

ARTIGO | *PAPER*

APLICAÇÃO DA REALIDADE AUMENTADA E REALIDADE VIRTUAL EM RECONSTRUÇÃO DE RUÍNAS

APPLICATION OF AUGMENTED AND VIRTUAL REALITY IN THE
RECONSTRUCTION OF RUINS

Ana Carla Pereira dos Passos ^a
Luciana Massami Inoue ^b

^a Estudante de graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de São João del-Rei, ana.carla_2002@aluno.ufsj.edu.br Bolsista CAPES/ CNPq/UFSJ

^b Professora Adjunta, Curso de Arquitetura e Urbanismo Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de São João del-Rei, DAUAP-UFSJ lmi@ufsj.edu.br

RESUMO

Este trabalho explora a aplicação da realidade aumentada (RA) e da realidade virtual (RV) na reconstituição digital do engenho localizado na Fazenda do Pombal, em Ritópolis, Minas Gerais. Foram empregadas técnicas de fotogrametria, modelagem tridimensional nos softwares ArchiCAD e Blender, além da integração no Unity por meio do Vuforia. A realidade aumentada possibilita a visualização da reconstrução ao direcionar o celular para a base da ruína, enquanto a realidade virtual oferece uma experiência de imersão virtual no interior do engenho. O estudo evidencia o potencial dessas ferramentas tecnológicas na valorização do patrimônio cultural e na promoção da educação patrimonial, contribuindo assim para as práticas de preservação.

PALAVRAS-CHAVE

Realidade Aumentada, Realidade Virtual, Patrimônio Cultural, Reconstrução digital, Fazenda do Pombal.

ABSTRACT

This paper explores the application of augmented reality (AR) and virtual reality (VR) in the digital reconstruction of the sugar mill located at Fazenda do Pombal, in Ritópolis, Minas Gerais. Photogrammetry techniques, three-dimensional modeling in ArchiCAD and Blender software, and integration with Unity through Vuforia were used. Augmented reality allows viewing of the reconstruction by pointing the cell phone at the base of the ruin, while virtual reality offers a virtual immersion experience inside the sugar mill. The study highlights the potential of these technological tools in enhancing cultural heritage and promoting heritage education, thus contributing to conservation practices.

KEYWORDS

Augmented Reality, Virtual Reality, Cultural Heritage, Digital reconstruction, Fazenda do Pombal.

COMO CITAR ESTE ARTIGO

PASSOS, Ana Carla Pereira; INOUE, Luciana Massami. Aplicação da realidade aumentada e realidade virtual em reconstrução de ruínas. Cadernos do Lepaarq, v. XXIII, n. 45, p. 45 - 67, Jan-Jun, 2026.

INTRODUÇÃO

A Realidade Aumentada (RA) e a Realidade Virtual (RV) vêm se consolidando como ferramentas inovadoras na preservação, interpretação e divulgação do patrimônio histórico, ao permitirem formas interativas de visualização e engajamento com elementos culturais e arquitetônicos muitas vezes degradados ou invisíveis ao olhar cotidiano. Essas tecnologias proporcionam ao público experiências significativas, favorecendo o fortalecimento da memória coletiva e o sentimento de pertencimento aos espaços históricos.

O presente projeto tem como foco a aplicação dessas tecnologias nas ruínas do engenho da Fazenda do Pombal (Figura 1), localizada em Ritápolis, Minas Gerais, local de nascimento de Joaquim José da Silva Xavier, o Tiradentes. Tombado pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) em 1971, sob o número de inscrição 433, o sítio (Figura 2) é um importante marco da história nacional. A pesquisa propõe uma abordagem interativa por meio da gamificação, combinando reconstrução virtual com elementos lúdicos que possibilitam uma nova leitura do lugar.



Figura 1: Ruínas do engenho da Fazenda do Pombal.
Fonte: Autora(1) 2025

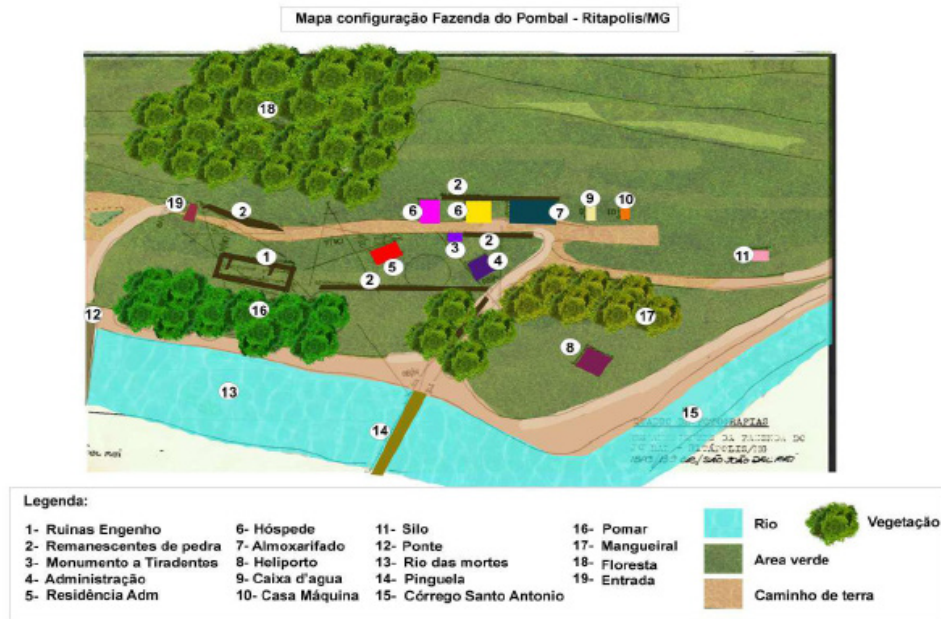


Figura 2: Mapa da atual configuração da Fazenda do Pombal.

Fonte: IPHAN, 1991. Adaptado pela autora(1)

Nos últimos anos, o uso da gamificação tem se destacado em diferentes áreas, especialmente na educação e no campo patrimonial. Segundo Deterding et al. (2011, p. 9), “gamificação refere-se ao uso de elementos de jogos em contextos não lúdicos com o intuito de promover engajamento”. Araújo, Marques e Pedro (2023) reforçam seu potencial como estratégia educativa, principalmente na mediação entre sociedade e patrimônio. Aplicadas à preservação, essas técnicas tornam a experiência mais envolvente e colaborativa.

Nesse sentido, a reconstrução virtual apresenta-se como recurso eficaz para ressignificar memórias e ampliar o acesso ao patrimônio cultural. Moura (2018, p. 53) afirma que “reconstruções digitais podem contribuir para a valorização do patrimônio histórico ao permitir sua representação sob formas interativas que dialogam com as novas gerações”. Quando integradas a dispositivos móveis, essas tecnologias democratizam o acesso, eliminando barreiras como a necessidade de agendamento ou mediação especializada.

