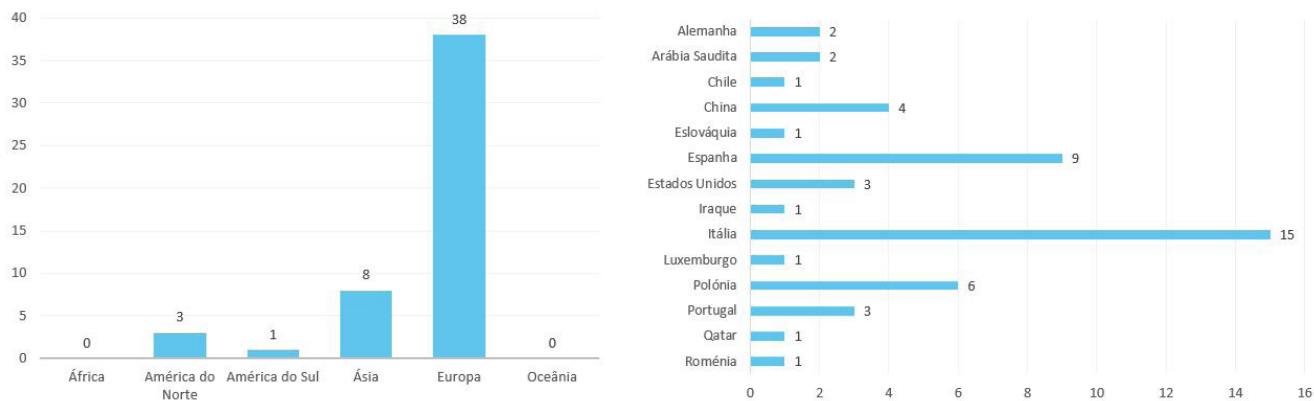


Figura 3
Distribuição dos casos de estudo por continente (esquerda) e por país (direita).

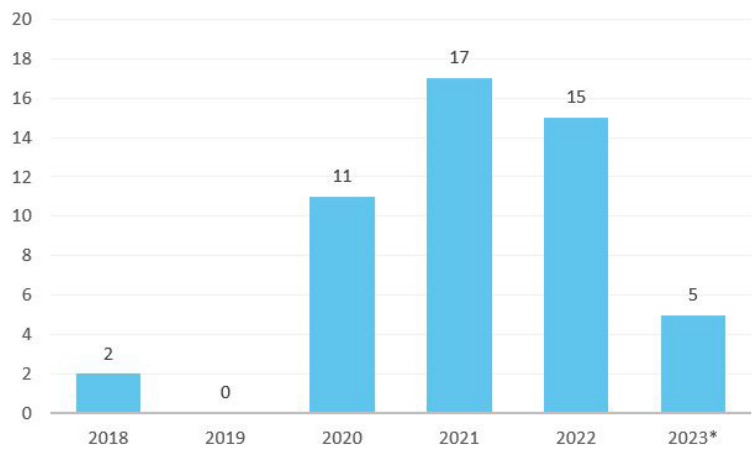


Figura 4
Distribuição anual dos artigos analisados (até março 2023).

3.2. Fase da construção e casos de aplicação

Nesta secção analisa-se a distribuição dos artigos recolhidos na revisão da literatura conforme o caso de aplicação e a fase da construção do ativo em estudo.

A Tabela 1 ilustra a forte ligação europeia com o seu património cultural, nomeadamente no que toca a edifícios históricos. Este dado está em linha com a corrente de pensamento atual do HBIM (Heritage BIM), que tem uma forte aposta no continente europeu [15].

Praticamente todos os casos de estudo são aplicados às fases da operação e manutenção (O&M) e à conservação histórica do ativo, na maioria das vezes de edifícios. A exceção é o artigo de Hu et al. [16] onde a fotogrametria aérea com drones é aliada à fotogrametria terrestre para criar um modelo BIM de um edifício no seu fim de vida útil com planeamento 4D para otimizar a estratégia de desconstrução e gestão de resíduos. O modelo BIM serve também de base à criação de um modelo de análise estrutural para a avaliação das estratégias de segurança.

É interessante a não inclusão de qualquer artigo aplicado à fase da execução em obra, principalmente por essa fase ser bastante mencionada em artigos que utilizam ferramentas de *reality capture* (i.e., fotogrametria e laser scanner) para comparar a construção “as-is” com modelos de projeto. Note-se que artigos que seguissem essa lógica foram retirados aquando da presente revisão por não utilizarem estas ferramentas como base para a criação de modelos, mas apenas para comparação/atualização de modelos já existentes, pelo que não se enquadra no propósito desta revisão da literatura.

