

INTEGRAÇÃO BIM-RA: ABORDAGEM MARKERLESS PARA MONITORIZAÇÃO DE PROGRESSO DE OBRA EM AMBIENTE CONSTRUTIVO

Pedro Ferreira ⁽¹⁾, Mário Dixo ⁽²⁾, Daniel Pereira ⁽²⁾, João N.D. Fernandes ⁽³⁾, Luís Sanhudo ⁽⁴⁾

(1) BUILT CoLAB, Porto, Portugal, 0000-0003-4187-5033

(2) BUILT CoLAB, Porto, Portugal

(3) BUILT CoLAB, Porto, Portugal, 0000-0003-0590-4861

(4) BUILT CoLAB, Porto, Portugal, 0000-0002-2578-6981

Resumo

A integração de ferramentas de Realidade Aumentada (RA) com metodologias *Building Information Modeling* (BIM) oferece novas formas de visualizar e interagir com modelos digitais em contexto real, promovendo uma comunicação mais eficaz entre equipas e melhorando as tomadas de decisão no terreno. Contudo, a sua adoção no setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações (AECO) continua condicionada por diversas limitações técnicas e operacionais, como acentuadas curvas de aprendizagem ou longos períodos de adaptação ao hardware.

O trabalho apresentado descreve o desenvolvimento e validação de uma aplicação de RA, aplicada a processos de gestão e monitorização do progresso de obra. A solução emprega uma abordagem *markerless* de ancoragem espacial, garantindo a sobreposição estável e persistente dos modelos BIM sobre o ambiente físico, sem necessidade de marcadores visuais. A adoção do sistema pressupõe uma compreensão espacial melhorada e um acesso contextualizado à informação BIM do modelo sobreposto, permitindo identificar discrepâncias e verificar a conformidade construtiva.

A introdução deste tipo de tecnologia como ferramenta de apoio técnico no ciclo de vida da construção promove aumentos de produtividade e eficiência e constitui um passo importante para a digitalização do setor AECO. Ao melhorar a fiabilidade do alinhamento e simplificar a implementação, este trabalho visa contribuir para tornar as ferramentas de RA mais acessíveis aos trabalhadores e práticas em fluxos de trabalho baseados em BIM, promovendo a sua utilização em detrimento de métodos tradicionais.

1. Introdução

A adoção de ferramentas digitais, impulsionada pela digitalização da indústria do setor AECO, tem promovido melhorias significativas na eficiência e na qualidade dos processos construtivos [1]. Embora o BIM seja amplamente utilizado como suporte central de informação, a sua aplicação prática em obra permanece restrita, sobretudo no que respeita ao acesso contextualizado e à interpretação da informação por parte dos intervenientes no terreno [2]. Esta

lacuna compromete o seu potencial enquanto ferramenta de apoio à monitorização e controlo do processo construtivo.

Neste contexto, este trabalho apresenta a RA como uma abordagem eficaz para aproximar o modelo BIM da realidade construída, permitindo a sua visualização em escala real diretamente no local da obra. O artigo descreve o desenvolvimento de uma aplicação de RA para dispositivos *head-mounted display* (HMD), orientada para a monitorização do progresso de obra. A solução baseia-se num sistema de ancoragem espacial *markerless*, com âncoras persistentes adaptadas para funcionamento offline, assegurando uma sobreposição estável e fiável entre o modelo BIM e o ambiente construído.

Seguindo a introdução, o artigo inclui, no capítulo 2, uma revisão do estado da arte. O capítulo 3 define a arquitetura e metodologia empregados e a descrição do sistema de ancoragem proposto é apresentada nos capítulos 4 e 5. O capítulo 6 apresenta uma implementação piloto em obra e a discussão dos resultados obtidos. As conclusões são incluídas no capítulo 7.

