

O “GÉMEO DE CALIBRAÇÃO”: UMA NOVA TIPOLOGIA NA MATURIDADE DOS GÉMEOS DIGITAIS

Diogo F. R. Parracho ⁽¹⁾, Mohamed Nour El-Din ⁽²⁾, João Poças Martins ⁽³⁾

(1) CONSTRUCT-GEQUALTEC, FEUP, Porto, Portugal. 0000-0003-0413-6178

(2) CONSTRUCT-GEQUALTEC, FEUP, Porto, Portugal. 0000-0003-0890-9043

(3) CONSTRUCT-GEQUALTEC, FEUP, Porto, Portugal. 0000-0001-9878-3792

Resumo

Os gémeos digitais são cada vez mais relevantes no setor AECO (Arquitetura, Engenharia, Construção, e Operação), no entanto, a sua terminologia é aplicada de forma inconsistente. Mesmo as classificações mais comuns apresentam ambiguidades, dificultando a distinção entre diferentes níveis de maturidade de geminação digital, contribuindo assim para interpretações divergentes. Para além disso, a fase crítica de calibração de modelos digitais com recurso a dados recolhidos *in situ* carece de um reconhecimento formal como um grau de maturidade distinto, apesar de ser amplamente aplicada na prática.

Este artigo propõe a formalização do “Gémeo de Calibração” (*Calibration Twin*) como uma tipologia intermédia que utiliza dados provenientes de sistemas de monitorização instalados num ativo físico para ajustar e validar modelos virtuais. Esta fase caracteriza-se ainda por um fluxo unidirecional de informação sem capacidade de influenciar o ativo real, posicionando-se conceptualmente entre um modelo digital estático e configurações mais avançadas de geminação digital.

Ao reconhecer esta etapa como um nível de maturidade distinto, destaca-se o papel fulcral da calibração no desenvolvimento de gémeos digitais, reforçando ainda a precisão terminológica necessária para evitar ambiguidades recorrentes. A proposta contribui também para uma taxonomia mais coerente e com potencial de aplicação transversal a outros setores de atividade.

1. Introdução

A origem do conceito de geminação digital remonta à década de 1960, quando a NASA procurava simular condições espaciais na preparação para as missões do programa Apollo. Em 2002, Michael Grieves, da Universidade de Michigan, identifica os elementos necessários para a criação de um gémeo digital: o objeto real, o objeto digital, e um sistema capaz de transferir fluxos de informação entre ambas as partes [1], [2]. A terminologia “*digital twin*” é formalizada em 2010 pela NASA [1]–[4] contudo, apesar do vasto crescimento do interesse da academia e

da indústria a partir de 2017 [2], [5], o conceito tornou-se demasiado lato. A bibliografia apresenta múltiplas definições de um *digital twin*, mesmo fora do domínio do setor AECO [1], [3], [6]–[8]. Neste caso em particular, o termo tornou-se tão amplo que é comum ser confundido com os modelos BIM [7] ou classificado como um “chavão tecnológico” [9]. A falta de padronização do conceito tem sido apontada como uma barreira significativa no progresso dos gémeos digitais, contribuindo para discrepâncias entre projetos [1], [5], [10].

Recentemente, foi elaborada a proposta de norma europeia prEN 18162:2025, que definiu um gémeo digital no setor AECO como “uma representação digital sincronizada com o estado físico do ativo, capaz de suportar visualização, simulação, monitorização, previsão e controlo” [11], [12]. É de notar que esta proposta não utiliza nomenclatura já consolidada no setor, como é o caso da popular trilogia modelo digital, sombra digital e gémeo digital [3], [5], [13].

Apesar da crescente implementação de gémeos digitais e do desenvolvimento de diferentes tipologias para distinguir os seus estágios de maturidade, existe uma fase crítica que, apesar de sobejamente implementada na prática, não tem uma nomenclatura própria: a fase da calibração. É neste passo que os modelos digitais são alinhados com os dados provenientes do mundo físico, sendo por isso fundamental para garantir a confiança, fidelidade e utilidade da geminação digital. Deste modo, este artigo procura reconhecer e formalizar esta etapa de calibração, posicionando-a de forma clara na taxonomia dos gémeos digitais. Pretende-se assim estabelecer uma base de classificação que distinga os sistemas digitais orientados para a calibração de modelos digitais estáticos e de configurações associadas a níveis de maior maturidade.