A simulação desenvolvida neste projeto baseou-se em dados obtidos por meio de escaneamento digital realizado via fotogrametria, disponibilizados pelo estudante de graduação da UFSJ e estagiário do IPHAN Pedro Lucas Pereira (2024), colaborador do projeto de extensão da Fazenda do Pombal. A partir desses dados, foram gerados modelos tridimensionais precisos da ruína, posteriormente inseridos em ambientes virtuais e aumentados.

O escaneamento digital, também chamado de *laser scanning*, é uma técnica que possibilita a captura detalhada da geometria de objetos e edificações. Seu uso em sítios históricos favorece a análise de patologias construtivas, identificação de técnicas construtivas tradicionais e planejamento de intervenções restaurativas (CUPERSCHMID; CAMPIOTTO; LAURIA, 2018, p. 185; MOURA, 2018).

A realidade virtual (RV) utilizada neste projeto é classificada como não imersiva. De acordo com Tori, Kirner e Siscoutto (2006, p. 8), “a realidade virtual é categorizada como não imersiva quando o usuário é transportado parcialmente ao mundo virtual, através de uma janela (monitor ou projeção, por exemplo), mas continua a sentir-se predominantemente no mundo real”. A decisão por usar smartphones em vez de óculos de RV considerou critérios como acessibilidade, segurança e autonomia do visitante.

Nesse contexto, o conceito de *Digital Heritage*¹, estabelecido pela UNESCO em 2016, torna-se central. A organização define como patrimônio digital todo material de valor cultural, histórico ou científico gerado digitalmente ou digitalizado, que deve ser preservado para as futuras gerações. Segundo Pereira (2017, p. 7), esse conceito amplia o escopo da preservação ao incluir “bens culturais que já não existem fisicamente, mas que podem ser resgatados e mantidos digitalmente”.

Um marco inicial da aplicação da realidade aumentada em sítios arqueológicos foi o projeto ARCHEOGUIDE (*Augmented Reality-based Cultural Heritage On-site Guide*), lançado em 2002. De acordo com Tсотros (2002 apud PEREIRA, 2017), o sistema utilizava computadores portáteis e *head-mounted displays* (HMD), permitindo aos visitantes visualizar reconstruções tridimensionais diretamente sobre as ruínas físicas. A partir dessa iniciativa pioneira, surgiram versões móveis, incluindo aplicativos para smartphones, tornando a experiência progressivamente mais acessível e portátil. Esses avanços evidenciaram o potencial das tecnologias digitais não apenas como recursos expositivos, mas como novas formas de interpretação e mediação do patrimônio, abrindo caminho para abordagens mais amplas no campo do patrimônio cultural.

Nesse contexto, este projeto insere-se no campo da Arqueologia Digital, que compreende o uso de tecnologias tridimensionais não apenas como ferramentas de registro, mas como instrumentos de interpretação, análise e mediação do patrimônio arqueológico (FORTE; DELL'UNTO, 2012). Nesse campo, os modelos 3D são entendidos como representações interpretativas, passíveis de revisão, atualização e debate científico.

Projetos como o *3D-Digging at Çatalhöyük* demonstram o potencial dessas tecnologias ao integrar escaneamento a laser, fotogrametria e ambientes interativos para a construção de um registro arqueológico colaborativo e reversível (FORTE et al., 2012). De maneira semelhante, a presente pesquisa utiliza fotogrametria e modelagem tridimensional para documentar e recontextualizar as ruínas do engenho da Fazenda do Pombal.

A inovação proposta reside na incorporação de realidade aumentada, realidade virtual em dispositivos móveis, ampliando o acesso público ao conhecimento arqueológico e fortalecendo a mediação patrimonial por meio de experiências interativas e narrativas.

¹ *Digital Heritage: catalogação, proteção e divulgação do patrimônio cultural ao redor do mundo com o uso de ferramentas digitais*

Fundamentação e Abordagem Metodológica

A metodologia adotada nesta pesquisa consiste em um conjunto articulado de procedimentos voltados à documentação, análise e reconstrução da Fazenda do Pombal, com ênfase no uso de recursos digitais como a Realidade Aumentada e a Realidade Virtual. Os dados foram obtidos a partir de fontes primárias e secundárias, complementados por levantamentos métricos com tecnologias digitais e modelagens tridimensionais.

As fontes primárias incluem fotografias históricas, registros de propriedade, bancos de dados de órgãos públicos, processos e inventários de preservação, além de outras documentações institucionais. Foram também analisadas informações específicas sobre o objeto de estudo, como as técnicas construtivas utilizadas, com base em manuais de construção civil e literatura técnica. Consideraram-se ainda o período histórico da edificação, a legislação vigente, a dinâmica urbana e os personagens históricos associados. Como destaca Campiotto (2018, p. 149-150), é essencial considerar o grau de confiabilidade dos registros utilizados, sempre referenciando suas fontes, autores e contextos de produção.

As fontes secundárias complementam a análise, incluindo livros, artigos acadêmicos, relatórios de investigações anteriores, notícias de jornais e revistas, além de relatos orais de habitantes locais. A triangulação dessas informações permitiu uma compreensão mais ampla e rigorosa do bem cultural estudado.

O levantamento documental envolveu a análise de registros históricos, fotografias, plantas arquitetônicas (Figura 3), perspectivas (Figura 4) e estudos técnicos sobre as técnicas construtivas empregadas na Fazenda do Pombal. Uma das principais fontes foi o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), que forneceu dados fundamentais sobre a edificação e seu contexto.

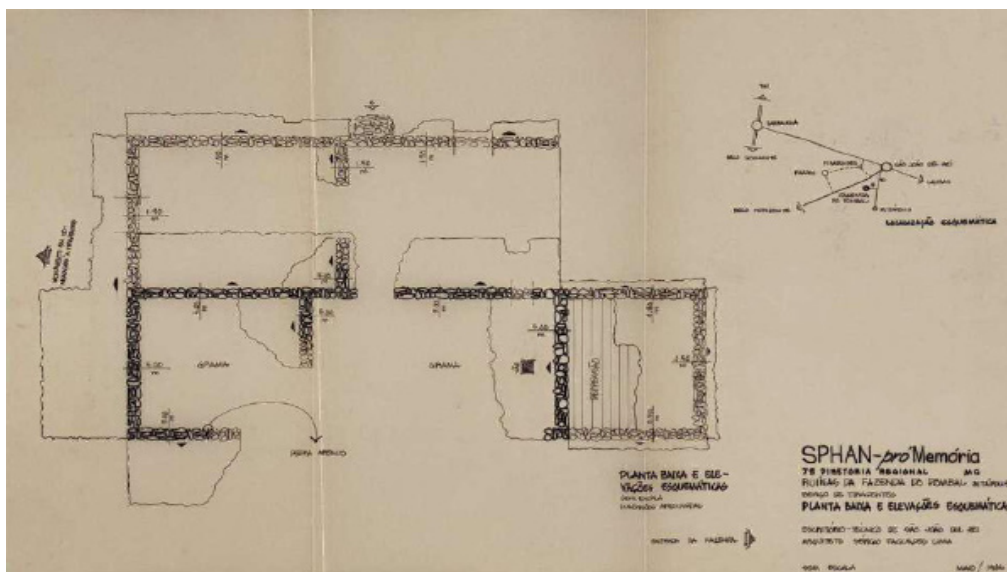


Figura 3: Planta baixa sem escala e elevações esquemáticas da ruína do Engenho/Fazenda do Pombal.