2. Estado da Arte

A integração BIM-RA tem vindo a consolidar-se como uma das abordagens mais pragmáticas para disponibilizar informação digital a partir do estaleiro, permitindo comparar, em escala real, o *as-designed* com o *as-built* e reduzindo a fricção típica da consulta de plantas e modelos fora de contexto. Estudos recentes mostram que as aplicações de RA na construção concentram-se sobretudo em coordenação em obra, inspeção de qualidade, documentação e apoio à decisão, com impacto reportado na redução de retrabalho e na melhoria da comunicação entre equipas [3]. Do ponto de vista técnico, os sistemas BIM-RA enfrentam dois tipos de desafios: preparação do modelo para visualização e interação e alinhamento espacial.

No primeiro, o desafio recorrente é transformar modelos BIM detalhados em representações otimizadas para renderização em tempo real, sem perder a informação relevante para o utilizador (e.g., IDs, categorias, propriedades). Trabalhos recentes sobre integração de BIM com motores de jogo reforçam que o desempenho e a consistência do fluxo de dados continuam a ser fatores críticos para experiências de Realidade Mista (RM) fiáveis, sobretudo quando se pretende navegação fluida e manipulação de modelos em contexto real [4].

Na camada de alinhamento, a literatura identifica o registo espacial como o principal entrave à operacionalização em estaleiro. Abordagens *marker-based* (e.g., códigos QR, alvos) são simples e replicáveis, mas introduzem dependência de marcadores físicos e manutenção. Já as abordagens *markerless* (e.g., SLAM, mapeamento espacial) eliminam marcadores, mas enfrentam degradação em ambientes com geometria repetitiva, poeiras, oclusões e variações de iluminação. Um estudo recente sobre localização em RM discute limitações de métodos puramente visuais e aponta constrangimentos de soluções industriais baseadas em âncoras quando aplicadas a escalas maiores ou a cenários complexos [5].

Em paralelo, surgem contributos aplicados que integram RA com processos formais de inspeção e documentação. Em túneis, por exemplo, foi explorada RA para apoiar registos de inspeção e reduzir dependência de processos em papel, evidenciando ganhos na rastreabilidade e no tempo de reporte, mas mantendo o alinhamento como requisito essencial para credibilidade operacional [6]. No domínio de segurança, propostas recentes demonstram visualização em RA de requisitos e planos modelados em BIM, suportada por localização *markerless indoor-outdoor*, reforçando o potencial da RA como interface contextual para dados BIM em obra [7].

Na indústria, plataformas comerciais como a *Argyle* têm explorado mecanismos de *anchor-lock* com base em *Azure Spatial Anchors* para guardar pontos de alinhamento criados no terreno, e surgem soluções orientadas a projetos *industrial-strength* com foco explícito em BIM alinhado em RA [8]. Ainda assim, a dependência de conectividade e a persistência robusta das âncoras permanecem temas centrais, motivando investigação e desenvolvimento em estratégias de persistência, sincronização e operação *offline*, especialmente relevantes para estaleiros com restrições de rede.

3. Arquitetura e Metodologia

3.1 Arquitetura do Sistema

O sistema adota uma arquitetura que integra múltiplos padrões de *design* para lidar com diferentes aspetos das funcionalidades do *software*, assegurando que cada componente é otimizado para o seu papel específico, mantendo simultaneamente um sistema coeso e escalável. Esta arquitetura modular é composta por três elementos principais, para permitir uma divisão de responsabilidades bem definida e uma maior adaptabilidade às necessidades da implementação:

- **Aplicação de RA:** desenvolvida no motor de jogo *Unity* recorrendo ao padrão de design *Entity-Component-System*, que separa as partes constituintes em objetos, a informação a eles atribuída e aos sistemas que operam as mecânicas principais. Esta arquitetura, utilizada no desenvolvimento de jogos, é adequada à otimização do desempenho do *software* em dispositivos com menor capacidade computacional;
- **Base de dados e repositório *Cloud*:** atuam como serviços de suporte ao armazenamento e sincronização de dados através de uma arquitetura de Microserviços. Este padrão é o mais adequado pela sua capacidade de suportar funcionalidades independentes, destacando-se pela modularidade, flexibilidade e escalabilidade, características que facilitam o desenvolvimento, a manutenção e a adaptação do *software*.
- **Plugin para *software* BIM (*Autodesk Revit*):** beneficia de uma arquitetura MVVM (*Model-View-ViewModel*) devido à necessidade de uma interface complexa aliada a uma lógica robusta e independente, assentando numa estrutura organizada e da clara separação de responsabilidades, o que promove um desenvolvimento mais eficiente, manutenção simplificada, bem como maior escalabilidade e flexibilidade da aplicação.