2. Enquadramento à Geminação Digital

2.1. Distinção entre BIM e Digital Twin

O setor AECO tem assistido a uma revolução digital, batizada de Construção 4.0, impulsionada sobretudo pela crescente adoção da metodologia BIM [11], [14]. O BIM é definido pela norma ISO 19650 como “uma representação digital partilhada de um ativo construído para facilitar os processos de projeto, construção e operação, formando uma base confiável de apoio à decisão” [15]. De acordo com Opoku et al. [13], a esmagadora maioria da literatura referente ao desenvolvimento de gémeos digitais no setor AECO utiliza modelos BIM como base, tanto em termos de geometria como em termos de informação não-gráfica. Shahzad et al. [8] reforçam esta ideia, argumentando que o desenvolvimento de gémeos digitais será inevitavelmente influenciado pela crescente adoção do BIM no setor. No entanto, um gémeo digital não tem necessariamente origem num modelo BIM [12].

A principal característica de um gémeo digital é a sua natureza dinâmica, em contraste com a representação estática dos modelos digitais, como o BIM [8], [10]. Num cenário ideal, isto significa que qualquer alteração no objeto real será refletida em tempo real no objeto digital e vice-versa, resultando num fluxo bidirecional de informação, normalmente graças a sensores e atuadores instalados no mundo físico [2], [5], [8], [10]. Deste modo, o gémeo digital é capaz de agir automaticamente de acordo com a envolvente em que está inserido, aliando ainda ferramentas de análise preditiva a partir de dados históricos [2], [8], [10]. Assim, o processo de geminação digital tem maior aplicabilidade na fase de operação e manutenção de ativos, sendo também relevante durante a construção [13], [16]. É, no entanto, um tópico pouco explorado na fase de desconstrução e demolição [13]. Segundo Nour El-Din et al. [2], o principal foco assenta

em casos aplicados à gestão de ativos (incluindo do ponto de vista energético e do conforto térmico), seguido da monitorização estrutural do edificado e da gestão de obra.

2.2. Tipologias e Níveis de Maturidade de Gémeos Digitais

Existem várias propostas para definir o nível de maturidade de um gémeo digital, sem que haja uma unificação consensual, no entanto, todas convergem na tentativa de estabelecer níveis relativos de desenvolvimento e funcionalidade por comparação a um estado idealizado [5], [10]. Na ausência de uma definição padronizada do que constitui, efetivamente, um *digital twin*, torna-se um desafio nomear os seus estágios de maturidade. Mesmo com tentativas recentes de normalização, nomeadamente pela ISO/IEC 30173:2023, que define os conceitos e a terminologia dos gémeos digitais, e pela prEN 18162:2025, que adapta ao setor da construção, Liu et al. [5] consideram que estes esforços estão atrasados face à realidade do mercado. No setor AECO, a tríade modelo digital (*digital model*), sombra digital (*digital shadow*), e gémeo digital (*digital twin*) mantém-se a nomenclatura mais reconhecida mundialmente [3], [5], [13], contrastando com a visão agregadora da proposta prEN 18162:2025, que enquadra todas estas definições sob o conceito de *Asset Digital Twin* (ADTw) [12], indo numa direção contrária às várias propostas a apresentar em seguida.

Assim, um modelo digital corresponde ao estágio inicial da geminação digital, caracterizando-se pela inexistência de uma ligação que permita a interligação automática direta entre o objeto real e o seu correspondente digital, ou seja, qualquer alteração feita no mundo físico não tem qualquer impacto no digital. A existir um fluxo de informação entre objetos, este é efetuado de forma manual [3], [4], [9], [10], [13], [17]–[19]. Embora seja comum que este modelo seja desenvolvido numa fase que antecede a construção, correspondente ao projeto [3], [10], pode também corresponder a uma edificação pré-existente [3]. Este modelo digital de projeto, ainda sem um correspondente físico, é designado “Pré-Digital Twin” por Madni et al. [20]. Por sua vez, a prEN 18162:2025 denomina de *Asset Digital Twin Prototype* (ADTwP) um modelo que descreve um ativo construído desde a fase de projeto até ao fim da obra, na fase da entrega [12]. Tanto a sombra digital como o gémeo digital têm origem no modelo digital, acrescentando-lhe um fluxo automático de transferência de informação entre o ativo físico e o virtual. A principal diferença entre ambos os conceitos assenta no facto de o gémeo digital permitir uma ligação bidirecional automática da informação entre os mundos real e virtual, contrariamente à sombra digital, que é apenas unidirecional, sem que uma alteração ao objeto digital seja refletida no objeto real, o que, por isso, requer uma ação manual [3], [4], [21], [7]–[10], [13], [17]–[19]. É, no entanto, comum existir uma confusão entre termos, sendo que a maioria dos modelos descritos na literatura não alcança um nível de maturidade suficiente para ser considerado como um gémeo digital, tratando-se, na realidade, de sombras digitais [3], [5], [10].

