

# Orientações para a avaliação da usabilidade de interfaces imersivas para o sector da construção

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.77.41>

**Fábio Matoseiro Dinis<sup>1</sup>, Bárbara Rangel<sup>2</sup>,  
Ana Sofia Guimarães<sup>3</sup>, João Poças Martins<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> CONSTRUCT-GEQUALTEC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 0000-0003-4017-7962

<sup>2</sup> CONSTRUCT-GEQUALTEC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 0000-0002-5911-9423

<sup>3</sup> CONSTRUCT-LFC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 0000-0002-8467-6264

<sup>4</sup> CONSTRUCT-GEQUALTEC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 0000-0001-9878-3792

## Resumo

Ao longo dos últimos anos tem sido verificado o desenvolvimento de meios de interação inovadores por forma a minimizar o impacto na mudança de paradigma tecnológico no sector da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações (AECO), quer pela implementação de novas tecnologias, quer pela extensa curva de aprendizagem de algumas ferramentas autorais BIM. A utilização de um espectro variado de tecnologias imersivas (e.g., Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA)), tem contribuído favoravelmente em diversas áreas do conhecimento como a educação e treino para Engenharia [1]–[3], revisão de projeto e colaboração [4]–[6], manutenção de edifícios [7]–[9], segurança na construção [10]–[12], entre outras. Contudo e quando presentes em trabalhos de investigação, a diversidade de procedimentos utilizados para avaliação da aplicabilidade de interfaces inovadoras no sector AECO carece de uma metodologia holística que forneça resultados passíveis de serem comparados, centrados no utilizador e em cumprimento com diretrizes sistematizadas em normas internacionais.

O presente artigo descreve o estado de uma investigação em curso no sentido de propor linhas orientadoras para a avaliação da usabilidade de interfaces inovadoras e imersivas baseadas em BIM, com base em normas de usabilidade de *software* e investigação relacionada. Adicionalmente, apresentam-se várias interpretações dos domínios que compõem o conceito de usabilidade, assim como adaptações para que as avaliações de usabilidade se possam adequar aos requisitos das interfaces imersivas e do próprio sector da construção.

## 1. Introdução

As interfaces de Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA) têm sido desenvolvidas visando várias aplicações no sector da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações (AECO) causando, ao longo dos últimos anos, uma profusão de casos de estudo. De facto, os crescentes desenvolvimentos tecnológicos em campos como a informática e a computação gráfica permitiram o decréscimo dos preços dos equipamentos (e.g., head-mounted displays), tornando-os mais acessíveis ao consumidor comum [10], [13], [14].

Como resultado do progresso tecnológico, sectores industriais como a AECO, reconhecido por alguma resistência no investimento em novas tecnologias [15] largamente devido à natureza fragmentada do sector [16], têm sido alvo de investigação que procura preparar a mudança tecnológica em áreas como operações, coordenação, colaboração, design, aproximando os vários intervenientes dos projetos de construção. Neste sentido, a aplicação de interfaces imersivas baseadas em BIM tem demonstrado potenciais benefícios na melhoria dos comportamentos de segurança a adotar em obra [17], na gestão de cenários de emergência [1], manutenção [18], comunicação e colaboração entre vários intervenientes do sector AECO [19], assim como novas abordagens para a educação e treino na Engenharia [20], entre muitas outras aplicações. Neste sentido, a validação deste tipo de soluções assume especial relevo face à presença de alguns estudos sobre a aplicação de interfaces imersivas para a indústria da construção ausentes de testes complementares que comprovem a adequabilidade e potencial das soluções apresentadas. Por outro lado, quando presentes, verifica-se uma diversidade de métodos de avaliação, procedimentos e dimensões utilizadas que inviabiliza a comparação entre estudos.