Fonte: IPHAN, 1986

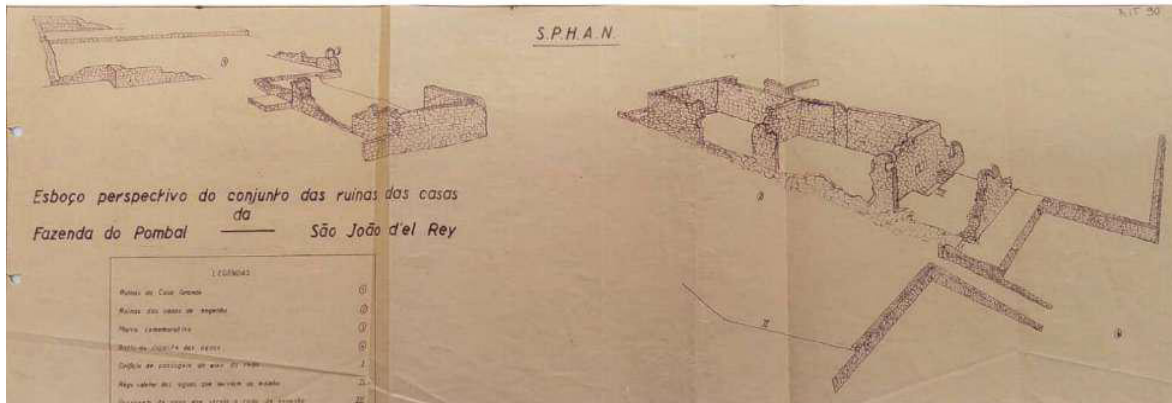


Figura 4: Esboço de perspectiva da ruína do Engenho/Fazenda do Pombal.

Fonte: IPHAN, 1986

A introdução da indústria açucareira no Brasil remonta ao início do período colonial, por volta do século XVI, com a chegada de mudas de cana-de-açúcar provenientes da Ilha da Madeira, em Portugal. Desde então, o açúcar consolidou-se como um dos pilares econômicos da colônia, impulsionando seu desenvolvimento. Para atender à crescente demanda por produção em larga escala, a mão de obra africana escravizada foi amplamente empregada nos engenhos, onde se realizavam todas as etapas do processo produtivo.

É nesse contexto que se insere a construção do engenho da Fazenda do Pombal, dedicado à produção açucareira. Trata-se de uma edificação de planta retangular, com subdivisões internas regulares e funcionais, que evidenciam seu uso específico. O edifício foi construído com técnicas tradicionais, utilizando alvenaria de pedras e argamassa de barro, resultando em paredes espessas e com poucas aberturas, características que favorecem o controle térmico e a estabilidade estrutural.

A cobertura do engenho seguia modelos da arquitetura tradicional brasileira (Figura 4), podendo apresentar um único plano inclinado (meia-água), dois planos com cumeeira central (cangalha) ou estruturas mais complexas com três ou mais águas (tacaniça ou copiar). No caso da Fazenda do Pombal, é provável que o telhado original fosse do tipo quatro águas, dada a complexidade e a hierarquia das edificações rurais da época, permitindo melhor escoamento das águas pluviais e maior estabilidade. Elementos como a empena, o frontão e os travamentos diagonais — como as chamadas aspas francesas — reforçavam a estrutura (VASCONCELLOS, 1979). A cumeeira, geralmente com quina voltada para cima, permitia a fixação eficiente dos caibros e era apoiada em cruzamentos de pernas ou pontaletes com encaixes do tipo “boca de lobo”. Os frechais, cruzando-se nos cunhais em meia madeira, garantiam a amarração da estrutura (VASCONCELLOS, 1979, p. 143).

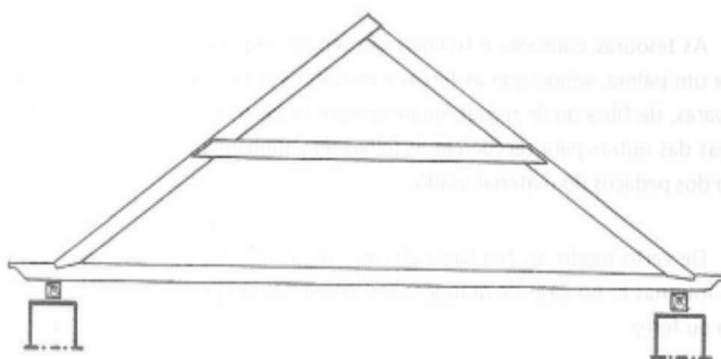


Figura 5: Telhado com tesoura de linha alta no terço médio.

Fonte: VASCONCELLOS, 1979, p. 140.

Os engenhos e demais propriedades rurais podiam se estabelecer por meio de diferentes formas de aquisição de terras, como sesmarias, heranças, posses ou compras (SILVA, 2006, p. 83). A estrutura física dos engenhos incluía geralmente uma casa de moagem retangular, construída sobre baldrames de madeira lavrada, com compartimentos internos destinados ao processamento do açúcar. Técnicas construtivas como pau-a-pique e alvenaria de pedras eram amplamente empregadas, utilizando materiais locais e mão de obra especializada. Termos como “baldrame”, “cipós” e “barrear” evidenciam a cultura construtiva popular e adaptada ao meio. (SILVA, 2006, p. 86)

O uso da energia hidráulica também se fazia presente, especialmente por meio da instalação de rodas d’água (Figura 5), responsáveis por acionar as moendas. Esse sistema ressaltava a importância do trabalho do carpinteiro, cuja habilidade era essencial para o funcionamento mecânico das estruturas (SILVA, 2006, p. 87).

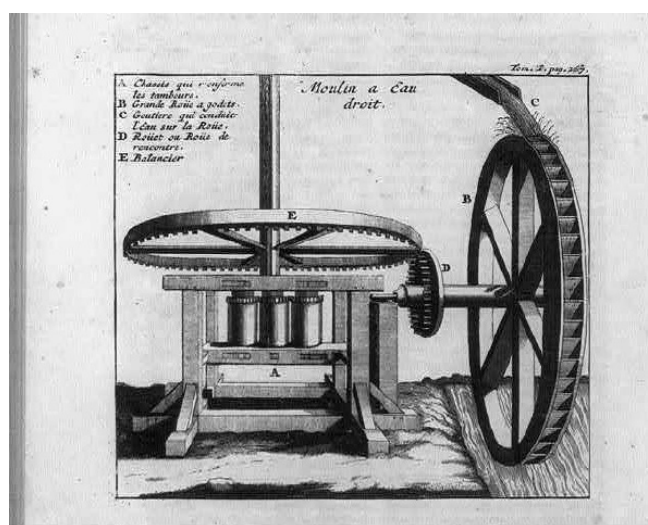


Figura 6: Moinho vertical de três eixos movido a energia hidráulica, Martinica, final do século XVII.