Além desta taxonomia “clássica” de Kritzinger et al. [19], alguns autores propõem classificações alternativas. Mousavi et al. [10] estende este espetro com mais dois níveis acima do gémeo digital: o “gémeo digital autónomo”, e o “gémeo digital federado”. O primeiro implementa algoritmos de inteligência artificial e aprendizagem computacional não-supervisionada, para operar de forma autónoma, identificar padrões, prever comportamentos e, ainda, tomar decisões. Já o segundo integra múltiplos gémeos digitais autónomos, permitindo uma gestão integrada de sistemas complexos (e.g., cidades inteligentes).

Liu et al. [5] analisam diversas propostas de taxonomia de geminação digital em diversas áreas da engenharia, notando que níveis superiores implicam maior complexidade técnica, requisitos funcionais mais exigentes e riscos financeiros acrescidos. Para além disso, os autores definem

o seu próprio modelo de maturidade de geminação digital, subdividido em cinco níveis: o modelo digital no nível 0, seguido da sombra digital e do gémeo digital, onde se inicia a bidirecionalidade do fluxo de informação. A lógica dos graus superiores é idêntica à descrita por Mousavi et al., neste caso com um “gémeo digital cognitivo” com capacidades autónomas e de autodiagnóstico suportadas por algoritmos de inteligência artificial, seguindo-se por último o “gémeo digital federado”, que agrega os demais num único ecossistema, permitindo aplicações interdomínio e a gestão de sistemas mais complexos. Os autores reforçam ainda a importância da cibersegurança no domínio da geminação digital.

Madni et al. [20] propõem quatro níveis de maturidade, desde modelos virtuais básicos sem qualquer contraparte física, até aos gémeos digitais inteligentes com capacidades de aprendizagem não-supervisionada e com autonomia operacional. O gémeo digital tradicional corresponde ao nível 2, interligando os dados de forma bidirecional entre o ativo físico e o mundo virtual. O terceiro nível, o “gémeo digital adaptativo” acrescenta a aprendizagem computacional supervisionada adaptada ao utilizador, ao passo que o nível superior, o “gémeo digital inteligente”, apresenta elevados graus de autonomia e de capacidade cognitiva.

Elfarri et al. [22] definem seis classes de maturidade de geminação digital de acordo com as suas funcionalidades, aplicadas a uma habitação monitorizada por múltiplos sensores e cujo modelo BIM é integrado em ambiente de realidade virtual (VR). O nível inicial (“independente”) corresponde a um modelo virtual sem qualquer ligação ao ativo físico, enquanto o seguinte (“descritivo”) já incorpora os dados de monitorização e atualiza o respetivo estado. O “gémeo digital diagnóstico” identifica causas de anomalias, o “preditivo” antecipa comportamentos futuros com base em modelos de análise preditiva, enquanto o “prescritivo” recomenda ações para a melhoria do desempenho. O nível superior, o “autónomo”, combina as capacidades de todos os anteriores, atuando ainda de forma independente com base em inteligência artificial. Além disso, os autores utilizam outros termos fora das classes de maturidade, nomeadamente o “irmão digital” (*digital sibling*) que corresponde a um modo *offline* do gémeo digital, ou seja, desligado da operação de monitorização, usado para simulações, análises de cenários hipotéticos, e avaliações de risco, sem necessidade de alterações diretas na operação real. Já o termo “fio digital” (*digital thread*) corresponde a uma linha contínua de dados e previsões geradas pelo *digital twin* ao longo do tempo.

Deng et al. [16] estudam a evolução do BIM até aos gémeos digitais, subdividindo em cinco fases de maturidade: BIM (nível 1), Simulações suportadas por BIM (nível 2), BIM integrado com sensores (nível 3), BIM integrado com inteligência artificial (nível 4), e, por último, os gémeos digitais (nível 5). Os autores concluem que são raros os estudos que chegam aos estágios mais avançados, concentrando a maioria nos patamares intermédios (2 e 3).