Ao combinar estes padrões, o *software* beneficiará de uma arquitetura bem estruturada, de fácil manutenção e escalável, que aproveita os pontos fortes de cada padrão para abordar eficazmente os diferentes aspetos do sistema.

3.2 Metodologia de Integração BIM-RA

A metodologia adotada visa assegurar uma interoperabilidade eficiente entre o *software* de modelação BIM e a aplicação de RA para reduzir a fricção associada à transição entre aplicações, incentivando a sua utilização mais frequente em processos construtivos. Nesse sentido, é fundamental não só viabilizar a transferência de forma segura dos modelos entre o ambiente BIM e o ambiente aumentado, como também manter uma fonte de verdade para a informação alfanumérica ao longo do sistema. A Figura 1 evidencia o *pipeline* da integração

BIM-RA e o fluxo de dados entre as partes constituintes. Este inicia no ambiente de modelação BIM, onde, através do *plugin Autodesk Revit*, é criada a estrutura de organização por projetos que facilita a correta passagem dos ficheiros entre as aplicações. O mesmo atua como mecanismo de suporte em processos que incluem a organização dos diferentes modelos BIM e dos seus elementos construtivos, a preservação de identificadores e categorias dos elementos, a garantia da correspondência métrica e da escala real (1:1) e a conversão e exportação de toda a informação para formatos compatíveis com o motor de jogo (i.e., .obj, .mtl para informação geométrica e .json para informação alfanumérica).

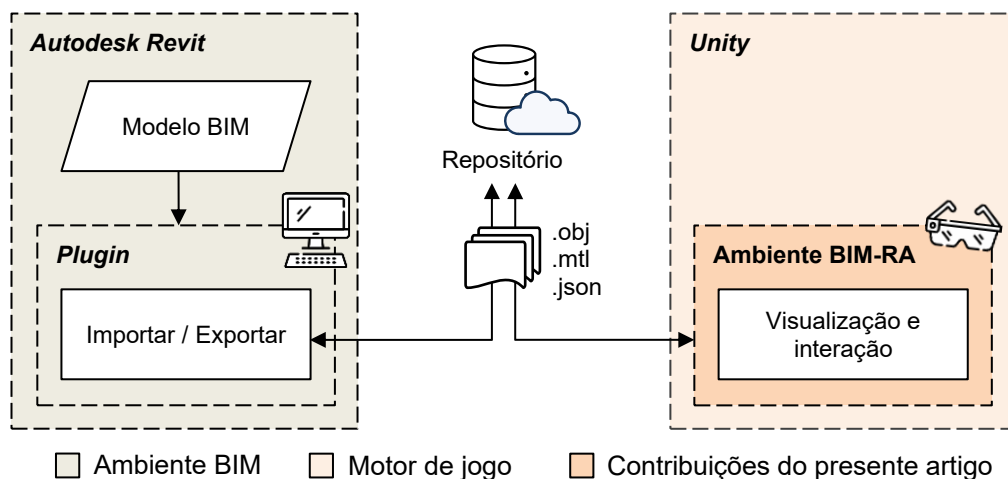


Figura 1: Fluxograma da metodologia utilizada.

Com a informação devidamente estruturada, a aplicação de RA recorre aos sensores integrados do dispositivo HMD, para apresentar ao utilizador os modelos 3D corretamente sobrepostos e ancorados. A comunicação entre os diferentes componentes do sistema é bidirecional, permitindo que ações realizadas em contexto de obra, como marcações de progresso ou comentários associados a elementos do modelo, sejam registadas e posteriormente refletidas no ambiente BIM, assegurando a consistência da informação ao longo do processo construtivo. O repositório *Cloud* funciona como mediador nessa transferência de informação e assegura que a qualquer momento há concordância nos dados apresentados aos utilizadores.