Fonte: Labat, 1742, p. 436 apud MOLINA, 2017, p. 72.

O cultivo da cana-de-açúcar exigia solo fértil e úmido, preferencialmente em áreas planas e próximas a rios — conhecidas como Ibipeba pelos indígenas e várzeas pelos portugueses. As enchentes sazonais enriqueciam o solo, favorecendo o plantio. Embora fosse possível o cultivo em áreas elevadas, a produtividade era menor, salvo em solos muito ricos (MARCGRAVE, 1942).

O engenho movido a água, conhecido como roda d'água, rodete ou bolandeira, era composto por engrenagens de madeira e pás, sustentado por grandes traves. Escravizados alimentavam a moenda com cana, retiravam o bagaço — usado como combustível — e coletavam o caldo em canoas de madeira chamadas coches. Esse caldo era levado à cozinha do açúcar, onde era imediatamente fervido para evitar a fermentação (MARCGRAVE, 1942).

As senzalas, essenciais à dinâmica dos engenhos, raramente são preservadas do ponto de vista arqueológico. Essas construções, geralmente organizadas em linha ou em quadras para facilitar a vigilância, desempenhavam papel central no sistema escravocrata (SILVA, 2006, p. 63). Embora não existam vestígios visíveis dessas edificações na Fazenda do Pombal, presume-se que seguiam o padrão típico da época: pequenas habitações organizadas em torno de um pátio central. Eram construídas de forma precária, geralmente com esteios de taipa de mão, o que lhes conferia baixa durabilidade e ausência de conforto. Podiam ser unidades individuais ou pavilhões com diversos cubículos de cerca de 6m², ventilados apenas por portas (ABUD, 2020, p. 15). Há registros de senzalas com até 85 salas, geralmente cobertas por telhas. Após a abolição, essas estruturas perderam sua função, restando apenas em registros históricos e iconográficos.

A produção do açúcar envolvia etapas complexas e exaustivas, com o uso de três caldeiras: a primeira para remoção da espuma com escumadeira, a segunda para fervura com lixívia, e a terceira para coar o caldo. A espuma era usada para preparar garapa, consumida pelos escravizados. O caldo purificado era espessado em tachos, resfriado e moldado em fôrmas de barro. O *maestre d'asucar*² supervisionava o processo, utilizando óleo de oliva para evitar danos causados pelo calor. O açúcar era então purgado, secado ao sol e armazenado em cestos, moldado em blocos de até 42 libras (MARCGRAVE, 1942).

A Fazenda do Pombal contava originalmente com casa principal de dois pavimentos, capela e senzalas (IPHAN, 1971). Um levantamento do SPHAN, em 1940, registrou essas estruturas e a presença de um ramal ferroviário. Hoje, restam apenas ruínas da casa do engenho e alguns muros de pedra, encobertos pela vegetação. O Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) já recomendou ações emergenciais de conservação, e estudos ambientais vêm sendo realizados em parceria com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

A reconstrução digital contou com o apoio de uma maquete física da Fazenda do Pombal (Figura 6), elaborada pelos alunos da Universidade Federal de São João del rei (UFSJ): Alexandre Campos, Guilherme Peixoto, Gustavo dos Anjos e Rafael Bebiano, sob orientação da professora Liziane Peres Mangili. Fundamentada em estudos sobre engenhos, a maquete conferiu maior

² *maestre d'asucar: mestre do açúcar, como era chamado o responsável que supervisionava o processo da produção do açúcar*

precisão à modelagem tridimensional.



Figura 7: Maquete realizada na disciplina de Arquitetura e Urbanismo da docente Profa. Dra. Liziane Peres Mangili, sobre a reconstrução do engenho da Fazenda do Pombal.

Fonte: Fotografia pela autora(1) 2024

Para o levantamento métrico-arquitetônico, foi utilizada a técnica da fotogrametria, que exige que todo o plano a ser documentado esteja visível no fotograma. A técnica utiliza câmeras fotográficas e/ou drones e gera apenas medidas relativas em pixels (CAMPIOTTO, 2018, p. 198). O resultado é a nuvem de pontos — um conjunto denso de coordenadas espaciais representando superfícies escaneadas (CAMPIOTTO, 2018, p. 200).

A modelagem digital foi realizada nos softwares ArchiCAD e Blender. A aplicação de realidade aumentada foi desenvolvida com Unity e Vuforia SDK. A Unity, criada em 2005 pela Unity Technologies, destaca-se por sua compatibilidade, flexibilidade e ampla difusão entre desenvolvedores (BARBA PRIETO, 2022).

Com a integração ao Vuforia, tornou-se possível criar experiências de realidade aumentada para dispositivos móveis, aproveitando os avanços nos chipsets gráficos, câmeras e GPS dos smartphones (SAROSA et al., 2019). Scripts baseados em tutoriais — como os vídeos de Fred (2021), para movimentação com joystick, e Dave (2022), para visão em primeira pessoa — permitiram o controle de personagens, simulação do moinho, sons ambientes, textos explicativos, interações com portas e mensagens de aviso.

A ativação do modelo digital foi realizada por meio do recurso Model Target, que reconheceu a soleira de uma das portas da ruína como ponto de ativação da experiência em Realidade Aumentada (RA) (Figura 7). Esse recurso funcionou como rastreador improvisado. Segundo Tori, Kirner e Siscoutto (2006, p. 17), rastreadores determinam a posição e orientação do usuário, permitindo manipulação de objetos e espacialização sonora. Em RA, o software deve permitir rastreamento de objetos reais, posicionamento preciso de objetos virtuais e interação em tempo real (TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006, p. 12).

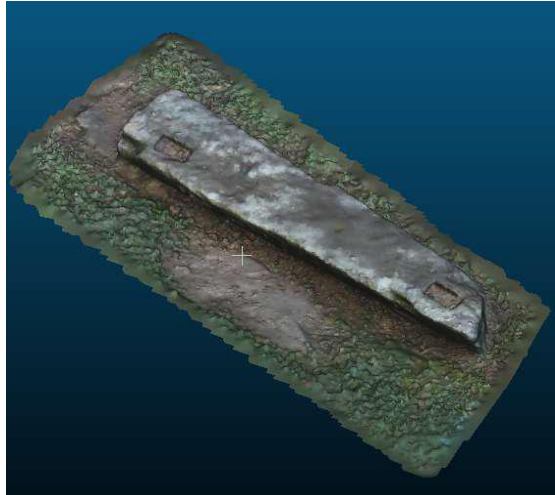


Figura 8: Recorte da soleira da ruína do engenho, feito pelo software CloudCompare, utilizado como Model Target. Fonte: Fotogrametria de Pereira (2024). Adaptado pela autora(1)

O hardware utilizado incluiu joystick e rastreadores, sendo a técnica de rastreamento visual essencial, com apoio da visão computacional. A realidade virtual, por sua vez, foi aplicada por meio de um aplicativo que permite a navegação interativa pela fazenda reconstruída, utilizando o joystick. Com essa abordagem, a pesquisa pretende demonstrar como essas tecnologias podem contribuir para a valorização do patrimônio histórico e ampliar seu acesso a diferentes públicos.