Asare et al. [18] adaptam o conceito de *Level of Development* (LOD) do BIM ao contexto da geminação digital, propondo a taxonomia “BIM-based DT LOD”, que evolui do LOD 100 até ao 500. Os autores sugerem que o LOD 300 deve ser considerado como nível inicial para fins de monitorização em tempo real. A proposta foi avaliada através de um inquérito a profissionais do setor AECO, da academia e da indústria, obtendo uma taxa de aceitação elevada, embora com algum ceticismo da parte dos profissionais da indústria não envolvidos em atividades de investigação e desenvolvimento.

No panorama nacional, Mêda et al. [21] propõem uma visão de gémeo digital incremental (iDTw), composto por sete graus de maturidade, do nível 100 ao 500. Neste caso, os primeiros três níveis não integram dados de sensorização [17], [21], que surgem a partir do “*Sensored Twin*” (nível 300), mas somente com uma integração automática unidirecional [21]. Deste

modo, a bidirecionalidade do iDTw inicia-se no “*Responsive Twin*” (nível 350), pese embora apenas no nível seguinte se incorpore a inteligência artificial no processo, com supervisão humana. Finalmente, o “*Intelligent Twin*” (nível 500) representa uma integração de dados totalmente automatizada e personalizada, dispensando intervenção humana [17], [21]. Calvetti et al. [17] expandem posteriormente o conceito de iDTw de forma a aferir os requisitos necessários em cenários reais, sob o ponto de vista do humano, da bidirecionalidade, da segurança, da inteligência artificial e do ambiente de dados.

Sugiyama et al. [23] apresentam uma proposta para a definição de gémeos digitais com base em quatro atributos: fidelidade do modelo, sincronização, inteligência, e autonomia. Por sua vez, cada um destes atributos está subdividido em quatro níveis, de acordo com os respetivos graus de maturidade. Esta abordagem matricial, designada *heritage digital twin*, é particularmente flexível, permitindo até 256 combinações, evitando limitar a geminação digital a uma taxonomia linear rígida. O método é posteriormente ilustrado em quatro casos de estudo portugueses. Apesar de inicialmente concebido para fins patrimoniais, os autores salientam que poderá ser adaptado a outras finalidades também.

Apesar das múltiplas propostas para a definição dos níveis de geminação digital convergirem na sua maioria em termos lógicos, é de notar a falta de uma categoria específica para a calibração e sincronização dos dados adquiridos *in situ* com o mundo virtual. Este procedimento está, no entanto, implícito, pois constitui um passo crítico no desenvolvimento de um gémeo digital [9], [24]–[26]. Assim, torna-se pertinente formalizar este estado transitório, posicioná-lo devidamente na taxonomia da geminação digital e atribuir-lhe uma nomenclatura própria.

3. O “Gémeo de Calibração”

O “*Calibration Twin*” é um conceito prático amplamente implementado e consolidado, mas, até ao momento, sem o devido reconhecimento em nenhuma das propostas analisadas relativas à temática dos níveis de maturidade de um gémeo digital. Embora o termo tenha sido previamente utilizado pela equipa de investigação em [27] para classificar casos aplicados à construção modular digital, nesse trabalho, funcionava apenas como uma etiqueta operacional de análise em que dados reais de monitorização eram utilizados para calibrar ou validar modelos digitais. O presente artigo constitui, assim, a primeira proposta de formalização do “*Calibration Twin*” como uma tipologia própria, com critérios de identificação definidos e posicionamento explícito nas taxonomias de maturidade dos gémeos digitais. Por uma questão de simplicidade e de melhor enquadramento, este conceito será enquadrado na tríade de Kritzinger et al. [19].

O “*Calibration Twin*” é um modelo digital que integra dados provenientes de campanhas de monitorização instaladas num ativo real, com o objetivo de atualizar parâmetros e validar o modelo através do alinhamento entre valores medidos e simulados previamente (e.g., temperaturas, vibrações). Este processo organiza-se tipicamente em eventos de calibração, podendo envolver fluxos automáticos ou recolhas manuais de dados (e.g., *data loggers* em zona sem conexão à rede). Assim, esta proposta de tipologia corresponde a um modelo calibrado com documentação do grau de ajuste e incerteza.