4. Sistema de Ancoragem

A definição do sistema de ancoragem representou uma etapa central no desenvolvimento da solução BIM-RA, uma vez que a fiabilidade do alinhamento espacial condiciona diretamente a utilidade da RA no setor AECO. O desenvolvimento do sistema de ancoragem seguiu uma metodologia iterativa, envolvendo a avaliação de diferentes abordagens com o objetivo de identificar uma solução capaz de garantir a criação, posicionamento e ancoragem fiável de modelos BIM em escala real, diretamente em contexto de obra.

4.1 Requisitos do Sistema

Os requisitos do sistema de ancoragem foram definidos em função das condições reais de utilização em estaleiro e das limitações inerentes à aplicação de RA em ambiente não

controlado. Nesse sentido, foi considerada essencial a robustez face à variabilidade das condições ambientais e a simplicidade de utilização por perfis não especializados. A solução deve também permitir a criação e manutenção de modelos BIM em escala real sem preparação prévia do local nem recurso a *hardware* adicional, garantindo simultaneamente a estabilidade do alinhamento durante a navegação do utilizador.

4.2 Abordagens *Marker-based* vs *Markerless*

Foram testadas diferentes estratégias que permitissem cumprir com os requisitos estabelecidos anteriormente. Abordagens baseadas em marcadores visuais (i.e, *markers*), como códigos QR, permitem um alinhamento inicial preciso entre o modelo digital e o ambiente físico. Ao fornecerem uma referência explícita e facilmente identificável, os marcadores contribuem para reduzir a ambiguidade no posicionamento e mitigam problemas de *drift* com a deslocação do utilizador pelo ambiente.

Em alternativa, abordagens *markerless* recorrem exclusivamente à sensorização integrada dos dispositivos HMD para o mapeamento e posterior reconhecimento do ambiente físico em redor do utilizador para estabelecer o alinhamento espacial. Este tipo de ancoragem elimina a necessidade de elementos físicos adicionais.

As primeiras tendem a ser mais adequadas a cenários controlados, onde a geometria e as condições de visibilidade se mantêm estáveis. Por outro lado, métodos *markerless*, baseados em redes de âncoras espaciais virtuais, respondem de forma mais eficaz às exigências de estaleiros ativos, caracterizados por alterações frequentes e limitações operacionais, permitindo uma utilização mais integrada ao longo do ciclo construtivo.

Após consideração, foi adotado um sistema final de ancoragem *markerless* com funcionamento *offline*, que preserva os princípios de persistência e robustez da ancoragem espacial. Com a devida preparação dos modelos BIM, destaca-se de soluções como o Argyle [8] na medida em que não dependem do posicionamento manual de âncoras a partir da aplicação de RA nem da utilização de rede WiFi em todos os locais da obra.

5. Funcionamento do Sistema de Ancoragem

O sistema de ancoragem desenvolvido deve priorizar a robustez e acautelar o *drift* causado pelas movimentações do utilizador. O sistema auxiliar de rastreamento de cabeça, composto por quatro câmaras de luz visível, um sensor de profundidade por tempo-de-voo, uma IMU (unidade de medição inercial) e uma câmara [9], é essencial para calcular o deslocamento do utilizador no espaço virtual. No entanto, testes anteriores revelam erros acumulados na ordem de alguns centímetros após 5 metros percorridos [10], justificando a necessidade de mecanismos adicionais de ancoragem espacial para garantir a estabilidade e a precisão do alinhamento.

5.1 Criação do Ambiente Virtual e Rastreamento do Utilizador

O ambiente virtual é definido numa escala de 1 unidade por 1 metro, posicionando o utilizador na origem virtual. À medida que o utilizador se desloca, o sistema de rastreamento de cabeça gera uma malha de pontos de referência, armazenando informações visuais para reajustar a posição. Em sessões futuras, caso a aplicação seja iniciada num espaço já visitado, o utilizador é automaticamente reposicionado na posição virtual correspondente. Além disso, erros

acumulados durante deslocamentos são mitigados ao regressar a pontos familiares, ajustando os pontos da malha mais afastados.