É convicção dos autores deste estudo que a utilização de novas interfaces e das suas aplicações em contextos específicos como a Engenharia Civil ou campos relacionados com o sector AECO não deverá ficar comprometida pela falta de um mapa sistemático e holístico sobre como proceder na validação deste tipo de ferramentas e sistemas. Tais orientações deverão simultaneamente permitir a comparação entre estudos, fornecendo prescrições sobre como alcançar domínios de usabilidade padronizados, desta forma contribuindo para a base de conhecimento sobre o desenvolvimento e validação de interfaces imersivas.

O presente artigo assume o desafio de propor diretivas para a avaliação da usabilidade no contexto da Engenharia Civil, com base em normas de usabilidade de software e investigação relacionadas. São ainda apresentadas, várias interpretações dos atributos que compõem o conceito da usabilidade assim como respetivas adaptações para que as avaliações se possam adequar aos requisitos das interfaces imersivas desenvolvidas para o sector AECO.

## 2. Contextualização do conceito de usabilidade

Não obstante os resultados favoráveis reportados em publicações recentes relativamente à performance, eficiência, eficácia e facilidade de utilização de interfaces imersivas [21]–[23], estas dimensões constituem atributos ou domínios de um conceito mais amplo, a usabilidade. De facto, a utilização de procedimentos muito diversos para reportar resultados da aplicação de interfaces imersivas dificulta a comparação entre estudos, perpetuando a preocupação: "Existirá uma metodologia holística que permita uma comparação objetiva e suficientemente fundamentada sobre os resultados obtidos na aplicação de interfaces imersivas ao contexto do sector AECO?"

Atendendo aos resultados mencionados em recentes revisões sistemáticas da literatura [24], [25], permanece a lacuna por um conjunto de recomendações práticas e suficientemente inclusivas, que promovam uma alternativa à avaliação dispersa de interfaces imersivas aplicadas a objetivos e tarefas semelhantes. Assim, neste artigo apresentam-se os passos iniciais de uma investigação em curso no sentido de promover um conjunto de orientações abrangente e flexível para a avaliação de interfaces imersivas de RV e RA, passível de replicação e comparação entre estudos.

### 2.1. Pluralidade na definição de usabilidade

A usabilidade faz parte de uma vasta rede de conceitos relacionados com a aceitabilidade de sistemas. No entanto, em termos de aceitabilidade prática, a usabilidade pode ser considerada como um subcampo, relacionado com a qualidade da funcionalidade de um sistema em termos de uso [26]. Usabilidade é um conceito comum que tem sido aplicado como indicador da "capacidade de ser utilizado" referente a um sistema [27]. No entanto, a definição de usabilidade é uma tarefa desafiante, dada a pluralidade de normas com diferentes definições para este conceito (ver também [28]), bem como a dependência dos atributos de usabilidade do contexto de utilização [29]. De forma mais elucidativa, a ISO/IEC 9126-1 estabelece uma abordagem orientada para o produto definindo usabilidade como "A capacidade do software de ser compreendido, aprendido, utilizado e atrativo para o utilizador, quando utilizado em condições especificadas" [30]. Esta norma foi mais recentemente substituída pela ISO 25010:2011 [31] apresentando a usabilidade como uma categoria da qualidade em uso, adaptando a definição da ISO 9241 [32]. O ponto de vista apresentado pela ISO 9241-11:2018 [32] especifica medidas de desempenho e satisfação para avaliações de usabilidade, bem como a exigência de identificação dos objetivos e contexto de utilização [27]. Esta norma define usabilidade como a "medida em que um sistema, produto ou serviço pode ser utilizado por utilizadores especificados para atingir objetivos específicos com eficiência, eficácia e satisfação num contexto de utilização especificado" [32]. Uma visão semelhante é sustentada pela ANSI INCITS 354-2001 [33], como descrito por Sauro e Kindlund [34].

Por sua vez, a IEE Std.610.12-1990 especifica o mesmo conceito como "A facilidade com que um utilizador pode aprender a operar, preparar *inputs* para, e interpretar *outputs* de um sistema ou componente" [35].

O modelo para a usabilidade tem sido objeto de debate entre vários peritos e autores sob o ponto de vista de que mais domínios poderiam ser incluídos como características relevantes deste conceito (e.g., *memorability*, capacidade de aprendizagem, segurança) [26], [29], sugerindo, no entanto, diferentes medidas para a sua avaliação [29].