O “*Calibration Twin*” vai além dum simples modelo digital, ao incorporar a componente de sensorização. Difere da sombra digital, pois esta caracteriza-se sobretudo pela replicação do estado do ativo para fins operacionais, com sincronização contínua ou quase em tempo real, ao passo que o “gémeo de calibração” se centra exclusivamente na atualização de parâmetros e na

validação do modelo. Embora esta abordagem possa apoiar processos de tomada de decisão a jusante, essa não é a sua função principal, nem implica qualquer influência direta sobre o ativo físico. Por consequência, o fluxo de informação será apenas unidirecional (do real para o virtual), não constituindo, no entanto, um sistema operacional espelhado do estado físico.

Assim, o “*Calibration Twin*” constitui um estágio intermédio distinto da geminação digital, entre o modelo digital estático e a sombra digital, preenchendo uma lacuna conceptual relevante na taxonomia. Este estado digital pode ser identificado quando se têm os seguintes elementos:

- Modelo digital (não necessariamente um modelo BIM)
- Dispositivos de aquisição contínua de dados instalados no ativo físico
- Fluxo de informação unidirecional (do mundo real para o virtual), automático ou manual
- Processo de calibração e validação dos dados (incluindo comum comparação entre valores medidos e simulados, podendo envolver avaliação de incerteza)
- Possível suporte a processos de tomada de decisão, ainda que sem influência direta sobre o ativo físico

A Figura 1 ilustra esta nomenclatura, proposta anteriormente pela equipa de investigação [27]:

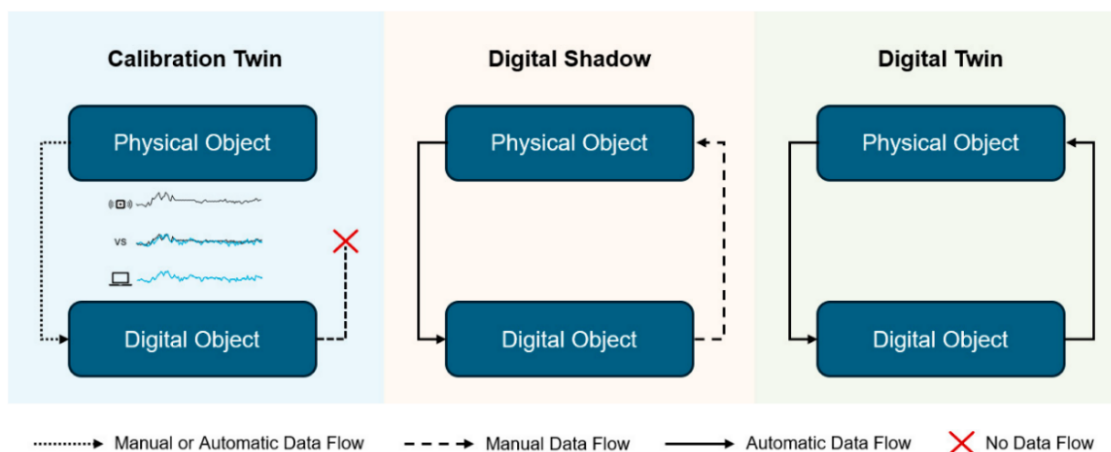


Figura 1: Nomenclatura de geminação digital, incluindo o “gémeo de calibração” [27]

A pertinência desta tipologia pode ser ilustrada, por exemplo, através de uma aplicação no domínio das unidades habitacionais prefabricadas com sistemas solares integrados. Vassiliades et al. [28] analisam uma unidade “Pre-Fab ECO Smart House” com integração de um sistema híbrido fotovoltaico/térmico (PV/T), recorrendo a simulações dinâmicas em TRNSYS para avaliar o comportamento energético, térmico e económico da solução. O estudo é particularmente relevante para esta proposta porque combina um modelo digital de desempenho do edifício, uma unidade física prefabricada, sensores de temperatura integrados no sistema PV/T, e a comparação entre cenários simulados com e sem integração do sistema. Embora o objetivo principal do estudo seja a avaliação do desempenho da solução e não a formulação explícita de uma nova tipologia de gémeo digital, este tipo de configuração demonstra claramente a necessidade de uma categoria intermédia: ultrapassa um modelo digital estático, porque se apoia numa representação dinâmica do ativo e em dados físicos do sistema monitorizado, mas não corresponde a uma sombra digital operacional, pois não procura espelhar continuamente o estado do ativo nem fechar um ciclo de atuação sobre o edifício. A

sua finalidade dominante é a avaliação, ajuste e validação do modelo de desempenho, aproximando-se, assim, da lógica proposta para o “*Calibration Twin*”.