5.2 Princípios da Ancoragem Espacial

O sistema de ancoragem é composto por cinco elementos fundamentais:

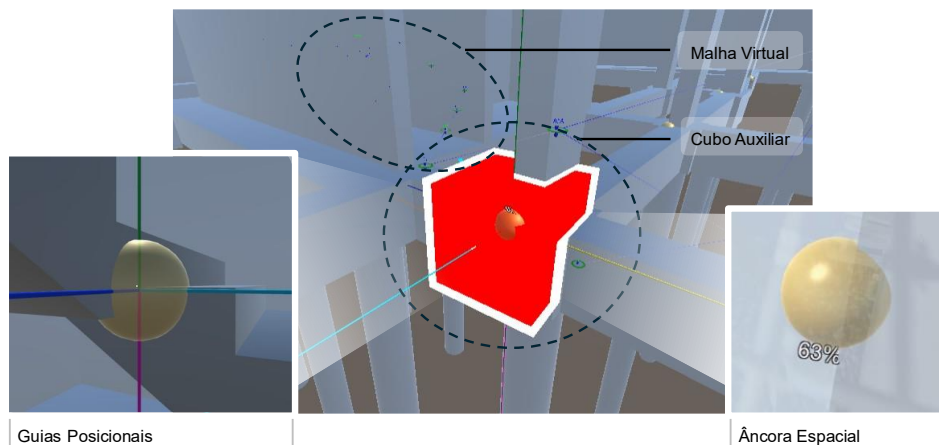


Figura 2: Visão geral do Sistema de Ancoragem.

- **Âncoras:** elementos esféricos colocados no projeto BIM ficam inativas até serem interagidas pela primeira vez em alguma sessão da aplicação. Servem como ponto de ligação entre uma coordenada virtual e real, afixando-se à coordenada digital em que são criadas;
- **Malha virtual:** criada automaticamente com a deslocação do utilizador, representa o movimento do mesmo pelo espaço virtual e guarda informação visual do ambiente circundante;
- **Cubo auxiliar:** forma-se em redor das âncoras que estejam a ser usadas como referência para reajustar a posição do modelo à realidade. A cor e o tamanho representam o peso que cada âncora têm a cada momento no reajuste do espaço virtual em volta do utilizador;
- **Guias Posicionais:** linhas orientadoras de auxílio ao ajuste do posicionamento das âncoras;
- **Start Point:** elemento auxiliar utilizado apenas na primeira instanciação do modelo que indica a posição ideal do utilizador em obra para o correto posicionamento inicial do modelo. Após a primeira instanciação, as âncoras ficam encarregues de ajustar a localização do modelo virtual e o Start Point torna-se desnecessário.

Para apoiar o sistema de posicionamento incorporado no dispositivo HMD, utilizam-se objetos virtuais que estabelecem correspondências entre pontos no espaço virtual e no espaço físico. Neste projeto, adotou-se uma abordagem baseada exclusivamente em âncoras espaciais digitais, que recorrem à referência da malha espacial para ajustar o alinhamento global da cena, preservando a integridade geométrica dos modelos e objetos virtuais.

Uma vez que estas âncoras não se encontram associadas diretamente aos modelos, mas sim a coordenadas do espaço virtual, o realinhamento com o ambiente físico é efetuado através do deslocamento do sistema de coordenadas subjacente, em vez de distorcer individualmente os objetos ou mover apenas subconjuntos da cena.

Para executar estes alinhamentos, o utilizador dispõe de ferramentas que permitem mover e rodar âncoras existentes. Adicionalmente, é possível criar ou remover âncoras conforme necessário. Durante a manipulação, são apresentados guias visuais correspondentes aos eixos de transformação e ao centro da âncora, fornecendo referências espaciais que auxiliam na execução precisa destas operações.

5.3 Consistência e Persistência do Alinhamento Espacial

Esta abordagem melhora a consistência espacial em cenários onde o utilizador se desloca por múltiplas localizações num mesmo ambiente, reduzindo o erro acumulado relativamente ao ponto de origem através do uso de âncoras espaciais.