O presente artigo baseia-se nos modelos de usabilidade de Dix et al. [36], Nielson [26], Abran et al. [29] e Preece et al. [37], bem como nas recomendações da ISO 9241-11 [32] e ANSI INCITS 354-2001 [33]. Adicionalmente, os domínios de usabilidade visados neste trabalho constituem um exercício ilustrativo, passível de caracterizar uma hipotética avaliação de usabilidade no âmbito do sector AECO. Por conseguinte, este estudo pretende descrever uma ferramenta suficientemente plástica a futuras adaptações, nomeadamente a inclusão de outros domínios de usabilidade. Atendendo a que as interfaces imersivas poderão ser avaliadas face à facilidade de utilização e conformidade com os objetivos a atingir num determinado contexto por um determinado tipo de utilizadores (com requisitos próprios), na definição de orientações para a condução de tais avaliações, deverão ser consideradas possíveis modificações face à diversidade de perfis dos intervenientes dos projetos de construção e à amplitude de contextos presentes no sector AECO.

## 2.2. Sobre tipos de avaliação de usabilidade

Benyon [38] descreve dois tipos principais de avaliação: métodos baseados em peritos e métodos baseados em participantes. A avaliação baseada em peritos compreende um conjunto de sujeitos peritos em Interação Humano-Computador (IHC) ou usabilidade, aptos a testar uma versão em desenvolvimento de uma interface. Por sua vez, estes deverão recorrer à sua experiência para comparar a interface com um conjunto de princípios gerais de design também reconhecidos como heurísticas [38]. Este tipo de avaliação, também conhecido como avaliação formativa, é geralmente realizado durante as fases iniciais de desenvolvimento, onde grandes mudanças afetando a globalidade de uma interface poderão ainda ser apontadas [26], [37], [38].

O segundo tipo de avaliação referido, avaliações sumativas, constitui um método baseado em participantes, compreendendo a avaliação de domínios de usabilidade (e.g., eficiência, eficácia, satisfação, entre outros) podendo estar em conformidade com normas internacionais. Este tipo de avaliação destina-se a produtos finalizados [37], pelo que a qualidade global das interfaces poderá ser avaliada [26] pelos utilizadores (i.e., participantes).

Embora as avaliações sumativas possam ser mais adequadas na condução de uma avaliação quantitativa, a relevância dos aspetos qualitativos presentes na interação deve ser considerada [39]. De facto, a consideração de aspetos qualitativos na avaliação de usabilidade poderá ter um papel significativo na identificação de comportamentos

e decisões tomadas pelos utilizadores. Schaffer et al. [40] descrevem que qualidade está normalmente relacionada com a avaliação da perceção dos utilizadores. Num estudo sobre IHC e escolha da modalidade, os autores referem o efeito do contexto e preferência subjetiva sobre o comportamento dos utilizadores [40]. Embora a RV e RA sejam conhecidas há várias décadas, os avanços tecnológicos para a sua aplicação generalizada são relativamente recentes. Assim, espera-se que a maioria dos utilizadores do sector AECO não esteja completamente familiarizada com este tipo de interfaces, especialmente quando aplicadas à interação com modelos BIM segundo abordagens mais tradicionais (e.g., utilização de ferramentas autorais). Desta forma, a implementação de métodos qualitativos (e.g., entrevistas, grupos focais) para avaliar o contexto e as perceções dos utilizadores, assim como a aceitabilidade da tecnologia, poderá fornecer uma visão mais esclarecedora sobre as necessidades reais dos utilizadores e a disposição para adotar métodos inovadores.