Tabela 1: Distribuição dos artigos conforme o caso de aplicação e a fase da construção

Continente	Aplicação	Fase da Construção					Total
		Pré-Construção	Execução	O&M	Fim de Vida Útil	Conservação Histórica	
Europa	Edifícios	–	–	10	–	22	32
	Pontes	–	–	4	–	–	4
	Obras Hidráulicas	–	–	1	–	–	1
	Outro (Arco)	–	–	–	–	1	1
Ásia	Edifícios	–	–	2	1	5	8
América do Norte	Edifícios	–	–	2	–	–	2
	Pontes	–	–	1	–	–	1
América do Sul	Obras Hidráulicas	–	–	1	–	–	1
Total		–	–	21	1	28	50

3.3. Grupo do artigo e estágio do modelo

Durante esta revisão da literatura foram identificados seis grupos principais, conforme a área em que o caso de estudo se aplica. A estes grupos soma-se um outro que engloba temáticas diferenciadas.

O grupo que engloba um maior número de artigos está relacionado com o património, que representa também a fase da conservação histórica da construção (da Tabela 1). Note-se que nenhum dos artigos deste grupo vai além do BIM (ou HBIM) em termos de estágio do modelo. Além disso, poucos são os artigos que usam somente os drones neste processo. No que toca ao património (europeu e asiático), apenas em uma situação foi possível capturar informação com estas aeronaves para modelar tanto o interior como o exterior do edifício em questão [17]. Esta é de resto a única vez em que o drone foi utilizado como ferramenta única para esse processo. Só em mais duas situações estas aeronaves foram utilizadas dentro de um edifício (ambos relacionados com o património), contudo, Currià et al. [18] e Leon et al. [19] utilizam também fotogrametria terrestre de curto alcance e laser scanners, respetivamente, para este tipo de aquisição.

Contrariamente ao grupo mencionado anteriormente, em que nenhum artigo entrava em estágios de modelo em direção ao Digital Twin, o mesmo não acontece com o grupo das simulações energéticas. Em três situações foram utilizados sensores reais e cujos resultados da monitorização *in-situ* foram comparados com os resultados das simulações energéticas. Para esta situação de comparação de dados simulados com campanhas de monitorização em tempo real adotou-se a designação de “Protótipo de um Digital Twin”.

Existem dezenas de definições sobre o que é um Digital Twin (DT). Uma destas é que devem existir sensores a recolher dados em tempo real no ativo em estudo, permitindo a conexão bidirecional de informação entre os mundos físico e virtual. Por sua vez, um Digital Shadow (DS) apenas permite uma ligação unidirecional da informação [20]. Estas são as nomenclaturas adotadas nesta revisão. Assim, mesmo que exista uma interligação bidirecional da informação (e.g., entre o Excel e o Revit via Dynamo) mas não haja sensores [21], nesta revisão tal situação não será considerada como um Digital Twin (assinalado com um * na tabela seguinte). Como tal, apenas Han et al. [22] cumpre com este critério, tendo criado um campus universitário inteligente na China. Na Tabela 2 está resumida a informação encontrada.

Tabela 2: Distribuição dos artigos conforme o seu grupo, a utilização exclusiva de drones como ferramenta de *reality capture*, e estágio do modelo digital

Continente	Grupo	Apenas com Drone?	Tem BIM?	Estágio				Total
				Só BIM	Prot. DT	DS	DT	
Europa	Património	Sim	Sim	2	–	–	–	2
		Não	Sim	21	–	–	–	21
	Energia	Sim	Sim	–	2	–	–	2
		Não	Não	–	1	–	–	1
	Estrutural	Não	Sim	–	–	1	–	1
		Sim	Sim	1	1	–	–	2
		Não	Não	–	–	1	–	1
		Sim	Sim	2	–	–	–	2
	Gestão de Ativos	Não	Não	–	2	–	–	2
		Sim	Sim	1	–	–	–	1
Ásia	Outro	Não	Sim	3	–	–	–	3
	Património	Não	Sim	5	–	–	–	5
	Gestão de Ativos	Não	Sim	–	–	1	–	1
		Não	Não	–	–	–	1	1
	Fim de Vida Útil	Não	Sim	1	–	–	–	1
América do Norte	Gestão de Ativos	Sim	Sim	1	–	–	–	1
	Inspeções	Sim	Sim	1	–	–	–	1
	Outro	Não	Sim	1	–	–	–	1
América do Sul	Gestão de Ativos	Sim	Sim	1	–	–	*	1
Total				40	6	3	1	50

