

INTEGRAÇÃO DE MODELOS BIM EM REALIDADE AUMENTADA WEB: DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MÉTODOS DE REGISTO ESPACIAL

J. Torcato Almeida ⁽¹⁾, Mário Coelho ⁽²⁾, José Granja ⁽³⁾, Miguel Azenha ⁽⁴⁾

(1) Instituto CCG/ZGDV, Guimarães, Portugal, 0009-0001-3083-6496

(1) Instituto CCG/ZGDV, Guimarães, Portugal, 0000-0002-6356-6963

(2) ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, PT, 0000-0002-0858-4990

(2) ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, PT, 0000-0003-1374-9427

Resumo

A integração de *Building Information Modelling* (BIM) com Realidade Aumentada (AR) apresenta-se como uma abordagem promissora para a visualização de modelos 3D em contexto real, embora a precisão do registo continue a representar um desafio nas soluções *WebAR*. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e avaliação comparativa de três protótipos baseados em diferentes métodos de registo: geolocalização, *Global Navigation Satellite System* (GNSS), deteção de planos com ancoragem manual e marcadores visuais customizados. A análise considerou precisão, estabilidade, robustez em ambiente urbano e dependência de condições externas. Os resultados indicam que a geolocalização apresenta limitações significativas de precisão, enquanto a deteção de planos oferece melhor equilíbrio entre estabilidade e aplicabilidade, sendo os marcadores particularmente adequados para verificações localizadas em ambientes controlados. As abordagens estudadas demonstram potencial no apoio aos processos urbanísticos, melhorando a compreensão espacial dos projetos.

1. Introdução

A recente transformação dos processos urbanísticos, nomeadamente dos processos de licenciamento, planeamento urbano e discussão pública, tem vindo a ganhar relevância em múltiplos países [1]–[9]. Esta transformação vem, em parte, através de reformas legislativas, avanços no software de modelação paramétrica tridimensional, mas também através da crescente exigência de transparência e proximidade entre as administrações públicas e a população. Neste contexto, o *Building Information Modelling* (BIM), aliado à tecnologia de Realidade Aumentada (AR), tem se destacado como uma forma eficaz de representar os projetos urbanos de forma contextualizada, intuitiva e imersiva, superando as limitações dos meios

tradicionais de comunicação urbanística, como plantas ou alçados 2D, maquetas físicas, ou cartazes em obra [10]–[12].

Nas últimas décadas, vários estudos internacionais exploram a aplicação de AR em processos participativos. Boos, U, *et. al* [12] avaliaram a utilização de uma aplicação AR para visualização de um projeto escolar na cidade de Zurique, comparando-a com o método tradicional baseado em alçados de construção. Os resultados revelaram que a AR aumentou a perceção de escala, e a capacidade de os participantes imaginarem o aspeto final do edifício, sobretudo quando utilizado um modelo com maior nível de informação necessário (LOIN). Embora a precisão percebida entre os diferentes LOIN não tenha apresentado diferenças significativas, o estudo validou que alguns elementos visuais, como a cor e o detalhe exterior das fachadas favorecem a compreensão do edifício. Ao mesmo tempo, evidenciou limitações clássicas da AR, como a tendência para subestimar as distâncias reais em alguns casos.

Adicionalmente, outros estudos analisaram o papel da AR como promotor da participação pública nos processos urbanísticos [11]–[14]. Outros estudos aplicaram AR para promover comportamentos relacionados com economia circular, onde foi demonstrado que a AR pode de facto aumentar a eficácia e motivação dos utilizadores, mesmo entre indivíduos sem elevada literacia tecnológica [7]. A inclusão social, a democratização do acesso à informação e a capacidade da AR em tornar conteúdo técnico mais acessível são aspetos também confirmados pelos autores.

Também em áreas como a da energia urbana, foi demonstrado que a AR facilita a interpretação dos dados sobre consumos e produção de energia, através da associação de informação abstrata a elementos físicos do ambiente. Estes autores verificaram que a visualização através de AR torna estes tópicos mais intuitivos, permitindo facilmente compreender as diferentes categorias de *feedback* energético, reforçando a importância da contextualização espacial que a AR proporciona [15].