A perda de referências visuais pelas câmaras pode levar à redefinição da origem do sistema, afetando temporariamente o alinhamento dos modelos. Da mesma forma, iniciar a aplicação num local não previamente observado pode resultar na criação de uma nova origem, com risco de perda de alinhamentos anteriores. Contudo, o regresso a locais previamente reconhecidos permite recuperar o alinhamento original, sendo ainda disponibilizado um mecanismo de reposicionamento manual quando necessário.

Quanto à persistência entre sessões, uma vez que as âncoras e malhas espaciais são armazenadas localmente no dispositivo, e desde que um local não sofra alterações significativas, o alinhamento é restaurado automaticamente, dispensando reajustes manuais.

5.4 Limitações do Sistema

O sistema de ancoragem apresentou algumas limitações que afetaram o seu desempenho global. Em particular, o seu funcionamento mostrou-se dependente da qualidade e fiabilidade da sensorização do *hardware* utilizado, condicionando a sua utilização em diferentes dispositivos HMD. Verificou-se ainda sensibilidade às condições de luminosidade do ambiente envolvente, o que influencia o desempenho do rastreamento visual em contextos de obra com iluminação variável. Adicionalmente, o sistema requer um *setup* prévio realizado através do software BIM, introduzindo uma etapa adicional inevitável no processo de preparação.

6. Implementação Piloto e Validação

Nesta secção é apresentado uma implementação piloto, com o objetivo de validar a metodologia definida anteriormente e avaliar a aplicabilidade da solução BIM-RA em contexto real de obra, enquanto apoio à monitorização do progresso e à verificação construtiva. Este caso de uso explora a utilização das ferramentas desenvolvidas para a sobreposição, visualização e interação com três modelos BIM de diferentes especialidades: Estruturas, Mecânica e Hidráulica; correspondentes ao projeto em execução de um edifício habitacional em altura. A aplicação do sistema decorreu na fase inicial da construção, permitindo avaliar o sistema sob diferentes condições de luminosidade, ruído e humidade.

Para esta implementação, o modelo foi preparado no *Autodesk Revit* conforme a Figura 3 de forma a respeitar as regras definidas para a correta sobreposição do modelo e disponibilizado à aplicação de RA através do fluxo de integração descrito na secção 3.2., garantindo a correspondência métrica e semântica entre o modelo digital e o ambiente físico. A visualização foi efetuada em escala real, sobreposta à construção existente, através do dispositivo *HoloLens*

2, selecionado por corresponder aos critérios de sensorização selecionados previamente e pela compatibilidade com capacetes de proteção.

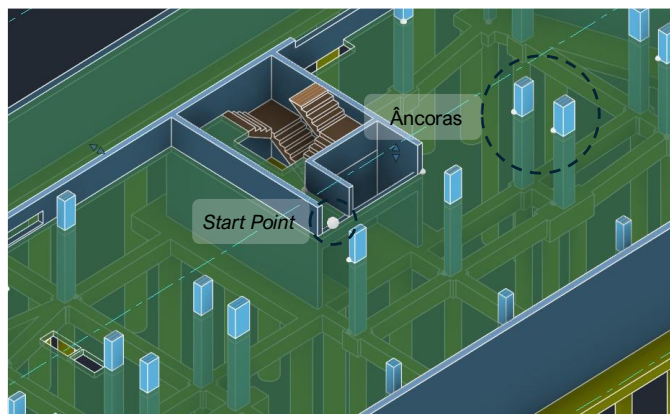


Figura 3: Setup dos elementos de ancoragem em ambiente BIM (*Autodesk Revit*).

Após o carregamento do modelo e a configuração inicial do sistema de ancoragem espacial, foram iniciados testes às principais ferramentas desenvolvidas para apoio à análise em obra. Foram demonstradas as funcionalidades de navegação no espaço aumentado, filtragem de elementos, interação direta com os elementos BIM e ferramentas de medição, permitindo assinalar elementos como concluídos, identificar desvios face ao projeto e registar comentários associados aos componentes do modelo (ver Figura 4).