### 3. Orientações para a avaliação de usabilidade

A aplicação de interfaces imersivas no sector AECO compreende a utilização de um novo tipo de sistema de interação. Neste sentido, e sob a ótica da avaliação, a escolha de objetivos de usabilidade é muitas vezes uma tarefa árdua quando comparada com o mesmo processo aplicado a novas versões de soluções pré-existentes [26]. Como tal, anteriormente à fase de conceção, poderão definir-se quais os atributos, domínios da usabilidade, a avaliar. Poderá igualmente ser solicitado o auxílio de especialistas em usabilidade a fim de se poderem definir critérios para a medição e cumprimento de determinadas tarefas (a realizar pelos utilizadores durante as avaliações sumativas) (ver também, Rideout [41] e Nielsen [26] sobre a utilização de linhas de objetivos de usabilidade).

Ao longo do processo iterativo de desenvolvimento de interfaces imersivas poderão planear-se momentos de teste formativos, como a realização de avaliações heurísticas, especialmente ao longo das fases iniciais. De facto, as etapas iniciais de desenvolvimento são propensas a um maior número de modificações na conceção, pelo que, através da aplicação de heurísticas, poderão identificar-se de forma expedita uma variedade de problemas de usabilidade. Sobre este tipo de avaliação, Nielsen [26] recomenda a utilização de três a cinco avaliadores, sugerindo a existência de uma relação positiva entre o número de peritos e o número de problemas que poderão vir a ser encontrados.

Noutro aspeto e anteriormente à concretização de avaliações sumativas, poderá equacionar-se a realização de testes piloto. Utilizadores menos experientes que enfrentem uma transição entre gerações de tecnologias e tipos de interface deverão ser expostos a sessões de formação para explorar alguns dos aspetos da interface sem comprometer os testes de usabilidade [26]. Este procedimento assegura que os resultados dos testes não serão distorcidos devido ao esforço dos utilizadores com a mecânica das interações [26].

Os testes de usabilidade baseados em participantes (i.e., avaliações sumativas) permitem avaliar uma dada interface numa fase avançada de desenvolvimento. Como tal, a realização de testes de medição torna-se adequada para aferir atributos de usabilidade previamente delineados. Sauro e Kindlund [34] declaram que para realizar uma avaliação sumativa sobre a usabilidade de um produto, é necessário definir e medir um conjunto de métricas. Os autores destacam as recomendações da ISO 9241-11 [32] e ANSI INCITS 354-2001 [33] que definem as dimensões de usabilidade como compostas por: eficiência, eficácia e satisfação.

A tabela 1 identifica a definição admitida pelos autores do presente artigo sobre os referidos atributos da usabilidade. Por razões estritamente ligadas a simplicidade da apresentação das orientações a que este artigo se propõe, admitiram-se apenas três atributos. Contudo e como referido anteriormente (ver subcapítulo 2.1) este estudo pretende descrever uma ferramenta suficientemente plástica a futuras adaptações, pelo que poderão incluir ou substituir-se atributos da usabilidade (e.g., *memorability*, capacidade de aprendizagem, segurança, entre outros) em pertinência dos requisitos e contexto da avaliação a que se destinam.

**Tabela 1**  
Atributos da usabilidade e sua definição.

Atributos	Definição
Eficácia	A extensão alcançada pelos utilizadores cumprindo e completando com precisão um conjunto pré-definido de tarefas e objetivos. <sup>1</sup>
Eficiência	Recursos consumidos para atingir um determinado resultado que conduza a um determinado nível de desempenho. <sup>2</sup>
Satisfação	O agrado verificado na utilização do sistema em comparação com as expectativas e necessidades do utilizador anteriores à experiência. <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Conforme [26], [32]; <sup>2</sup> Conforme [33].

Eficácia e eficiência são domínios da usabilidade relacionados com a definição de tarefas. Assim, deverá ser previamente formulada uma lista de tarefas e subtarefas, pelo que os utilizadores deverão ser igualmente e expressamente informados sobre quais as tarefas a serem executadas durante o teste de usabilidade. Assumindo que cada utilizador pretenderá completar as tarefas estabelecidas, na eventualidade de falhar ou não completar uma determinada subtarefa, deverá contabilizar-se um desconto na percentagem final (i.e., valor total da eficácia) de conclusão da tarefa (ver também Sauro e Kindlund [42]). A eficácia pode, portanto, ser medida como a percentagem de conclusão de uma tarefa, enquanto que a eficiência (de utilização) diz respeito ao tempo despendido a completar a tarefa [26].