Esta tipologia encontra-se, deste modo, na base do processo de geminação digital, precedido apenas pelo modelo virtual. Sem a existência deste procedimento, não seria possível almejar patamares superiores rumo a um verdadeiro *digital twin* [9], [24]–[26]. No cenário ideal, os dados recolhidos pelo sistema de monitorização devem permitir a calibração e a atualização automáticas do modelo digital [25]. A calibração poderá, no entanto, não ser um processo direto e necessitar primeiramente de uma avaliação da sua incerteza via métodos estatísticos, comparando os valores das campanhas de medição aos dados de simulação numérica, a título de exemplo, do ponto de vista estrutural com modelos de elementos finitos (FEM) [24], [25], ou da térmica e energia com modelos BEM (*Building Energy Modelling*) [26], [29].

Deste modo, o “gémeo de calibração”, enquanto pilar fundamental no ciclo de vida de um gémeo digital, utiliza dados empíricos para afinar a precisão dos modelos, sendo por isso uma peça fulcral para posteriores análises preditivas e aplicação de medidas corretivas, por exemplo. Apesar de presente nos níveis superiores de geminação, a formalização do “gémeo de calibração” como uma etapa própria permite representar de forma mais rigorosa a realidade operacional, clarificando o papel crítico da validação empírica na transição para níveis de maturidade de gémeos digitais mais avançados, colmatando uma lacuna evidente nas taxonomias existentes.

4. Discussão

Tal como analisado na Secção 2.2, existem várias propostas de nomenclatura na área da geminação digital que não consideram a fase de calibração e sincronização dos dados adquiridos. Esta é uma lacuna na literatura, pois existem casos de estudo que não se enquadram na classificação “padrão” de Kritzinger et al. [19]. Alguns casos eram mais do que simples modelos, mas não alcançavam o patamar da sombra digital, encontrando-se num estágio intermédio que mais tarde viria a denominar-se por “*Calibration Twin*”. Inicialmente, o conceito era denominado por “*Digital Prototype*”, traduzido para “Protótipo de um *Digital Twin*” [30], mas esta terminologia viria a ser descartada pelo facto de normalmente se associar a palavra protótipo ao ativo real. A designação “*Simulation Twin*” foi igualmente descartada por já estar em uso com um significado distinto [31]. Para a KPMG, o “*Simulation Twin*” corresponde a um nível de maturidade orientado para a simulação de cenários e a avaliação do impacto de diferentes decisões de projeto, construção e operação, com vista à otimização de custo, desempenho e risco. Difere assim do “*Calibration Twin*”, cuja função principal não é a simulação exploratória de cenários, mas sim o ajuste e a validação de um modelo digital com base em dados medidos no ativo físico. À data, a única referência a um “*Calibration Twin*” nos motores de pesquisa *online* é uma revisão da literatura desta equipa de investigação, que identificou cinco casos aplicados à área da construção modular digital [27].

O reconhecimento formal deste estágio intermédio permite clarificar o estado real de desenvolvimento e maturidade da geminação digital, procurando evitar classificações imprecisas e, principalmente, facilitando a comunicação. Esta proposta contrasta com a prEN 18162:2025, que enquadra todas as instâncias que contêm dispositivos de aquisição de dados instalados num ativo físico numa única categoria: *Asset Digital Twin Instance* (ADTwI) [12]. Deste modo, o “gémeo de calibração” seria agrupado num ADTwI em conjunto com uma

sombra digital e um gémeo digital, deixando de haver distinção entre conceitos, e privilegiando uma visão unificadora do ecossistema digital. Esta abordagem normativa apresenta vantagens ao clarificar o enquadramento conceptual da geminação digital, promovendo um vocabulário comum e simplificando a interoperabilidade ao nível do ecossistema. A agregação de instâncias com capacidade de sensorização sob o conceito de ADTWI fornece um ponto de entrada coerente no contexto da geminação digital. Embora coerente, esta lógica agregadora introduz desafios adicionais, sobretudo em contextos em que a distinção entre diferentes graus de maturidade é essencial para comunicar o nível de desenvolvimento de um sistema digital. Com efeito, a ausência de subcategorias no ADTWI pode perpetuar discrepâncias entre implementações que, embora classificadas da mesma forma, apresentam níveis de desenvolvimento substancialmente distintos, reforçando problemas decorrentes da falta de normalização [1], [5], [10]. Face a isto, poderá ser pertinente considerar a possibilidade de criar graus de maturidade ADTWI, à semelhança da proposta de Asare et al. [18], que adaptam o conceito de LOD aos gémeos digitais.