Assim, não foi observado qualquer artigo que utilize unicamente drones para a criação de modelos BIM e Digital Twins com sistemas de monitorização em tempo real, tampouco de Digital Shadows. Existem apenas três situações de “Protótipos de Digital Twins” que caminham nessa direção: dois relacionados com as simulações energéticas de edifícios existentes [23], [24] e um com a análise estrutural de uma ponte [25]. Por sua vez, os Digital Shadows dos grupos da energia [26], estruturas [27], e gestão de ativos [28], não seguem o processo na sua totalidade, falhando ou na utilização não exclusiva da fotogrametria aérea com drones ou na aplicação da metodologia BIM, além da questão da bidirecionalidade dos dados.

3.4. Metodologia padrão

Após análise dos 50 artigos recolhidos que utilizam a fotogrametria aérea como base da criação de modelos BIM ou Digital Twins – servindo habitualmente a nuvem de pontos (82%) como guia para a modelação digital dos ativos levantados via *reality*

capture –, é interessante avaliar os métodos em estudo. Assim, nesta secção é avaliada a “metodologia padrão” destes artigos.

A maioria dos casos de estudo situa-se na Europa (76%), sendo a metodologia aplicada sobretudo a edifícios (84%) numa fase da construção interessada na sua conservação (56%).

Dos 43 artigos que identificam qual o drone utilizado no processo, 5 mencionam ter utilizado 2 ou mais. O drone mais utilizado foi o DJI Phantom 4 Pro (presente em 13 artigos dos 43 – 30%), tendo a gama dos DJI Phantom sido a mais usada (22 casos – 51%). A DJI foi, de longe, a marca mais utilizada (em 40 artigos – 93%). Nenhum drone utilizado era de asa fixa, sendo todos multirotores. Estes são os mais utilizados no setor AEC por serem capazes de descolarem e aterrarem verticalmente, bem como pairar sobre a área em estudo pretendida, ao contrário dos de asa fixa, que além de não conseguirem pairar, precisam de zonas de pista para descolarem e aterrarem. Assim, os drones multirotores permitem uma maior flexibilidade para trabalhos relacionados com este setor [3]. Todos os levantamentos foram efetuados com a câmara RGB da aeronave, sendo que 1 usou também a câmara de infravermelhos. A fotogrametria foi assim utilizada em todos os levantamentos, exceto em 2 que optaram pela videogrametria (4%).

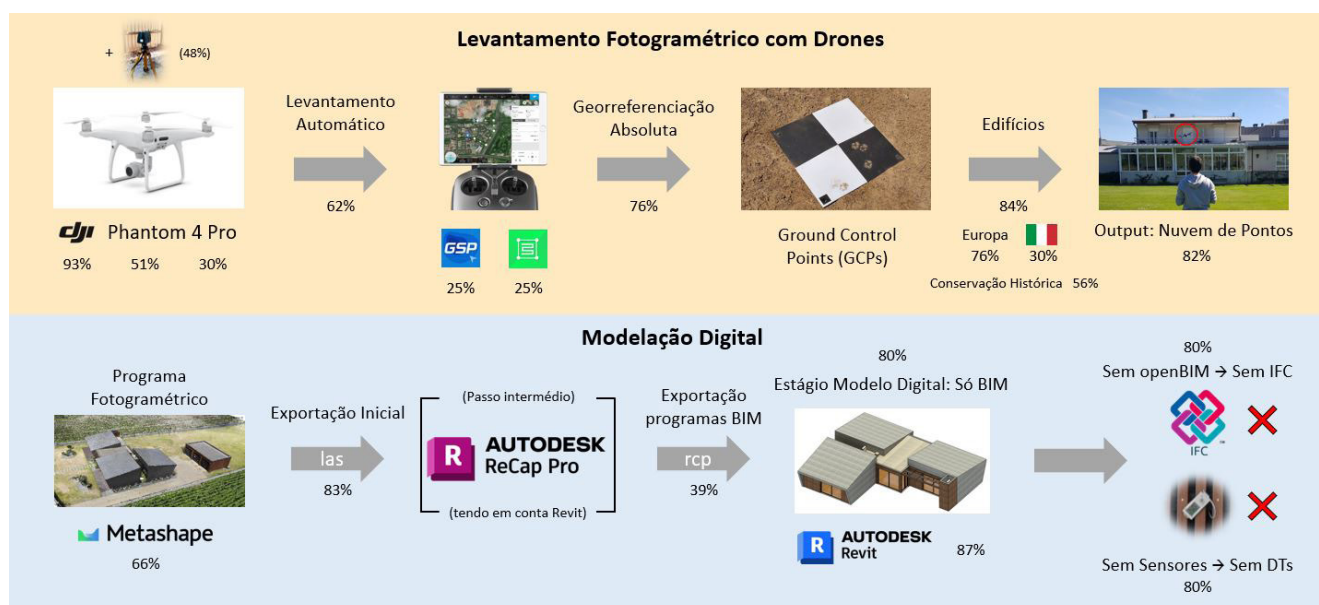
O levantamento com drone é, na maioria das vezes, efetuado automaticamente (23 dos 37 identificados – 62%), com recurso ao DJI Ground Station Pro ou ao Pix4Dcapture (ambos 4 vezes em 16 mencionados – 25% cada). Pontos de controlo terrestres são utilizados na maioria dos casos (27/37 – 76%), de forma a garantir uma maior precisão absoluta do modelo [29].