No que respeita à avaliação da satisfação verifica-se a utilização de uma variedade de questionários. Um destes exemplos é o *System Usability Scale* (SUS) que, para além de representar uma ferramenta reconhecida, possui a vantagem de ser relativamente curto (i.e., 10 questões), com fiabilidade comprovada (ver também Sauro [43]), bem como relativamente fácil para a análise de resultados. Em detalhe, cada resposta pode ser classificada usando uma escala Likert de cinco pontos. Os valores das respostas serão depois adaptados de acordo com o número da pergunta. Ou seja, a cada resposta a itens ímpares é subtraído 1 valor, e cada resposta a um item de número

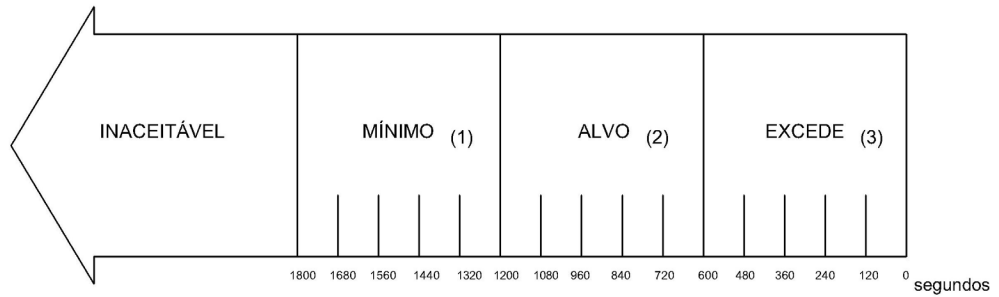
par terá a sua classificação subtraída a partir de 5. Após adicionar todos os valores de cada resposta (após o ajustamento), o valor obtido deverá ser multiplicado por 2,5 [43]. Segundo este processo o valor final situar-se-á entre 0 e 100 e corresponderá à satisfação geral do sistema.

A Figura 1 concentra a visão geral das fases e procedimentos acima mencionados.



**Figura 1**  
Avaliação formativa (à esquerda) e avaliação sumativa (à direita).

Para poder estabelecer uma comparação entre estudos centrados em aplicações semelhantes de interfaces imersivas, os autores deste estudo sugerem que os três atributos sejam comparados em termos de três medidas descritivas: média aparada, mediana, e coeficiente de correlação. Como tal, é necessário realizar uma transformação de escala, uma vez que o atributo eficiência é medido numa escala temporal (e.g., número de segundos despendidos na realização de uma tarefa), enquanto os restantes são avaliados numa escala percentual entre 0 e 100. Neste sentido e considerando a inexistência de uma regra geral para estabelecer a duração de tarefas (segundo o conhecimento dos autores), Preece et al. [37] sugerem estabelecer períodos de pausa se uma tarefa for concebida para demorar mais que 20 minutos. Considerando uma hipotética avaliação de usabilidade (teste sumativo), sem pausas, os autores propõem a definição de um mínimo e máximo aceitáveis, bem como o período de tempo alvo para completar tarefas pré-definidas (consultar Figura 2). Logo, é possível discernir qual seria o período de tempo alvo para diferentes intervalos de eficiência e posteriormente transformá-lo num valor percentual. Uma abordagem semelhante à definição de uma *usability goal line* (ver também Nielsen [26] e Rideout [41]) onde se estabelecem o nível planeado, assim como intervalos de tempo teóricos mínimos e máximos. A Figura 2 ilustra um exemplo de uma possível abordagem para transformação de escala visando o atributo da eficiência.