Em Portugal, este movimento tem sido impulsionado por iniciativas públicas e administrativas e enquadramentos regulamentares recentes que promovem a adoção progressiva do BIM em contexto de licenciamento urbanístico, em particular em obras públicas e em processos associados ao planeamento e controlo urbanístico [16]. A recente introdução legislativa que obriga a utilização do BIM em projetos de arquitetura até 2030 reforça a necessidade de desenvolvimento de ferramentas que permitam, não apenas a produção destes modelos digitais, mas também a sua utilização prática para efeitos de validação e comunicação eficaz entre os diferentes intervenientes no processo urbanístico.

Tendo isto em conta, o desenvolvimento de aplicações de AR baseadas em *web* e tecnologias de código-aberto (*open-source*) promete abrir novas possibilidades para a visualização e interação com os modelos tridimensionais diretamente através de navegadores *web*, sem necessidade de instalação de aplicações dedicadas, permitindo o desenvolvimento de aplicações com custos de longo prazo reduzidos. Estas bibliotecas permitem então explorar abordagens mais acessíveis, multiplataforma e potencialmente escaláveis para utilização nestes processos públicos, nomeadamente em contexto de licenciamento e inspeção urbanística.

Portanto, o presente artigo tem como principal objetivo estudar e comparar 3 diferentes abordagens baseadas em *web* para a visualização de modelos BIM através de AR, recorrendo exclusivamente a tecnologias abertas (*open-source*) e baseadas em *web*. Para este efeito, foram desenvolvidos e analisados 3 protótipos, desenvolvidos com recurso a duas bibliotecas distintas. Estes protótipos distinguem-se entre si pelo método de posicionamento do modelo (registo do modelo).

Posto isto, o presente artigo encontra-se estruturado da seguinte forma: i) a secção 2 apresenta a metodologia adotada, onde são expostos os *workflows*, a arquitetura e as tecnologias utilizadas no desenvolvimento de todos os protótipos; ii) a secção 3 detalha e analisa os protótipos desenvolvidos, organizados de acordo com a abordagem de registo do modelo; iii) finalmente, a secção 4 discute e conclui sobre os resultados obtidos, identificando as vantagens, limitações, e precisão de cada método, assim como discutindo a usabilidade e aplicabilidade prática de cada tecnologia estudada.

2. Metodologia

Nesta secção é descrita a abordagem adotada para o desenvolvimento dos protótipos *web* que permitem a visualização de modelos BIM através de AR. Aqui pretende-se detalhar a arquitetura de desenvolvimento, os fluxos de trabalho envolvidos e as ferramentas utilizadas. A metodologia adotada foi estruturada em duas vertentes principais: i) a definição da arquitetura de desenvolvimento e integração dos modelos BIM em ambientes *web*, e; ii) a seleção e utilização de bibliotecas de código aberto (*open-source*) que suportam diferentes estratégias de posicionamento de modelos (*model registration* – registo do modelo).

2.1 Arquitetura de Desenvolvimento

A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático da arquitetura de desenvolvimento adotada, onde está detalhada a relação entre as etapas de preparação do modelo BIM, até à sua integração com cada um dos protótipos AR desenvolvidos.

