

REALIDADE VIRTUAL E PREVENÇÃO DE ACIDENTES - PESQUISA

LUÍS MIGUEL PINTO SILVA GOMES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Alfredo Augusto Vieira Soeiro

JUNHO DE 2020

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2019/2020

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2019/2020 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2020.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À Minha Família e Amigos

*É o tempo da travessia: e, se não ousarmos fazê-la, teremos ficado, para sempre, à
margem de nós mesmos.*

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta etapa académica contou com o apoio de várias pessoas, destacando-se as seguintes:

Ao Professor Doutor Alfredo Augusto Vieira Soeiro, pela orientação, exigência e disponibilidade, apesar das condicionantes a que a situação sanitária do país nos obrigou. Agradeço, de forma genuína, pelos conselhos, informações e confiança transmitida para a conclusão deste trabalho.

Aos meus colegas de curso e grandes amigos, David Marques, Manuel Aranha, Emanuel Nunes, Rafael Mendes, João Trocado e Artur Silva, pelas horas de estudo na biblioteca, o apoio prestado nas inúmeras unidades curriculares que frequentamos em conjunto, pelos almoços e, acima de tudo, pela amizade.

À minha namorada, Madalena Vale, por tudo o que ela representa para mim. Não acompanhou de início este trajeto, mas tornou-o estes últimos anos os melhores que podia ter tido. Agradeço por estar sempre ao meu lado e por me tornar cada vez melhor.

Por fim, um enorme agradecimento à minha família, em especial, aos meus pais. Este percurso não foi fácil, mas nunca deixaram de me apoiar e fizeram sempre de tudo para que me sentisse bem com as minhas escolhas. Sei que por vezes não foram as melhores, mas nunca me deixaram de aconselhar e muito do que sou o devo a eles. Levo-os comigo para sempre.

RESUMO

O setor da construção apresenta números preocupantes em termos de acidentes de trabalho e fatalidades dos seus executantes. Têm sido feitos esforços para reduzir esta tendência e tornar esta indústria mais segura para os seus trabalhadores. Nos últimos anos, a construção tem sofrido um grande aumento de automação, e tecnologias como a realidade virtual e realidade aumentada, sustentadas em ferramentas BIM, apresentam grandes benefícios inerentes à prevenção de acidentes e gestão de segurança.

Nesta dissertação, pretendeu-se selecionar experiências e casos de estudo fundamentados na utilização de sistemas que integrem as tecnologias anteriormente referidas. Os benefícios e limitações destes sistemas foram analisados no sentido de selecionar um sistema a aplicar posteriormente.

Desta forma, procurou-se simular o processo de aplicação do sistema em estudo, com o objetivo de aferir o seu potencial em termos de prevenção de acidentes. Uma melhor performance dos trabalhadores na execução de tarefas de construção com a utilização deste sistema pode tornar a área de atividades mais segura e provoca, também, uma diminuição de custos e de prazos de um projeto.

Os cenários virtuais utilizados na simulação da aplicação do sistema foram criados neste trabalho, de forma a demonstrar os conhecimentos adquiridos pela análise dos vários sistemas considerados como relevantes para a gestão de segurança na construção.

Pode-se, então, concluir que esta dissertação pretendeu demonstrar a aplicabilidade destas tecnologias em sistemas que podem ser integrados em empresas de construção. Finalizou-se este trabalho com uma proposta de recomendações para futuros estudos abordando esta temática.

PALAVRAS-CHAVE: realidade virtual, realidade aumentada, prevenção de acidentes, gestão de segurança, BIM.

ABSTRACT

The construction sector has a worrying number of work accidents and fatalities among its workers. There have been done the best efforts to reduce this propensity and make this industry safer.

During the last years, the construction sector has been experiencing a huge increase in automation, and the technology as a virtual and augmented reality, based in BIM tools, presents huge inherent benefits in accident prevention and safety management.

In this dissertation, it is pretended to select experiences and study cases distinguished by the utilization of systems that integrate the technologies already mentioned. The benefits and limitations of these systems will be analysed, to select a system to apply latter.

In this sense, we try to simulate the system application, with the aim of mesasure its potential in accident prevention. The best workers` performance in construction tasks execution using the system may turn the site safer and reduce the project cost and deadlines.

The virtual scenarios used in the application simulation has been created in this work, to demonstrate the knowledge acquired by the analysis of the several systems considered relevant for construction safety management.

Finally, this dissertation pretends to demonstrate these techonologies systems applicability in construction companies, finishing this work presenting a recommenddation for applying this kind of technologies in future studies.

KEYWORDS: virtual reality, augmented reality, accident prevention, safety management, BIM.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. ESTRATÉGIA E OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO	3
2.2. REALIDADE VIRTUAL	3
2.2.1. <i>VIRTUALITY CONTINUUM (VC)</i>	3
2.2.2. DEFINIÇÃO DE REALIDADE VIRTUAL	4
2.3. SISTEMA DE REALIDADE VIRTUAL (SRV)	5
2.3.1. IMERSÃO	6
2.3.2. INTERATIVIDADE	6
2.3.3. DISPOSITIVOS DE INPUT/OUTPUT	7
2.3.4. HARDWARE DE UM SRV	8
2.3.4.1. CAVE (<i>Cave Automatic Virtual Environment</i>)	9
2.3.4.2. HMD (<i>Head Mounted Display</i>)	10
2.3.5. SOFTWARE DE UM SRV	10
2.3.5.1. Motores Físicos de um SRV	11
2.3.5.2. Scripts	11
2.4. REALIDADE AUMENTADA	11
2.5. INTERAÇÃO ENTRE MODELOS BIM E AS TECNOLOGIAS DE VISUALIZAÇÃO	13
2.6. TECNOLOGIAS DE VISUALIZAÇÃO NA PREVENÇÃO DE ACIDENTES NA CONSTRUÇÃO	14
2.6.1. FORMAÇÃO DE SEGURANÇA	14
2.6.2. PLANEAMENTO DE SEGURANÇA	16
2.6.3. INSPEÇÃO DE SEGURANÇA	17
2.7. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	18

3. CASOS DE ESTUDO RELEVANTES	21
3.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO	21
3.2. SAFETY MANAGEMENT AND VISUALIZATION SYSTEM (SMVS)	21
3.2.1. ESTRUTURA DO SISTEMA	21
3.2.1.1. Módulo de Planeamento	21
3.2.1.2. Módulo de Formação	22
3.2.1.3. Módulo de Inspeção	23
3.2.1.4. Motor de Visualização	23
3.2.2. PROCESSO DE APLICAÇÃO DO SISTEMA.....	24
3.2.3. TESTE DE APLICABILIDADE DO SISTEMA	25
3.2.3.1. Configuração do Protótipo do Sistema	25
3.2.3.2. Introdução do Cenário.....	25
3.2.3.3. Implementação do Sistema.....	26
3.2.4. AVALIAÇÃO E RESULTADOS.....	28
3.3. VIRTUAL SAFETY ASSESSMENT SYSTEM (VSAS)	28
3.3.1. ESTRUTURA DO SISTEMA	28
3.3.2. PROCESSO DE APLICAÇÃO DO SISTEMA.....	30
3.3.3. CASO DE ESTUDO	31
3.3.3.1. Configuração do Protótipo do Sistema	31
3.3.3.2. Implementação do Sistema.....	33
3.3.4. AVALIAÇÃO E RESULTADOS.....	33
3.4. EXPERIMENTAL CONSTRUCTION SAFETY EDUCATION SYSTEM (ECSES)	34
3.4.1. ESTRUTURA DO SISTEMA	34
3.4.1.1. Módulo SKD	34
3.4.1.2. Módulo SKR	35
3.4.1.3. Módulo SKA	36
3.4.2. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO SISTEMA	36
3.4.2.1. Configuração do Protótipo do Sistema	36
3.4.2.2. Introdução dos Cenários em Estudo	36
3.4.2.3. Implementação do Sistema.....	37
3.4.3. AVALIAÇÃO E RESULTADOS.....	39
3.5. GAME TECHNOLOGY-BASED SAFETY TRAINING SYSTEM (GTSTS)	41
3.5.1. ESTRUTURA DO SISTEMA	41
3.5.2. CASO DE ESTUDO	43
3.5.2.1. Configuração do Protótipo do Sistema	43

3.5.2.2. Implementação do Sistema.....	43
3.5.2.3. Personalização dos Comandos de <i>Gaming</i>	44
3.5.2.4. Processo de Formação do Sistema	45
3.5.3. AVALIAÇÃO E RESULTADOS.....	47
3.6. SIMCRANE 3D⁺	48
3.6.1. ESTRUTURA DO SISTEMA	48
3.6.1.1. Módulo de Visão Cinestésica	49
3.6.1.2. Módulo de Visão Estereoscópica	50
3.6.2. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA	51
3.6.3. AVALIAÇÃO E RESULTADOS.....	51
3.7. CoVR: A CLOUD-BASED MULTIUSER VIRTUAL REALITY HEADSET SYSTEM	54
3.7.1. ESTRUTURA DO SISTEMA	54
3.7.1.1. <i>Layer</i> BIM	54
3.7.1.2. <i>Layer Middleware</i>	56
3.7.1.3. <i>Layer</i> do Motor de Jogo	57
3.7.1.4. <i>Layer</i> do Utilizador	57
3.7.1.5. <i>Layer Cloud Networking</i>	57
3.7.2. CASO DE ESTUDO	58
3.7.2.1. <i>Layer</i> BIM	58
3.7.2.2. <i>Layer Middleware</i>	58
3.7.2.3. <i>Layer</i> do Motor de Jogo	59
3.7.2.4. <i>Layer Cloud Networking</i>	60
3.7.3. DEMONSTRAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	60
3.7.3.1. Configuração do Protótipo do Sistema	60
3.7.3.2. Implementação do Sistema.....	60
3.7.3.3. Inspeção de Segurança	62
3.7.4. AVALIAÇÃO E RESULTADOS.....	62
3.8. IMAGE-BASED CONSTRUCTION HAZARD AVOIDANCE SYSTEM (ICHAS)	63
3.8.1. ESTRUTURA DO SISTEMA	63
3.8.1.1. Módulo de Monitorização	64
3.8.1.2. Módulo de Avaliação de Segurança	64
3.8.1.3. Módulo de Visualização de Informações de Perigo	65
3.8.2. CASO DE ESTUDO	65
3.8.2.1. Configuração do Protótipo do Sistema	65
3.8.2.2. Monitorização e Avaliação de Segurança.....	65

3.8.2.3. Visualização de Informações de Perigo.....	67
3.8.3. VALIDAÇÃO DO SISTEMA	69
3.8.4. RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS	72
3.9. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	75

4. CLASSIFICAÇÃO E SELEÇÃO DO SISTEMA DE IMPLEMENTAÇÃO..... 77

4.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO.....	77
4.2. CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS	77
4.3. CLASSIFICAÇÃO TÉCNICA DOS SISTEMAS EM ESTUDO.....	79
4.3.1. <i>SAFETY MANAGEMENT AND VISUALIZATION SYSTEM (SMVS)</i>	79
4.3.2. <i>VIRTUAL SAFETY ASSESSMENT SYSTEM (VSAS)</i>	80
4.3.3. <i>EXPERIMENTAL CONSTRUCTION SAFETY EDUCATION SYSTEM (ECSES)</i>	81
4.3.4. <i>GAME TECHNOLOGY-BASED SAFETY TRAINING SYSTEM (GTSTS)</i>	81
4.3.5. <i>SIMCRANE 3D+</i>	82
4.3.6. <i>COVR: A CLOUD-BASED MULTIUSER VIRTUAL REALITY HEADSET SYSTEM</i>	83
4.3.7. <i>IMAGE-BASED CONSTRUCTION HAZARD AVOIDANCE SYSTEM (ICHAS)</i>	84
4.4. SELEÇÃO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO	85
4.5. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	88

5. SIMULAÇÃO DA APLICAÇÃO DO SISTEMA..... 89

5.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO.....	89
5.2. SELEÇÃO DA TAREFA DE CONSTRUÇÃO ESPECÍFICA.....	89
5.3. RISCOS ASSOCIADOS À TAREFA SELECIONADA	90
5.4. PROCESSO DE SIMULAÇÃO DA APLICAÇÃO DO SISTEMA.....	94
5.4.1. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA	94
5.4.2. INTRODUÇÃO DO CENÁRIO VIRTUAL.....	94
5.4.3. INSPEÇÃO DE SEGURANÇA.....	95
5.5. PROPOSTA DE RECOMENDAÇÕES.....	99
5.5.1. MÓDULO SKD	100
5.5.2. MÓDULO SKR.....	102
5.5.3. MÓDULO SKA.....	103
5.5.4. PROCESSO DE APLICAÇÃO DO SISTEMA.....	104
5.6. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	107

6. CONCLUSÕES	109
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
6.2. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Espectro de Milgram	4
Fig. 2.2 – História da RV	5
Fig. 2.3 – Sistema de RV	5
Fig. 2.4 – Dispositivos de input em sistemas de RV/RA.....	7
Fig. 2.5 – Dispositivos de output em sistemas de RV/RA.....	8
Fig. 2.6 – Hardware de sistemas de RV/RA	8
Fig. 2.7 – <i>VisCube C4-T3™</i>	9
Fig. 2.8 – Exemplos de HMD's	10
Fig. 2.9 – História da RA	12
Fig. 2.10 – Utilização de RA na indústria da construção	13
Fig. 2.11 – Formação de segurança com a utilização de RV	15
Fig. 2.12 – Treino de equipamento com o emprego de RV	16
Fig. 2.13 – Gestão da informação na construção com a utilização de RA	17
Fig. 2.14 – Processo de inspeção de segurança na construção com o emprego de RA	18
Fig. 3.1 – Módulo de planeamento do SMVS	22
Fig. 3.2 – Módulo de formação do SMVS	22
Fig. 3.3 – Módulo de inspeção do SMVS.....	23
Fig. 3.4 – Motor de visualização do SMVS	24
Fig. 3.5 – Processo de aplicação do SMVS.....	25
Fig. 3.6 – Criação do modelo virtual.....	26
Fig. 3.7 – Tarefa de inspeção com a utilização de RA.....	27
Fig. 3.8 – Cenários virtuais do QAG.....	27
Fig. 3.9 – Resultados da avaliação do SMVS.....	28
Fig. 3.10 – Ambiente virtual do VSAS.....	29
Fig. 3.11 – Execução inadequada de uma soldadura.....	29
Fig. 3.12 – Elevação incorreta de um elemento de construção.....	30
Fig. 3.13 – Base de dados de uma atividade de construção do VSAS	30
Fig. 3.14 – Questão do teste do VSAS	31
Fig. 3.15 – Relatório do VSAS	32
Fig. 3.16 – Hardware do VSAS	32
Fig. 3.17 – Visualização de causas de acidente no VSAS	33
Fig. 3.18 – Resultados do teste do VSAS.....	33

Fig. 3.19 – Resultados da avaliação de eficiência do VSAS	34
Fig. 3.20 – Estrutura do ECSES.....	35
Fig. 3.21 – Cenários virtuais do ECSES	37
Fig. 3.22 – Demonstração dos EPI’s com a utilização de RA	38
Fig. 3.23 – Representação de um acidente em obra envolvendo uma queda	38
Fig. 3.24 – Representação de uma questão teórica do teste do ECSES	39
Fig. 3.25 – Esquema de avaliação do ECSES.....	40
Fig. 3.26 – Resultados da avaliação de eficiência do ECSES.....	40
Fig. 3.27 – Resultados do questionário do ECSES	41
Fig. 3.28 – Estrutura do GTSTS.....	42
Fig. 3.29 – Capacidade interativa do GTSTS	42
Fig. 3.30 – Simultaneidade na execução de tarefas no GTSTS.....	43
Fig. 3.31 – Instruções do comando para o Op1.....	44
Fig. 3.32 – Instruções do comando para o Op2.....	44
Fig. 3.33 – Instruções do comando para o Op3.....	45
Fig. 3.34 – Destacamento virtual do elemento da grua T1 para conexão dos cabos da grua T2	45
Fig. 3.35 – Processo de conexão do cabo da grua T2 ao elemento da grua T1	46
Fig. 3.36 – Desaparafusamento do elemento da grua T1	46
Fig. 3.37 – Elevação e colocação do elemento na localização desejada.....	47
Fig. 3.38 – Resultados da avaliação do GTSTS	48
Fig. 3.39 – Estrutura do <i>SimCrane 3D+</i>	48
Fig. 3.40 – Cenário experimental para a visão cinestésica: a) figura real; b) figura virtual	49
Fig. 3.41 – Resultados da experiência para a visão cinestésica	49
Fig. 3.42 – Hardware do <i>SimCrane 3D+</i>	50
Fig. 3.43 – Utilização da visão cinestésica e da visão estereoscópica.....	50
Fig. 3.44 – Cenários experimentais do <i>SimCrane 3D+</i>	52
Fig. 3.45 – Resultados da experiência em termos de tempo consumido	52
Fig. 3.46 – Resultados da experiência em termos de erros de julgamento.....	53
Fig. 3.47 – Resultados do questionário do <i>SimCrane 3D+</i>	53
Fig. 3.48 – Estrutura do sistema <i>CoVR</i>	55
Fig. 3.49 – Fluxo de trabalho do sistema <i>CoVR</i>	56
Fig. 3.50 – Modelo BIM para o caso de estudo	58
Fig. 3.51 – Otimização do modelo BIM	59
Fig. 3.52 – Modelo BIM representado no motor de jogo.....	59

Fig. 3.53 – Modos de representação do modelo: a) representação 3D; b) representação imersiva	60
Fig. 3.54 – Auditório Bob Segner de Francis Hall	61
Fig. 3.55 – Modelo BIM do auditório Bob Segner	61
Fig. 3.56 – Cenário virtual do <i>CoVR</i>	62
Fig. 3.57 – Resultados da experiência de inspeção do sistema	63
Fig. 3.58 – Fluxo de informação do ICHAS.....	64
Fig. 3.59 – Identificação de trabalhadores e equipamentos através de níveis de segurança	66
Fig. 3.60 – Processo de identificação de trabalhadores	67
Fig. 3.61 – Identificação de informações de perigo	67
Fig. 3.62 – Identificação de perigos através de um código de cores.....	68
Fig. 3.63 – Utilização de um GDK neste sistema.....	69
Fig. 3.64 – Perspetiva do utilizador com o emprego dos <i>Google Glass</i>	69
Fig. 3.65 – Performance do sistema para o cenário 1	70
Fig. 3.66 – Performance do sistema para o cenário 2	70
Fig. 3.67 – Performance do sistema para o cenário 3	71
Fig. 3.68 – Experiência 1.....	71
Fig. 3.69 – Experiência 2.....	72
Fig. 3.70 – Resultados da experiência 1	73
Fig. 3.71 – Resultados da experiência 1, de acordo com a orientação	73
Fig. 3.72 – Resultados da experiência 2.....	73
Fig. 3.73 – Resultados da experiência 2, de acordo com a orientação.....	74
Fig. 3.74 – Resultados do teste para o erro angular.....	74
Fig. 4.1 – Processo de identificação de perigos no SMVS	79
Fig. 4.2 – Cenário virtual do VSAS.....	80
Fig. 4.3 – Processo de inspeção no ECSES.....	81
Fig. 4.4 – Cenário virtual do GTSTS	82
Fig. 4.5 – Grua virtual do <i>SimCrane 3D+</i>	83
Fig. 4.6 – Perspetiva do utilizador no <i>CoVR</i>	84
Fig. 4.7 – Perspetiva do utilizador no ICHAS	85
Fig. 5.1 – Betonagem de uma laje	90
Fig. 5.2 – Guarda corpos utilizado na representação virtual	91
Fig. 5.3 – Escoramento de uma laje	91

Fig. 5.4 – Escada utilizada na representação virtual	92
Fig. 5.5 – Autobomba com lança.....	92
Fig. 5.6 – Presença de vários trabalhadores no manuseamento da mangueira de betão	93
Fig. 5.7 – Correta utilização dos EPI´s na execução de uma betonagem	93
Fig. 5.8 – Cenário virtual existente no <i>3D Warehouse</i>	94
Fig. 5.9 – Cenário virtual criado no <i>SketchUp Pro 20</i>	95
Fig. 5.10 – Inexistência de guarda corpos num dos lados da cofragem.....	96
Fig. 5.11 – Incorreta fixação das escoras ao solo.....	97
Fig. 5.12 – Incorreta instalação da escada	97
Fig. 5.13 – Presença indevida de trabalhadores nas proximidades da autobomba de betão	98
Fig. 5.14 – Incorreto manuseamento da mangueira de betão	98
Fig. 5.15 – Ausência de óculos de proteção durante a tarefa de betonagem	99
Fig. 5.16 – Sala de aula virtual.....	101
Fig. 5.17 – <i>Fatal Four</i>	102
Fig. 5.18 – Existência de múltiplos trabalhadores na mesma área de atividades	103
Fig. 5.19 – Representação detalhada de um caso de acidente.....	105
Fig. 5.20 – Discussão, entre grupos, na sala virtual	106
Fig. 5.21 – Processo de inspeção virtual do sistema ECSES	106
Fig. 5.22 – Questão teórica do teste do ECSES.....	107

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 1 – Correspondência dos equipamentos de tecnologias de visualização utilizados com os sistemas em estudo.....	76
Quadro 2 – Custo dos equipamentos de RV/RA utilizados nos casos de estudo	85

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AEC – *Architecture, Engineering and Construction*
API – *Application Program Interface*
BIM – *Building Information Modeling*
CAVE – *Cave Automatic Virtual Environment*
CCTV – *Closed Circuit Television*
ECSES – *Experimental Construction Safety Education System*
EPC – *Equipamento de Proteção Coletiva*
EPI – *Equipamento de Proteção Individual*
EUA – *Estados Unidos da América*
FPS – *Frames Per Second*
FXB – *Filmbox*
GDK – *Glass Development Kit*
GL – *Graphic Library*
GTSTS – *Game Technology-based Safety Training System*
HMD – *Head Mounted Display*
HTML – *HiperText Markup Language*
ICHAS – *Image based Construction Hazard Avoidance System*
ID – *Instruction Database*
IDE – *Integrated Development Environment*
KOSHA – *Korean Occupational Safety Health Administration*
KVM – *Kinesthetic Vision Method*
LD – *Location Database*
LTS – *Location Tracking System*
OSHA – *Occupational Safety and Health Administration*
PUN – *Photon Unity Networking*
QAG – *Question and Answer Game*
RA – *Realidade Aumentada*
RII – *Risk Information Interface*
RM – *Realidade Mista*
RPC – *Remote Procedure Call*
RUI – *Risk Update Interface*
RV – *Realidade Virtual*
SDK – *Software Development Kit*
SID – *Safety Information Database*

SKA – *Safety Knowledge Assessement*
SKD – *Safety Knowledge Dissemination*
SKR – *Safety Knowledge Refletion*
SMVS – *Safety Management and Visualization System*
SRV – *Sistema de Realidade Virtual*
SVM – *Stereoscopic Vision Method*
TCP – *Transmission Control Protocol*
TCS – *Terminal de Contentores Sul*
TEU – *Twenty-Foot Equivalent Unity*
TOI – *Task Operation Interface*
UII – *User Identification Interface*
UMC – *Universal Material Converter*
VEB – *Visualization Engine Browser*
VOIP – *Voice Over Internet Protocol*
VSAS – *Virtual Safety Assessment System*

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O mundo tem sofrido enormes alterações numa grande extensão e variedade de aspetos no último século. A construção, por seu lado, apresenta avanços e modificações significativas, sendo que esta indústria revolucionou abordagens, técnicas e métodos, e foi considerada como um setor amplo, complexo e dinâmico que oferece um grande número de oportunidades de emprego por todo o mundo.