Em todos os artigos as nuvens de pontos foram em algum momento utilizadas no processo (e.g., para a criação dos *mesh models* – modelos de malhas poligonais), não obstante, em 41 ocasiões (82%) foi o output final ou fez parte do conjunto de outputs finais do processo fotogramétrico.

O Agisoft Metashape (ou a sua versão anterior, o Agisoft Photoscan) foi o programa fotogramétrico mais comum (27/41 – 66%) e o Autodesk Revit foi o programa BIM mais usado (39/45 – 87 %). Contudo, este programa só recebe nuvens de pontos nos formatos proprietários do Autodesk ReCap (*rcp* ou *rct*) [23], [29], pelo que quando o Autodesk ReCap não é usado desde o início, é necessário converter os formatos de exportação. O mesmo não se aplica quando se trata de *meshes* uma vez que o Autodesk Revit suporta os formatos *ply* e *obj*, entre outros. O formato de exportação *las* foi o mais mencionado (5/6 – 83% para nuvens de pontos). Efetivamente, os formatos *rcp* (7/18 – 39%) e *rct* (6/18 – 33%) foram os mais utilizados no processo de importação para programas BIM.

O openBIM começa a ser uma temática abordada, mas só 20% dos artigos referem o uso do formato IFC. Por sua vez o HBIM é o padrão nos artigos relacionados com a conservação do património.

Nos 10 artigos que referem algum estágio de Digital Twins, 4 apresentam apenas sensores das condições ambientais (temperatura, humidade relativa, CO₂, etc.), 2 apresentam sensores relacionados com a monitorização estrutural (e.g., extensómetros e acelerómetros) e outros 2 com ambos. Além disso há 1 que utiliza outros tipos de medições (e.g., ocupação) e 1 que não identifica quais os sensores utilizados, mas identifica o uso da plataforma digital EcoDomus. Apenas 11 artigos utilizam exclusivamente os drones (22%), sendo que o laser scanner é o instrumento mais utilizado além destas aeronaves, estando presente em 24 artigos (48%), seguido de perto pela fotogrametria terrestre de curto alcance com 19 ocorrências (38%). Outras curiosidades incluem o facto de 10 artigos utilizarem técnicas de realidade estendida (9 deles com realidade aumentada, 8 com realidade virtual e 2 com realidade mista). O Unity foi o programa mais vezes utilizado nestas aplicações (4 ocorrências). Na Figura 5 está resumido o processo padrão dos artigos encontrados:



NOTA: Links das imagens – Drone [30], controlador remoto [31], GCP [32], levantamento aéreo [33] e modelos [23]. As demais são do acervo dos autores

Figura 5

Resumo do processo padrão, desde o levantamento fotogramétrico ao modelo digital.

4. Conclusões

Enquanto ferramentas essenciais para a Construção 4.0, o BIM e os Digital Twins beneficiam da adoção crescente de drones no setor AEC, principalmente desde 2020. Como tal, esta revisão pretendeu analisar a interligação destas ferramentas para a criação dos modelos.