Apesar de pensado para a realidade do setor AECO, o conceito enquadra-se noutras áreas que apostam fortemente nos gémeos digitais, como as engenharias mecânica [24], aeronáutica e aeroespacial, a manufatura avançada, ou a medicina [1]. Assim, a formalização do “gémeo de calibração” como um estado digital distinto pode ser aplicada a outros setores, promovendo um diálogo interdisciplinar mais consistente sobre a temática da geminação digital.

5. Conclusão

O “*Calibration Twin*” representa um estado digital amplamente implementado na prática, mas até agora ausente das taxonomias de geminação digital. A sua formalização permite descrever com maior precisão a fase em que dados de monitorização, obtidos através de sistemas de aquisição instalados no ativo real, são utilizados para ajustar modelos digitais, posicionando-o entre o “modelo digital” e a “sombra digital”. Ao reconhecer esta etapa como uma configuração distinta, reforça-se a consistência terminológica e colmata-se uma lacuna persistente na representação dos diferentes graus de maturidade dos gémeos digitais. Embora este trabalho se centre no setor AECO, o conceito apresenta potencial de generalização. A calibração entre dados de monitorização e modelos digitais é uma prática transversal aos setores que recorrem a gémeos digitais, pelo que a formalização deste estado intermédio poderá apoiar uma leitura mais coerente das práticas existentes e fomentar um diálogo interdisciplinar mais estruturado. Como trabalhos futuros, considera-se pertinente auscultar a perceção do setor AECO relativamente ao “gémeo de calibração”, avaliando a sua utilidade, clareza e aplicabilidade. Esta reflexão poderá ser aprofundada através de inquéritos para validar, refinar ou expandir o conceito no contexto da geminação digital.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Financiamento - UID/04708 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P./ MCTES, através de fundos nacionais.

Referências

- [1] B. R. Barricelli, E. Casiraghi, and D. Fogli, “A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 167653–167671, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953499.
- [2] 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.
- [3] A. Fuller *et al.*, “Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [4] I. Osadcha, A. Jurelionis, and P. Fokaides, “Geometric parameter updating in digital twin of built assets: A systematic literature review,” *J. Build. Eng.*, vol. 73, p. 106704, 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.106704.
- [5] Y. Liu *et al.*, “A review of digital twin capabilities, technologies, and applications based on the maturity model,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 62, p. 102592, 2024, doi: 10.1016/j.aei.2024.102592.
- [6] I. Esmaeili and D. Simeone, “A General Contractor’s Perspective on Construction Digital Twin: Implementation, Impacts and Challenges,” *Buildings*, vol. 13, no. 4, p. 978, 2023, doi: 10.3390/buildings13040978.
- [7] S. M. E. Sepasgozar, “Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment,” *Buildings*, vol. 11, no. 4, p. 151, 2021, doi: 10.3390/buildings11040151.
- [8] M. Shahzad *et al.*, “Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges,” *Buildings*, vol. 12, no. 2, p. 120 (19 pp.), 2022, doi: 10.3390/buildings12020120.
- [9] T. A. Adebisi, N. A. Ajenifuja, and R. Zhang, “Digital Twins and Civil Engineering Phases: Reorienting Adoption Strategies,” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 24, no. 10, 2024, doi: 10.1115/1.4066181.
- [10] Y. Mousavi *et al.*, “Digital Twin Technology in Built Environment: A Review of Applications, Capabilities and Challenges,” *Smart Cities*, vol. 7, no. 5, pp. 2594–2615, 2024, doi: 10.3390/smartcities7050101.
- [11] J. Poças Martins, “Do BIM aos Gémeos Digitais na Gestão de Ativos,” *Construção Mag. - Rev. Técnico-Científica Eng. Civ.*, no. 130, novembro/dezembro, p. 33, 2025.
- [12] CEN - European Committee for Standardization, “DRAFT prEN 18162 Building Information Modelling (BIM) - Digital twins applied to the built environment - Concept and definitions,” Brussels, Belgium, 2025.
- [13] D.-G. J. Opoku *et al.*, “Digital twin application in the construction industry: A literature review,” *J. Build. Eng.*, vol. 40, p. 102726, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102726.
- [14] J. Brozovsky, N. Labonnote, and O. Vigren, “Digital technologies in architecture, engineering, and construction,” *Autom. Constr.*, vol. 158, p. 105212, 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2023.105212.
- [15] International Organization for Standardization, “ISO 19650-1:2018, Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 1: Concepts and principles,” Geneva, Switzerland, 2018.
- [16] M. Deng, C. C. Menassa, and V. R. Kamat, “From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry,” *J.*