No entanto, esta indústria tende a ter um maior número de acidentes fatais de trabalho que noutros setores, sendo que este fenómeno tem levado a uma grande consternação e discussão [1]. Estudos anteriores provam que a maioria destes acidentes é provocada pela falta de medidas preventivas como a formação da mão-de-obra, identificação de riscos e perigos, e por planeamento e supervisão inadequados e insuficiente comunicação entre os membros de equipa [2]. Por outro lado, estas medidas podem ser subjetivas e é necessário averiguar a eficiência da forma como este conhecimento está a ser adquirido.

Desta forma, técnicas de visualização de informação tais como *Building Information Modeling* (BIM), Realidade Virtual (RV), Realidade Aumentada (RA), e outras ferramentas de Realidade Mista (RM) estão a ser testadas na gestão e planeamento de segurança. Estas tecnologias estão a ser implementadas em várias áreas como formação e educação, engenharia, arquitetura e design urbano, arqueologia, ciências médicas, entretenimento, entre outros [3,4].

Em termos da indústria de construção, tecnologias de visualização apresentam múltiplas aplicações de onde um projeto pode beneficiar de forma a diminuir prazos e custos de projeto [5]. Realidade virtual e realidade aumentada estão a ser usadas para colocar um ambiente digital 3D nas mãos de um engenheiro, arquiteto ou cliente, gerando uma experiência virtual de aprendizagem. Esta interação com o projeto vai levar a que o utilizador possa lidar com anomalias, riscos ou acidentes ainda antes destes acontecerem [2].

Realidade virtual e realidade aumentada são o futuro da construção sendo usadas em várias fases do processo, interagindo num modelo do projeto antes da sua execução, num ambiente seguro e livre de perigos em tempo real.

1.2. ESTRATÉGIA E OBJETIVOS

Os objetivos principais deste trabalho focam a pesquisa e seleção de experiências e casos de estudo relacionados com a prevenção de acidentes e gestão de segurança na construção com a utilização de realidade virtual.

Pretende-se a seleção dos casos de estudo mais relevantes neste âmbito, para análise da sua aplicabilidade e apresentação dos resultados da avaliação dos seus sistemas.

Após esta descrição, é requerida a comparação técnica e económica de cada sistema, visando os seus benefícios e limitações de aplicação. Esta abordagem tem como objetivo uma seleção, ponderada e bem justificada, do sistema a simular para análise deste trabalho.

Como parte final deste trabalho, realiza-se uma simulação da aplicação do sistema selecionado e pretende-se a apresentação de uma proposta de recomendações para o mesmo, de forma a suprimir as limitações identificadas e tornar o sistema mais eficiente em termos de prevenção de acidentes e gestão de segurança.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, onde cada abordagem foi desenvolvida de forma simples e concisa.

O primeiro capítulo refere-se à introdução do trabalho, onde se descreve o enquadramento e objetivos propostos, assim como a estruturação do mesmo.

No segundo capítulo está presente o estado da arte, onde se faz referência às principais características da realidade virtual e dos seus sistemas. Refere-se, também, as fases mais importantes na prevenção de acidentes na construção e gestão de segurança.

No terceiro capítulo ocorre a descrição dos casos de estudo mais relevantes em termos de prevenção de acidentes com a utilização de tecnologias de visualização. São apresentados os sistemas, a sua estrutura e uma avaliação experimental dos mesmos.

No quarto capítulo procede-se à classificação dos casos de estudo abordados no capítulo anterior, sendo verificados os seus benefícios e as suas limitações. Posteriormente, efetua-se a seleção do sistema que será simulado no capítulo seguinte.

No quinto capítulo seleciona-se uma tarefa de construção específica, de forma a simplificar a aplicação do sistema. Posteriormente, realiza-se uma simulação da aplicação do mesmo e sugere-se uma proposta de recomendações para reduzir as limitações apresentadas.

No sexto capítulo, finaliza-se o trabalho com as conclusões e considerações finais, assim como se procede a análise de recomendações para futuros estudos.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo procede-se à descrição do estado da arte deste trabalho, no qual se foca a definição e principais progressos da história da realidade virtual. Posteriormente, descreve-se um sistema de realidade virtual, caracterizando cada uma das suas componentes.

Após isto, apresenta-se o conceito de realidade aumentada e compara-se as suas características com a realidade virtual. De seguida, refere-se as vantagens da interação das tecnologias de visualização com as ferramentas BIM e introduz-se as principais fases dos sistemas de RV/RA em termos de prevenção de acidentes e gestão de segurança na construção.

2.2. REALIDADE VIRTUAL

2.2.1. VIRTUALITY CONTINUUM (VC)

Em 1994, Paul Milgram definiu o conceito de *virtuality continuum*, que se descreve como uma mistura de classes de objetos presente numa qualquer situação de visualização, onde o ambiente real e o ambiente virtual se apresentam como os extremos deste espectro [6].

O ambiente real define-se como o ambiente no qual apenas existem objetos reais e no qual a sua visualização direta não necessita do suporte de um sistema eletrónico.

Por outro lado, um ambiente virtual consiste em objetos ou entidades aparentemente reais, que partilham um atributo da realidade (aparência), mas que não partilham as suas características físicas. Um ambiente virtual pode ser descrito como um espaço digital 3D gerado por tecnologia computacional, sendo este composto por estímulos visuais projetados numa superfície e, também, por estímulos auditivos produzidos num dispositivo eletrónico [7].

A estes, pode-se acrescentar a integração de mais estímulos sensitivos como o olfato ou o tato. Um ambiente virtual tem como objetivo extrair um utilizador do mundo real e inseri-lo num mundo sintético, para depois este ser exposto a sensações que o emulam a estímulos reais [7].

Desta forma, o processo mais fácil de visualizar um ambiente de realidade mista foca aquele que apresenta objetos do ambiente real e ambiente virtual, ou seja, em qualquer lugar integrante do espectro VC, como demonstra a figura 2.1.

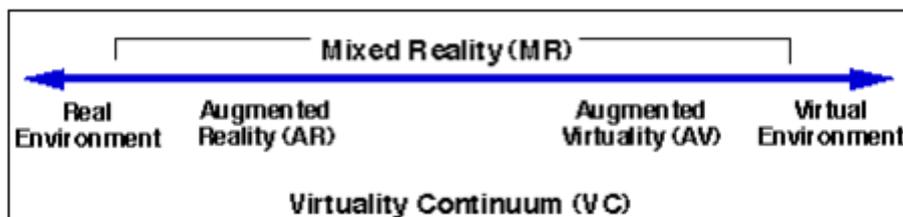


Fig. 2.1 – Espectro de Milgram [6]

2.2.2. DEFINIÇÃO DE REALIDADE VIRTUAL

O conceito de RV foi-se tornando difícil de ser clarificado, pela constante alteração das suas aplicabilidades ao longo dos anos. Com o auxílio de um dicionário, é possível constatar a seguinte definição: *“a set of images and sounds, produced by a computer, that seem to represent a place or a situation that a person can take part in”* [9].

Desta forma, podemos concluir que o termo de RV é utilizado para caracterizar um ambiente 3D gerado por um computador, onde pode existir interação do seu utilizador com outros ou com o próprio ambiente virtual. De seguida, são apresentadas três definições descritas por Coates, Greenbaum e Krueger, respetivamente: [7]

“Virtual Reality is electronic simulations of environments experienced head-mounted eye goggles and wired clouthng enabling the end user to interact with realistic three-dimensional situations”.

“Virtual reality is an alternative world filled with computer-generated images that respond to human movements. These simulated environmnents are usually visited with the aid of an expensive data suit whitch features stereophonic vídeo goggles and fiber-optic data gloves”.

“The terms virtual worlds, virtual cockpits, and virtual workstations were used to describe specific projects... In 1989, Jaron Lanier, CEO of VPL, coined the term virtual reality to bring all of the virtual projects under a single rubric. The term therefore refers to three-dimensional realities implemented stereo viewing goggles and reality gloves”.

Dadas as suas enormes potencialidades, o conceito de RV foi-se moldando pelos avanços tecnológicos e desenvolvimento de novos equipamentos, apesar de não ser propriamente fácil situar a RV numa escala temporal. De seguida, são apresentados os mais relevantes progressos desta tecnologia.

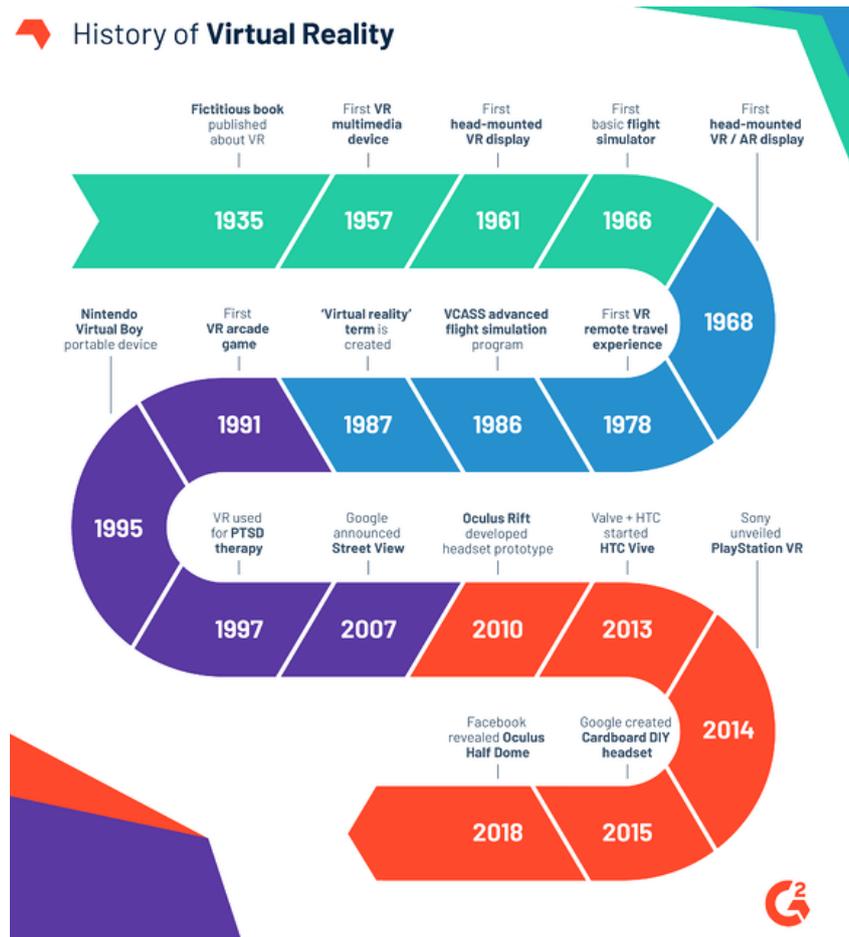


Fig. 2.2 – História da RV [10]

2.3. SISTEMA DE REALIDADE VIRTUAL (SRV)

Um SRV é composto por software, hardware e algoritmos. O hardware incorpora um processador, um visor, sensores e dispositivos de input/output, enquanto que o software e os algoritmos fornecem informações relacionadas com procedimentos relativos ao nível de realismo que um ambiente virtual pode atingir. As aplicações destes sistemas podem ser configuradas de acordo com os requerimentos a que sejam sujeitos, de forma a alcançar o nível de imersão e interação desejados [11].

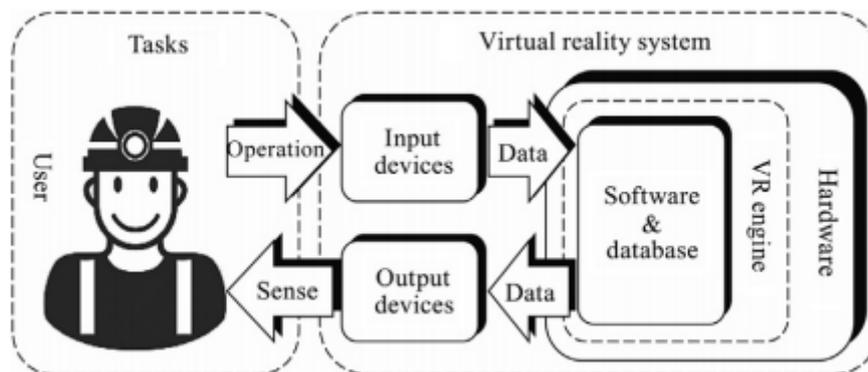


Fig. 2.3 – Sistema de RV [12]

2.3.1. IMERSÃO

A imersão é referida pela relação com o estado emocional dos utilizadores enquanto estão envolvidos na experiência de RV e também com a capacidade de estimulação a que o utilizador é sujeito. Esta pode ser relacionada, também, com a sensação de estar “presente” e de ser “extraído” do mundo real, sendo que a RV é a tecnologia em que as suas representações se encontram mais perto de o alcançar [13].

Pelo nível de imersão, estes sistemas podem ser divididos em diferentes categorias: sistemas não imersivos (*desktop VR systems*) e sistemas imersivos (*immersive VR systems*).

Os sistemas não imersivos utilizam apenas um monitor de um computador como plataforma para as atividades em realidade virtual. Esta tecnologia permite a criação de representações 3D sem o uso de equipamento de suporte para monitorização, apelando apenas à capacidade de percepção espacial do utilizador para se contextualizar do que se passa no ambiente ao seu redor. A maior parte das tarefas pode ser realizada com a utilização do rato e do teclado, sendo esta considerada barata em relação a outras tecnologias [14].

Os sistemas imersivos caracterizam-se pelo uso de hardware específico como os HMD`s (*head-mounted display*) para extrair o utilizador do mundo real e fazer a interação com o ambiente virtual. Esta imersão é gerada por cenários virtuais, imagens e efeitos sonoros que provocam a sensação de realidade nos participantes. Um ambiente virtual imersivo é criado pela posição espacial do utilizador que, à medida que o utilizador altera a sua posição, esta também será alterada na representação virtual [15].

Além disso, vários sensores e outros dispositivos podem ser adicionados à interação, de forma a se obter feedback em tempo real. Para melhorar a estimulação do utilizador, podem ser empregues comandos de *gaming* e dispositivos de controlo de movimento, que podem fornecer informações para deteção e demonstração dos movimentos e ações da experiência [15].

2.3.2. INTERATIVIDADE

Sendo a imersão a resposta para uma representação estática, a interatividade requer um ambiente dinâmico. Não se refere somente à capacidade de navegação em ambiente virtual por parte dos participantes da experiência, mas, também, às reações do ambiente virtual em relação às ações do utilizador.

Num SRV, os sensores captam a posição espacial dos utilizadores e permitem uma certa liberdade de movimentos, mas se não ocorrer reação do ambiente virtual em função das ações realizadas, a imersão da experiência pode ser limitada.

Jonathan Steuer abordou esta temática, e em 1992 definiu que a o nível de interatividade depende, maioritariamente, dos seguintes fatores: velocidade, alcance e mapeamento [7]. A velocidade é definida como a taxa das ações do utilizador incorporadas no mundo virtual e depende diretamente da capacidade do SRV.

O alcance é referido como o número de possíveis resultados que cada ação do utilizador pode obter. Esta característica pode ser comparada com um conjunto de ferramentas, sendo que os sistemas que têm um maior número de ferramentas apresentam ambiente virtuais mais viáveis.

Por fim, o mapeamento é a capacidade do sistema em produzir resultados a partir das ações dos participantes na experiência de forma previsível. A interatividade é desejável em grande parte das

aplicações de RV, de forma a que estes sejam mais intuitivos e práticos, adaptando as suas características às necessidades de cada aplicação.

2.3.3. DISPOSITIVOS DE INPUT/OUTPUT

Os dispositivos de entrada (*input devices*) permitem a interação com o mundo digital, pela transmissão de sinais para o sistema acerca dos movimentos do utilizador. Estes sinais fornecem informações de volta para o utilizador através dos dispositivos de saída (*output devices*) em tempo real. Um computador com mecanismos de RV lida com a interação com os utilizadores e serve como interface para os dispositivos de input/output [16].

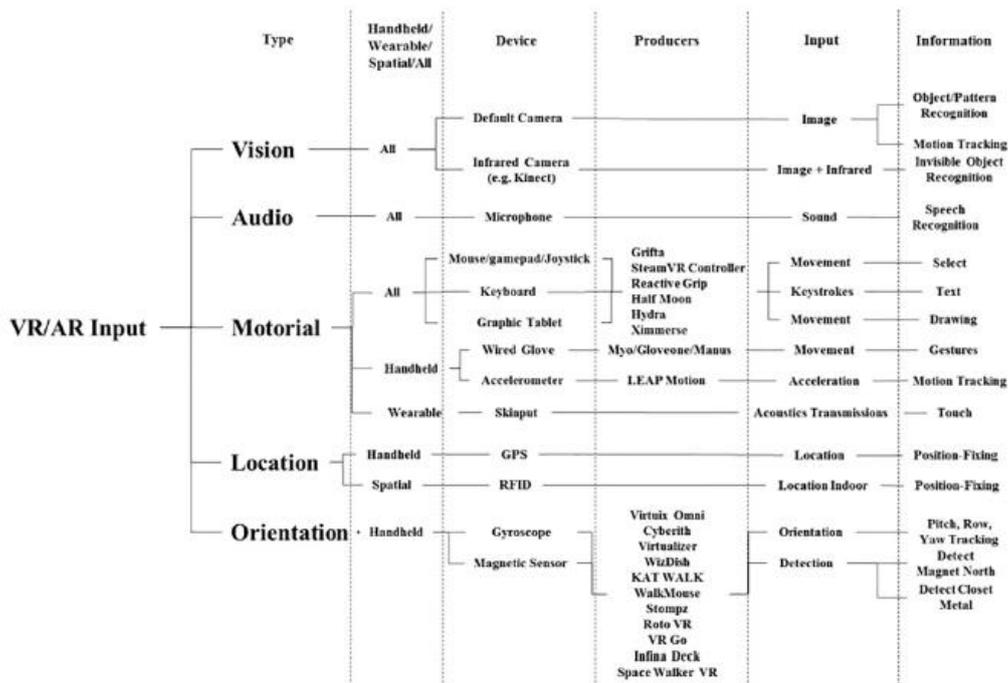


Fig. 2.4 – Dispositivos de input em sistemas de RV/RA [17]

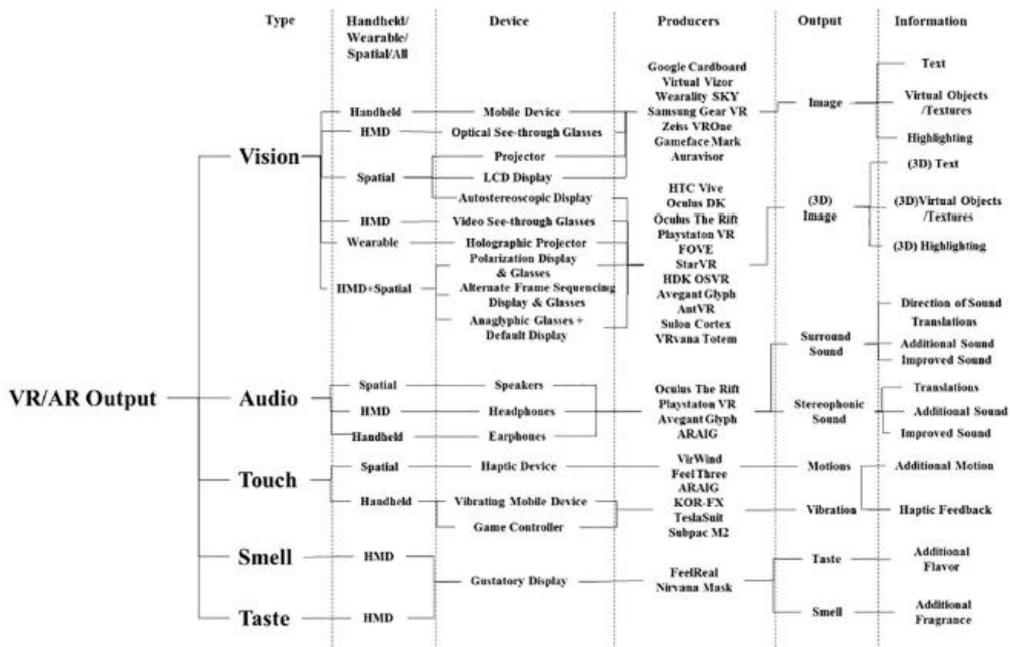


Fig. 2.5 – Dispositivos de output em sistemas de RV/RA [17]

2.3.4. HARDWARE DE UM SRV

A componente eletrónica do hardware dos SRV's é responsável por aferir todos os comportamentos do mundo virtual e pelas representações a que o utilizador pode usufruir. O display visual do hardware apresenta a maior influência de design no sistema, sendo esta a sua sensação predominante. Existem dois grandes tipos de displays visuais: os estacionários (sistemas como CAVE) e os HMD's.