Desenvolvimento

A gamificação tem se mostrado uma abordagem eficaz para promover o engajamento do público e facilitar a mediação cultural em contextos patrimoniais. Uma revisão sistemática da literatura sobre gamificação aplicada ao patrimônio destaca que os elementos lúdicos não apenas atraem a atenção dos usuários, mas também incentivam uma aprendizagem ativa, estimulando conexões emocionais e cognitivas com os bens culturais. Essa estratégia torna o patrimônio mais acessível e atrativo, sobretudo para os públicos mais jovens, ao transformar o processo de apropriação do conhecimento histórico em uma experiência interativa e significativa.

No que se refere aos elementos interativos e de gamificação, a experiência desenvolvida prioriza a imersão e a interatividade educativa, em detrimento de mecanismos tradicionais de jogos, como pontuação, rankings ou competição. A gamificação manifesta-se por meio de uma abordagem narrativa e exploratória, alinhada ao conceito de *soft gamification* (DETERDING et al., 2011).

Ressalta-se que tais elementos interativos — como navegação guiada, progressão espacial e acionamento de áudios explicativos — estão presentes exclusivamente na experiência em Realidade Virtual (RV). A aplicação em Realidade Aumentada (RA) apresenta caráter predominantemente contemplativo e visual, uma vez que o usuário interage principalmente por meio da observação de elementos virtuais sobrepostos ao ambiente real, como ocorre em aplicações populares

a exemplo do *Pokémon GO*³, nas quais o foco está na visualização dos objetos digitais no espaço físico, permitindo ao usuário a visualização do modelo tridimensional reconstruído sobre a ruína física e a navegação espacial básica, sem a inclusão de camadas narrativas, áudios ou mecanismos de progressão.

Os principais elementos gamificados da experiência incluem:

1. Progressão espacial estruturada: o usuário deve explorar sequencialmente os ambientes do engenho como: casa da moenda, casa do purgar e casa das fornalhas, para compreender o processo produtivo do açúcar. O acesso a novos espaços é condicionado à conclusão da narração explicativa do ambiente anterior.
2. Feedback narrativo contextual: áudios explicativos são acionados automaticamente conforme a aproximação do usuário a determinados espaços, fornecendo informações históricas e funcionais de forma integrada à experiência

Essa estratégia promove o engajamento por meio da curiosidade, da descoberta e da narrativa guiada, alinhando-se aos objetivos educacionais e de interpretação patrimonial. Ao restringir os elementos gamificados à experiência em RV, o projeto mantém a fidelidade histórica e a clareza funcional entre as duas tecnologias, utilizando a RA como ferramenta de contextualização visual *in situ* e a RV como ambiente imersivo de exploração educativa.

Considerando esse cenário, a opção metodológica adotada envolveu a aplicação da gamificação por meio de tecnologias acessíveis de realidade virtual e aumentada, explorando as potencialidades específicas de cada uma. A RA, em particular, tem como principal finalidade integrar elementos virtuais ao ambiente físico, permitindo que o usuário interaja simultaneamente com o mundo real e com conteúdos digitais sobrepostos, como exemplificado pela projeção de objetos virtuais sobre superfícies físicas reais (TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006).

Já a realidade virtual (RV) se caracteriza pela imersão total do usuário em um ambiente completamente virtual, criado por meio da combinação de hardware e software específicos. Essa tecnologia simula ambientes reais ou fictícios, oferecendo estímulos visuais, auditivos e, em alguns casos, táteis, que proporcionam ao usuário a sensação de presença física no espaço simulado (DEGGIM, 2017). Para isso, foram utilizadas as plataformas Unity e Vuforia, amplamente conhecidas por sua robustez e compatibilidade. O Unity é um motor gráfico profissional voltado para o desenvolvimento de jogos e experiências interativas em 2D e 3D, compatível com diversos sistemas operacionais, como Microsoft Windows, macOS e Linux. Trata-se de uma das plataformas mais utilizadas no mundo: estima-se que mais de 5 bilhões de aplicativos tenham sido desenvolvidos com Unity, sendo responsável por 71% dos principais jogos móveis, com cerca de 2,5 bilhões de usuários ativos mensais em mais de 190 países (BARBA PRIETO, 2022).

³ Jogo digital de realidade aumentada, disponibilizado gratuitamente para dispositivos móveis

Com o Unity instalado, realiza-se a integração com o Vuforia, ferramenta que possibilita a criação de aplicações de realidade aumentada voltadas para dispositivos móveis. Os dispositivos Android mais recentes oferecem suporte eficiente a essas aplicações, uma vez que contam com chipsets capazes de processar gráficos tridimensionais, câmeras de alta resolução e GPS integrado — elementos essenciais para experiências de RA de qualidade (SAROSA et al., 2019).

O Vuforia Engine disponibiliza uma gama diversificada de ferramentas para o desenvolvimento de experiências em realidade aumentada (RA), com destaque para funcionalidades que possibilitam o reconhecimento e a interação com diferentes tipos de elementos do mundo físico. Entre os principais recursos, destacam-se:

- *Model Target*: permite o reconhecimento e o rastreamento de objetos tridimensionais reais com base em sua geometria. Essa funcionalidade é aplicável a uma ampla variedade de objetos, desde itens cotidianos, como eletrodomésticos e brinquedos, até veículos, equipamentos industriais de grande porte e marcos arquitetônicos.
- *Area Target*: possibilita a digitalização e o aumento de ambientes inteiros. A partir de uma varredura 3D detalhada, cria-se um modelo espacial que serve como base para a sobreposição de elementos digitais interativos. Essa tecnologia é especialmente útil em contextos como museus, apartamentos, escritórios, fábricas e outros espaços físicos nos quais o ambiente em si se torna parte integrante da experiência em RA.
- *Image Target*: consiste na detecção e rastreamento de imagens planas, que são comparadas a um banco de dados de características visuais previamente definido. Após a detecção, o motor de RA mantém o rastreamento contínuo da imagem, garantindo a sobreposição precisa de conteúdo digital.
- *Ground Plane*: permite o posicionamento de objetos digitais em superfícies horizontais reais, como pisos e mesas. Esse recurso também possibilita a inserção de elementos suspensos, por meio de pontos de ancoragem no espaço tridimensional.

Essas ferramentas proporcionam flexibilidade no desenvolvimento de aplicações interativas, educativas e culturais, especialmente relevantes em projetos voltados ao patrimônio histórico, ao transformar objetos e espaços físicos em interfaces digitais exploráveis. Todas essas funcionalidades estão detalhadamente documentadas e disponíveis na plataforma oficial do Vuforia (PUALANI, 2024)

Realidade Aumentada (RA)

Inicialmente, foi testada a utilização do recurso *Image Target* para o desenvolvimento da

aplicação em realidade aumentada, considerando sua possível aplicação em uma ruína com extensão aproximada de 30 metros. Contudo, verificou-se que essa tecnologia restringe a exibição do conteúdo digital ao alinhamento com um marcador físico, como um *QR Code*, o que exigiria a instalação de um elemento igualmente extenso para cobrir toda a ruína — solução que se mostrou inviável tanto do ponto de vista técnico quanto do ponto de vista da preservação da ruína.