Nesta revisão foi possível constatar a utilização da fotogrametria aérea para a criação de nuvens de pontos de ativos (normalmente edifícios), usadas como guia para a modelação. Apesar da vasta aplicação para a criação de modelos BIM, poucos são os que usam a monitorização em tempo real com sensores para criar um modelo digital “vivo”. Em apenas uma situação se descreveu um “verdadeiro” Digital Twin, ao invés

de um Digital Shadow. Não foi encontrado qualquer artigo que tenha utilizado somente drones para criar um Digital Twin baseado num modelo BIM, tendo em conta que a maioria dos autores usa também outras técnicas de *reality capture* (e.g., laser scanners). Foram encontradas apenas três situações de “Protótipos de Digital Twin” que caminham nessa direção. Esta poderá ser uma temática a explorar futuramente.

Por fim, é notória a aposta em métodos de Cloud-to-BIM baseadas na fotogrametria, em particular para edifícios de interesse histórico e em obras de restauro (sobretudo na Europa), contudo, não aparentam ter interesse de monitorizar em tempo real os ativos para estes fins.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/04708/2020>) da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC) e pelo Fundo Social Europeu (FSE), através do Programa Operacional Regional do Norte [NORTE-06-3559-FSE-000176].

O primeiro autor, Diogo Filipe Ramos Parracho, dedica este artigo à memória do seu avô Manuel Santana Parracho.

Referências

- [1] M. B. Hatoum and H. Nassereddine, “The Use of Drones in the Construction Industry: Applications and Implementation,” in *ISARC 2022*, Bogotá, Colombia, Jul. 2022, pp. 542-549. doi: 10.22260/ISARC2022/0077.
- [2] J. M. Nwaogu *et al.*, “Application of drones in the architecture, engineering, and construction (AEC) industry,” *Autom. Constr.*, vol. 150, no. March, p. 104827, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.104827.
- [3] M. Gheisari, D. B. Costa, and J. Irizarry, “Unmanned Aerial System applications in construction,” in *Construction 4.0 – An Innovation Platform for the Built Environment*, London: Routledge, 2020, pp. 264-288. doi: 10.1201/9780429398100-14.
- [4] T. Rakha and A. Gorodetsky, “Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones,” *Autom. Constr.*, vol. 93, pp. 252-264, 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.05.002.
- [5] B. Aydin, “Public acceptance of drones: Knowledge, attitudes, and practice,” *Technol. Soc.*, vol. 59, p. 101180, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.techsoc.2019.101180.

- [6] D. Chabot, "Trends in drone research and applications as the Journal of Unmanned Vehicle Systems turns five," *J. Unmanned Veh. Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. vi-xv, 2018, doi: 10.1139/juvs-2018-0005.
- [7] H. Golizadeh *et al.*, "Scientometric analysis of research on 'remotely piloted aircraft': A research agenda for the construction industry," *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 27, no. 3, pp. 634-657, 2020, doi: 10.1108/ECAM-02-2019-0103.
- [8] T. S. N. Rachmawati and S. Kim, "Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Integration with Digital Technologies toward Construction 4.0: A Systematic Literature Review," *Sustainability*, vol. 14, no. 9, p. 5708, May 2022, doi: 10.3390/su14095708.
- [9] World Economic Forum, "Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology," Geneva, Switzerland, May 2016.
- [10] G. Albeaino and M. Gheisari, "Trends, benefits, and barriers of unmanned aerial systems in the construction industry: a survey study in the United States," *J. Inf. Technol. Constr.*, vol. 26, no. March, pp. 84-111, Mar. 2021, doi: 10.36680/j.it-con.2021.006.
- [11] M. R. Freeman, M. M. Kashani, and P. J. Vardanega, "Aerial robotic technologies for civil engineering: established and emerging practice," *J. Unmanned Veh. Syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 75-91, Jun. 2021, doi: 10.1139/juvs-2020-0019.
- [12] D. F. R. Parracho, J. Poças Martins, and E. Barreira, "Drones, BIM e o Desempenho Energético de Edifícios," in *2SEC2023: Livro de Atas*, Lisboa, Portugal, 2023, pp. 163-164. [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/151119>
- [13] Q. F. M. Dupont *et al.*, "Potential Applications of UAV along the Construction's Value Chain," *Procedia Eng.*, vol. 182, pp. 165-173, 2017, doi: 10.1016/j.pro-eng.2017.03.155.
- [14] A. C. Tricco *et al.*, "PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation," *Ann. Intern. Med.*, vol. 169, no. 7, pp. 467-473, Oct. 2018, doi: 10.7326/M18-0850.
- [15] Z. Zhang and Y. Zou, "Research hotspots and trends in heritage building information modeling: A review based on CiteSpace analysis," *Humanit. Soc. Sci. Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 394, Oct. 2022, doi: 10.1057/s41599-022-01414-y.
- [16] X. Hu *et al.*, "Smart building demolition and waste management frame with image-to-BIM," *J. Build. Eng.*, vol. 49, p. 104058, May 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.104058.
- [17] P. Martínez-Carricondo *et al.*, "Combination of nadiral and oblique UAV photogrammetry and HBIM for the virtual reconstruction of cultural heritage. Case