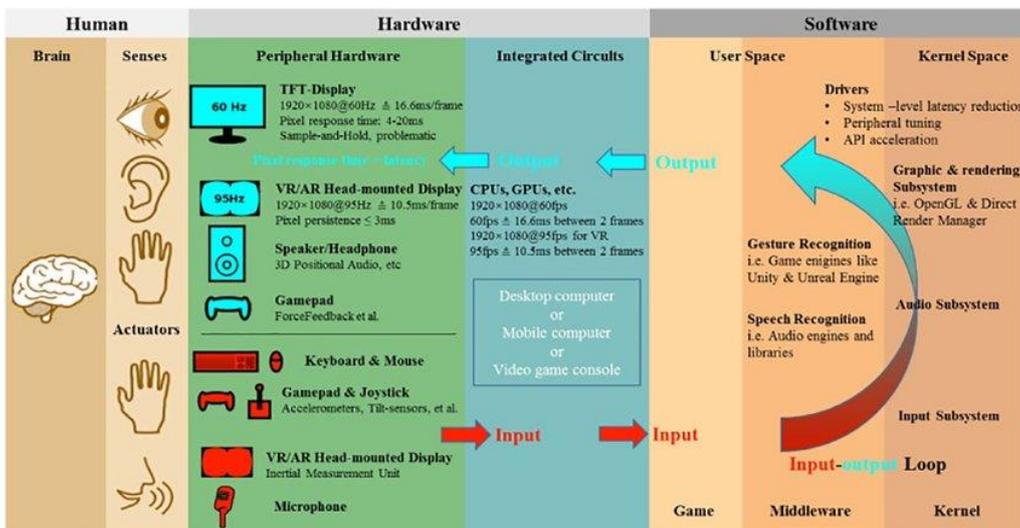


Fig. 2.6 – Hardware de sistemas de RV/RA [17]

2.3.4.1. CAVE (Cave Automatic Virtual Environment)

Esta tecnologia foi desenvolvida pela Universidade de Illinois em 1992 e caracteriza-se pela existência de uma sala cúbica, na qual as paredes, pavimentos e tetos apresentam representações virtuais exibidas por projetores. É uma sala de vídeo que integra os utilizadores a um espaço que interage com o mundo virtual através de sensores de movimento. Estes sensores estão anexados aos dispositivos oculares tipicamente usados, óculos estereoscópicos que permitam a visualização 3D, e o vídeo ajusta continuamente a perspetiva dos participantes da experiência.

Esta experiência pode ser executada na presença de vários utilizadores, sendo que este tipo de utilização da CAVE fomenta o debate e a discussão de ideias num ambiente imersivo. Outra vantagem destes sistemas é o facto da imersão não ser total, isto é, o utilizador ainda está consciente do mundo real durante a interação no ambiente virtual [18].

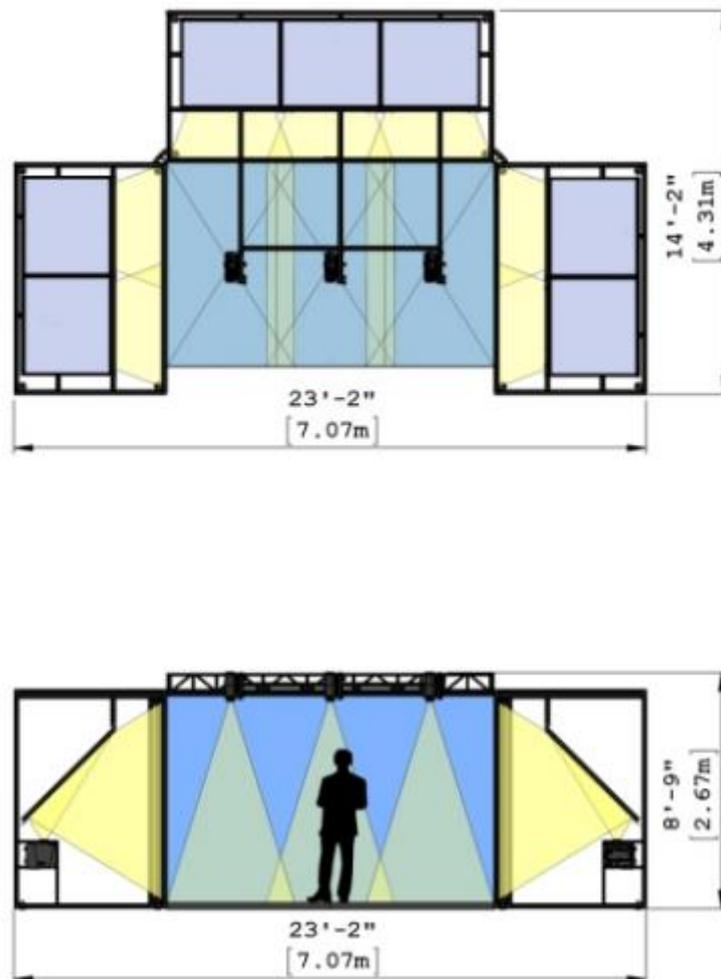


Fig. 2.7 - VisCube C4-T3™ [19]

2.3.4.2. HMD (Head Mounted Display)

O conceito de HMD está presente há muitas décadas, mas apenas após os recentes avanços tecnológicos, estes dispositivos voltaram a ser alvo de interesse e investimento. Desenvolvimentos em elementos de suporte de SRV's e a acessibilidade dos *smartphones* provocaram o ressurgimento dos HMD's, permitindo a sua aquisição a preços relativamente baixos e a oportunidade de se obter melhores interações durante as experiências [20].

Para esta obtenção, é necessário que se cumpram alguns requisitos. Os utilizadores têm os visores muito perto dos olhos e é importante que estes apresentem uma boa capacidade de atualização para que não seja visualmente incómodo. Depois, é necessário que os dispositivos de hardware captem de forma correta a posição dos utilizadores para que o conceito de imersão seja respeitado [20].

Por outro lado, os dois visores do HMD (um para cada olho) encontram-se numa posição ligeiramente distinta um do outro, e é necessário que o hardware execute o dobro de renderização do que num visor normal. Este facto leva a que a experiência tenha de ser otimizada para que a interação não seja comprometida [21].

Os HMD's podem ser móveis, isto é, não necessitam de estar ligados a um computador, podendo estar conectados a um *smartphone*, tornando-o num dispositivo de RV. Este facto promove maior liberdade ao utilizador e podem apresentar preços bastante acessíveis, apesar disto, muitos *smartphones* não estão projetados para um sistema de RV e podem existir incompatibilidades.

Em contraste, existem os *tethered VR headsets*, que se encontram fisicamente ligados a um computador. Estes dispositivos oferecem uma maior qualidade de imagem e controlo de movimento, mas a sua ligação por cabos pode trazer inconvenientes para a interação [22].

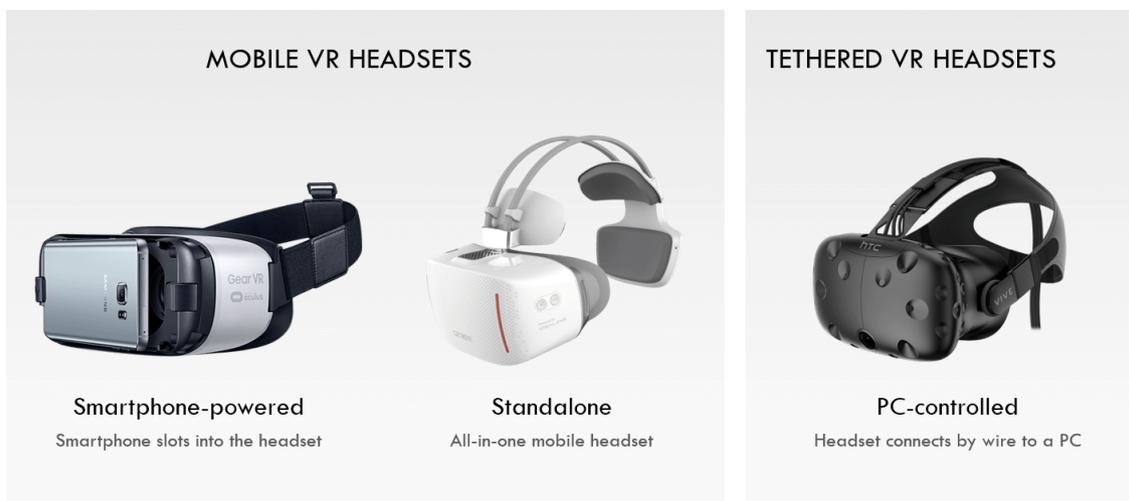


Fig. 2.8 – Exemplos de HMD's [23]

2.3.5. SOFTWARE DE UM SRV

O software de um sistema com esta tecnologia é uma coleção de ferramentas para design, desenvolvimento e manutenção de ambientes virtuais e apresenta uma base de dados onde a informação é armazenada. Este tipo de sistemas pode ser configurado de acordo com os requisitos a que seja sujeita a sua aplicação na construção, podendo-se obter diferentes níveis de imersão.

Uma grande variedade de componentes de software é necessária para permitir uma experiência virtual eficaz, sendo que esta deve conter elementos que possibilitam simulações, capacidade de display visual e interface com os dispositivos de input e output.

O software usado pela indústria de construção sofreu uma grande evolução nos últimos anos, passando pela criação de plantas e desenhos a 2D para a integração de modelos BIM complexos. Apesar dos modelos BIM serem muito utilizados para suprimir as necessidades da construção, estes não apresentam capacidade de manipulação em tempo real para as tecnologias de visualização [24].

Por outro lado, os motores de jogo utilizados na indústria do entretenimento e de *gaming* têm a preocupação de garantir os frames por segundo (FPS) necessários para uma melhor representação visual. Os motores do jogo são softwares que contêm componentes usados para o processo de desenvolvimento do jogo. Visto que os videojogos apresentam muitas funcionalidades em comum entre eles, o processo de desenvolvimento é reduzido por não existir a necessidade de se programar todos os componentes a partir do zero [25].

É possível importar para o motor de jogo, objetos de outros programas, podendo-se, também, acrescentar características como sombras ou iluminação para aumentar o realce gráfico. Considerando a capacidade dos videojogos em gerar representações em tempo real, componentes como os motores físicos e os *scripts* estão preparados para a criação de conteúdo. Desta forma, estes softwares oferecem inúmeras vantagens na criação de aplicações de RV.

2.3.5.1. Motores Físicos de um SRV

Os motores físicos integram-se no próprio motor jogo e são capazes de simular as leis físicas do mundo real. Estes motores são essenciais para as experiências de RV pois são a ferramenta utilizada para calcular a interação física entre os elementos, pois a física não é parte integral da modelação visual. Por exemplo, são os motores físicos que permitem ao utilizador a capacidade de *walkthrough*, isto é, caminhar sobre um objeto a que lhe é fornecido as suas capacidades físicas.

2.3.5.2. Scripts

Os scripts são um conjunto de instruções em código destinados a interagir com outros tipos de linguagem de programação. Os scripts não precisam de ser compilados para serem interpretados, são de implementação imediata, mas apresentam uma leitura mais lenta. Aos objetos dos motores de jogo podem ser atribuídos scripts, e estes podem ser controlar os comportamentos do ambiente virtual. Desta forma, estas instruções podem potenciar a utilização do motor de jogo simplificando as ações a desenvolver.

2.4. REALIDADE AUMENTADA

A RA é considerada por Ronald Azuma como uma variação do ambiente virtual [8]. A RV caracteriza-se pela imersão total dos seus utilizadores, o que provoca que estes não consigam observar o mundo real. Por outro lado, a RA permite a visualização da realidade, com a sobreposição de objetos ou entidades virtuais.

A RA suplementa a realidade em vez de a substituir e, desta forma, existe uma coexistência de objetos reais e virtuais. Os sistemas desta tecnologia apresentam também interatividade em tempo

real e representações e registos em 3D, o que permite a utilização de vários equipamentos e retira exclusividade aos HMD's.

A realidade aumentada fornece uma visão do mundo real, na qual os elementos são sobrepostos por ficheiros gerados por um computador como gráficos, efeitos sonoros, vídeos e outros tipos de informação digital. Esta tecnologia pode ser usada em diferentes áreas como a engenharia, o entretenimento, medicina, aplicações militares, indústria automóvel, entre outros [3]. De seguida, apresentam-se os acontecimentos mais importantes na história desta tecnologia.

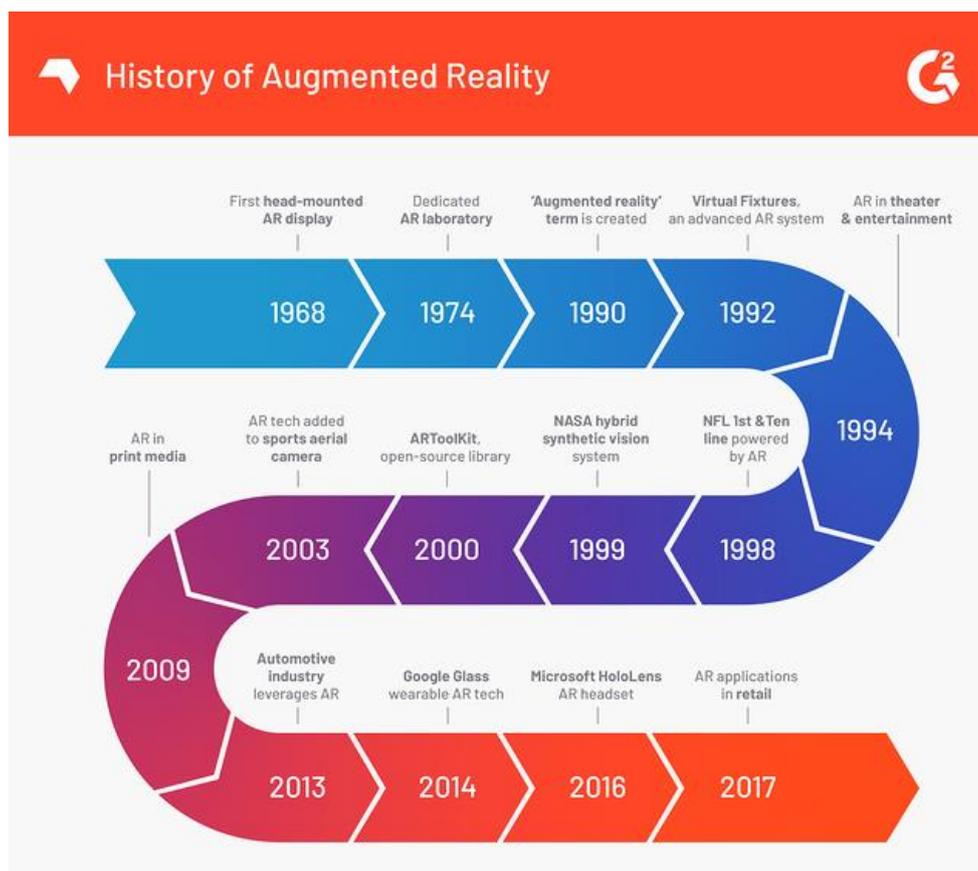


Fig. 2.9 – História da RA [26]

Na indústria AEC, a inclusão da RA tem sido alvo de significativos avanços, de forma a melhorar os processos construtivos dos projetos. Esta tecnologia fornece aos utilizadores a capacidade de simulação e visualização, permitindo a interação de ambientes reais com ambientes virtuais.

Possibilita, também, a monitorização do progresso construtivo por comparação dos trabalhos projetados com os trabalhos já executados em obra. O desenvolvimento de equipamentos cada vez mais sofisticados, de menos tamanho e com maior portabilidade vai facilitar a sua utilização em obra, diminuindo a interferência que estes poderiam ter nos trabalhadores aquando da execução dos trabalhos [3].

O suporte tecnológico levanta algumas limitações para as tecnologias de RA, pois a grande quantidade de dados necessária pode condicionar a sua aplicação. A interação dos equipamentos com os utilizadores deve ser a mais natural possível, de forma a não comprometer a experiência.

A forma de interação com os equipamentos não deve consumir mais atenção aos trabalhadores, que as próprias tarefas programadas [3]. Apesar destes avanços, as aplicações de RA estão ainda em fase de pesquisa e o seu verdadeiro potencial ainda não foi totalmente alcançado.



Fig. 2.10 – Utilização de RA na indústria da construção [27]

2.5. INTERAÇÃO ENTRE OS MODELOS BIM E AS TECNOLOGIAS DE VISUALIZAÇÃO

Os projetos de construção têm vindo aumentar a sua complexidade e o seu controlo é mais desafiante, sendo que as suas soluções têm sido desenvolvidas com base no uso das tecnologias de comunicação e de informação. Um modelo BIM permite a avaliação visual das condições de trabalho e identificação de perigos [24].

Em qualquer fase do projeto, BIM permite inserir, extrair, modificar ou atualizar a informação contida nos modelos e, desta forma, pode-se minimizar o risco de incompatibilidades. Apesar do aumento da incorporação de BIM nos últimos anos, a maior parte dos edifícios já construídos não apresenta o nível de informação necessário para o modelo. Informações incompletas e incorretas dos projetos são as razões principais para o nível baixo na gestão da construção, sendo necessária a criação de modelos, nos quais se armazene toda a informação existente no processo de construção [24].

BIM é definido como o processo de criação de representações digitais de uma construção ou um edifício e as suas respetivas características. BIM não se limita a produzir modelos 3D, como pode ser utilizado para melhorar a comunicação, permitir visualizações mais precisas e aumentar a qualidade de tomada de decisão dos trabalhadores [28].

Além disto, BIM pode acelerar o processo de integração de informação, do design até à execução. Esta tecnologia revolucionou a metodologia da construção e permitiu aos engenheiros e arquitetos prever e resolver problemas que possam ocorrer no ciclo de vida de uma obra. Fornece, também, ferramentas para deteção de falhas e simulação de diferentes cenários de construção que possam permitir melhores decisões [29].

A interação de BIM com vários dispositivos móveis pode trazer inúmeras vantagens para os seus modelos. Sistemas de controlo de localização integrados num modelo BIM promovem a

segurança e a produtividade dos trabalhadores em obra, podendo esta tecnologia ser usada, também, para localizar equipamentos ou materiais e para prevenir locais e atividades com elevado potencial de risco [24].

Esta integração facilita o planejamento com a análise dos requerimentos de segurança. Aplicações de segurança com a interação de BIM são uma ferramenta eficiente no diálogo e discussão de assuntos relacionados com a prevenção de acidentes com a equipa de projeto.

Apesar desta revolução, BIM ainda apresenta algumas deficiências, pois não fornece um modelo de visualização robusto e a experiência dos utilizadores na interação com esta tecnologia ainda se apresenta limitada. Alguns estudos revelam ainda que esta tecnologia apresenta limitações na comunicação em obra em tempo real, provocando ainda mais dificuldades na sua aplicação [30]. De forma a ultrapassar as suas deficiências, tecnologias como a RV e a RA surgiram na indústria da construção.

A RV leva a uma melhor comunicação entre os vários intervenientes num projeto de construção, através de uma capacidade avançada de visualização. O tratamento de informação baseado nos processos dos modelos BIM permite analisar os diferentes problemas e fornece soluções para os mesmos. A capacidade imersiva da RV permite manipular os modelos BIM provocando a sensação de envolvimento de uma obra que ainda não foi executada, melhorando assim a sua metodologia [29].

A integração entre BIM e RA pode ser uma preciosa ferramenta para coordenação e comunicação. Com a visualização da construção e associação com o modelo do projeto, é possível melhorar a identificação de discrepâncias em obra. Esta interação permite melhor monitorização e planejamento das atividades de um edifício, e pode melhorar a eficiência do tratamento de informação do progresso dos trabalhos em tempo real [30].

2.6. TECNOLOGIAS DE VISUALIZAÇÃO NA PREVENÇÃO DE ACIDENTES NA CONSTRUÇÃO

2.6.1. FORMAÇÃO DE SEGURANÇA

A identificação de perigos caracteriza-se na capacidade de uma equipa de segurança em analisar e avaliar o potencial de risco destes numa obra de construção. Podem influenciar a execução de medidas como a seleção de instalações de um projeto, ajustamentos sequenciais dos trabalhos e o controlo de segurança [31].

Os métodos tradicionais para o reconhecimento destes perigos regem-se pelo acesso da informação convencional através de desenhos, casos de acidente ou conhecimento heurístico que são transmitidos por aulas e reuniões, sendo que estas abordagens não são fáceis de ser diretamente absorvidas e não se refletem em obra [32]. Para reforço das experiências interativas e imersivas do utilizador, a modelação e visualização da realidade virtual emergiram.

Desta forma, formação em ambientes virtuais tem vindo a ganhar popularidade na construção pela promoção da aprendizagem cognitiva dos utilizadores. Estudantes ou estagiários são introduzidos à formação mais convencional que inclui palestras, conferências ou filmes que fornecem muita informação teórica, mas pouca interação visual, além de apresentarem algumas deficiências [33]. Estes denotam falta de envolvimento e falta de conhecimento do que se passa em obra, assim como desconhecem as dinâmicas e complexidades envolvidas num projeto de construção, sendo este treino considerado inadequado e pouco efetivo [34].

Formação em obra pode ser mais eficiente pelo envolvimento e experiência, mas depende muito tempo, é considerado caro e está sujeita a um potencial de risco enorme [17]. As tecnologias como RV e RA garantem novas oportunidades para formação e educação com níveis cognitivos elevados num ambiente livre de perigos.

A utilização de tecnologias imersivas abre excelentes perspectivas para a construção pela sua capacidade de visualização e de manipulação. A RA apresenta características distintas que podem beneficiar a eficiência da formação e avaliação na segurança, criando um ambiente onde a informação virtual se sobrepõe na visão do utilizador do mundo real. Esta tendência crescente da sua utilização nas aplicações práticas de formação demonstra o seu potencial pelo aperfeiçoamento das tecnologias existentes e por proporcionar melhores condições de treino.