Diante dessa limitação, realizou-se uma investigação mais aprofundada das ferramentas disponíveis no Vuforia SDK, identificando-se o recurso *Area Target* como uma alternativa potencialmente mais adequada, uma vez que possibilita a reconstrução e o aumento de ambientes inteiros, permitindo a navegação virtual no interior da ruína. No entanto, essa abordagem apresentou restrições significativas: a entrada física no interior da ruína é proibida por questões de segurança, devido à instabilidade estrutural de algumas paredes, e a captura necessária para o *Area Target* demanda equipamentos especializados e de alto custo, como dispositivos compatíveis com ARKit equipados com sensores LiDAR, câmeras Matterport Pro2 e Pro3 e scanners tridimensionais específicos (PUALANI, 2024)

Considerando essas limitações práticas, técnicas e financeiras, optou-se pela utilização do recurso *Model Target*, que permite o reconhecimento de objetos tridimensionais reais com base em sua geometria, sem a necessidade de marcadores planos ou intervenções físicas no local. A Realidade Aumentada (RA), nesse contexto, foi concebida como uma ferramenta de contextualização *in situ*, possibilitando a sobreposição do modelo tridimensional reconstruído diretamente sobre as ruínas físicas do engenho da Fazenda do Pombal, preservando a leitura do sítio arqueológico e promovendo uma mediação patrimonial sensível ao contexto histórico.

Para a implementação dessa abordagem, utilizou-se o modelo de fotogrametria da Fazenda do Pombal, conforme Pereira (2024). Diferentemente de projetos como a reconstrução de Segeberg 1600, desenvolvida com escaneamento a laser de alta precisão (DEGGIM, 2017), este trabalho baseou-se exclusivamente na fotogrametria previamente realizada por outros pesquisadores, a partir do uso de drone cedido pelo IPHAN. O elevado volume de dados gerados resultou em alta complexidade computacional, exigindo processos de otimização para viabilizar sua aplicação em dispositivos móveis.

Nesse sentido, a nuvem de pontos obtida foi processada no software *CloudCompare*, sendo convertida em um modelo tridimensional simplificado, desprovido de cores e texturas realistas, com o objetivo de reduzir o peso computacional. Inicialmente, tentou-se utilizar a ruína em sua totalidade como *Model Target*; entretanto, o Vuforia não conseguiu reconhecê-la integralmente, possivelmente em função de seu tamanho e complexidade geométrica. Assim, optou-se pela segmentação de uma parte específica da ruína para o rastreamento, selecionando-se uma das soleiras de porta, o que resultou em sucesso na detecção e no reconhecimento pelo sistema (Figura 9).

O aplicativo de realidade aumentada foi desenvolvido para dispositivos móveis com sistema operacional Android, exigindo que o visitante realize o download previamente. No local, ao direcionar a câmera do smartphone para a soleira reconhecida como *Model Target*, o modelo tridimensional completo do engenho é renderizado em escala e posição compatíveis com a edi-

ficação original, proporcionando ao usuário uma compreensão imediata da volumetria, da organização espacial e da arquitetura histórica do conjunto.



Figura 9: Aplicativo da realidade aumentada na fazenda.

Fonte: Autora(1) 2025

Realidade virtual (RV)

A maquete digital da Fazenda do Pombal (Figura 10), utilizada tanto nas aplicações de Realidade Aumentada (RA) quanto de Realidade Virtual (RV), foi desenvolvida de forma gradual e estruturada em diferentes etapas. Inicialmente, adotou-se a planta fornecida pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), complementada pelas medidas atualizadas obtidas por meio da fotogrametria realizada no local. Essa combinação permitiu maior precisão dimensional na reconstrução tridimensional do conjunto arquitetônico.

Para a representação dos corpos d'água presentes na reconstrução digital, foram desenvolvidos *shaders*⁴ específicos, com o objetivo de conferir maior realismo visual à superfície aquática. Esse processo foi realizado pelo discente do curso de Administração da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Flávio Augusto Eleutério dos Passos, voluntário na presente pesquisa. O *shader* foi elaborado por meio do *Shader Graph*, uma interface gráfica disponibilizada pelo motor de desenvolvimento Unity, baseada em nodos, que possibilita a criação de *shaders* de forma visual, sem a necessidade de programação textual em linguagens como HLSL. A interconexão desses nodos permitiu o controle de parâmetros como cor, transparência, reflexão, refração e movimento, viabilizando a simulação dinâmica da água com reflexos sutis e transparência controlada, elementos fundamentais para a ambientação virtual do patrimônio reconstruído.

⁴ Programa gráfico que define como um objeto é renderizado, controlando aparência como cor, luz, sombra, textura e efeitos visuais.



Figura 10: Maquete digital da reconstrução do engenho da Fazenda do Pombal, software unity

Fonte: Autora(1) 2025

Mapa Hipsométrico Ruínas do Engenho - Fazenda do Pombal Ritópolis/MG

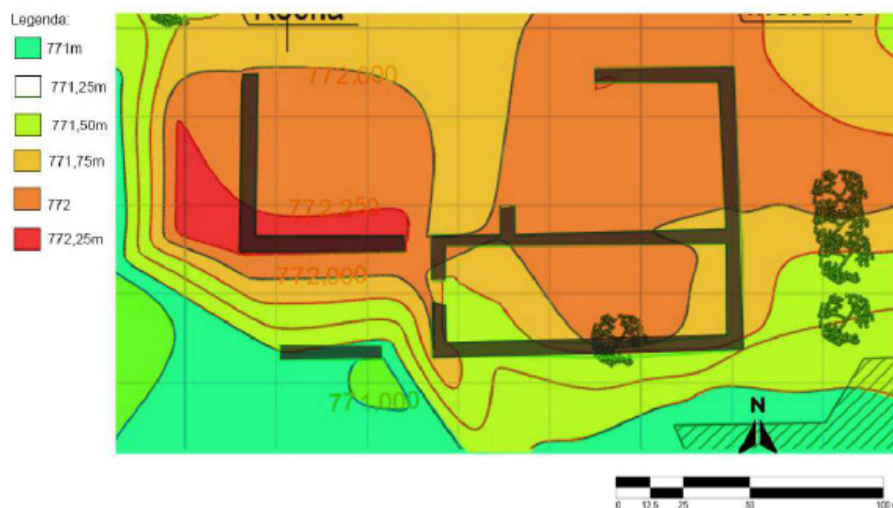


Figura 11: Mapa Hipsométrico das ruínas do engenho

Fonte: Prefeitura Municipal de Ritópolis, 2012

Na etapa seguinte, desenvolveu-se a modelagem da parte interna da fazenda, incluindo a representação do antigo moinho. A partir de estudos sobre a tipologia dos engenhos de açúcar do período colonial, foram modelados, de maneira simplificada, os principais ambientes de produção, como a casa da moenda (Figura 11), a casa do purgar (Figura 12) e a casa das fornalhas (Figura 13). Essa fase da modelagem foi realizada no software Blender, amplamente utilizado para a criação de modelos tridimensionais. As texturas aplicadas — como as das paredes de pedra, do piso em terra batida, do telhado, da vegetação e do mobiliário — foram obtidas em bancos de imagens de domínio público, assegurando fidelidade visual sem infringir direitos autorais.