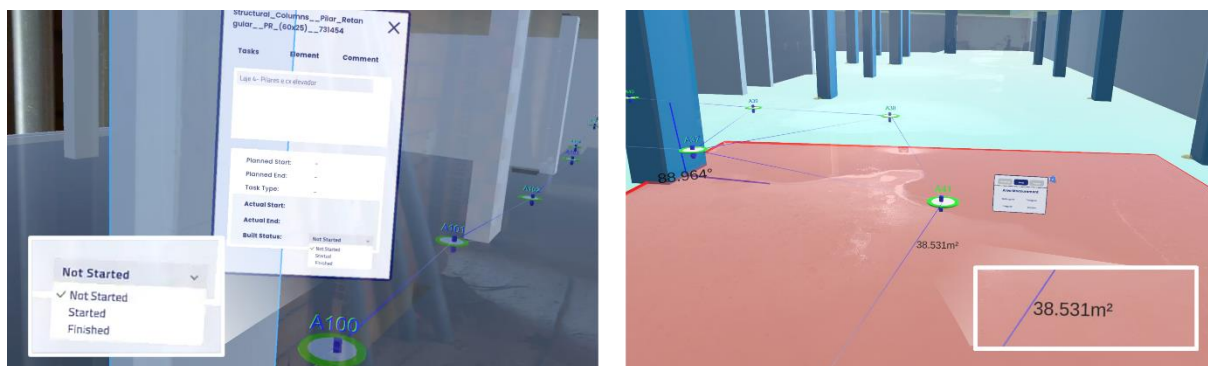


Figura 4: Interação com elementos (à esquerda) e medição de áreas (à direita).

No decorrer da implementação, foram recolhidos testemunhos por parte dos utilizadores para aferir as vantagens da utilização da tecnologia face aos processos habituais. Depreendeu-se que a interface imersiva da RA aliada a uma ancoragem robusta (ver Figura 5) proporcionou uma compreensão visual clara e imediata do estado atual da construção, facilitando a comparação direta entre o modelo BIM e o edifício. Esta abordagem revelou-se eficaz na identificação precoce de inconformidades e contribuiu para a redução do tempo habitualmente necessário à perceção do progresso de obra. As funcionalidades de filtragem e navegação demonstraram particular relevância em contextos multidisciplinares, permitindo isolar conjuntos específicos de elementos e adaptar-se aos objetivos das visitas à obra. Adicionalmente, o *feedback* recebido ajudou a identificar o *pipeline* bidirecional de dados BIM como sendo crucial para manter a

organização e a sincronização da informação transmitida entre as equipas. Com os testes realizados foi possível verificar que a estrutura de dados foi mantida entre a RA e o ambiente BIM e a associação aos respetivos elementos construtivos foi correta.

No entanto, apesar do progresso alcançado na área de UX (*User Experience*), não foi possível eliminar por completo a curva de aprendizagem associada, tendo sido, ocasionalmente, necessária a intervenção da equipa de desenvolvimento para o esclarecimento de dúvidas.

No capítulo da ancoragem, condições mais extremas de baixa luminosidade causaram a perda temporária dos pontos de referência, originando grandes desvios na sobreposição. No entanto, com o restabelecimento de condições mais ideais verificou-se prontamente a reposição correta da ancoragem. Em casos de luz solar direta, a visibilidade dos hologramas era muito reduzida, podendo esse fator ser mitigado pela colocação de um acessório que escurecia as lentes do dispositivo. Episódios de chuva intensa condicionaram também a utilização do sistema por motivos de segurança e da falta de impermeabilização dos HoloLens 2.



Figura 5: Sobreposição do modelo BIM de Estruturas.

De forma geral, o caso de estudo foi bem-sucedido no objetivo principal de confirmar que a solução proposta se encontra funcional e adequada ao contexto de obra, apesar das limitações enunciadas. Foi validada a metodologia adotada e evidenciado o potencial da RA como ferramenta de apoio à monitorização e gestão do progresso em fluxos de trabalho baseados em BIM, mas com uma larga margem para possíveis atualizações no futuro.