Neste processo, a maior parte dos estudos utiliza estagiários e profissionais como termo comparativo em métodos de avaliação subjetivos (entrevistas, questionários e inquéritos) e objetivos (tempo de execução de tarefas, nível de satisfação, entre outros). Grande parte dos trabalhadores considera que os problemas relacionados com a segurança são induzidos pelo comportamento dos mesmos [17]. Difícilmente se resolvem questões de segurança sem o compromisso dos intervenientes que executam os trabalhos.

A utilização da RV torna a formação dos trabalhadores mais eficaz em termos de concentração, assim como aumenta a sua confiança na conclusão das tarefas projetadas. Os formandos apresentam menos stress, maior cuidado durante as experiências e tomam decisões mais coerentes e realistas.



Fig. 2.11 – Formação de segurança com a utilização de RV [35]

Muitos acidentes na construção são provocados pela utilização inadequada de equipamentos como guias ou guindastes. Estes equipamentos são tipicamente usados nesta indústria, mas é notória a dificuldade dos estagiários em perceber o seu funcionamento pela informação limitada que lhes é transmitida.

Operações não imersivas são tidas como baratas e de fácil manuseamento para formação no uso de equipamentos, podendo estas simular processos detalhados de desmantelamento e de utilização de guas. Estas fornecem, também, uma base de dados para os trabalhadores compararem as suas ações com os procedimentos de segurança normativos [36].

Apesar disto, a integração de um ambiente virtual imersivo pode gerar uma simulação realística, de forma a reduzir a diferença entre as experiências realizadas. A utilização das tecnologias de visualização vai permitir uma maior eficiência no treino de formação e uma maior confiança na execução das operações. A adoção da RV e RA nestas tarefas vai promover uma melhor coordenação entre equipamentos e materiais com a existência de uma interface de controlo mais intuitiva.

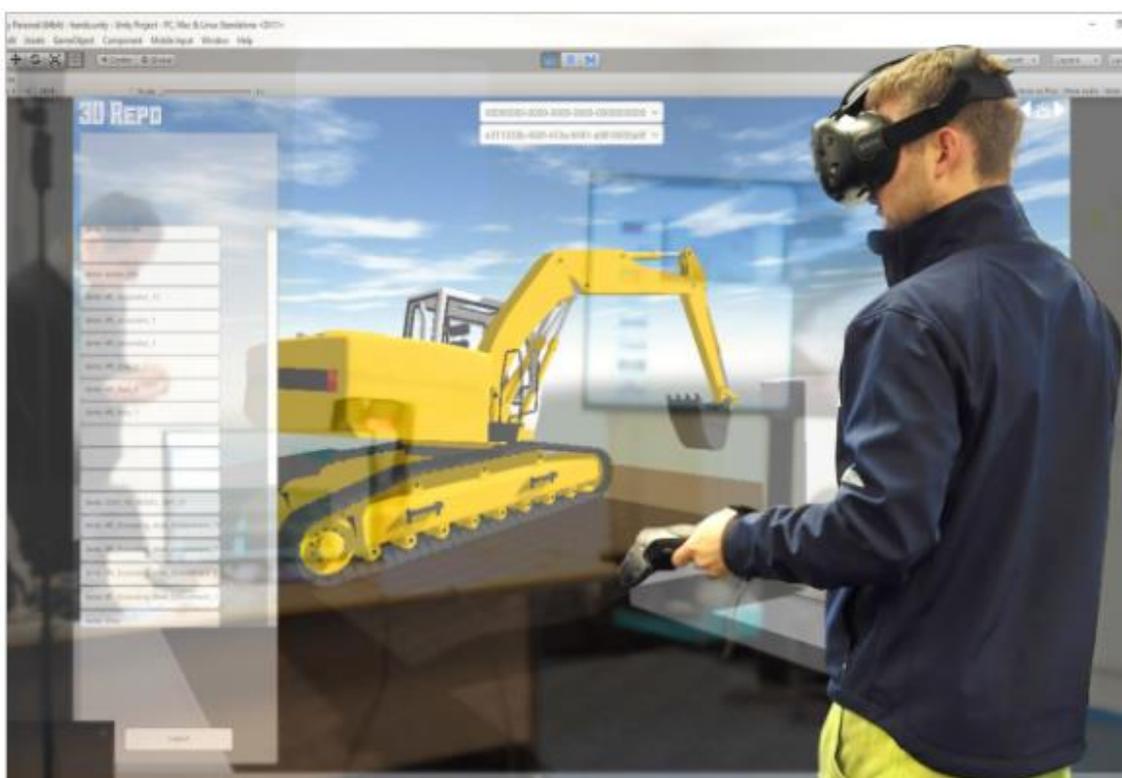


Fig. 2.12 – Treino de equipamentos com o emprego de RV [37]

2.6.2. PLANEAMENTO DE SEGURANÇA

O planeamento de segurança é uma parte essencial do processo de construção, mas é habitualmente realizado de forma separada do restante planeamento do projeto e do controlo de tarefas. O método tradicional do planeamento de segurança descreve medidas de segurança pela observação manual e experiência dos trabalhadores [37].

A conexão entre os planos de segurança e a execução das tarefas é, geralmente, abaixo do pretendido. São usados desenhos e representações para prevenção de acidentes, sendo que estes resultados podem estar sujeitos a erros e omissões pelo carácter subjetivo dos intervenientes que tomam decisões [2].

Tarefas planejadas de forma inadequada podem ser mais perigosas de serem realizadas, especialmente numa sequência de trabalhos. Esta situação deve-se a métodos desatualizados e design incorreto de trabalhos temporários. O tratamento de informação não é melhorado pela utilização de ações manuais e processos complexos, podendo levar a erros e omissões.

Os estagiários estão sujeitos a cometer mais erros quando se baseiam na sua memória para a realização de tarefas. A incorporação das tecnologias de visualização irá fornecer ferramentas para implementar corretos procedimentos de execução dos trabalhos, especialmente processos de segurança [17].

De forma a melhorar o acesso à informação em obra e tornar a comunicação mais efetiva, a utilização de aplicações de RA poderá ser muito útil. Esta tecnologia vai permitir a comunicação entre os participantes e o fluxo de informação do projeto. Os sistemas de realidade aumentada permitem um acesso mais facilitado à informação ajudando os gestores de projeto a tomar melhores decisões que irão provocar menos custos de projeto e atrasos no cumprimento de prazos [3].

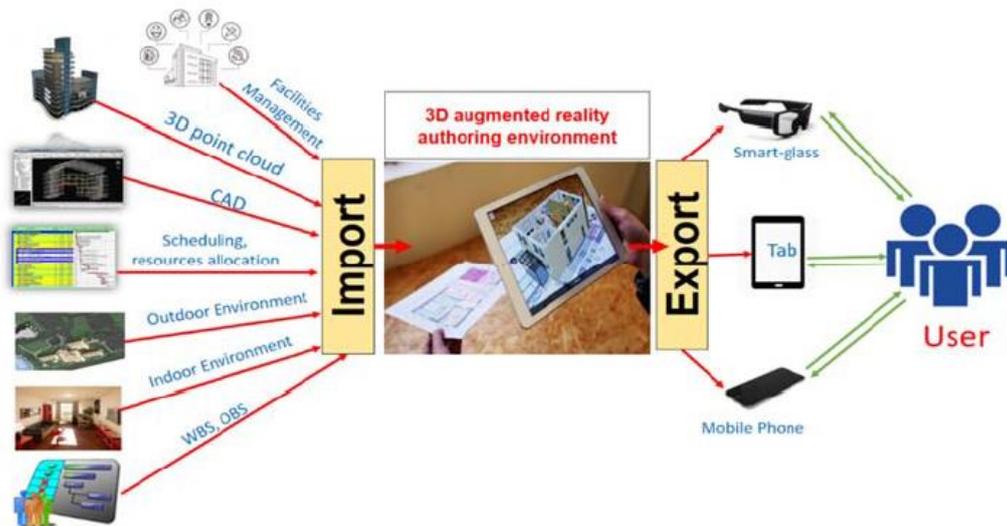


Fig. 2.13 – Gestão de informação na construção com a utilização de RA [37]

2.6.3. INSPEÇÃO DE SEGURANÇA

Numa obra, a inspeção de segurança tem como objetivo garantir que os trabalhos executados estão dentro das especificações do projeto. Métodos tradicionais de inspeção obrigam os trabalhadores a transportarem os desenhos do projeto para a obra, e exigem um enorme esforço para a identificação correta dos mesmos, de forma a se obterem as informações necessárias [38]. Este método requer a transferência da informação dos desenhos em planta para uma visualização 3D e de uma correta análise de símbolos e indicadores presentes nas representações [39].

Após esta análise, geram-se relatórios e *checklists* que irão ser discutidas entre os intervenientes do projeto. Este processo depende da capacidade dos inspetores de extrair a informação necessária e de compará-la com o que foi projetado inicialmente, podendo este ser insuficiente e pouco efetivo. De forma a se potenciar as competências de reconhecimento e avaliação de risco, a RV e a RA têm sido alvo de estudos e aplicações no processo de inspeção, supervisão e estratégia na construção [40, 3].

A incorporação destas tecnologias para inspeção e instrução tem promovido um melhor acesso à informação em obra com a configuração das ferramentas BIM nas suas aplicações. Esta informação pode ser manipulada e visualizada, não só por representações virtuais, como os trabalhadores têm capacidade para a recolher e monitorar de acordo com os requerimentos de segurança [24]. Estes últimos podem ser capazes de analisar e comparar rapidamente o que se a ser executado com o que foi previamente projetado.

Os trabalhadores podem obter fotografias, inserir e exportar informação, aferir notas virtuais e antecipar problemas e perigos para a obra. As tarefas programadas terão capacidade de ser realizadas em menos tempo pela rápida resposta que os intervenientes do projeto poderão apresentar. Toda a documentação será armazenada e poderá ser compartilhada quando necessária numa plataforma virtual, levando a um aumento de qualidade dos trabalhos.

Assim, a identificação de perigos e perceção de risco pode ser realizada de forma mais eficiente por parte dos trabalhadores, pela capacidade de reconhecimento em tempo real e pela possibilidade de simulação num ambiente virtual antes da sua realização em obra.

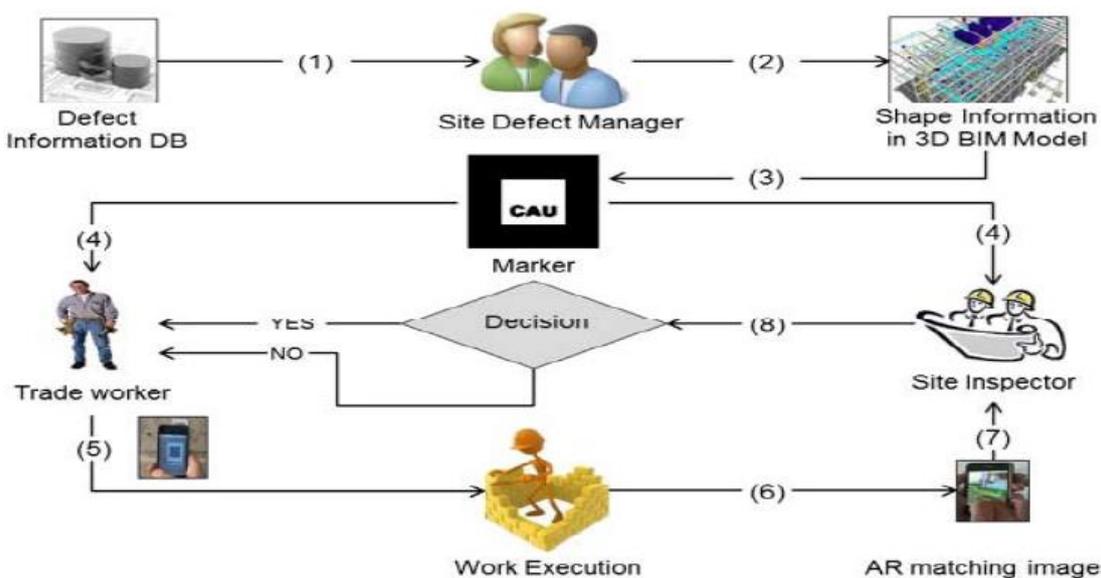


Fig. 2.14 – Processo de inspeção de segurança na construção com o emprego de RA [37]

2.7. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo procedeu-se à análise das características da realidade virtual e apresentou-se a estrutura dos seus sistemas. Um sistema de realidade virtual apresenta os seguintes componentes:

- Hardware;
- Software;
- Dispositivos de input/output;
- Capacidade imersiva e interativa.

Após a descrição destes componentes, integrou-se o conceito de realidade aumentada para os objetivos deste trabalho e relacionou-se as tecnologias de visualização com as ferramentas BIM na construção. As principais vantagens desta interação são as seguintes:

- A capacidade imersiva da RV permite manipular os modelos BIM provocando a sensação de envolvimento de uma obra que ainda não foi executada, melhorando assim a sua metodologia;
- A interação da RA com as ferramentas BIM permite melhor monitorização e planeamento das atividades de um edifício, e pode melhorar a eficiência do tratamento de informação do progresso dos trabalhos em tempo real.

Por fim, o capítulo apresenta as principais fases de gestão de segurança nos processos construtivos, onde se compara a utilização de RV e RA com os métodos tradicionais na prevenção de acidentes. Formação, planeamento e inspeção apresentam grandes benefícios com o emprego destas tecnologias, sendo os principais os seguintes:

- A RA apresenta características distintas que podem beneficiar a eficiência da formação e avaliação na segurança, criando um ambiente onde a informação virtual se sobrepõe na visão do utilizador do mundo real.
- A utilização da RV torna a formação dos trabalhadores mais eficaz em termos de concentração, assim como aumenta a sua confiança na conclusão das tarefas projetadas. Os formandos apresentam menos stress, maior cuidado durante os testes e fornecem respostas mais coerentes e realistas.
- A adoção da RV e RA em tarefas de construção vai promover uma melhor coordenação entre equipamentos e materiais com a existência de uma interface de controlo mais intuitiva.
- Os sistemas de realidade aumentada permitem um acesso mais facilitado à informação ajudando os gestores de projeto a tomar melhores decisões que irão provocar menos custos de projeto e atrasos no cumprimento de prazos.
- A identificação de perigos e perceção de risco pode ser realizada de forma mais eficiente por parte dos trabalhadores, pela capacidade de reconhecimento em tempo real e pela possibilidade de simulação num ambiente virtual antes da sua realização em obra.

3

CASOS DE ESTUDO RELEVANTES

3.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo descreve-se os sistemas dos casos de estudo mais relevantes em termos de gestão de segurança e prevenção de acidentes com a utilização de RV e RA. São apresentados da seguinte forma:

- Descrição da sua estrutura;
- Análise do processo de aplicação;
- Apresentação de um caso de estudo;
- Implementação do sistema;
- Apresentação da sua avaliação e respetivos resultados.

Promove-se uma descrição completa dos casos de estudos apresentados para posterior análise dos seus benefícios e limitações no capítulo seguinte.

3.2. SAFETY MANAGEMENT AND VISUALIZATION SYSTEM (SMVS)

3.2.1. ESTRUTURA DO SISTEMA

Este sistema foi desenvolvido de forma a evoluir o processo tradicional de gestão de segurança na construção e está dividido em três fases: planeamento, formação e inspeção. Estas fases encontram-se interligadas no sistema, sendo que estes módulos interagem com um motor de visualização que integra e fornece toda a informação gerada.

O motor utilizado foi o *Microsoft XNA Game Studio 4.0* e assume-se como o núcleo do sistema pois permite o tratamento de informação pela interoperabilidade fornecida. Todas as informações necessárias das interfaces dos módulos estão dispostas no VEB (*visualization engine browser*).

3.2.1.1. Módulo de Planeamento

Este módulo foi desenvolvido para se identificar os fatores de risco e informações relativas de segurança nas atividades de projeto. Esta tarefa será realizada através de uma reunião de gestores de segurança com a utilização de um modelo virtual do projeto presente na GL (*graphic library*).

Os riscos de segurança identificados e as informações relativas (de materiais, equipamentos, casos de acidentes, entre outros) são extraídas da SID (*safety information database*) e estes interagem

com os modelos virtuais do sistema para o emprego dos módulos de formação e inspeção. A base de dados tem a capacidade de armazenar informações que vão ser utilizadas nos três módulos do sistema e atualiza-se, também, ao longo da realização das tarefas projetadas.

Para uma filtragem eficiente das informações do sistema, foi criada uma RII (*risk information interface*) que vai permitir aos gestores de segurança aferirem a situação atual dos trabalhadores em termos de formação e inspeção.

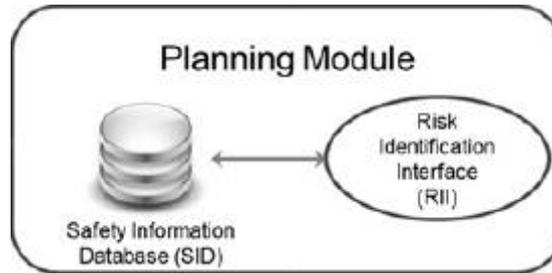


Fig. 3.1 – Módulo de planeamento do SMVS [2]

3.2.1.2. Módulo de Formação

Os fatores de risco identificados no módulo de planeamento vão ser analisados através de um QAG (*question answer game*). Este jogo fornece uma experiência virtual aos trabalhadores de forma prévia à execução real das tarefas, na qual será analisada a sua capacidade em termos de perceção de risco e comportamentos de segurança.

Durante este exercício, um avatar (representação virtual do trabalhador) navega virtualmente no modelo do projeto e enfrenta questões referentes ao comportamento adequado numa situação de risco identificada no módulo anterior. Independentemente da resposta do utilizador, outra base de dados, ID (*instruction database*), apresenta fotos e vídeos de forma a aumentar a capacidade cognitiva dos trabalhadores baseada nos fatores de risco associados às tarefas do projeto.

Neste módulo, a posição do utilizador e o seu percurso efetuado são localizados pela conexão de um LTS (*location tracking system*) ao motor de visualização. A lista de respostas de cada utilizador é enviada para o módulo de planeamento para ser avaliada. A identificação de novos riscos na tarefa de inspeção também permite a sua notificação nos respetivos módulos.

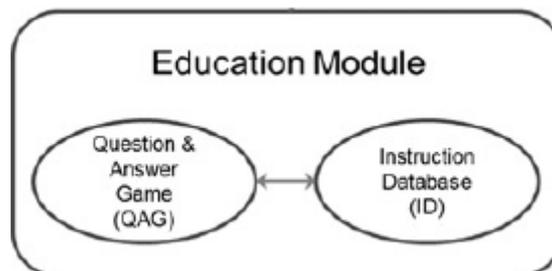


Fig. 3.2 – Módulo de formação educacional do SMVS [2]

3.2.1.3. Módulo de Inspeção

Este módulo foi designado para o controlo eficiente das medidas de prevenção de acidentes durante o processo de inspeção. A localização dos elementos de risco e as informações de segurança relativas são sobrepostas virtualmente num espaço real. Com a utilização de realidade aumentada, observam-se melhorias na capacidade cognitiva de identificação de perigos e as tarefas de inspeção podem ser realizadas com maior eficácia.

Este módulo caracteriza-se por duas interfaces: TOI (*task operation interface*) e RUI (*risk update interface*). A primeira permite a utilização de realidade aumentada através de um dispositivo móvel, com a circulação dos trabalhadores em obra. Os pontos de referência são transmitidos para o LST, ocorrendo, depois, a interação com o modelo virtual do projeto. Posteriormente a isto, a lista final de inspeção é armazenada na SID do módulo de planeamento.

A RUI permite o armazenamento e partilha de informações relativas dos riscos de segurança durante o processo de inspeção para a SID. Estas informações serão utilizadas nos módulos de formação e inspeção durante a execução dos trabalhos.

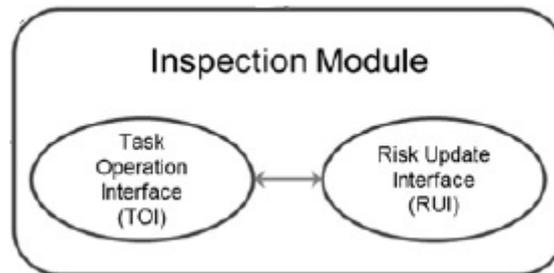


Fig. 3.3 – Módulo de inspeção do SMVS [2]

3.2.1.4. Motor de Visualização

O motor do sistema foi desenvolvido com o uso do *Microsoft XNA Game Studio 4.0* é constituído por:

- GL (*graphic library*);
- LTS (*location tracking system*);
- LD (*location database*);
- UII (*user identification interface*);
- UD (*user database*);
- VEB (*visualization engine browser*).

Este motor está interligado a todos os módulos por via wireless e por rede local. A GL importa os modelos BIM do projeto e as informações deste interagem com o LTS e a LD de acordo com a calendarização do projeto. De forma a garantir a eficiência dos trabalhadores em termos de formação e inspeção, é necessário fornecer as informações relevantes para cada execução de trabalhos.

Os utilizadores do SMVS devem ser agrupados no sistema com o auxílio da UD que armazena informações pessoais por empresa, nome do trabalhador e tarefas a realizar. Por fim, a interface UII permite o acesso aos módulos por parte dos utilizadores e garante, também, o acesso às informações relativas aos requerimentos de segurança.