Figuras 12, 13 e 14: Interior do engenho

Fonte: Autora(1) 2025

A Realidade Virtual (RV) foi desenvolvida como uma experiência imersiva e narrativa, independente da localização física do usuário. Diferentemente da Realidade Aumentada (RA), que depende da relação direta com o sítio arqueológico e do uso de ferramentas de reconhecimento e rastreamento, como o Vuforia, a RV opera integralmente em um ambiente digital, podendo ser desenvolvida exclusivamente em motores gráficos como o Unity. Na construção da maquete virtual da Fazenda do Pombal, o processo de modelagem e aplicação de texturas seguiu os mesmos parâmetros adotados na versão em RA; contudo, foram adicionados novos elementos ao ambiente, como arborização, vegetação e corpos d'água, com o objetivo de enriquecer a experiência imersiva. Esses acréscimos justificam-se pelo fato de a RV permitir a livre exploração do espaço reconstruído, o que demanda maior fidelidade visual e espacial.

A experiência foi concebida como uma RV não imersiva, também denominada *desktop/mobile VR*, acessível por meio de um aplicativo autônomo para dispositivos móveis com sistema operacional Android. A navegação ocorre em primeira pessoa, utilizando joysticks virtuais sobrepostos à tela (Figura 15), que possibilitam o deslocamento pelo ambiente e o controle da câmera. O principal desafio técnico dessa etapa consistiu na implementação de scripts que viabilizassem uma navegação fluida e intuitiva, semelhante à de jogos digitais. Para isso, o desenvolvimento baseou-se no tutorial de Fred (2021), voltado à movimentação em primeira pessoa em ambiente desktop, posteriormente adaptado para dispositivos móveis com apoio do material de Dave (2022), que aborda a navegação por meio de joysticks virtuais. A combinação e adaptação desses scripts permitiram a criação de uma experiência interativa estável e coerente com os objetivos do projeto.



Figuras 15: Aplicativo da realidade virtual, evidenciando os joysticks

Fonte: Autora(1) 2025

Além disso, foram implementados scripts de áudio 3D, que ajustam o volume conforme a proximidade do usuário em relação às fontes sonoras, ampliando a sensação de imersão. Introduções narrativas e áudios explicativos sobre cada cômodo do engenho são ativados automaticamente à medida que o usuário acessa os diferentes ambientes. Para evitar sobreposição de informações e garantir a clareza do percurso educativo, as portas virtuais somente se abrem após o término das respectivas narrações, conduzindo o usuário de forma sequencial e orientada pela maquete digital. Essa lógica confere à experiência uma estrutura narrativa guiada, com elementos de gamificação leve, baseados na exploração progressiva e na descoberta gradual dos espaços.

Na versão atual, o aplicativo é compatível com visualização tridimensional em modo mono-tela em smartphones e tablets. Embora ainda não ofereça suporte nativo a *head-mounted displays* (HMDs), como Oculus Rift ou HTC Vive, a arquitetura do projeto desenvolvida no Unity permite futura conversão para sistemas imersivos, mediante a ativação da renderização estereoscópica e ajustes nos perfis de entrada. A distribuição do aplicativo está sendo realizada por meio da Google Play Store, encontrando-se atualmente na fase final de publicação, com prazo estimado de liberação de até 14 dias. O acesso será facilitado por meio da disponibilização de um QR Code a ser instalado no sítio arqueológico.

Detalhamento técnico

O modelo tridimensional final utilizado nas experiências em Realidade Aumentada e Realidade Virtual possui aproximadamente 180.350 polígonos, valor compatível com aplicações voltadas a dispositivos móveis. As texturas empregadas, cujas resoluções variam de acordo com o material representado — como grama, metal enferrujado, telhas cerâmicas, terra batida, paredes de pedra, madeira e fornalhas —, encontram-se detalhadas na Tabela 1, evidenciando a preocupação com o equilíbrio entre fidelidade visual e desempenho computacional.

Elemento	Resolução de textura (pixels)
Grama	1152 × 864
Metal enferrujado	4096 × 4096
Telhas	1024 × 1024
Terra	1538 × 1538
Paredes de pedra	1600 × 1036
Madeira	1024 × 1024
Fornalhas	612 × 398

Tabela 1 – Especificações técnicas das texturas utilizadas na maquete digital

Fonte: Autora(1) 2025

O sistema de iluminação adotado foi do tipo *Baked Lighting* (iluminação pré-calculada), considerando que o ambiente virtual é essencialmente estático e não demanda variações dinâmicas de luz. Essa escolha contribuiu significativamente para a otimização do desempenho gráfico e para a redução do consumo de recursos computacionais durante a execução da aplicação.

A *build* final do aplicativo apresenta tamanho aproximado de 164 MB. A aplicação foi desenvolvida para o sistema operacional Android, com ampla compatibilidade estimada em mais de 18.113 modelos de smartphones. Os testes de funcionamento e desempenho foram realizados em dez dispositivos distintos, contemplando diferentes fabricantes e faixas de hardware, conforme apresentado na Tabela 2, tendo sido observada estabilidade na execução e tempos adequados de carregamento.

Fabricante/Modelo	Identificação Interna	Quantidade de dispositivos
Motorola Moto E13	sabahl	2
Samsung Galaxy M34 5G	m34x	2
Redmi Note 10 Pro	sweet	1
Motorola One Fusion	astro	1
Motorola Moto G42	hawao	1
Motorola Moto G04s	lion	1
Samsung Galaxy A34 5G	a34x	1
Samsung Galaxy S20 FE 5G	r8q	1
Total	—	10 dispositivos

Tabela 2 – Dispositivos móveis utilizados nos testes da aplicação

Fonte: Autora(1) 2025

Considerações finais

O presente trabalho teve como objetivo principal investigar e aplicar as tecnologias de Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (RV) na reconstrução digital e na mediação do patrimônio cultural representado pelas ruínas do engenho da Fazenda do Pombal. A partir da integração entre fotogrametria, modelagem tridimensional e desenvolvimento de aplicações interativas, foi possível atender aos objetivos propostos, demonstrando o potencial dessas tecnologias como ferramentas de preservação e difusão do patrimônio histórico.

A reconstrução e documentação digital do engenho resultaram na criação de um registro tridimensional preciso e reversível, contribuindo para a preservação digital do patrimônio e possibilitando futuras reinterpretações e usos acadêmicos. A aplicação em Realidade Aumentada, baseada no reconhecimento de uma soleira como *Model Target*, permite a contextualização in loco da edificação, sem a necessidade de marcadores físicos invasivos, preservando a integridade visual e material do bem histórico.



Figuras 16: Fotografia da fachada lateral esquerda da ruína seguida de sua reconstrução em 3D.