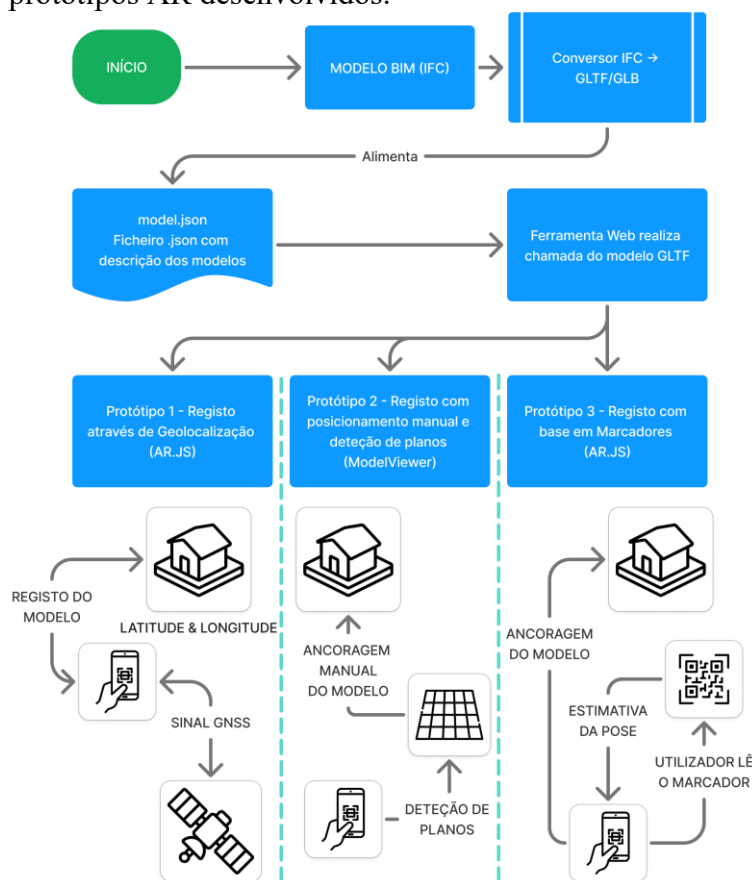


Figura 1 - Diagrama esquemático da arquitetura de desenvolvimento adotada.

O *workflow* geral pode ser descrito em três etapas principais: i) Preparação do modelo BIM, ii) desenvolvimento dos protótipos *web*, iii) integração AR e posicionamento do modelo no espaço real. Na primeira etapa os modelos tridimensionais, originalmente em formato *Industry Foundation Classes* (IFC), são exportados para o formato *Graphics Library Transmission Format/GL Transmission Format Binary* (GLTF/GLB) através de um conversor específico. Esta etapa permite criar modelos em formato coerente que alimentam posteriormente os 3 protótipos desenvolvidos. A referência a estes modelos é guardada num ficheiro em formato *JavaScript Object Notation* (JSON), que é utilizado na etapa seguinte. Neste ficheiro JSON é também guardada a sua posição no mapa. Os modelos GLTF/GLB são então integrados na página *web* desta forma. A etapa final consiste na integração destes modelos nos protótipos desenvolvidos, conforme o método de posicionamento do modelo escolhido, nomeadamente: i) geolocalização, onde o modelo é posicionado com base nas coordenadas *Global Navigation Satellite System* (GNSS); ii) Detecção de planos, seguida de ancoragem manual; iii) Através de marcadores físicos customizados.

2.2 Tecnologias Utilizadas

O desenvolvimento destes protótipos foi realizado essencialmente com recurso a 3 bibliotecas distintas: i) AR.js, uma biblioteca para AR na *web*, que inclui funcionalidades como *Image Tracking*, *Location Based AR* e *Marker Tracking* [17]; ii) *model-viewer*, uma biblioteca que permite exibir modelos 3D interativos na *web* e em AR [18]; iii) *Leaflet*, uma biblioteca que permite a criação de mapas interativos [19].

O AR.js é uma biblioteca *open-source* desenvolvida com base na tecnologia (*WebXR – Android*), mas que fornece suporte para ambientes *iOS* através de *WebGL/WebRTC*. Esta biblioteca está preparada para diferentes tipos de posicionamento dos modelos, nomeadamente, marcadores físicos e geolocalização via GPS do dispositivo. Destaca-se, pois, funciona diretamente sobre o *browser*, sem necessitar da instalação de aplicações adicionais. Também suporta múltiplos métodos de registo do modelo, incluindo o posicionamento por marcadores, geolocalização e *Image Tracking*.

O *model-viewer* é uma biblioteca *open-source* baseada em *Web Components* que permite a integração de modelos tridimensionais (em formato GLTF/GLB) em páginas *web*. Esta biblioteca permite a visualização dos modelos através de *WebXR*, mas também permite a utilização do *Scene-Viewer* (*Android*) e do *Quick Look* (*iOS*). Destaca-se pela sua compatibilidade com qualquer navegador moderno, pela fácil integração em plataformas *web* existentes. No entanto, esta biblioteca não possui flexibilidade no modo de posicionamento do modelo, estando limitada ao posicionamento manual com base na deteção de planos, e a interação com o modelo está limitada a funcionalidades básicas, não permitindo o *tracking* avançado de planos ou em ambientes complexos.