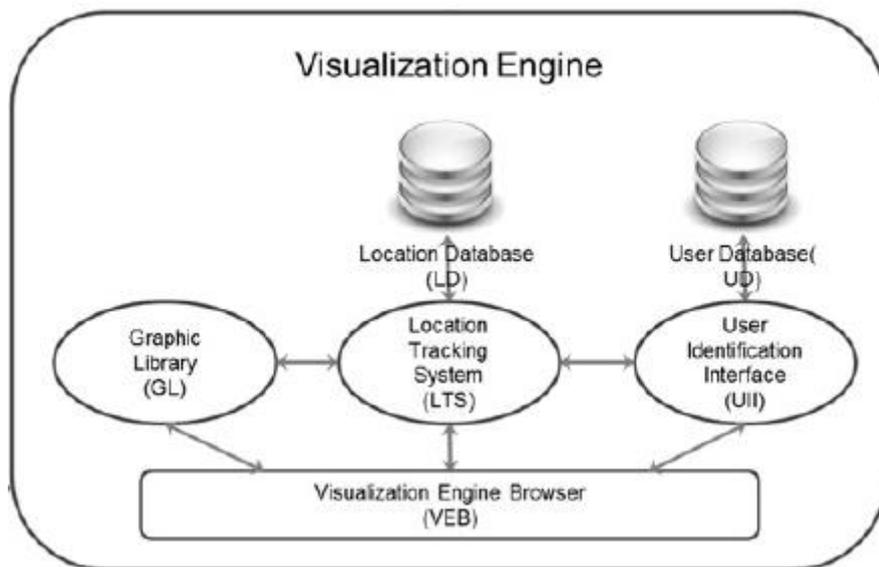


Fig. 3.4 – Motor de visualização do SMVS [2]

3.2.2. PROCESSO DE APLICAÇÃO DO SISTEMA

Primeiramente, os modelos BIM são criados e são adicionadas informações sobre os requerimentos de segurança, sendo estes ficheiros enviados, de seguida, para a GL. Com estes modelos e os calendários de atividades do projeto, é possível realizar a avaliação dos fatores de risco através de uma reunião entre os intervenientes do projeto. A SID fornece informações que serão utilizadas nos trabalhos de formação e inspeção. A determinação dos fatores de risco ocorre no módulo de planeamento e a localização de cada componente analisado é armazenada na LD.

A avaliação dos fatores de risco é apresentada através de um código de cores, isto é, a cor visível no modelo indica a sua performance. Vermelho representa que o utilizador não cumpriu com o plano de segurança, enquanto que se a cor mudar para verde, isto representa que o risco está prevenido naquele local. Existe, ainda, a possibilidade de a cor aparecer em amarelo, que se caracteriza por uma resposta incompleta, na qual a medida de segurança necessita de mais informação. Com este código de cores, a inspeção apresenta-se eficiente na gestão de segurança.

Nas tarefas de formação, o utilizador percorre virtualmente toda a área de atividade de construção onde se encontram os fatores de risco já identificados. Com a aproximação do participante a estes pontos, o QAG começa. Este jogo engloba todos os pontos analisados como fatores de risco e a obtenção de todas as respostas permite o encerramento do questionário. Os resultados são, posteriormente, enviados para o módulo de planeamento e são calculados pela média das respostas corretas.

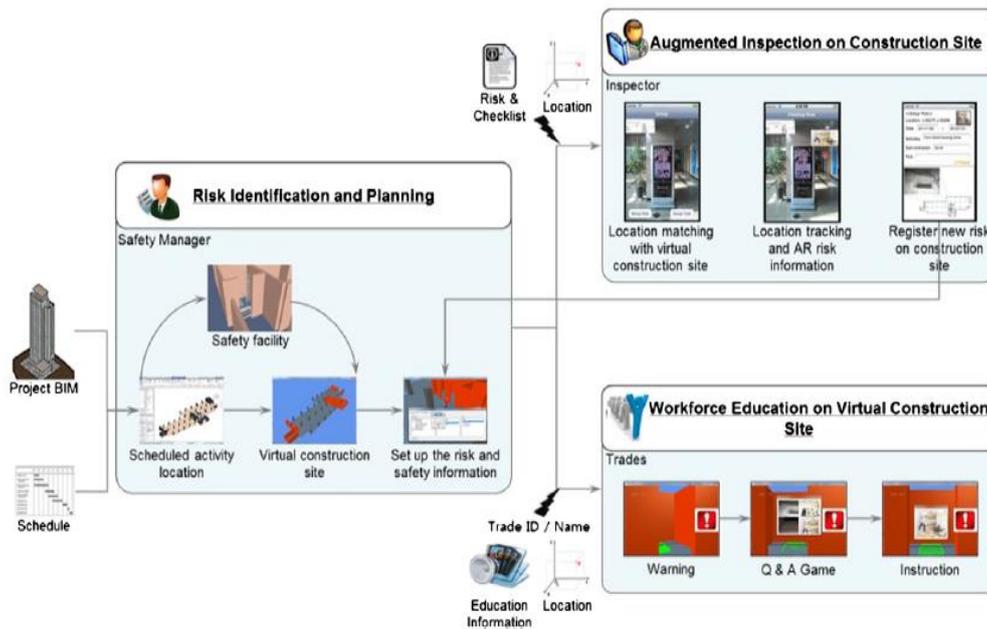


Fig. 3.5 – Processo de aplicação do SMVS [2]

Quando ocorre a inspeção real dos trabalhos em obra, existe a correspondência dos pontos analisados nos modelos virtuais para os mesmos no mundo real. Esta interação permite que o LTS calcule as distâncias relativas entre os riscos e o inspetor em ambiente virtual, sendo estas informações transmitidas para os dispositivos móveis dos trabalhadores. Esta informação sobreposta permite a análise de segurança em obra em tempo real.

Após a inspeção real, as informações retiradas são enviadas e armazenadas na SID. Novos riscos associados a inadequadas execuções das tarefas são, também, notificados para futuros trabalhos de formação e inspeção.

3.2.3. TESTE DE APLICABILIDADE DO SISTEMA

3.2.3.1. Configuração do Protótipo do Sistema

Um cenário de gestão de segurança para um caso real de acidente foi desenvolvido para o teste de aplicabilidade do sistema. Além do motor de jogo *XNA 4.0 Game Studio*, utilizou-se o *Revit 2012 Architecture* para os modelos BIM e o *Xcode 4.2* para aplicação móvel de RA nos iPhones dos trabalhadores.

3.2.3.2. Introdução do Cenário

O acidente ocorreu durante a construção de um edifício, numa obra onde mais de metade dos trabalhadores eram estrangeiros. A gestão de segurança semanal estava programada, incluindo a inspeção diária dos trabalhos e trabalhos semanais de formação. Durante este processo foram identificadas duas situações de risco: *“struck by vertical reinforcement of the wall”* e *“improper work of lifting supports through pipe shaft opening of the building”*.

A primeira situação foi identificada na reunião e propriamente prevenida pelos intervenientes do projeto. Por outro lado, a abertura designada estava planeada ser coberta com reboco, sendo que esta não foi considerada como perigosa na reunião. Apesar disto, a segunda situação acabou por

ser identificada na inspeção e procedeu-se à instalação de uma cerca para a segurança dos trabalhadores.

Passado uns dias, alguns novos trabalhadores incorporaram a construção e, apesar da participação no programa de formação de segurança, estes não foram capazes de reconhecer a abertura na obra. Esta situação resultou na lesão de um dos novos trabalhadores, por queda nessa mesma abertura. Com esta situação, a equipa de segurança ponderou a utilização de tecnologias de visualização de forma a garantir novas abordagens para maior segurança na obra.

3.2.3.3. Implementação do Sistema

Os modelos BIM foram gerados a partir da utilização do *Revit Architecture 2012*, sendo depois convertidos virtualmente num ficheiro FXB (*filmbox*). Após a reunião, “*wall reinforcing work*” foi escolhido como a atividade de risco a ser analisada e as atividades “*bracing installation*” e “*cover the cap over the top edge of rebar*” são seleccionadas para a inspeção e fotos e vídeos relativos são, também eles, seleccionados para o treino da avaliação de riscos.

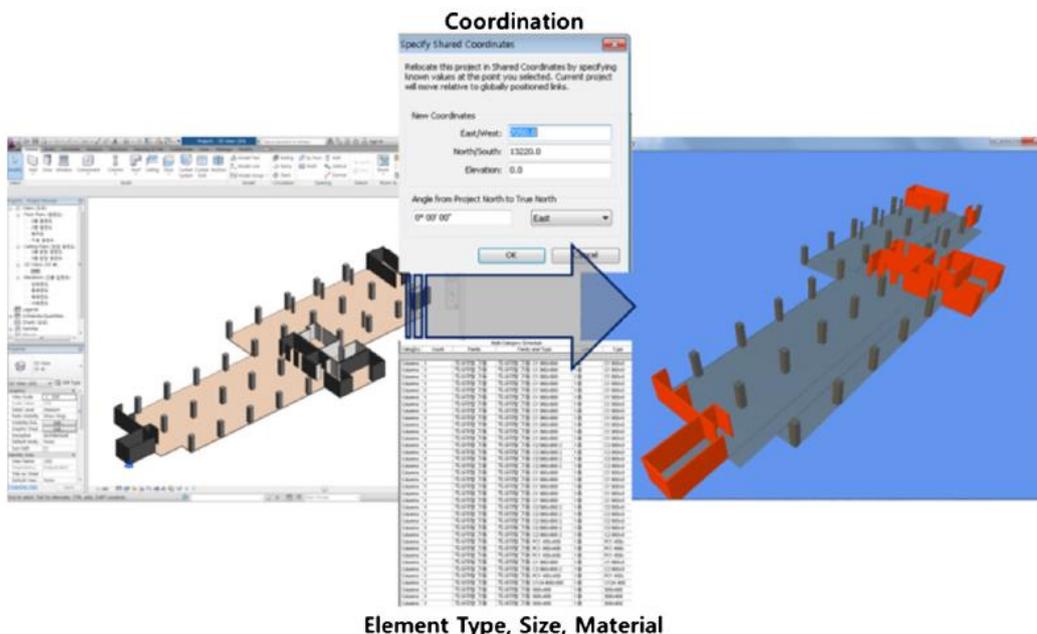


Fig. 3.6 – Criação do modelo virtual [2]

Durante a inspeção diária, a abertura é identificada como fator de risco, situação que não havia sido notificada na fase de planeamento. Como já foi referido, esta abertura deveria ter sido coberta por reboco, e procedeu-se à implementação da cerca de segurança. No entanto, esta cerca foi removida para a execução dos trabalhos de elevação.

O processo de avaliação de risco foi registado da seguinte forma: a localização do utilizador em obra tem de corresponder à localização do modelo virtual; utilização da interface RUI para registo em tempo real; após este registo, os trabalhadores têm capacidade para reconhecer os riscos e visualizá-los com o auxílio de dispositivos móveis.

Este procedimento permite que os trabalhadores recebam um aviso em tempo real após a sua localização e fornece informações necessárias para a prevenção de acidentes. O dispositivo móvel tem a capacidade de sobrepor os cenários de obra reais com informações do TOI e do RUI com a utilização de realidade aumentada.



Fig. 3.7 – Tarefa de inspeção com a utilização de RA [2]

O desenvolvimento do QAG permite a formação dos trabalhadores e estes têm acesso ao questionário com a interface UII que relaciona o jogo com as atividades relativas de cada utilizador. O jogo para a situação em estudo foi testado, onde os participantes usam o teclado e o rato para percorrer a obra e respondem às perguntas sobre as medidas de segurança através de escolha múltiplas.

Se as respostas são acertadas, o sistema calcula a pontuação dos trabalhadores, enquanto que se as respostas estiverem erradas, o sistema apresenta informações relativas a casos de acidentes e de medidas de segurança de forma a aumentar o conhecimento cognitivo dos trabalhadores. O jogo continua até se obter todas as respostas certas e acaba com a análise total dos fatores de risco da obra.



Fig. 3.8 – Cenários virtuais do QAG [2]

3.2.4. AVALIAÇÃO E RESULTADOS

O protótipo do sistema aplicado a um caso de estudo real foi testado de forma a se perceber o potencial da sua aplicabilidade. A aplicação prática do SMVS foi desenvolvida através de uma entrevista, na qual ocorreu a divisão dos inquiridos em quatro grupos. A avaliação desta entrevista foi dividida em três partes: identificação dos riscos antes da execução dos trabalhos; aumento da percepção de risco de acidentes; e comunicação em tempo real.

Os resultados da entrevista demonstram que o uso do sistema é aplicável em obra e fornece suporte à comunicação na identificação de perigos e na tomada de decisão relativamente a condições inadequadas de segurança.

A utilização deste sistema, em contraste com os métodos tradicionais de comunicação, fornece uma plataforma inovadora aos trabalhadores, na qual a transferência de informação é realizada de forma automática com o auxílio de dispositivos móveis. Esta informação pode ser empregue em diferentes tarefas de construção, o que permite uma aprendizagem e tomada de decisão mais eficientes.

Summary of interview result.

	Average SMVS rating*		
	Identifying risk before work execution	Increasing information comprehension	Real-time communication
Construction workers (9)	3.89	3.33	3.89
Safety managers (11)	3.64	3.91	4.09
Construction managers (6)	3.67	3.83	3.83
Trade leads (5)	3.60	4.20	3.80

* The rating is scaled as follows: 1=Useless, 2=Ineffective, 3=Normal, 4=Effective, 5=Highly effective.

Fig. 3.9 – Resultados da avaliação do SMVS [2]

3.3. VIRTUAL SAFETY ASSESSMENT SYSTEM (VSAS)

3.3.1. ESTRUTURA DO SISTEMA

Este sistema utiliza as tecnologias de visualização, de forma a testar a avaliação da eficiência de segurança numa construção através de ferramentas de *gaming*. O VSAS foi designado de forma a permitir que as competências dos requisitos de gestão de segurança de construção sejam alcançadas, sendo que o seu processo de visualização é detalhado de seguida.

O ambiente virtual utilizado apresenta representações de estruturas permanentes e temporárias, materiais e equipamentos de construção armazenados, e quaisquer ferramentas empregues na obra. A utilização de materiais e texturas permite uma melhor performance do sistema em tempo real, fornecendo uma experiência 3D realista.

Este processo permite a inspeção aos seus utilizadores e uma melhor tomada de decisão em termos de informações de segurança, sustentados nos seus conhecimentos e experiência. A figura 3.10 ilustra um exemplo de um ambiente virtual do VSAS.



Fig. 3.10 – Ambiente virtual do VSAS [4]

O sistema permite a integração de representações dos trabalhadores com o ambiente virtual, de forma a avaliar os seus comportamentos de segurança na execução de tarefas de construção. Na figura 3.11, é possível observar a representação de um trabalhador a executar uma soldadura sem os equipamentos de proteção adequados.



Fig. 3.11 – Execução inadequada de uma soldadura [4]

O processo de visualização de métodos de construção ineficientes é análogo ao da situação anterior, onde equipamentos e materiais são adicionados ao ambiente virtual e são apresentados em forma de animações 3D. Os trabalhadores são requeridos a executar tarefas de construção e são registados os procedimentos incorretos, como a elevação incorreta de um elemento de construção, como pode ser observado na figura 3.12.



Fig. 3.12 – Elevação incorreta de um elemento de construção [4]

3.3.2. PROCESSO DE APLICAÇÃO DO SISTEMA

A identificação das limitações dos processos de gestão de segurança referidos anteriormente, é a base da avaliação do sistema, sendo classificados através dos seus atributos. Esta classificação permite ao sistema selecionar as questões mais relevantes para o contexto de cada utilizador.

Estas informações são armazenadas em formato digital, como ilustra a figura 3.13.

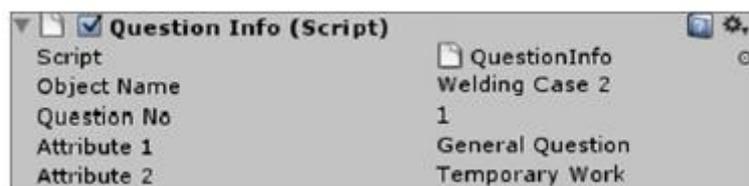


Fig. 3.13 – Base de dados de uma atividade de construção do VSAS [4]

Apesar do formato textual das questões apresentadas, os utilizadores necessitam de navegar pelo ambiente virtual, de forma a obterem as respostas corretas. Os utilizadores têm a capacidade de comunicarem entre eles e diversas indicações foram adicionadas para auxílio dos trabalhadores. A experiência virtual permite a identificação de fatores de risco na construção e perceção de risco num ambiente virtual livre de perigos.

Os utilizadores são sujeitos a um teste constituído por questões de escolha múltipla, no qual as suas respostas são armazenadas na base de dados do sistema. Os participantes podem alterar as suas respostas, enquanto realizam a avaliação e os resultados são obtidos por comparação das respostas armazenadas na base de dados.

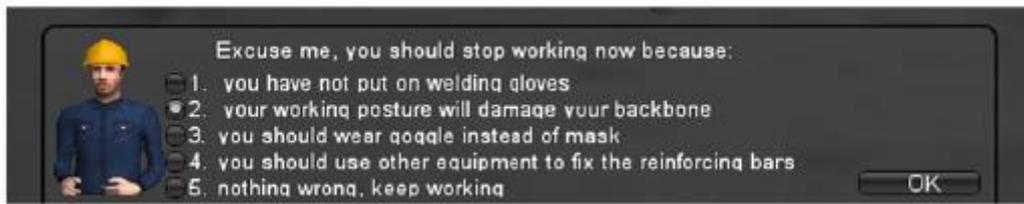


Fig. 3.14 – Questão do teste do VSAS [4]

O sistema atribui fatores às atividades pela sua importância em termos de severidade de acidentes de construção, no qual um fator maior representa uma atividade onde as fatalidades dos trabalhadores são mais comuns. As questões são selecionadas aleatoriamente, com base no contexto de cada participante, embora o peso dos fatores atribuídos seja o mesmo. Estes fatores dividem-se da seguinte forma: fator 1 foi designado para acidentes ligeiros; fator 2 para acidentes graves; enquanto que o fator 3 consiste nos acidentes que possam levar à morte dos trabalhadores.

A validação do teste inicia-se logo após a submissão das respostas dos utilizadores e o sistema reporta a performance de cada participante. A figura 3.15 apresenta um relatório do sistema, onde o enquadramento do incidente e a resposta correta, com a explicação da importância do mesmo, são, também, descritos.

A pontuação desta avaliação considera-se muito diferente dos métodos tradicionais de gestão de segurança. Os utilizadores necessitam de responder corretamente a todas as questões atribuídas com o fator 3. Estes não devem, também, responder incorretamente a mais de duas questões atribuídas com o fator 2 e o valor da soma das respostas incorretas deve ser inferior a 8. Os elevados standards deste sistema permitem um aumento na aprendizagem deste sistema e na redução de acidentes em obra.

3.3.3. CASO DE ESTUDO

3.3.3.1. Configuração do Sistema

Este sistema foi desenvolvido pelo motor de jogo *Unity 3D*, para renderização em tempo real da experiência. O desenvolvimento do sistema emprega, também, a utilização de linguagem *C#* e *Java*. Os requerimentos do sistema encontram-se na figura 3.16.

Report on USER1 safety performance-
 Test contents: Proper use of Personal Protective Equipment (P.P.E.)
 Incident: 1
 Background:
 Working at height is the working nature in construction industry. Ladder is available for construction use which is below 2 meters. Working on higher level requires the use of temporary working platform.



Suitable answer:
 You should erect temporary working platform instead of ladder
 Possible result:
 Serious injury

Fig. 3.15 – Relatório do VSAS [4]

CPU:	Intel Pentium 4 2.8 GHz, Intel Core 2.0 GHz, AMD Athlon 2800 + or better
RAM:	512 MB
Video card:	NVIDIA GeForce 6800 GT, ATI Radesorry800 Pro or better
VRAM:	256 MB of graphics memory
Storage:	1 GB

Fig. 3.16 – Hardware do VSAS [4]

3.3.3.2. Implementação do Sistema

Conduziu-se a um caso de estudo, de forma a avaliar o sistema VSAS. Este sistema consiste numa grande base de dados de atividades de construção e, nesta aplicação, o módulo de equipamentos de proteção individual (EPI's) foi empregue. Mais de 20 casos foram armazenados na base de dados do sistema, onde se pretende evidenciar os casos de acidente mais comuns em Hong Kong. A figura 3.17 demonstra exemplos de visualização de causas de acidentes utilizados neste caso de estudo.

Accident causes	Examples of visualization	Question format
Unsafe site conditions	Working at height without a safety belt	3D model
Unsafe working behaviour	Welding without welding gloves	3D Animation
Unsafe construction method or sequencing	Incorrect weight lifting	3D Animation

Fig. 3.17 – Visualização de causas de acidente no VSAS [4]

3.3.4. AVALIAÇÃO E RESULTADOS

O sistema foi comparado às práticas tradicionais de avaliação de segurança na construção e, desta forma, um grupo de trabalhadores de construção foi convidado para testar o sistema, com a incidência na utilização apropriada dos EPI's. Os participantes realizaram o teste, no qual os resultados descrevem a média de respostas incorretas dados ao longo da experiência. Os resultados podem ser analisados na figura 3.18.

Users	Average number of incorrect answer causing		
	Minor injury	Serious injury	Fatality
Construction workers	1.42	0.5	0.33
Engineers	0.33	0.17	0
Safety officers	0.25	0	0
Construction managers	0.66	0	0

Fig. 3.18 – Resultados do teste do VSAS [4]

O desenvolvimento do sistema VSAS pretende fornecer uma inovadora plataforma de avaliação e melhorar a performance em termos da prevenção de acidentes na indústria da construção. Para avaliação da aplicabilidade do sistema, procedeu-se a uma série de entrevistas para obtenção de feedback individual. Os entrevistados foram divididos em quatro grupos, de acordo com as suas habilitações profissionais e as questões selecionadas focavam a eficiência do VSAS, como pode ser observado na figura 3.19.

1 = ineffective, 3 = normal 5 = highly effective	Average VSAS rating for assessing the user's ability in:		
	Identifying an unsafe working environment	Identifying an unsafe working attitude	Identifying an unsafe working method/sequence
Construction workers	3.75	3.91	3.83
Engineers	3.66	3.83	4.33
Safety officers	3.75	3.75	4
Construction managers	3.67	4	4

Fig. 3.19 – Resultados da avaliação de eficiência do VSAS [4]

Estes resultados revelam que os entrevistados concordam que a utilização do VSAS permite a avaliação dos participantes em termos de identificação de fatores de risco, identificação de comportamentos de segurança inadequados e na identificação de métodos de construção ineficientes.

3.4. EXPERIMENTAL CONSTRUCTION SAFETY EDUCATION SYSTEM (ECSES)

3.4.1. ESTRUTURA DO SISTEMA

Este sistema tem como objetivo melhorar a performance em termos de requisitos de segurança por parte de estudantes e baseia-se na utilização móvel de RV e RA. Este sistema foi desenvolvido de forma a refletir o processo educacional de segurança na construção e divide-se em três módulos:

- *Safety Knowledge Dissemination Module (SKD)*, que foi desenvolvido para aquisição de conhecimentos dos requisitos de segurança, por parte dos estudantes;
- *Safety Knowledge Reflection Module (SKR)*, que consiste na identificação de perigos e percepção de risco, assim como a reflexão dos conhecimentos adquiridos no módulo anterior;
- *Safety Knowledge Assessment Module (SKA)*, onde se foca a avaliação dos estudantes, de forma a assegurar a sua aprendizagem.