Fonte: Autora(1) 2025

A experiência em Realidade Virtual, por sua vez, encontra-se finalizada e funcional, oferecendo uma imersão educativa e narrativa no interior do engenho reconstruído. A gamificação leve, estruturada por meio de progressão espacial e feedback auditivo contextual, promove o engajamento do usuário e favorece uma aprendizagem significativa sobre o processo produtivo do açúcar, aproximando o público do contexto histórico, das técnicas construtivas e da relevância sociocultural do local.

A disponibilização do aplicativo por meio da Google Play Store, associada à utilização de QR Codes no local, busca democratizar o acesso ao patrimônio, ampliando seu alcance para além das limitações físicas do espaço. Para a plena implementação dessa solução, destaca-se a necessidade de ampliação do sinal de internet na área, possibilitando o download da aplicação pelos visitantes em tempo real, o que contribuirá para superar limitações técnicas e potencializar o engajamento do público.

Conclui-se que a integração de RA, RV e estratégias de gamificação configura-se como uma ferramenta potente para a preservação digital, a mediação cultural e a revalorização do patrimônio histórico. Ao integrar informação, interatividade e experiência sensorial, a proposta fortalece a relação entre memória, espaço e tecnologia, tornando o patrimônio mais acessível — especialmente para públicos jovens e familiarizados com linguagens digitais — e reafirmando o potencial das realidades imersivas como estratégias eficazes de educação patrimonial e preservação da identidade histórica.

Agradecimentos

Agradecemos à PROPE/UFSJ e ao CNPq pela concessão da bolsa, fundamental para viabilizar as idas a campo e o desenvolvimento desta pesquisa. Agradece-se também ao discente Pedro Lucas Pereira, por ter gentilmente cedido a fotogrametria da Fazenda do Pombal e pelo suporte técnico prestado sempre que surgiram dúvidas relacionadas a esse processo. Ao senhor Carlos Pereira dos Passos, pai da autora¹, agradece-se pelo apoio constante e pelas múltiplas idas à Fazenda, essenciais para os estudos em realidade aumentada. Agradece-se, igualmente, ao discente Flávio Augusto Eleutério dos Passos, voluntário nesta pesquisa, pela elaboração do shader utilizado na simulação dos corpos d'água, contribuindo significativamente para o visual da reconstrução virtual.

Referências bibliográficas

- ABUD, Maria Victoria Amado. Arquitetura e sociedade na indústria do açúcar: o reflexo do ciclo açucareiro nos quadros arquitetônicos e o impacto às classes trabalhadoras na agroindústria canavieira do século XX. Universidade Federal de Sergipe, Laranjeiras (SE), 2020.
- BARBA PRIETO, Rainier Alexandro. Unity Hub aplicado en la gamificación del tema "the food" en la etapa de educación infantil. 2022. Trabajo Fin de Grado (Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación) – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sistemas de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2022.
- CAMPAGNOL, Gabriela. Usinas de açúcar: habitação e patrimônio industrial. 2008. p. 30-64.
- CAMPIOTTO, Renata Cima. Técnicas de documentação, levantamento e diagnóstico do patrimônio edificado: o caso do Museu do Ipiranga. Tese (Doutorado em História e Fundamentos da Arquitetura e do Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.
- DAVE. FIRST PERSON MOVEMENT in 10 MINUTES – Unity Tutorial. YouTube, canal Dave, 3.4 anos atrás. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=f473C43s8nE>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- DEGGIM, Simon; KÖNIG, Reinhard; DONATH, Dirk. Segeberg 1600 – Reconstructing a historic town for virtual reality visualisation as an immersive experience. In: 5th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications, 28–29 November 2017, Hamburg, Germany. Copernicus, 2017, p. 87-94.
- DETERDING, Sebastian; DIXON, Dan; KHALED, Rilla; NACKE, Lennart. From game design elements to gamefulness: defining “gamification”. Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments. Tampere, Finland, 2011. p. 9–15.
- FILITTO, Danilo. Unity + Vuforia 2022 – Aprenda como criar um projeto AR (Realidade aumentada) utilizando o Vuforia. YouTube, canal Danilo Filitto, 14 jul. 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=M3UOlKWHdG0&list=LL&index=4&t=1s>. Acesso em: 20 jul. 2024.

- FORTE, Maurizio; DELL'UNTO, Nicolò. Virtual archaeology: communication in 3D and ecological thinking. In: FORTE, Maurizio (org.). Cyber-archaeology. Oxford: Archaeopress, 2012. p. 7–18.
- FRED. MOVIMENTAÇÃO de Personagem com Joystick Virtual – Unity Tutorial. YouTube, canal Fred, 4.2 anos atrás. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=QEI7RDPaLPk>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- IBAMA, INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Plano de Manejo da Floresta Nacional de Ritópolis: diagnóstico e planejamento. Brasília: IBAMA, 2005.
- INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). Relatório técnico sobre o tombamento da Fazenda do Pombal. Belo Horizonte: IPHAN, 1971.
- INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). Ficha de catalogação das práticas – Engenho de cana-de-açúcar – Patrimônio Imaterial. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/007%20Cana%20de%20acucar.pdf>. Acesso em: 25/06/2025
- MARCGRAVE, Jorge. História Natural do Brasil. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado, 1942.
- MARQUES, Célio Gonçalo; PEDRO, João Paulo; ARAÚJO, Inês. A systematic literature review of gamification in/for cultural heritage: leveling up, going beyond. *Heritage*, [S.l.], v. 6, n. 8, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10316/112086>. Acesso em: 24 jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/heritage6080312>. ISSN 2571-9408.
- MOURA, Ana Carolina. Arquitetura da resignificação: realidade aumentada aplicada ao patrimônio cultural. Monografia (Graduação em Arquitetura e Urbanismo). Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Joinville, 2018.
- PEREIRA, Rafael Armando Torres. Uso de Realidade Aumentada aplicada ao Patrimônio: o século XX na Sé do Porto. Dissertação (Mestrado em Comunicação Audiovisual). Instituto Politécnico do Porto, Porto, 2017.
- SAROSA, Moechammad; MULYANI, Rini; SAPUTRO, Heru. Developing augmented reality based application for character education using unity with Vuforia SDK. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, v. 1193, p. 012035, 2019.
- SERVIÇO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (SPHAN). Levantamento das ruínas da Fazenda do Pombal. São João del-Rei: Escritório Técnico de São João del-Rei, Arquiteto Sérgio Fagundes Lima, 06 maio 1986.
- SILVA, Áurea Pereira da. Engenhos e fazendas de café em Campinas (séc. XVIII-séc. XX). *Anais do Museu Paulista: história e cultura material*, v. 14, p. 81-119, 2006.
- TORI, Romero; KIRNER, Claudio; SISCOOTTO, Robson Augusto. Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada. São Paulo: Editora SENAC, 2006.
- VASCONCELLOS, Sylvio de; MELLO, Suzy de. Arquitetura no Brasil – Sistemas Construtivos. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (Escola de Arquitetura da UFMG), 1979.

Recebido em: 25/06/2025

Aprovado em: 15/01/2026

Publicado em: 10/06/2026