- Inf. Technol. Constr.*, vol. 26, pp. 58–83, 2021, doi: 10.36680/J.ITCON.2021.005.
- [17] D. Calvetti *et al.*, “Incremental digital twin framework: A design science research approach for practical deployment,” *Autom. Constr.*, vol. 170, 2025, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105954.
- [18] K. A. B. Asare, R. Liu, and C. J. Anumba, “Dimensionality of BIM LODs in the Digital Twin Continuum,” *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 40, no. 1, 2026, doi: 10.1061/JCCEE5.CPENG-6479.
- [19] W. Kritzinger *et al.*, “Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [20] A. M. Madni, C. C. Madni, and S. D. Lucero, “Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering,” *Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 2019, doi: 10.3390/systems7010007.
- [21] P. Mêda *et al.*, “Incremental Digital Twin Conceptualisations Targeting Data-Driven Circular Construction,” *Buildings*, vol. 11, no. 11, p. 554, 2021, doi: 10.3390/buildings11110554.
- [22] E. M. Elfarri, A. Rasheed, and O. San, “Artificial Intelligence-Driven Digital Twin of a Modern House Demonstrated in Virtual Reality,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 35035–35058, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3265191.
- [23] G. Sugiyama, I. Bourgeois, and H. Rodrigues, “A holistic methodology for the assessment of Heritage Digital Twin applied to Portuguese case studies,” *Digit. Appl. Archaeol. Cult. Herit.*, vol. 36, p. e00390, 2025, doi: 10.1016/j.daach.2024.e00390.
- [24] T. G. Ritto and F. A. Rochinha, “Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 155, p. 107614, 2021, doi: 10.1016/j.ymssp.2021.107614.
- [25] M. F. Funari *et al.*, “A Parametric Scan-to-FEM Framework for the Digital Twin Generation of Historic Masonry Structures,” *Sustainability*, vol. 13, no. 19, p. 11088, 2021, doi: 10.3390/su131911088.
- [26] D. D. Eneyew, M. A. M. Capretz, and G. T. Bitsuamlak, “Continuous model calibration framework for smart-building digital twin: A generative model-based approach,” *Appl. Energy*, vol. 375, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124080.
- [27] D. F. R. Parracho *et al.*, “Modular Construction in the Digital Age: A Systematic Review on Smart and Sustainable Innovations,” *Buildings*, vol. 15, no. 5, 2025, doi: 10.3390/buildings15050765.
- [28] C. Vassiliades *et al.*, “Assessment of an innovative plug and play PV/T system integrated in a prefabricated house unit: Active and passive behaviour and life cycle cost analysis,” *Renew. Energy*, vol. 186, pp. 845–863, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2021.12.140.
- [29] V. G. González, G. R. Ruiz, and C. F. Bandera, “Empirical and comparative validation for a building energy model calibration methodology,” *Sensors*, vol. 20, no. 17, pp. 1–29, 2020, doi: 10.3390/s20175003.
- [30] D. F. R. Parracho *et al.*, “A fotogrametria aérea como base da criação de modelos BIM e digital twins: revisão da literatura,” in *5º Congresso Português de Building Information Modelling Volume I*, Braga: UMinho Editora, 2024. doi: 10.21814/uminho.ed.142.38.
- [31] KPMG, “Insight report: Innovation & R&D in construction,” Ontario, Canada, 2022. [Online]. Available: <https://www.cca-acc.com/wp-content/uploads/2022/06/Insight-report-June-2022.pdf>