A estrutura deste sistema encontra-se representada na figura 3.20.

3.4.1.1. Módulo SKD

O SKD foca-se no ensino e transferência de conhecimento aos estudantes, baseado em casos de acidente. Com a análise destes casos, os formadores introduzem regulamentos de segurança, orientações e métodos construtivos com a utilização de RV e RA. Como o estudo foi realizado na Coreia do Sul, a KOSHA (*Korean Occupational Safety Health Administration*) e os seus regulamentos de segurança foram utilizados. Estes regulamentos foram comparados aos da OSHA (*Occupational Safety Health Administration*) para que sejam internacionalmente relevantes e o modelo de avaliação de risco foi considerado apropriado.

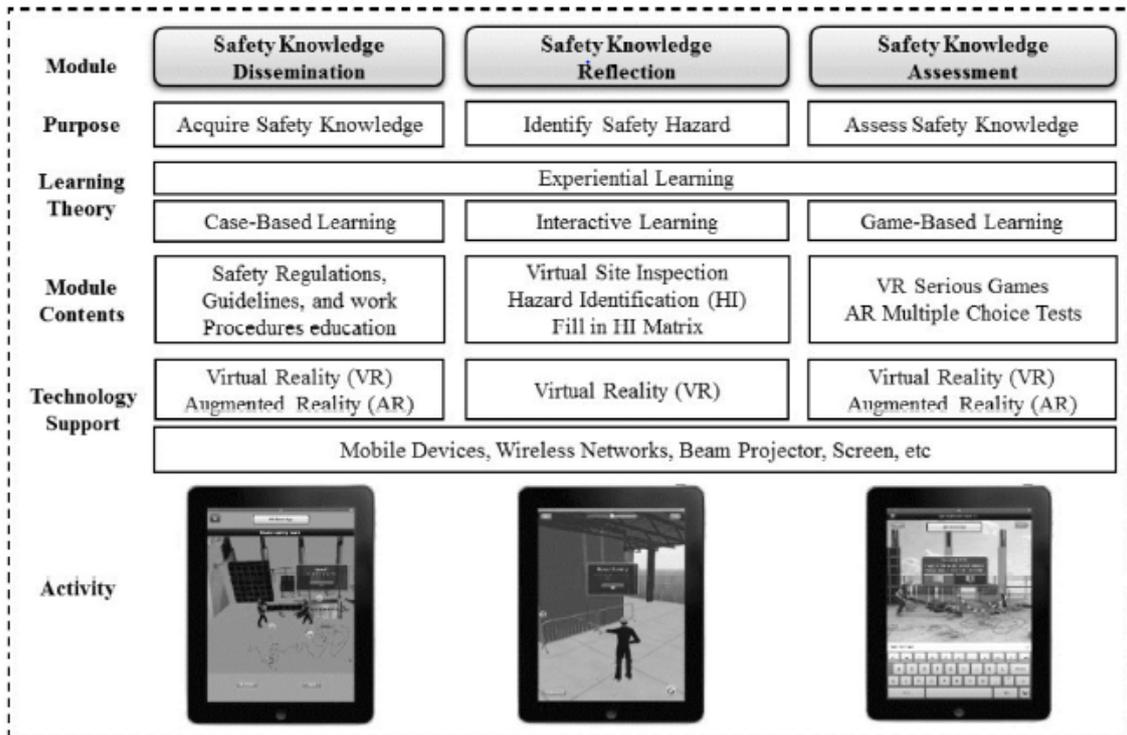


Fig. 3.20 – Estrutura do ECSES [41]

O módulo é iniciado com a abordagem sobre os casos de estudo nos quais os participantes, a partir de troca de ideias e partilha de conhecimentos, têm a capacidade de relacionar os regulamentos de segurança com a performance dos trabalhadores na execução das tarefas de construção. A RV permite a representação de cenários de construção, de forma a que os utilizadores visualizem áreas de atividades em ambiente virtual. Com o emprego de indicadores, a RA permite o acesso a objetos e entidades sobrepostos no mundo real.

Desta forma, os estudantes desenvolvem as suas capacidades de compreensão e perceção na prevenção de acidentes. Após este módulo, espera-se uma maior assertividade na identificação de perigos associados aos trabalhos executados por parte dos participantes.

3.4.1.2. Módulo SKR

O módulo SKR promove uma oportunidade experimental aos estudantes, sendo possível aplicar os conhecimentos adquiridos no módulo anterior. Os utilizadores são sujeitos a executar uma inspeção num ambiente virtual, com o objetivo de reconhecer os fatores de risco existentes em obra. Os estudantes têm a capacidade de aceder aos ambientes virtuais através de dispositivos móveis e realizam a inspeção com a identificação de perigos e condições inadequadas de segurança.

Durante este processo, instruções de segurança são dispostas na experiência por fotografias e vídeos, de forma a aumentar a perceção de risco. Através desta abordagem prática, a aprendizagem cognitiva desenvolvida nesta experiência é memorizada de forma mais efetiva do que nos métodos tradicionais.

A inspeção realizada será gravada para futura revisão e este módulo vai permitir, não só uma melhor identificação de perigos, como uma melhor aprendizagem dos requerimentos de segurança de construção pela interação com ambientes virtuais.

3.4.1.3. Módulo SKA

Por fim, o módulo SKA será essencial para avaliar os conhecimentos adquiridos pelos estudantes ao longo dos módulos anteriores. Este módulo foi desenvolvido pela execução de um jogo com a utilização de RV, que possibilita a identificação de perigos e determina estratégias de mitigação. O jogo fornece aos estudantes uma experiência virtual antes de entrar verdadeiramente numa obra e no seu espaço de atividades, e as suas capacidades de percepção de risco e os seus comportamentos são avaliados.

Durante esta experiência, vários cenários virtuais são apresentados, e uma série de questões é disposta nos dispositivos móveis de cada utilizador. O jogo apresenta diferentes níveis de dificuldade e só é completado com a resposta correta a todas as perguntas por parte dos estudantes. As escolhas múltiplas dispostas com o auxílio da RA permitem o teste de aplicabilidade de requisitos de segurança sobre áreas e tarefas específicas de construção.

Esta abordagem vai permitir aferir o nível de aprendizagem dos estudantes e pretende garantir que os participantes sejam capazes de enfrentar os perigos de uma obra real de construção de forma eficaz e consciente.

3.4.2. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO SISTEMA

3.4.2.1. Configuração do Protótipo do Sistema

O *MySQL-Server* foi utilizado no sistema para as bases de dados de visualização, informações de segurança e perfil de utilizador. O *Xcode* e o *iOS SDK (Software Development Kit)* foram empregues para o desenvolvimento da aplicação dos dispositivos móveis e como elo da plataforma *MySQL*. Posto isto, os cenários virtuais foram desenvolvidos pelo *Revit Architecture 2013* e o *Blender 2.68* e, por fim, a aplicação de RA ficou ao cargo do *BuildAR Pro 2*.

3.4.2.2. Introdução dos Cenários em Estudo

Casos de acidente em obra foram selecionados para simulação da experiência, sendo estes baseados nos fatores de risco presentes nos relatórios de segurança. Estudos indicam que as quedas em obra representam cerca de 30% das fatalidades na construção. Espera-se a redução destes números com o aumento da capacidade dos trabalhadores através da aprendizagem no reconhecimento de perigos e na percepção de risco. Desta forma, foram desenvolvidos 6 cenários virtuais relacionados com o risco de quedas, como pode ser visto na figura seguinte.

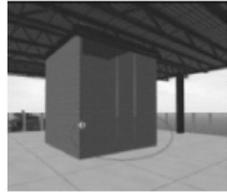
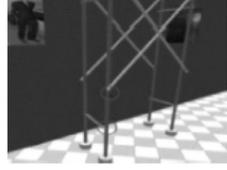
1	Fall into elevator opening (story 5)	While moving material using the elevator, the workers removed the fences around the opening and they forgot fit up them again	<ul style="list-style-type: none"> – Protective barrier type – The position and dimension barrier covering opening (OSHA 1910.23(a)) 	
2	Fall from height to below (story 3)	The workers detached the exterior cover wood barrier to install aluminium frame and glass. Although the installation task was not finished, the worker did not set up the protection in work area	<ul style="list-style-type: none"> – Spacing between vertical members of protection barrier – Temporary railing standard (height, space) (OSHA 1926.500(b), 501(b)) 	
3	Fall due to the scaffold collapse (front of building)	The lack of pin connection between two bottom bars in scaffold because of workers' carelessness during the installation	<ul style="list-style-type: none"> – Scaffold type, dimension, material – Installation method (OSHA 1910.28(a => v)) 	
4	Fall from stair (stair from story 3 to story 4)	After finishing an exit stair from story 3 to story 4, the worker didn't fit up temporary handrail protection	<ul style="list-style-type: none"> – Stairway railings and guards rule (handrail height, material, etc) (OSHA 1910.23(d)) 	
5	Fall into stair opening (story 4)	While waiting to pour concrete for the cover wall of stairway, the worker did not install protection fences around the hole	<ul style="list-style-type: none"> – Covering formwork for stair hole (formwork area, material, etc) (OSHA 1910.23) 	
6	Fall from scaffold to below (story 7)	Missing protective horizontal beam on the scaffold due discomfort when working on scaffolding	<ul style="list-style-type: none"> – Scaffold type, dimension, material – Installation method (OSHA 1910.28 (a=>v)) 	

Fig. 3.21 – Cenários virtuais do ECSSES [41]

3.4.2.3. Implementação do Sistema

Antes de iniciar o módulo SKD, os alunos são apresentados aos equipamentos de proteção pessoal e à sua importância em termos de segurança na construção. A utilização de dispositivos móveis permite a visualização destes equipamentos sobrepostos nos estudantes e esta abordagem interativa vai permitir a aquisição de conhecimentos dos mesmos. O objetivo deste processo passa pela aprendizagem na identificação de perigos e na utilização dos respetivos equipamentos de proteção em consonância com os regulamentos de segurança e pode ser visualizado na figura 3.22.

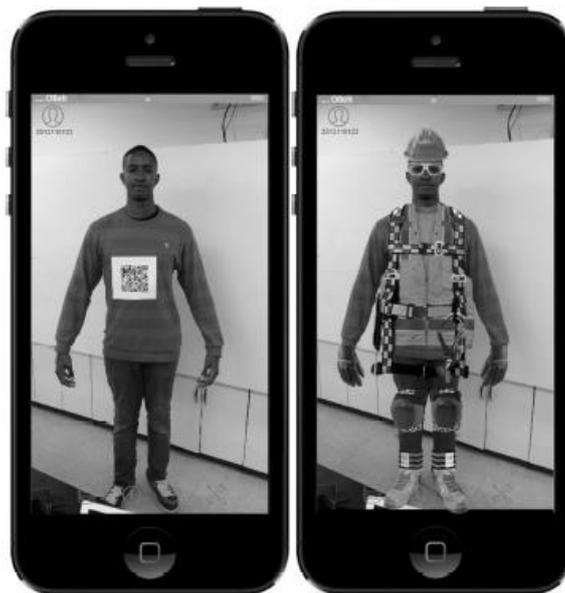


Fig. 3.22 – Demonstração dos EPI's com a utilização da RA [41]

De seguida, os estudantes têm a possibilidade de aceder a cenários virtuais que representam diferentes atividades específicas de construção. Estes cenários focam casos de acidente envolvendo quedas de trabalhadores e estas experiências permitem aos formadores explicar as causas e apresentar as medidas corretivas de acordo com os requerimentos estabelecidos. A figura 3.23 demonstra um desses casos de acidentes analisados.

Depois deste procedimento, os estudantes têm a oportunidade de refletir sobre os conhecimentos adquiridos num ambiente virtual através de dispositivos móveis. É explicado aos utilizadores, a tarefa de inspeção e de que forma pode ser utilizado o dispositivo para a sua execução, seguido da apresentação de estratégias de mitigação. Após esta orientação, é requerido aos estudantes o reconhecimento de perigos nos 6 cenários criados anteriormente.



Fig. 3.23 – Representação de um acidente em obra envolvendo uma queda [41]

Por fim, os formadores vão testar os conhecimentos de segurança e a capacidade de identificação de perigos e percepção de risco dos estudantes. Com o emprego de RV e RA, os participantes foram avaliados num jogo com um questionário de escolha múltipla sobre processos e equipamentos na prevenção de acidentes e gestão de segurança.

Esta abordagem permite aos estudantes a visualização destes cenários, em vez da tradicional descrição por textos e imagens. O teste apresenta vários níveis de dificuldade e os resultados dos participantes serão armazenados na base de dados do perfil de cada utilizador. Com base nestes resultados, o sistema reconhece quais os temas que cada estudante se deve focar mais em termos de segurança na construção.



Fig. 3.24 – Representação de uma questão teórica do teste do ECSES [41]

3.4.3. AVALIAÇÃO E RESULTADOS

De forma a determinar os benefícios e as limitações deste sistema, o esquema de avaliação da figura seguinte foi desenvolvido.

Esta avaliação inclui duas partes. Na primeira parte, os formadores apresentam uma aula sobre a utilização do sistema a 20 estudantes. Após isto, os estudantes utilizam o sistema e uma série de entrevistas e questionários são usados como teste de aplicabilidade.

Este teste divide-se em 5 critérios: facilidade de utilização, output visual, cognição, memória e acessibilidade de segurança. Os formadores e gestores de segurança fornecem, também, o seu feedback sobre a experiência. Os resultados deste questionário encontram-se na figura 3.27.

Na segunda parte, dois grupos de estudantes são formados: grupo 1 e grupo 2. O sistema apresentado será utilizado na realização de uma experiência de segurança pelo grupo 1, enquanto que no outro grupo, a experiência será realizada pelo emprego dos métodos tradicionais de prevenção de acidentes.

Após a realização desta experiência, ambos os grupos participam num teste de qualificação, que apresenta questões referidas nos regulamentos do KOSHA. Por fim, a performance dos estudantes é analisada (resultados, tempo, *NASA task load index*, entre outros) e o sistema será avaliado com bases nestes mesmos resultados.

Os participantes reconheceram vantagens na aplicação deste sistema, como ilustra a figura 3.26. Os estudantes sentiram-se confortáveis com a utilização dos dispositivos móveis com a sobreposição de informação para identificação de informações dos fatores de risco. Os módulos SKR e SKA foram considerados cativantes e de fácil compreensão e o emprego da RV e da RA foi considerado de grande utilidade em relação aos métodos tradicionais de aprendizagem.

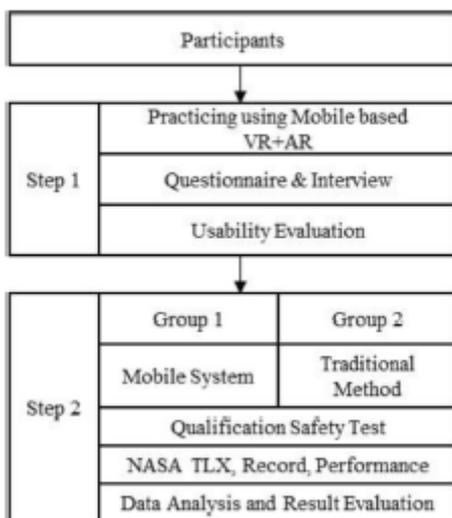


Fig. 3.25 – Esquema de avaliação do ECSES [41]

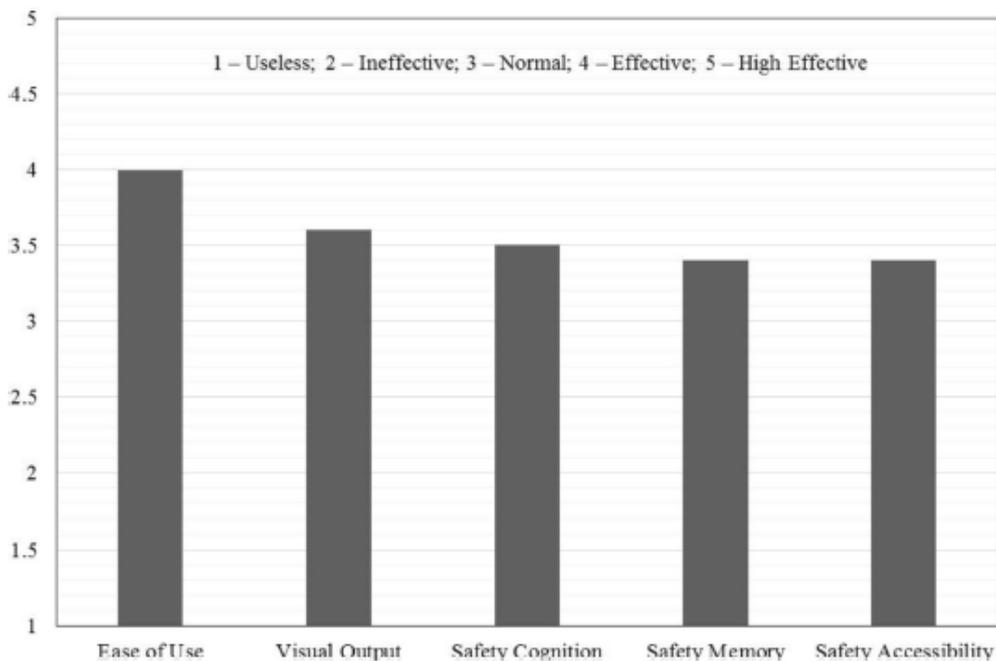


Fig. 3.26 – Resultados da avaliação de eficiência do ECSES [41]

1. Ease of Use (Sensory)		
Did you feel comfortable when interacting with the screen of the mobile system?	4.2	Very comfortable Very high score illustrates that users felt comfortable when using the mobile interface for learning.
Did you find the system easy to use? It seems that users can easily familiarize themselves with using the smart device to operate the system.	3.8	Neutral
2. Visual output (Sensory)		
How real do the VR and AR contents appear on mobile devices?	3.7	High The virtual contents reflects close-to-reality with real construction site which impressed the users.
Is the information provided in the system clear?	3.5	Clear The system provides users with adequate safety information via its constituent modules.
Did the system reflect practical construction experience?	3.6	Normal The virtual scenarios satisfied the educational purpose; however, some scenarios seemed not to reflect practical experiences.
3. Safety Cognition (Cognitive)		
Was the safety content of the system helpful in safety cognition?	3.8	Helpful Users felt that the safety content can provides them with a good cognition on how important of construction safety is.
Did you believe the system could improve hazard recognition in a real construction site?	3.2	Neutral It seems that the VR and AR contents of the system can support users to identify potential hazards in real construction site.
4. Safety Memory (Affective)		
Did you think the system could enhance your safety memory?	3.6	Satisfied The interactive and experiential features of the mobile VR+AR system engaged and motivated students to remember safety lessons.
Do you expect the mobile based VR+AR system affect your long-term memory?	3.2	Normal The neutral rating implies that experiential learning through mobile based VR+AR could support long-term memory; however, further testing of long-term memory testing is necessary.
5. Safety Accessibility (Active)		
Did you think the system enhance construction safety education effectively?	3.7	Effective The mobile system was interesting and captivating and could improve construction safety & health education.
Do you think the mobile based VR+AR system is more beneficial than tradition whiteboard based lecture?	3.1	Neutral Users felt that the system was a somewhat helpful and useful in comparison with the traditional whiteboard based lecture; however, it is necessary to use mathematical method to further evaluate the system and its classroom suitability.

1—Useless; 2—Ineffective; 3—Normal; 4—Effective; 5—High Effective.

Fig. 3.27 – Resultados do questionário do ECSES [41]

3.5. GAME TECHNOLOGY-BASED SAFETY TRAINING SYSTEM (GTSTS)

3.5.1. ESTRUTURA DO SISTEMA

Este sistema consiste numa plataforma online que permite a operação de gruas e guindastes no mesmo ambiente virtual, através de comandos de *gaming* e suporta a formação de várias atividades de construção como a instalação, cooperação e desmantelamento de gruas. Um ambiente virtual fornece representações de equipamentos e estruturas de forma a executar estas tarefas e permite a análise correta desta execução por parte dos utilizadores. A estrutura deste sistema está ilustrada na figura 3.28.

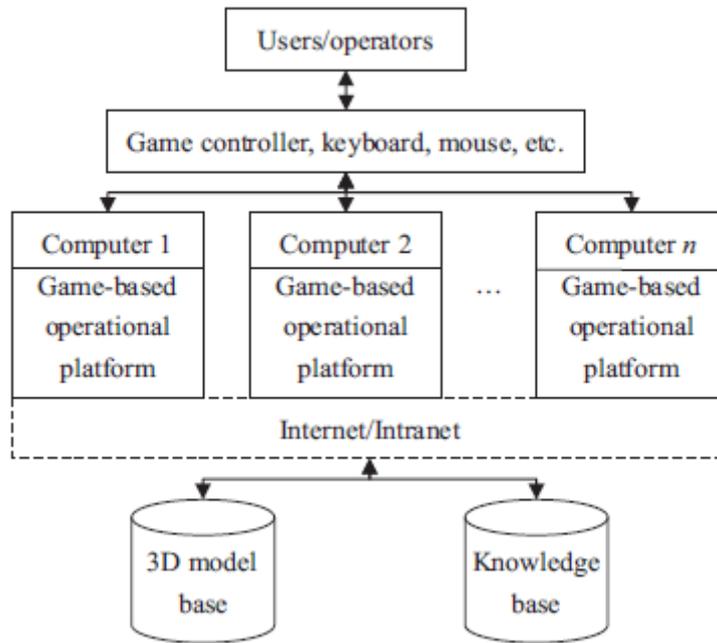


Fig. 3.28 – Estrutura do GTSTS [36]

O GTSTS fornece um ambiente virtual interativo onde os utilizadores, com comandos de *gaming*, podem mover equipamentos ou materiais de construção e comunicar de forma colaborativa entre eles, para uma tarefa de operação eficiente.