**Figura 2**  
Sugestão para a transformação de escala do atributo eficiência através de uma *usability goal line*.

- (1) Deduzir 10 % por cada intervalo além da área alvo
- (2) Intervalo correspondente a 50 % de Eficiência
- (3) Adicionar 10% por cada intervalo além da área alvo

#### 4. Conclusão

A mudança de paradigma tecnológico pode parecer inevitável e transversal à maioria dos sectores da indústria provocando novos desafios em particular no sector AECO face à possível substituição de práticas tradicionais por abordagens digitais. Adicionalmente, a adoção do BIM enfrenta ainda limitações no que respeita à adaptação aos níveis de conhecimento, requisitos e especificidade de tarefas de muitos intervenientes dos projetos de construção [44], [45]. A aplicação de tecnologias imersivas (e.g., RV e RA) para interação com informação contida em modelos BIM poderá constituir uma alternativa para agilizar colaboração e a integração de uma geração de profissionais ainda não totalmente familiarizados com ferramentas digitais imersivas.

Adicionalmente, a questão da validação assume especial relevo face à presença de alguns estudos visando interfaces imersivas desenvolvidas para a indústria da construção sem a presença de testes que comprovem a adequabilidade e potencial das soluções apresentadas. Por outro lado, quando presente, verifica-se uma diversidade de métodos de avaliação, procedimentos e dimensões utilizadas que inviabiliza a comparação entre estudos. Por conseguinte, o presente artigo pretende preencher esta lacuna, fornecendo diretivas acessíveis sobre como conduzir uma avaliação de usabilidade de interfaces imersivas para o sector AECO.

A escolha dos atributos de usabilidade constitui um passo fundamental no processo de avaliação, pelo que o presente trabalho sugere um conjunto de três domínios (i.e., eficácia, eficiência e satisfação) em conformidade com a pluralidade de definições para o conceito de usabilidade e as visões admitidas por diversos autores e normas internacionais.

São igualmente sugeridas a realização de avaliações heurísticas e testes piloto, assim como a transformação de escala do atributo relacionado com a eficiência através da utilização de *usability goal lines* de modo a viabilizar uma disseminação clara dos resultados obtidos numa potencial avaliação.



O presente artigo alerta ainda para a relevância dos testes qualitativos que poderão assumir um papel significativo na identificação de comportamentos e decisões tomadas pelos utilizadores.

Como trabalhos futuros serão realizados casos de estudo sobre a aplicação de interfaces imersivas cuja validação da adequabilidade ao sector AECO será avaliada segundo as orientações promovidas pelo presente trabalho.

## Agradecimentos

O primeiro autor gostaria de reconhecer a bolsa de doutoramento 2020.07329.BD concedida pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), cofinanciada pelo Fundo Social Europeu (FSE) através do Programa Operacional Regional Norte.

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base – UIDB/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC), bem como o Financiamento de Base – UIDB/00145/2020 do CEAU – Centro de Estudos de Arquitectura e Urbanismo, ambos financiados por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

## Referências

- [1] B. Wang, H. Li, Y. Rezgui, A. Bradley, and H. N. Ong, “BIM based virtual environment for fire emergency evacuation”, *Sci. World J.*, vol. 2014, pp. 1-22, Jan. 2014.
- [2] T. H. Wu, F. Wu, C. J. Liang, Y. F. Li, C. M. Tseng, and S. C. Kang, “A virtual reality tool for training in global engineering collaboration”, *Universal Access in the Information Society*, vol. 1, no. 0123456789, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1-13, 05-Dec-2017.
- [3] F. M. Dinis, A. S. Guimaraes, B. R. Carvalho, and J. P. P. Martins, “Development of virtual reality game-based interfaces for civil engineering education”, in *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, Atenas, Grécia, 2017, pp. 1195-1202.
- [4] C. Botton, “Supporting constructability analysis meetings with Immersive Virtual Reality-based collaborative BIM 4D simulation”, *Autom. Constr.*, vol. 96, pp. 1-15, 2018.
- [5] J. Du, Y. Shi, Z. Zou, and D. Zhao, “CoVR: Cloud-Based Multiuser Virtual Reality Headset System for Project Communication of Remote Users”, *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 144, no. 2, p. 4017109, Feb. 2017.
- [6] J. G. Cárcamo, H. Trefftz, D. A. Acosta, and L. F. Botero, “Collaborative design model review in the AEC industry”, vol. 11, no. 4, pp. 931-947, Nov. .