7. Conclusão

A crescente procura por soluções digitais que aproximem modelos BIM da realidade construída reforça o papel da RA como tecnologia de apoio em contexto operacional. Neste trabalho foi apresentada uma abordagem baseada em RA que permite a sobreposição de modelos BIM em escala real no local de construção, tendo como principal contributo o desenvolvimento de um sistema de ancoragem *markerless* robusto e persistente.

Os avanços alcançados ao nível do sistema de ancoragem demonstram que a fiabilidade do alinhamento espacial é um fator determinante para a continuidade e escalabilidade de implementações de RA em ambientes reais. Ao eliminar a dependência de marcadores físicos e de conectividade contínua, a solução proposta reforça a aplicabilidade prática da RA não

apenas no setor AECO, mas também em outros domínios que exigem precisão espacial e persistência ao longo do tempo.

Apesar dos desafios técnicos associados à preparação de modelos e ao desempenho em dispositivos HMD, os resultados obtidos evidenciam que sistemas de ancoragem bem concebidos constituem a base para a adoção sustentada da RA como ferramenta operacional.

8. Agradecimentos

Este documento é emitido no âmbito e para os fins do projeto CRIARTE. Este projeto é cofinanciado pelo programa Portugal 2030, ao abrigo da referência COMPETE2030-FEDER-01192200. Este trabalho tem o cofinanciamento do PRR – Plano de Recuperação e Resiliência e União Europeia – www.recuperarportugal.gov.pt | PRR - Investimento RE-C05-i02: Missão Interface - CoLAB.

Referências

- [1] W. Wang and H. Chen, “Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle,” *Automation in Construction*, vol. 147, p. 104832, 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.104832.
- [2] J. Whyte and T. Hartmann, “How digitizing building information transforms the construction site,” *Construction Management and Economics*, vol. 40, no. 2, pp. 99–113, 2022.
- [3] Z. Xu, Z. Feng, M. B. Jelodar e B. H. W. Guo, “Augmented reality applications in construction productivity: A systematic literature review,” *Autom. Constr.*, vol. 150, p. 102798, 2024, doi: 10.1016/j.aei.2024.102798.
- [4] M. Radanovic, K. Khoshelham e C. Fraser, “Aligning the real and the virtual world: Mixed reality localisation using learning-based 3D–3D model registration,” *Autom. Eng. Inf.*, vol. X, 2023, doi: 10.1016/j.aei.2023.101960.
- [5] O. Melnyk, “Augmented reality for enhanced documentation and inspection in tunnel construction,” *Tunnelling & Underground Space Technol.*, vol. X, 2024.
- [6] N. H. Pan et al., “Integration of Augmented Reality with Building Information Modeling for construction inspection and monitoring,” *Build. Eng. J.*, vol. 14, no. 3, pp. 612–xxx, 2024.
- [7] L. Binni, M. Vaccarini, F. Spegini, L. Messi e B. Naticchia, “An Automatic Registration System Based on Augmented Reality to Enhance Civil Infrastructure Inspections,” *Buildings*, vol. 15, no. 7, p. 1146, 2025, doi:10.3390/buildings15071146.
- [8] Argyle, “Argyle – Construction Intelligence Platform,” *Argyle*, [Online]. Disponível: <https://www.argyle.build/>. [Acedido em: 7 de janeiro de 2026].
- [9] Microsoft, “HoloLens 2 hardware,” *Microsoft Learn*, [Online]. Disponível: <https://learn.microsoft.com/en-us/hololens/hololens2-hardware>. [Acedido em: 7 de janeiro de 2026].
- [10] T. Scargill, G. PremSankar, J. Chen, and M. Gorlatova, “Here to Stay: A Quantitative Comparison of Virtual Object Stability in Markerless Mobile AR,” in *Proc. 2022 2nd International Workshop on Cyber-Physical-Human System Design and Implementation (CPHS)*, Milan, Italy, May 2022, pp. 24–29, doi:10.1109/CPHS56133.2022.9804545.