Durante estas tarefas, mensagens de aviso serão emitidas na ocorrência de acidentes ou erros; enquanto que a identificação correta de fatores de risco permite o seu registo para trabalhos futuros. Os utilizadores têm a capacidade de alterar a sua perspetiva durante a experiência, o que facilita o reconhecimento de perigos. Este sistema permite, então, a identificação de perigos e percepção de risco e a prevenção de acidentes na realização destas tarefas de construção.

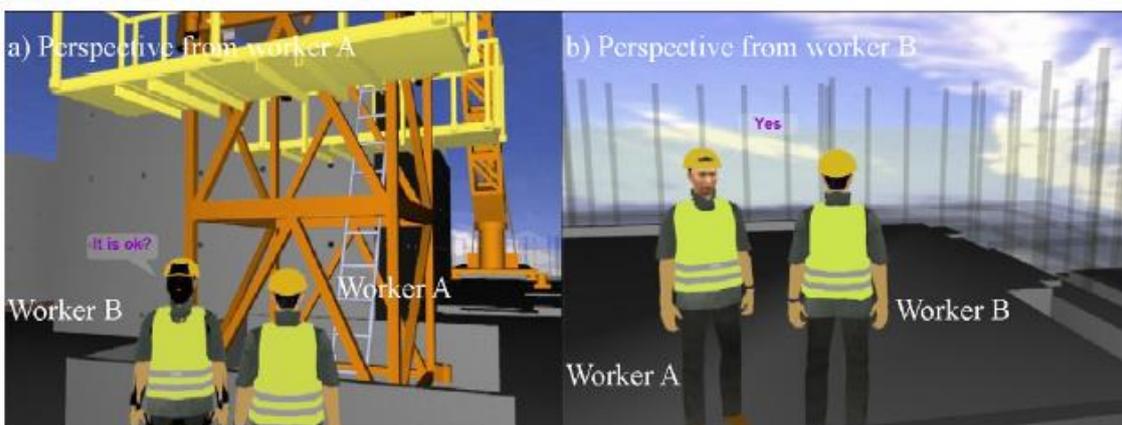


Fig. 3.29 – Capacidade interativa do GTSTS [36]

Na realização de uma tarefa por parte de um utilizador, os outros utilizadores têm a capacidade de, não só, observar a execução do primeiro, como também, podem dar uma resposta independente ou colaborativa na mesma tarefa.

A figura 3.30 demonstra uma situação onde dois utilizadores executam a mesma tarefa em simultâneo, onde situações como colisão de equipamentos podem ser prevenidas. Esta capacidade do sistema permite uma gestão de segurança eficiente em ambiente virtual.

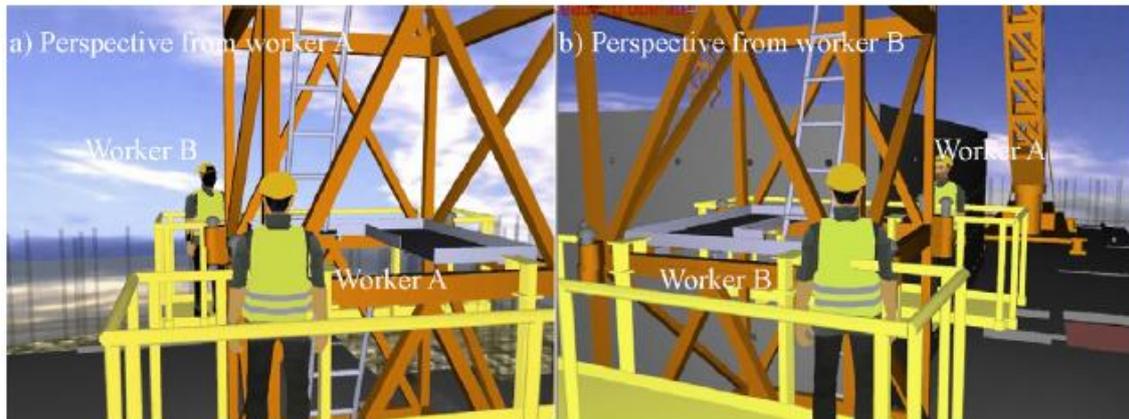


Fig. 3.30 – Simultaneidade na execução de tarefas no GTSTS [36]

Este sistema fornece cenários de resposta automática em ambiente virtual, baseados nas informações de segurança e na calendarização da construção. O processo de formação de segurança dos trabalhadores torna-se, assim, mais eficiente pela automação dos seus métodos. Ocorrência de acidentes ou colisões, incorreta execução de tarefas ou não cumprimento de prazos são situações que o sistema identifica em tempo real e aumenta a segurança dos utilizadores.

3.5.2. CASO DE ESTUDO

3.5.2.1. Configuração do Sistema

Este sistema foi desenvolvido pelo motor de jogo *3DVIA Virtools*, que fornece um ambiente virtual e uma plataforma multiutilizador interativa para os utilizadores. Esta tecnologia caracteriza-se pela interação dos utilizadores enquanto realizam as operações projetadas e pelas ferramentas visuais fornecidas.

3.5.2.2. Implementação do Sistema

O processo de desmantelamento de guias numa obra foi utilizado para a demonstração da aplicabilidade do sistema. Uma grua (T2) foi utilizada para o desmantelamento de outro equipamento (T1), sendo este processo descrito de seguida:

- Conexão de cabos de aço anexados ao gancho do equipamento da grua T2 a um elemento da grua T1;
- Desparafusamento do elemento da grua T1;
- Elevação do elemento da grua T1 e colocação do mesmo no local desejado.

Para realização destas tarefas, é necessária a interação entre três trabalhadores. O primeiro tinha a função de manobrar a grua T2, enquanto que os outros dois utilizadores prestavam assistência nas outras tarefas. Estes apresentavam grande competência na operação de guias de construção e este sistema permite treino de formação envolvendo as três tarefas.

3.5.2.3. Personificação dos Comandos de *Gaming*

Para suporte do processo de formação foram empregues comandos da *Nintendo Wii* e o teclado de um computador. Estes comandos são bastante comuns, existindo uma grande possibilidade de os trabalhadores se familiarizarem com a sua utilização e apresentam, também, mais funções que outros equipamentos semelhantes.

Cada botão dos comandos apresentava funções diferentes, dependendo da tarefa que cada utilizador realizou. As figuras 3.31, 3.32 e 3.33 apresentam essas funções pela atribuição de tarefas de cada utilizador. O Op1 é o trabalhador que manobrou a grua T2, enquanto que o Op2 se descreve como o utilizador que executou o desmantelamento do elemento. Por fim, o Op3 tinha a função de libertar os elementos desmantelados pela grua T2.



Fig. 3.31 – Instruções do comando para o Op1 [36]

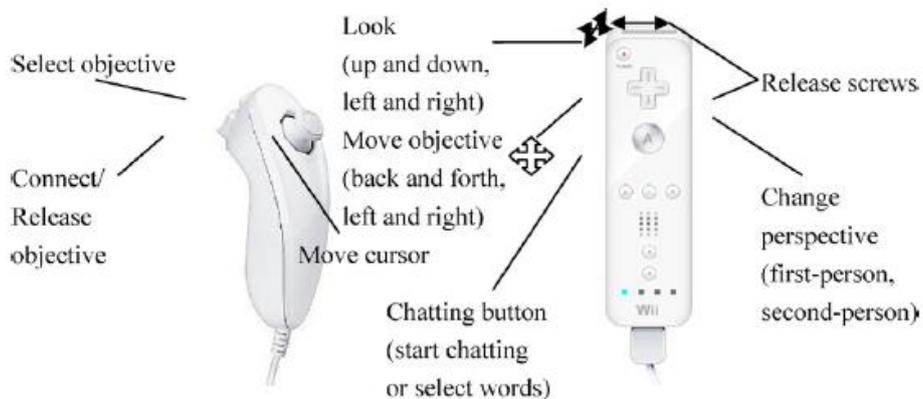


Fig. 3.32 – Instruções do comando para o Op2 [36]

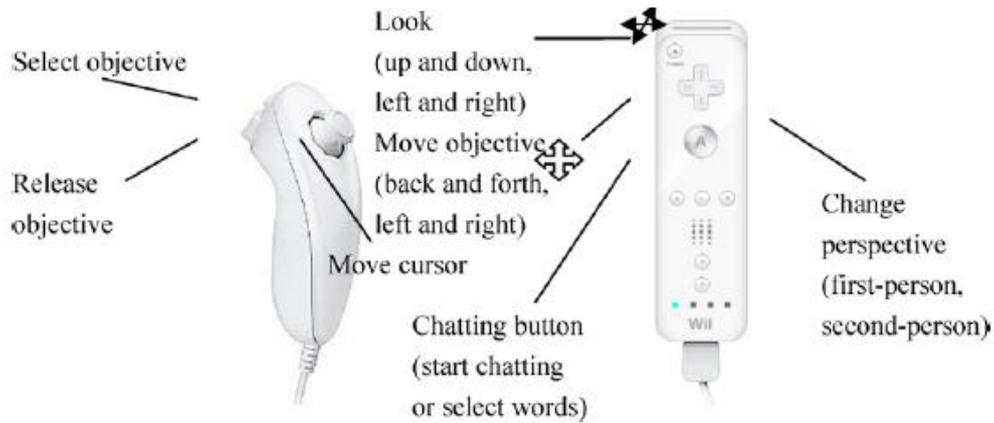


Fig. 3.33 – Instruções do comando para o Op3 [36]

3.5.2.4. Processo de Formação do Sistema

Este processo inicia-se pelo acesso dos três utilizadores ao mesmo ambiente virtual, através do seu computador. O Op1 executa a operação do T2, onde o gancho do equipamento foi movido até à localização apropriada, enquanto que o Op2 se deslocou para a área de atividade respetiva. A comunicação entre ambos permitiu a notificação automática dos problemas de segurança existentes, onde se discutiu possíveis soluções e alterações necessárias.

Quando o Op2 se encontrava numa posição relativamente próxima ao elemento, os pontos de ligação são destacados pelo sistema. A figura 3.34 ilustra esta situação.

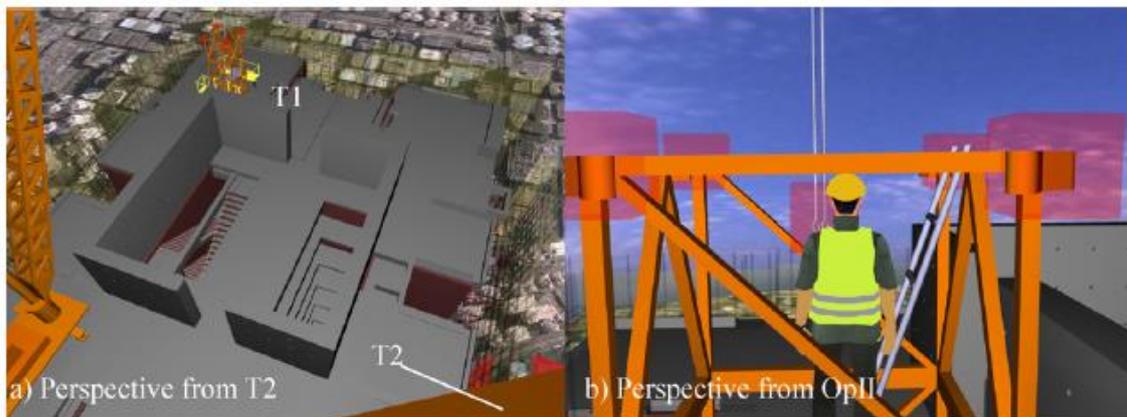


Fig. 3.34 – Destacamento virtual do elemento da grua T1 para conexão dos cabos da grua T2 [36]

Posto isto, o Op2 seleccionou um cabo de aço e permitiu a ligação automática deste ao elemento. A repetição deste processo permitiu a ligação correta dos cabos ao elemento seleccionado, como se pode observar na figura 3.35.

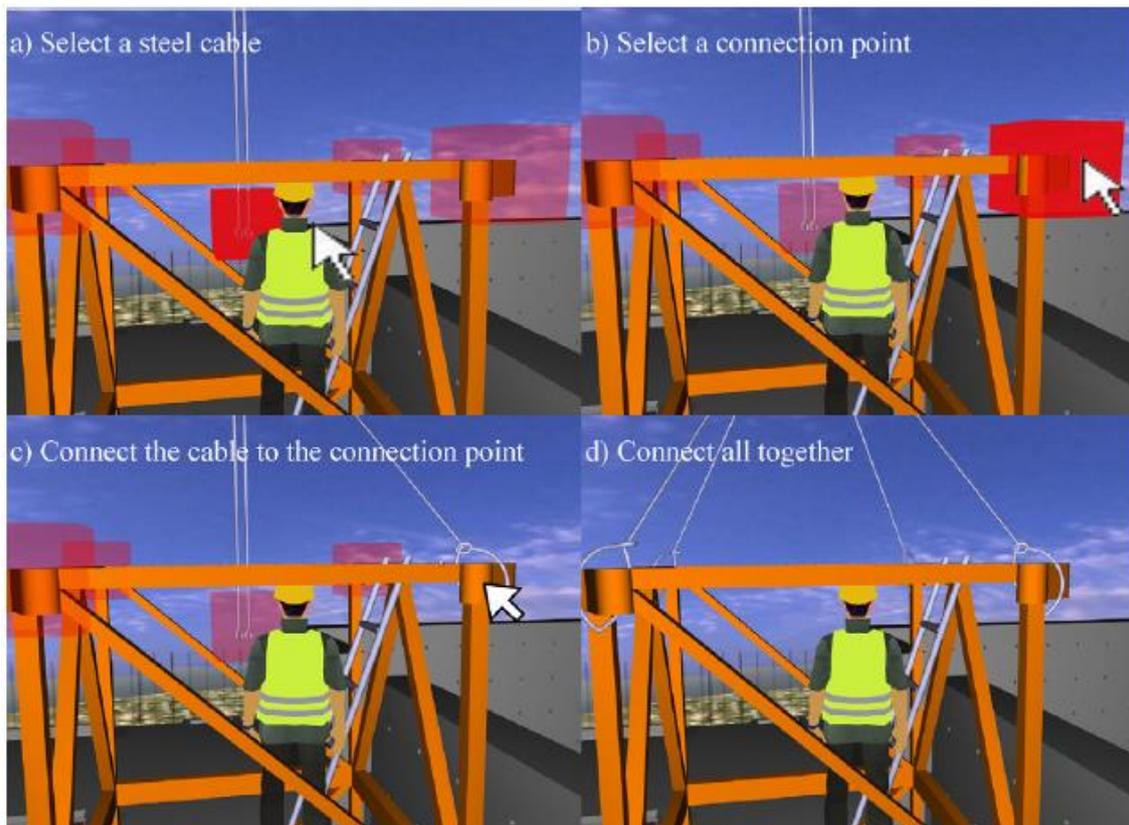


Fig. 3.35 – Processo de conexão do cabo da grua T2 ao elemento da grua T1 [36]

Posteriormente, o Op2 executou o desaparafusamento do elemento, de forma a garantir que este elemento se encontrava seguro ao equipamento T2. A prevenção de problemas de segurança permitiu ao Op2 a identificação correta da sequência construtiva de desmantelamento e o reconhecimento de potenciais riscos associados.



Fig. 3.36 – Desaparafusamento do elemento da grua T1 [36]

Após esta situação, o Op2 deslocou-se para a área de segurança, de forma a se proceder à elevação do elemento e colocação na localização desejada. O sistema não permite a realização desta tarefa, enquanto o Op2 não tenha alcançado a área de segurança. Após a elevação do elemento, o sistema verificou o percurso que seria efetuado e possibilidade de ocorrência de colisões foi destacada. O Op1 tem a capacidade de alterar este trajeto até este ser considerado seguro, e desta forma, os dois trabalhadores identificam potenciais fatores de risco associados a esta tarefa. Por fim, o Op3 liberta o elemento e este processo foi repetido até ao desmantelamento de todos os elementos da grua T1.

Após o encerramento da experiência, os trabalhadores afirmaram que o processo de treino foi facilmente compreendido e que o reconhecimento de fatores de risco na execução de tarefas de desmantelamento foi eficiente. Os destaques fornecidos pelo sistema foram, também, considerados como úteis pelos utilizadores.

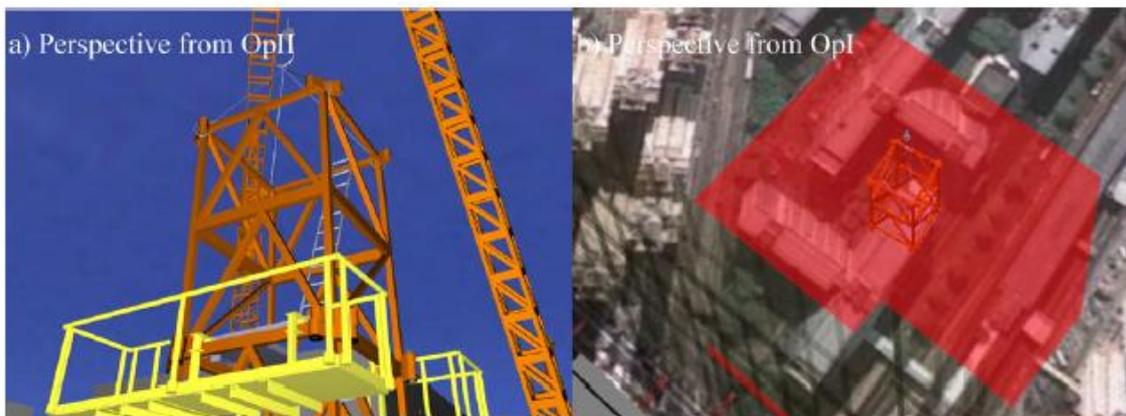


Fig. 3.37 – Elevação e colocação do elemento na localização desejada [36]

3.5.3. AVALIAÇÃO E RESULTADOS

A avaliação deste sistema consiste na comparação entre os métodos tradicionais de treino de desmantelamento e a formação com a utilização desta plataforma. Procedeu-se a uma entrevista e um questionário a 15 trabalhadores que realizaram o treino com o sistema GTSTS.

Consideraram-se cinco projetos de construção, onde diferentes tarefas de construção foram selecionadas. Operações envolvendo guias, guindastes e equipamentos de estacas foram consideradas e os critérios de avaliação foram os seguintes: reconhecimento das operações executadas; identificação dos fatores de risco; prevenção dos fatores de risco e melhoria no processo de operação. Os resultados encontram-se na figura 3.38 e demonstram uma clara melhoria com a utilização do sistema GTSTS, em comparação com os métodos tradicionais de formação.

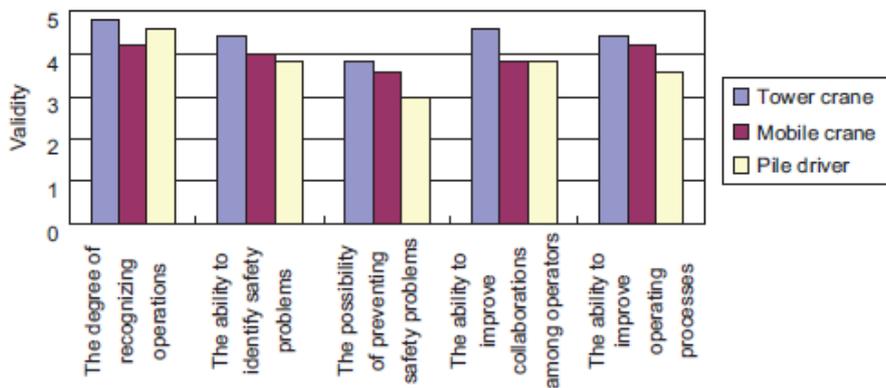


Fig. 3.38 – Resultados da avaliação do GTSTS [36]

3.6. SIMCRANE 3D+

3.6.1. ESTRUTURA DO SISTEMA

Este sistema foi implementado com a utilização da visão cinestésica e visão estereoscópica, no qual existe a criação de uma grua associada a características físicas num ambiente virtual de construção. Este sistema consiste em três módulos principais: o simulador, visão cinestésica e visão estereoscópica, como ilustra a figura 3.39.

O simulador foi desenvolvido com a inclusão de modelos de uma grua, de uma obra e de um edifício de construção, sendo que estes modelos foram desenvolvidos pela ferramenta *Microsoft XNA*. A integração de um motor físico forneceu ao modelo dinâmicas, de forma a que o modelo tenha capacidade de simular movimentos destes equipamentos em ambiente virtual.

O módulo de visão estereoscópica consiste no programa SVM (*stereoscopic vision method*), na utilização de um monitor e de uns óculos 3D. O SVM gera informações visuais dos cenários virtuais e transmite-a para os dispositivos 3D. O utilizador pode visualizar estas imagens nos dispositivos com a utilização dos óculos 3D.

O módulo de visão cinestésica emprega o KVM (*kinesthetic vision method*) para processamento de informação continuado através de um sensor de movimento. Desta forma, o ponto de vista e a orientação dos utilizadores são constantemente calculados e estes podem visualizar o ambiente virtual da perspetiva correta de diferentes pontos de vista.

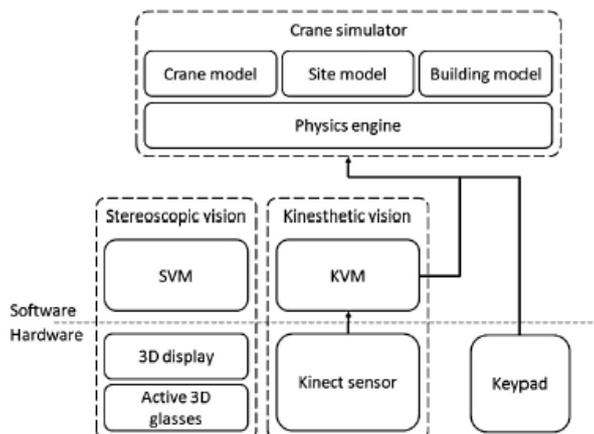


Fig. 3.39 – Estrutura do *SimCrane 3D+* [42]

3.6.1.1. Módulo de Visão Cinestésica

De forma a implementar a visão cinestésica, é necessária capturar a posição dos utilizadores relativa ao monitor. Neste estudo utilizou-se o sensor *Microsoft Kinect* para captura da posição dos utilizadores e fornecimento de informação. Esta informação será, posteriormente, convertida para o modelo. Apenas se utiliza a informação referente à posição da cabeça do utilizador para cálculo da perspetiva adequada. O sensor integra esta informação recuperada e fornece dados mais profundos.