- [7] Yangming Shi, Jing Du, S. Lavy, and Dong Zhao, "A Multiuser Shared Virtual Environment for Facility Management", *Procedia Eng.*, vol. 145, 2016.
- [8] H. Bae, M. Golparvar-Fard, and J. White, "High-precision vision-based mobile augmented reality system for context-aware architectural, engineering, construction and facility management (AEC/FM) applications", *Vis. Eng.*, vol. 1, no. 1, p. 3, Dec. 2013.
- [9] M. Chu, J. Matthews, and P. E. D. Love, "Integrating mobile Building Information Modelling and Augmented Reality systems: An experimental study", *Autom. Constr.*, vol. 85, no. October 2017, pp. 305-316, Jan. 2018.
- [10] T. Hilfert et al., "Low-cost virtual reality environment for engineering and construction", *Vis. Eng.*, vol. 4, no. 1, p. 2, Dec. 2016.
- [11] R. Sacks, J. Whyte, D. Swissa, G. Raviv, W. Zhou, and A. Shapira, "Safety by design: dialogues between designers and builders using virtual reality", *Constr. Manag. Econ.*, vol. 33, no. 1, pp. 55-72, Jan. 2015.
- [12] J. K. W. Wong et al., "Virtual prototyping for construction site Co2 emissions and hazard detection", *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 11, no. 1, p. 130, Aug. 2014.
- [13] J. Wolfartsberger, "Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review", *Autom. Constr.*, vol. 104, pp. 27-37, Aug. 2019.
- [14] A. Nandavar, F. Petzold, J. Nassif, and G. Schubert, "Interactive Virtual Reality Tool for BIM Based on IFC – Development of OpenBIM and Game Engine Based Layout Planning Tool – A Novel Concept to Integrate BIM and VR with Bi-Directional Data Exchange", in *23rd CAADRIA Conference*, 2018, pp. 453-462.
- [15] Ning Gu and K. London, "Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry", *Autom. Constr.*, vol. 19, no. 8, Dec. 2010.
- [16] R. Johnson and E. Laepple, "Digital innovation and organizational change in design practice", 2003.
- [17] S. Azhar, "Role of Visualization Technologies in Safety Planning and Management at Construction Jobsites", *Procedia Eng.*, vol. 171, pp. 215-226, Jan. 2017.
- [18] G. Williams, M. Gheisari, A. M. Asce, P.-J. Chen, J. Irizarry, and M. Asce, "BIM2MAR: An Efficient BIM Translation to Mobile Augmented Reality Applications", *J. Manag. Eng.*, vol. 31, no. 1, p. A4014009, Jan. 2015.
- [19] F. M. Dinis, L. Sanhudo, J. P. Martins, and N. M. M. Ramos, "Improving project communication in the architecture, engineering and construction industry: Coupling virtual reality and laser scanning", *J. Build. Eng.*, vol. 30, p. 101287, 2020.