Além das bibliotecas supramencionadas, foi também utilizada a biblioteca *A-Frame* [20] que fornece suporte à renderização e manipulação de modelos 3D, incluindo suporte para AR. Foi também utilizada a biblioteca *Leaflet* [19] de modo a criar um mapa interativo que permite ao utilizador visualizar todos os modelos existentes disponíveis para visualização em AR através de um marcador que situa o modelo na sua posição exata no mapa.

3. Protótipos Baseados em Tecnologias *Web*

3.1 Protótipo 1 – AR.js com Posicionamento baseado em Geolocalização

O primeiro protótipo explora um método de registo baseado exclusivamente na geolocalização do modelo, extraída do modelo BIM em formato IFC. A partir deste modelo são extraídas as coordenadas de latitude e longitude, retiradas com base na representação *IfcMapConversion*. Este protótipo recorre à biblioteca AR.js [17], que suporta o registo de modelos baseada em localização (*Location-Based AR*). Após a conversão do modelo IFC para GLB, as coordenadas geográficas associadas ao ponto de registo do modelo são guardadas num ficheiro JSON. Quando o utilizador seleciona o indicador do modelo no mapa gerado com recurso ao *Leaflet*, ilustrado na Figura 2, a aplicação ativa o visualizador de AR correspondente. A posição atual do utilizador é então comparada com estas coordenadas, sendo o modelo posicionado de acordo com essa referência.



Figura 2 - Mapa com os indicadores dos modelos introduzidos.

Este método é versátil e simples, sendo que o processo prévio de manipulação dos modelos pode ser totalmente automatizado, pois é baseado apenas em informação já presente no modelo IFC, que pode ser definida nos Requisitos de Troca de Informação (EIR). Também não é necessária nenhuma preparação adicional do espaço físico. A possível integração com os sistemas de informação geográfica permite, teoricamente, a visualização de múltiplos projetos distribuídos em diferentes localizações.

No entanto, a precisão deste método está intrinsecamente dependente da qualidade do sinal GNSS disponível. Em contexto urbano, a precisão esperada situa-se entre os 5 e os 10 metros, variando em função da densidade do edificado circundante, das condições atmosféricas e do sinal recebido [21]. Embora seja possível a melhoria significativa destas precisões através de técnicas especializadas, como o *Real Time Kinematic (RKT)*, isto acaba por limitar a aplicabilidade deste método em cenários onde seja exigida elevada precisão espacial. Observou-se ainda que pequenas variações na posição do utilizador podem provocar deslocamentos visíveis do modelo (*drift*). Portanto, embora o método seja de simples

implementação em *workflows* urbanísticos e facilmente escalável, a sua utilização prática revela-se limitada sem recurso a *hardware* especializado, à capacidade atual da tecnologia.

3.2 Protótipo 2 – *Model Viewer*

O segundo protótipo utiliza a biblioteca *Model-viewer* [18] para visualização do modelo, explorando a interface nativa de deteção de planos disponibilizado nos sistemas móveis. Este método combina a deteção automática de planos, registando o modelo automaticamente no plano horizontal, com o ajuste manual do modelo para o registo dos dois planos remanescentes. Ao clicar no indicador do modelo presente no mapa, o modelo pode ser visualizado e manipulado num ambiente tridimensional convencional. De seguida, é possível clicar num botão para iniciar a visualização AR. Isto inicia o sistema de deteção de planos horizontais. Uma vez identificado o plano válido, o modelo é colocado automaticamente sobre essa superfície. Por defeito, o *model-viewer* posiciona o modelo no seu centro, não sendo possível modificar este comportamento. De maneira a compensar este comportamento, e aproximar o modelo à posição real do edifício, foi implementada uma animação no ficheiro GLTF que desloca o modelo uma determinada distância. Esta distância foi definida manualmente, considerando a posição típica do utilizador em relação ao edifício.

Após o posicionamento inicial, o utilizador pode ajustar manualmente a posição e rotação do modelo, permitindo alinhar o modelo digital com o edifício físico existente. Este ajuste fino revelou-se eficaz, permitindo alcançar precisões de registo inferiores a 0,50m. Além disto, foi também observada uma excelente estabilidade da ancoragem inicial, com reduzido efeito de *drift*, mesmo para deslocações significativas do utilizador. A Figura 3 ilustra o método de ancoragem manual, assim como demonstra o posicionamento do modelo virtual em relação ao edifício real.