- study of Cortijo del Fraile in Níjar, Almería (Spain),” *Build. Res. Inf.*, vol. 48, no. 2, pp. 140-159, Feb. 2020, doi: 10.1080/09613218.2019.1626213.
- [18] E. Currà, A. D’Amico, and M. Angelosanti, “HBIM between Antiquity and Industrial Archaeology: Former Segrè Papermill and Sanctuary of Hercules in Tivoli,” *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1329, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14031329.
- [19] I. Leon, J.J. Pérez, and M. Senderos, “Advanced Techniques for Fast and Accurate Heritage Digitisation in Multiple Case Studies,” *Sustainability*, vol. 12, no. 15, p. 6068, Jul. 2020, doi: 10.3390/su12156068.
- [20] M. Nour El-Din *et al.*, “Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications,” *Buildings*, vol. 12, no. 12, p. 2155, 2022, doi: 10.3390/buildings12122155.
- [21] C. Jofré-Briceño *et al.*, “Implementation of Facility Management for Port Infrastructure through the Use of UAVs, Photogrammetry and BIM,” *Sensors*, vol. 21, no. 19, p. 6686, Oct. 2021, doi: 10.3390/s21196686.
- [22] X. Han *et al.*, “Intelligent Campus System Design Based on Digital Twin,” *Electronics*, vol. 11, no. 21, p. 3437, Oct. 2022, doi: 10.3390/electronics11213437.
- [23] J. M. P. Q. Delgado *et al.*, “BIM and BEM Interoperability – Evaluation of a Case Study in a Modular Wooden Housing,” *Energies*, vol. 16, no. 4, p. 1579, 2023, doi: 10.3390/en16041579.
- [24] A. Benz *et al.*, “Framework for a UAS-based assessment of energy performance of buildings,” *Energy Build.*, vol. 250, p. 111266, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111266.
- [25] V. Gattulli *et al.*, “Dynamical models of a suspension bridge driven by vibration data,” *Smart Struct. Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 139-156, 2021, doi: 10.12989/sss.2021.27.2.139.
- [26] L. Etxepare *et al.*, “Advanced Intervention Protocol in the Energy Rehabilitation of Heritage Buildings: A Miñones Barracks Case Study,” *Sustainability*, vol. 12, no. 15, p. 6270, Aug. 2020, doi: 10.3390/su12156270.
- [27] M. Bacco *et al.*, “Monitoring Ancient Buildings: Real Deployment of an IoT System Enhanced by UAVs and Virtual Reality,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 50131-50148, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2980359.
- [28] K. Naji *et al.*, “BIM-based Facility Management Models for Existing Buildings,” *J. Eng. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 21-37, Sep. 2021, doi: 10.36909/jer.11433.
- [29] D. F. R. Parracho, J. Poças Martins, and E. Barreira, “A Workflow for Photogrammetric and Thermographic Surveys of Buildings with Drones,” in *New Advances*

in Building Information Modeling and Engineering Management, Cham, Switzerland: Springer, 2023, pp. 77-95. doi: 10.1007/978-3-031-30247-3_5.

- [30] DJI, “Phantom Series,” 2023. <https://www.dji.com/pt/products/phantom> (accessed Dec. 11, 2023).
- [31] DJI, “DJI GS Pro,” 2023. <https://www.dji.com/pt/ground-station-pro> (accessed Dec. 11, 2023).
- [32] Pix4D SA, “Ground control points: why are they important?,” Dec. 03, 2019. <https://www.pix4d.com/blog/why-ground-control-points-important#need-gcps> (accessed Dec. 11, 2023).
- [33] D. F. R. Parracho, “Processos Digitais para a Realização de Levantamentos Fotogramétricos e Termográficos com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT),” Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal, 2021.