- [20] C. Wang, H. Li, and S. Y. Kho, "VR-embedded BIM immersive system for QS engineering education", *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 26, no. 3, pp. 626-641, Feb. 2018.
- [21] W. S. Alhalabi, "Virtual reality systems enhance students' achievements in engineering education", *Behav. Inf. Technol.*, vol. 35, no. 11, pp. 919-925, 2016.
- [22] J. Fogarty, J. McCormick, and S. El-Tawil, "Improving Student Understanding of Complex Spatial Arrangements with Virtual Reality", *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.*, vol. 144, no. 2, 2018.
- [23] D. Paes, E. Arantes, and J. Irizarry, "Immersive environment for improving the understanding of architectural 3D models: Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems", *Autom. Constr.*, vol. 84, pp. 292-303, Dec. 2017.
- [24] A. Sidani et al., "Recent Tools and Techniques of BIM-Based Virtual Reality: A Systematic Review", *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 28, no. 2, pp. 1-14, 2019.
- [25] A. Sidani et al., "Recent Tools and Techniques of BIM-Based Augmented Reality: A Systematic Review".
- [26] Jakob Nielsen, *Usability Engineering*. Mountain View, California: Morgan Kaufman, 1993.
- [27] N. Bevan, J. Carter, and S. Harker, "ISO 9241-11 Revised: What Have We Learnt About Usability Since 1998?", in *International Conference on Human-Computer Interaction*, 2015, pp. 143-151.
- [28] N. Bevan, "International standards for HCI and usability", *Int. J. Hum. Comput. Stud.*, vol. 55, no. 4, pp. 533-552, 2001.
- [29] A. Abran, A. Khelifi, W. Suryn, and A. Seffah, "Consolidating the ISO usability models", *Proc. 11th Int. Softw. Qual. Manag. Conf.*, pp. 23-25, 2003.
- [30] ISO/IEC, "ISO/IEC FDIS 9126-1: SOFTWARE ENGINEERING PRODUCT QUALITY PART 1: QUALITY MODEL (2000)". 2000.
- [31] ISO\_25010, "ISO/IEC 25010:2011: Systems and Software Engineering - Systems and Software Product Quality Requirements and Evaluation - System and Software Quality Models", ISO, 2011. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/35733.html>. [Accessed: 04-Apr-2019].
- [32] "ISO 9241-11 Ergonomics of human-system interaction – Part 11: Usability: Definitions and concepts", vol. 2018. 2018.
- [33] "ANSI INCITS 354-2001 Common Industry Format for Usability Test Reports". InterNational Committee for Information Technology Standards [INCITS], 2001.

- [34] J. Sauro and E. Kindlund, "A method to standardize usability metrics into a single score", *Proc. SIGCHI Conf. Hum. factors Comput. Syst. – CHI '05*, p. 401, 2005.
- [35] IEEE, "IEEE Std 610.12-1990, IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology". p. 84, 1990.
- [36] A. Dix, J. Finlay, G. Abowd, and R. Beale, *Human-Computer Interaction*, 3rd ed. Essex, England: Pearson Education Limited, 2004.
- [37] J. Preece, Y. Rogers, and H. Sharp, *Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction*, vol. 18, no. 1. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [38] D. Benyon, *Designing Interactive Systems: A comprehensive guide to HCI, UX and interaction design*, Third. Essex, England: Pearson Education Limited, 2014.
- [39] A. Cooper, R. Reimann, and D. Cronin, *About Face 3: The essentials of interaction design*, vol. 3, no. 3. Indianapolis, Indiana: Wiley Publishing, Inc., 2007.
- [40] S. Schaffer, R. Schleicher, and S. Möller, "Modeling input modality choice in mobile graphical and speech interfaces", *Int. J. Hum. Comput. Stud.*, vol. 75, pp. 21-34, 2015.
- [41] T. Rideout, "Changing your methods from the inside," *IEEE software*, 8, 3, 1991.
- [42] J. Sauro and E. Kindlund, "A method to standardize usability metrics into a single score", in *Proc. SIGCHI Conf. Hum. factors Comput. Syst. – CHI '05*, Portland, Oregon, EUA, p. 401, 2005.
- [43] J. Sauro, "Measuring Usability With The System Usability Scale (SUS)", *Measuring Usability*, 2011. [Online]. Available: <https://measuringu.com/sus/>. [Accessed: 25-May-2018].
- [44] Y. Liu, S. van Nederveen, and M. Hertogh, "Understanding effects of BIM on collaborative design and construction: An empirical study in China", *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 35, no. 4, pp. 686-698, May 2017.
- [45] H. Kerosuo et al., "Challenges of the expansive use of Building Information Modeling (BIM) in construction projects", *Production*, vol. 25, no. 2, pp. 289-297, Jun. 2015.