Figura 3 - Ajuste manual da ancoragem do modelo (esquerda); Modelo Virtual posicionado no modelo real (direita).

A principal limitação deste método reside na impossibilidade de introduzir diferentes métodos de registo, através do controlo direto do algoritmo de ancoragem, uma vez que o *Scene Viewer* e o *Quick Look* são ferramentas nativas com funcionalidades pré-definidas. Não é possível integrar métodos alternativos de registo ou aplicar correções adicionais.

3.3 Protótipo 3 – AR.js com Posicionamento Baseado em Marcador

O terceiro protótipo implementa um método de registo baseado em marcadores visuais, recorrendo novamente à biblioteca AR.js [17]. O processo inicia-se com a deteção do marcador através da câmara do dispositivo. Uma vez reconhecido o padrão visual, o sistema estima a pose do dispositivo, posicionando o modelo relativamente a essa referência. Nos testes realizados foi utilizado um marcador rotativamente assimétrico, de modo a reduzir as imprecisões na estimativa da orientação do plano.

Os testes realizados foram realizados com marcadores de pequenas dimensões (16x16 cm). Ficou demonstrado que estes marcadores não são suficientes para realizar o registo de modelos de grande escala, como edifícios completos, por dois motivos: i) a deteção do marcador não é possível a longa distância, distância essa que é necessária para observar com relevância o modelo em AR; ii) a estabilidade do posicionamento depende intrinsecamente do tamanho do marcador utilizado. Observou-se então que a estabilidade rotacional e a distância máxima de deteção estão diretamente relacionadas com o tamanho do marcador.

Em termos de precisão, este método é razoavelmente preciso (<1,00m), no entanto é necessário computar a distância da origem do modelo à posição exata do marcador. Esta relação nem sempre será a mesma, o que obriga a um procedimento manual de inserção desta distância. Também podem existir erros de colocação do marcador, o que pode acabar por causar erros indiretos de precisão do modelo de AR. Foi igualmente verificado que o contraste do marcador relativamente ao fundo em que ele está afixado influencia de forma significativa a deteção do marcador. Fundos mais claros e homogêneos favorecem o reconhecimento a maiores distâncias, enquanto superfícies escuras, ou visivelmente complexas, reduzem a robustez da deteção do marcador.

Este método permite atingir elevada precisão local, uma vez que o modelo é rigidamente associado ao marcador físico. No entanto, requer preparação prévia do local, incluindo a colocação física do marcador, e a definição desta posição no modelo BIM.

4. Discussão e Conclusões

A realização deste estudo consistiu no desenvolvimento e análise de 3 protótipos distintos para visualização de modelos BIM através de AR com recurso a ferramentas *web* e *open-source*. A análise comparativa, resumida na Tabela 1, demonstra que a escolha do método de registo tem impacto direto na precisão do registo e na instabilidade (*drift*) do modelo de AR quando sobreposto ao mundo real. Contudo, cada um dos casos apresenta diferentes metodologias de registo do modelo, e, por conseguinte, resulta num diferente conjunto de possíveis casos de uso.

Tabela 1 – Tabela comparativa dos diferentes protótipos desenvolvidos.

Critério	Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3
Tecnologia Base	AR.js (<i>Location-Based</i>)	<i>Model Viewer</i> (<i>Scene Viewer / Quick Look</i>)	AR.js (<i>Marker-Based</i>)
Registo de Modelos	Geolocalização (GNSS)	Deteção de Planos + Ancoragem Manual	Marcadores Customizados
Precisão Observada	5-10m	< 0,50m	< 1,00m
Instabilidade (<i>Drift</i>)	Elevada, especialmente em movimento	Muito reduzida	Rotacional média; Translação reduzida
Dependência de <i>Hardware</i>	Dispositivo móvel com câmara e sensor GNSS	Dispositivo móvel com câmara	Dispositivo móvel com câmara
Necessidade de Preparação do Local	Não requer preparação	Não requer preparação	Requer colocação dos marcadores
Dependência de Condições Externas	Precisão do sinal GNSS	Existência de superfícies detetáveis; Iluminação	Iluminação; Contraste do marcador com o edifício; Visibilidade do marcador
Robustez em Ambiente Urbano	Reduzida	Média Alta	Elevada
Possíveis Casos de Uso	Visualização preliminar de projetos de larga escala; Navegação exploratória baseada em localização	Análise comparativa entre o modelo BIM e o edificado; Auxílio na visualização da implantação do edificado.	Verificação técnica localizada; Visualização de instalações temporárias em ambientes controlados

O protótipo 1, revelou limitações significativas em termos de precisão. A variação entre 5 e 10 metros inviabiliza a sua utilização em cenários rigorosos de implantação ou inspeções técnicas, sem recurso a *hardware* especializado. A instabilidade observada durante o movimento do utilizador, reforça a dependência deste método da qualidade do sinal GNSS, particularmente problemático em ambientes urbanos densos. O protótipo 2 apresentou um melhor equilíbrio entre precisão e estabilidade. A deteção de planos permite uma ancoragem robusta do modelo, sendo posteriormente refinada com ajuste manual. Esta combinação revelou-se eficaz na redução do erro para valores inferiores a 0,50m, mantendo simultaneamente baixa a instabilidade do modelo (*drift*), mesmo após grande deslocamento do utilizador. O protótipo 3 demonstrou igualmente boa precisão de registo (<0,50m), e baixa instabilidade, especialmente

na componente translacional, registando alguma instabilidade rotacional, particularmente devido ao tamanho reduzido do marcador utilizado e ao baixo contraste entre a cor do marcador e a cor da fachada do edifício.

Os resultados obtidos indicam que não existe uma solução universalmente superior, mas sim abordagens mais adequadas a diferentes casos de uso. O protótipo 1 é particularmente adequado para visualizações exploratórias que não careçam de alta precisão no posicionamento, tal como apresentação preliminar de projetos de grande escala, onde esta precisão não seja determinante. O protótipo 2 demonstra maior adequação a cenários de confirmação para validações em obra, permitindo alinhar o modelo ao edificado com um erro real reduzido, no entanto nunca substituindo os métodos tradicionais de verificação. O protótipo 3 revela-se mais indicado para verificações localizadas, nomeadamente na análise de elementos construtivos específicos, visualização de instalações temporárias em ambientes controlados.

Considerando isto, os resultados demonstram que: i) os métodos baseados em geolocalização (sem *hardware* especializado) apresentam precisão insuficiente para aplicações técnicas rigorosas, no entanto demonstram uma elevada escalabilidade e facilidade de utilização; ii) A combinação da deteção de planos com o ajuste manual constitui uma solução mais equilibrada em termos de precisão e baixa instabilidade (*drift*), mas exigem um utilizador mais experiente para realizar corretamente o ajuste da ancoragem do modelo; iii) Os sistemas baseados em marcadores permitem um registo do modelo preciso em contextos controlados, sendo particularmente adequados para validações mais localizadas, no entanto carecem de preparação do local e condições de visibilidade favoráveis.

É possível concluir que a *WebAR* constitui uma alternativa de baixo custo, acessível e escalável para visualização de modelos BIM. Estas soluções podem servir como ferramentas complementares aos processos urbanísticos. No licenciamento, permitem visualizar a implantação real dos projetos no local, facilitando a análise volumétrica e a verificação preliminar da conformidade. Em inspeções, podem apoiar a comparação entre licenciamento e o efetivamente executado. Na participação pública, melhoram a comunicação entre técnicos, promotores e municípios, reduzindo ambiguidades associadas à leitura de desenhos 2D.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela União Europeia no âmbito do *NextGenerationEU*, através de uma subvenção do Acordo de Parceria do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) da República Portuguesa, no âmbito do programa “Missão Interface”, com o objetivo de financiar a componente base do Instituto CCG/ZGDV (Código de Operação n.º 03/C05-i02/2022.P5; Subvenção Total: 4 037 440,23 Euros).

Referências

- [1] M. J. F. Silva, F. Salvado, P. Couto, and Á. V. e Azevedo, ‘Roadmap Proposal for Implementing Building Information Modelling (BIM) in Portugal’, *Open Journal of Civil Engineering*, vol. 06, no. 03, pp. 475–481, 2016.
- [2] ‘Project - CHEK – Change toolkit for digital building permit’, 2025. [Online]. Available: <https://chekdbp.eu/project-2/>. [Accessed: 04-Jun-2025].
- [3] ‘BRISE-VIENNA’, 2024. [Online]. Available: <https://digitales.wien.gv.at/en/projekt/brise-vienna/>. [Accessed: 31-May-2025].
- [4] W. Yu, X. Zhou, D. Wang, and J. Dong, ‘The Development and Construction of City Information Modeling (CIM): A Survey from Data Perspective †’, *Applied Sciences*

- (Switzerland), vol. 15, no. 9. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 01-May-2025.
- [5] D. Pfeiffer, S. Fischer, and R. Schneider, 'BIM checking software requirements in the scope of the Vienna building authority'.
 - [6] M. Hanzl, 'Information technology as a tool for public participation in urban planning: a review of experiments and potentials', *Des. Stud.*, vol. 28, no. 3, pp. 289–307, May 2007.
 - [7] T. Katika, I. Karaseitanidis, D. Tsiakou, C. Makropoulos, and A. Amditis, 'Augmented Reality (AR) Supporting Citizen Engagement in Circular Economy', *Circular Economy and Sustainability*, vol. 2, no. 3, pp. 1077–1104, Sep. 2022.
 - [8] K. Reaver, 'Augmented reality as a participation tool for youth in urban planning processes: Case study in Oslo, Norway', *Front. Virtual Real.*, vol. 4, 2023.
 - [9] S. M. Saßmannshausen, J. Radtke, N. Bohn, H. Hussein, D. Randall, and V. Pipek, 'Citizen-Centered Design in Urban Planning: How Augmented Reality can be used in Citizen Participation Processes', in *DIS 2021 - Proceedings of the 2021 ACM Designing Interactive Systems Conference: Nowhere and Everywhere*, 2021, pp. 250–265.
 - [10] A. De Jaeger and T. Swerts, 'Right to the digital Twin City? citizen participation and limits-by-design in Rotterdam's urban digital twin', *Cities*, vol. 168, Jan. 2026.
 - [11] M. Allen, H. Regenbrecht, and M. Abbott, *Smart-Phone Augmented Reality for Public Participation in Urban Planning*. ACM Digital Library, 2013.
 - [12] U. C. Boos, T. Reichenbacher, P. Kiefer, and C. Sailer, 'An augmented reality study for public participation in urban planning', *Journal of Location Based Services*, vol. 17, no. 1, pp. 48–77, 2023.
 - [13] S. Das, M. Wolf, P. Schmidt, and H. Sobke, 'Mental Workload in Augmented Reality-based Urban Planning Education', in *Proceedings - 2023 IEEE International Symposium on Multimedia, ISM 2023*, 2023, pp. 303–308.
 - [14] P. He, Q. C. Wang, H. Wang, J. Xue, H. X. Bao, G. Q. Shen, S. Guo, M. Ni, and S. Wang, 'From participation to partnership: A systematic review of public engagement in sustainable urban planning', *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 117. Elsevier Inc., 01-Mar-2026.
 - [15] A. Francisco and J. E. Taylor, 'Understanding citizen perspectives on open urban energy data through the development and testing of a community energy feedback system', *Appl. Energy*, vol. 256, Dec. 2019.
 - [16] J. T. Almeida, 'BIM-AR Applications for Urban Planning: A Proposal for The Portuguese Context'.
 - [17] 'AR.js - Augmented Reality on the Web | AR.js'. [Online]. Available: <https://ar-js-org.github.io/AR.js/>. [Accessed: 15-Feb-2026].
 - [18] Google, 'Model-Viewer', 2018-2025. [Online]. Available: <https://modelviewer.dev/>. [Accessed: 14-Aug-2025].
 - [19] Volodymyr Agafonkin, 'Leaflet - a JavaScript library for interactive maps'. [Online]. Available: <https://leafletjs.com/>. [Accessed: 18-Jun-2025].
 - [20] 'A-Frame – Make WebVR'. [Online]. Available: <https://aframe.io/>. [Accessed: 15-Feb-2026].
 - [21] J. Ratajczak, M. Riedl, and D. T. Matt, 'BIM-based and AR application combined with location-based management system for the improvement of the construction performance', *Buildings*, vol. 9, no. 5, 2019.