O sensor Kinect pode ser instalado no topo ou na base do monitor de acordo com a altura do participante, sendo que se considerou o centro vertical do corpo, a posição mais apropriada. Este sensor deve, também, ser instalado no centro horizontal do monitor e o centro vertical do mesmo deve ser corretamente medido. A posição da cabeça proveniente do sensor é a posição do centro da cabeça, e esta deve ser medida entre os olhos do utilizador e o centro da cabeça.

Este método foi validado através de uma simples experiência, demonstrada na figura 3.40. Uma mesa foi simulada em ambiente virtual com as mesmas dimensões da figura real, e uma maçã virtual foi colocada do outro lado da mesa. Na figura 3.41, é possível visualizar os resultados dos diferentes movimentos do utilizador através de uma câmara instalada na sua cabeça. Os resultados indicam que o sistema tem capacidade de registar corretamente as diferentes perspetivas no monitor de acordo com a posição da cabeça do utilizador.

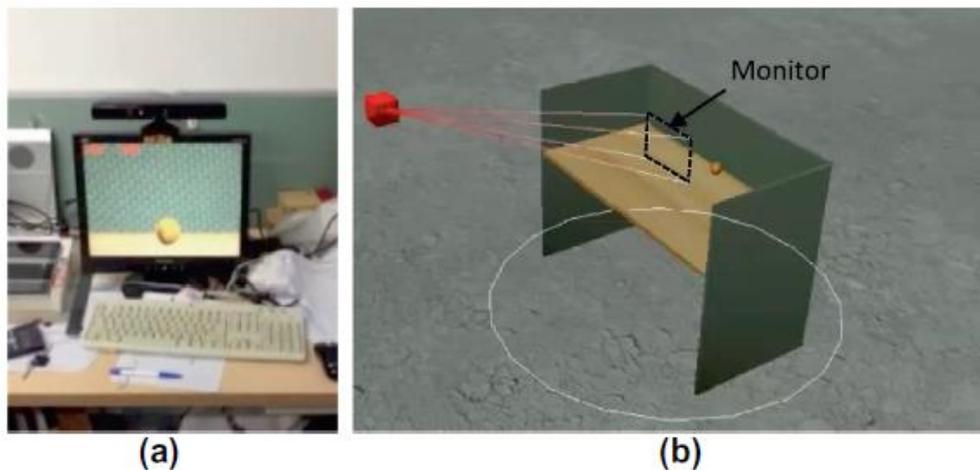


Fig. 3.40 – Cenário experimental para a visão cinestésica: a) figura real; b) figura virtual [42]



Fig. 3.41 – Resultados da experiência para a visão cinestésica [42]

3.6.1.2. Módulo da Visão Estereoscópica

Para implementação da visão estereoscópica, integrou-se no sistema a tecnologia *NVIDIA 3D Vision*. Esta abordagem fornece resolução total para ambos os olhos e qualidade para qualquer ângulo de visão. O hardware utilizado encontra-se representado na figura 3.42.

Na figura 3.43, encontram-se representados cenários com visão cinestésica e visão estereoscópica, onde as imagens desfocadas são, na realidade, duas imagens sobrepostas. Os óculos 3D permitem a penetração de luz em sincronização com as imagens 3D dispostas. Permitem, também, a correspondência das imagens com cada olho do utilizador e a sua respetiva perceção. Desta forma, são reduzidas as diferenças entre o ambiente virtual e o mundo real e a formação dos trabalhadores é melhorada.

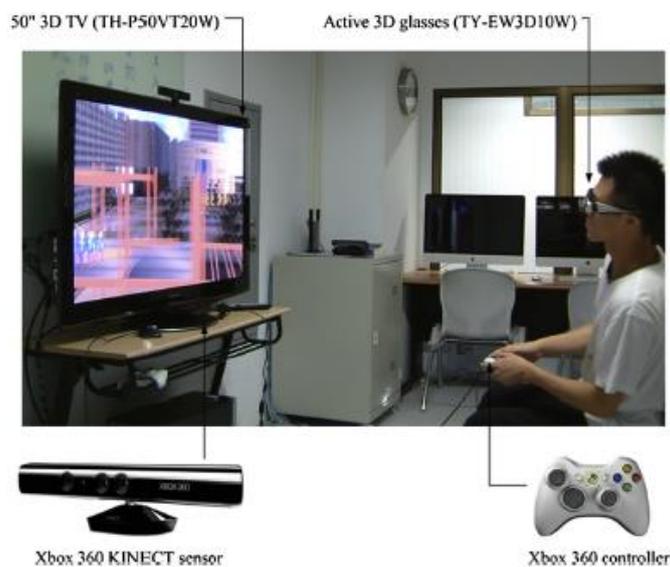


Fig. 3.42 – Hardware do *SimCrane 3D+* [42]



Fig. 3.43 – Utilização da visão cinestésica e da visão estereoscópica [42]

3.6.2. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

Para validação do sistema, procedeu-se a testes de performance por parte dos utilizadores. Considerou-se a utilização uma grua e a criação de três cenários para esta experiência. A figura 3.44 ilustra estes três cenários: na figura (a) criou-se uma área sem objetos de referência; na figura (b) representou-se a mesma área com objetos de referência; enquanto que na figura (c), a área continha obstáculos. Os objetos de referência são elementos estruturais que são, usualmente, utilizados pelos trabalhadores para determinação da distância e localização dos objetos elevados.

A experiência foi realizada em dois modos: no primeiro utiliza-se um ambiente virtual tradicional, enquanto que no segundo, o ambiente virtual contém visão cinestésica e visão estereoscópica. Em cada tarefa, o utilizador tinha de elevar o objeto e colocá-lo na localização pretendida.

Existem quatro passos principais desta experiência:

- Elevar o objeto até a altura exigida;
- Percorrer a área até à localização pretendida;
- Colocação do equipamento no solo à distância adequada do objetivo;
- Se o objeto se encontrar na localização pretendida, largar o objeto. Se o objeto não se encontrar na posição pretendida, repetir os passos até se atingir os objetivos.

3.6.3. AVALIAÇÃO E RESULTADOS

Durante esta avaliação, dois parâmetros foram registados para cada tarefa: o tempo gasto na experiência e a ocorrência de erros de julgamento, que representa o número de vezes que se repete o terceiro passo da experiência. Esta situação ocorre quando a distância entre o objeto e o objetivo foi calculada incorretamente.

Após a execução das tarefas, realizou-se um questionário, de forma a registar as opiniões dos participantes. Este processo baseou-se em seis fatores: confiança dos trabalhadores, exigência física da experiência, intuição, conforto, performance e frustração. Os participantes forneceram, também, o seu feedback, sugestões ou comentários à utilização do sistema.

Foram avaliados 30 participantes, incluindo estudantes formados e estudantes em formação. Todos os participantes apresentavam contacto com a indústria de construção, apesar de não apresentarem experiência com gruas.

As figuras 3.45 e 3.46 apresentam os resultados da execução das tarefas de cada modo. Os participantes apresentaram menos erros de julgamentos no caso 2 do que no caso 1, enquanto que o tempo consumido foi similar para os dois modos.

No caso 2, a existência dos objetos de referência permitiu julgamentos mais cautelosos, o que levou a um maior consumo de tempo. A utilização da visão cinestésica e da visão estereoscópica permite aos utilizadores evitarem obstáculos enquanto executam as tarefas projetadas.

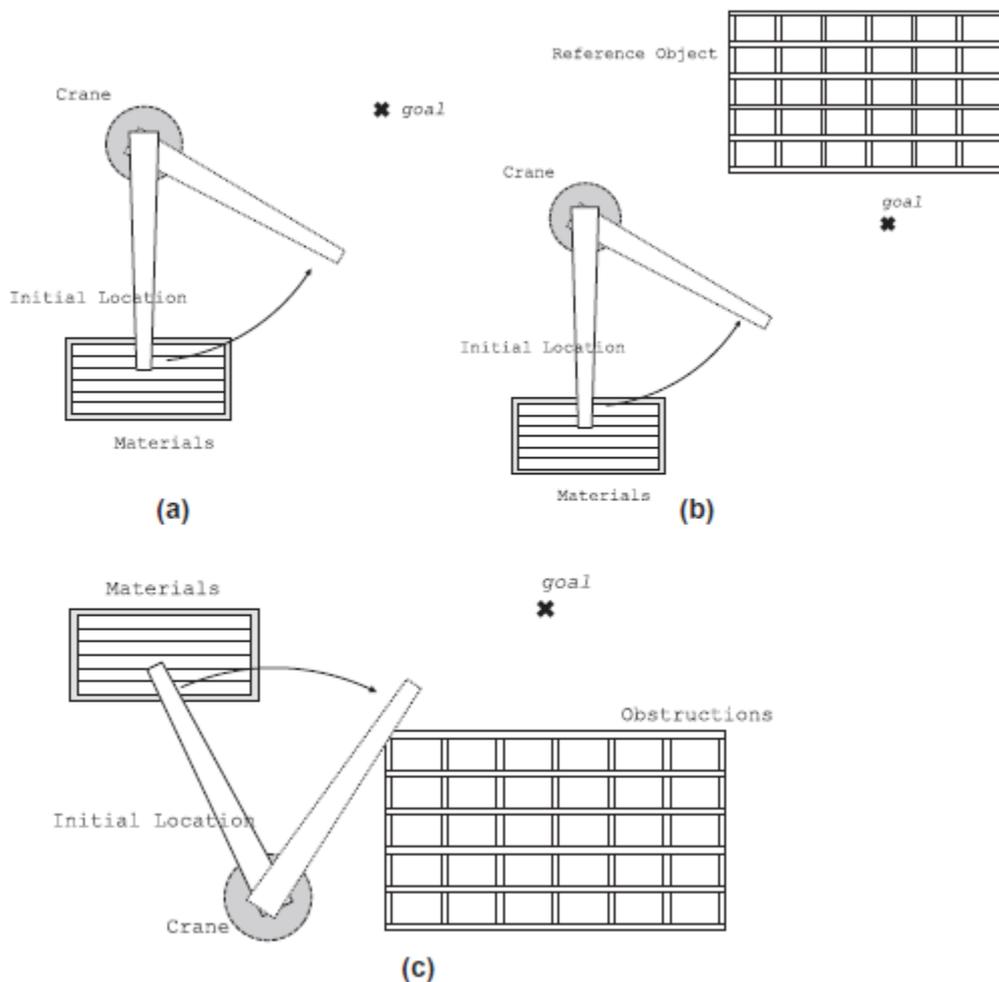


Fig. 3.44 – Cenários experimentais do *SimCrane 3D+* [42]

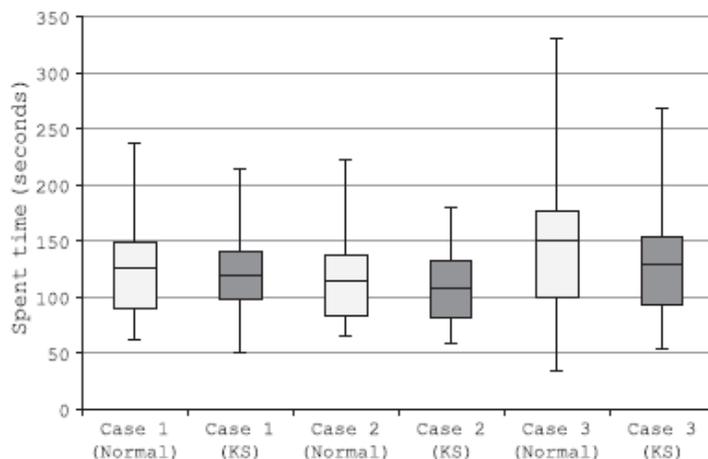


Fig. 3.45 – Resultados da experiência em termos de tempo consumido [42]

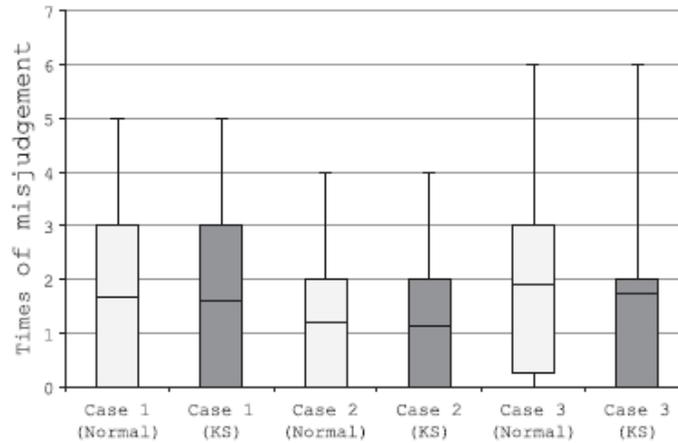


Fig. 3.46 – Resultados da experiência em termos de erros de julgamento [42]

A figura 3.47 ilustra os resultados do questionário feito aos estudantes, e os resultados revelam que os fatores de confiança, intuição e performance apresentam valores mais favoráveis no caso 2, enquanto que o caso 1 apresenta melhores resultados em termos de exigência física e conforto. A frustração apresenta valores baixos nos dois modos.

Estes resultados demonstram que os utilizadores sentiram o ambiente virtual mais intuitivo e realístico com o emprego da visão cinestésica e visão estereoscópica, logo os seus níveis de confiança foram mais altos neste modo. A perceção de profundidade adicional neste modo levou a uma tomada de decisão e execução das tarefas mais rápida, embora o rácio de erro de julgamento tenha sido similar nos dois casos. Isto demonstra que os utilizadores devem adaptar métodos diferentes na execução das tarefas, dependendo das características do ambiente virtual fornecido.

Revela, também, que os participantes nesta experiência não devem transferir, para uma área de atividades real de construção, as competências adquiridas no modo tradicional, pelo reduzido grau de perceção de profundidade empregue.

Em relação à exigência física, foi necessária maior adaptação à visão estereoscópica, pelo aumento de ocorrência de fadiga visual. A maior demora na resposta da visão cinestésica, quando o participante se move muito rápido, também perturba a execução correta das tarefas.

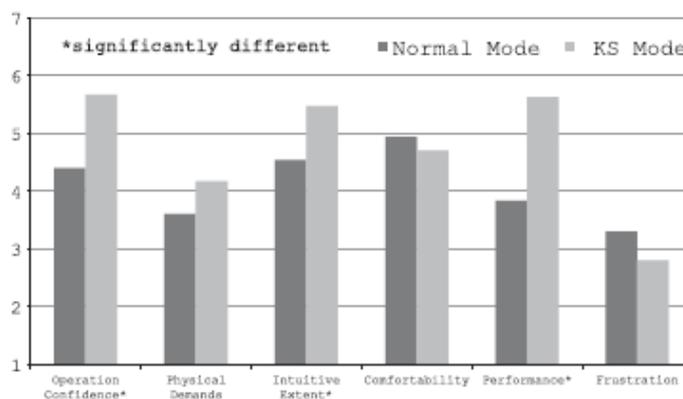


Fig. 3.47 – Resultados do questionário do *SimCrane 3D+* [42]

3.7. CoVR: CLOUD-BASED MULTIUSER VIRTUAL REALITY HEADSET SYSTEM

3.7.1. ESTRUTURA DO SISTEMA

O *CoVR* caracteriza-se por ser um sistema multiutilizador de RV baseado na utilização de uma *cloud*, que combina informação de modelos BIM e as converte em ambientes virtuais, de forma a melhorar a comunicação entre os intervenientes de um projeto de construção. Ao contrário dos tradicionais sistemas em ambiente virtual, *CoVR* é um sistema que fornece um ambiente virtual interativo multiutilizador, no qual os intervenientes do projeto têm a capacidade de comunicar em simultâneo entre eles.

BIM é a fonte principal de informação e o motor de jogo processa essa mesma informação e facilita as interações dos utilizadores com o servidor. A *cloud networking* permite a conexão remota dos utilizadores no sistema e serve como plataforma para tratamento de informação. Os movimentos e ações dos utilizadores são sincronizados no ambiente virtual imersivo para uma melhor interação interpessoal.

A figura 3.48 ilustra a forma como este sistema funciona, em particular o fluxo de informação desde os modelos BIM até ao motor de jogo. Este sistema divide-se em cinco *layers*: BIM, *middleware*, motor de jogo, utilizador e *cloud networking*. Estes *layers* facilitam o fluxo de informação da base de dados até chegar aos utilizadores. A informação presente nos modelos BIM é transferida para o *middleware* em ficheiros FBX, sendo estes, posteriormente, enviados para o motor de jogo. As interações são sincronizadas através de procedimentos via *net clouding* com a utilização de RPC (*remote procedure call*), um protocolo que permite o requerimento de um serviço de um programa instalado noutro computador.

Na figura 3.49, é possível observar o fluxo de trabalho do sistema *CoVR*, que se inicia com a adição das expectativas e requerimentos de projeto ao design. As informações relativas à calendarização, aos custos e ao consumo de energia também se incorporam nas informações de design e a utilização de vários algoritmos permite a transferência da informação BIM para o sistema.

Existem dois modos no sistema: modo individual e modo multiutilizador. No primeiro, o utilizador tem a capacidade de navegar virtualmente pelo projeto de forma isolada e interagir com o ambiente de construção. Este pode mover objetos e alterar localizações, dimensões e aparência de elementos estruturais.

Por outro lado, o modo multiutilizador foi desenvolvido numa *cloud server*, que tem a capacidade de conectar os participantes de forma remota, no mesmo ambiente virtual. Este servidor sincroniza as informações dos vários utilizadores e permite atualizar o ambiente virtual, sendo que este processo encerra quando os intervenientes chegam a um consenso em relação a uma alteração.

3.7.1.1. Layer BIM

Como referido anteriormente, os modelos BIM apresentam-se como a principal fonte de informação deste sistema, sendo que todos os participantes introduzem as suas expectativas e os seus requerimentos de design neste módulo. As classes de informação focam os elementos de construção, custos, materiais, consumos e calendarização. Os elementos de construção armazenam as características geométricas que serão úteis para o desenvolvimento dos modelos de realidade virtual. Estas informações são dispostas nos cenários virtuais, de forma a se obter um melhor entendimento do projeto.

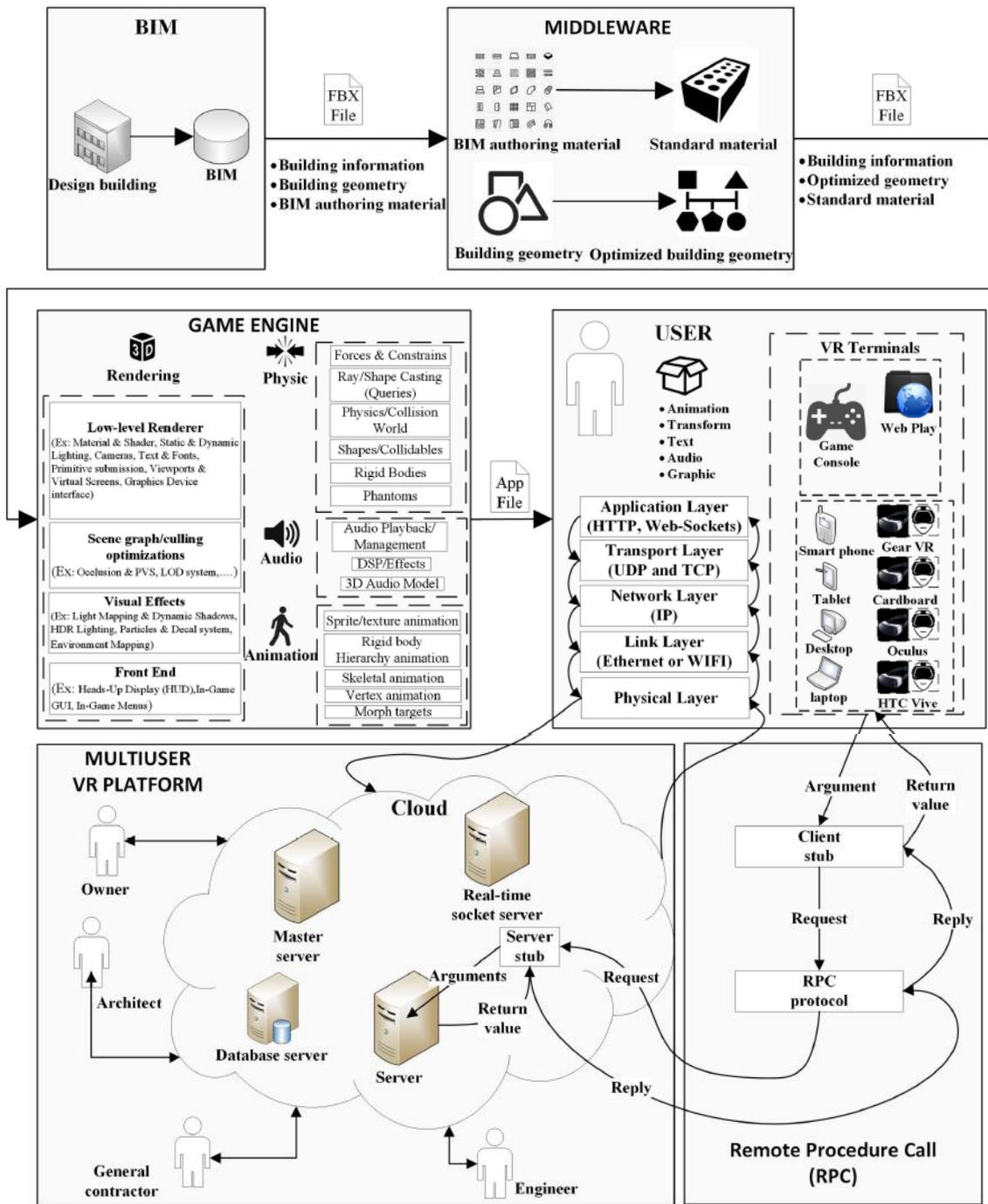


Fig. 3.48 – Estrutura do sistema CoVR [43]

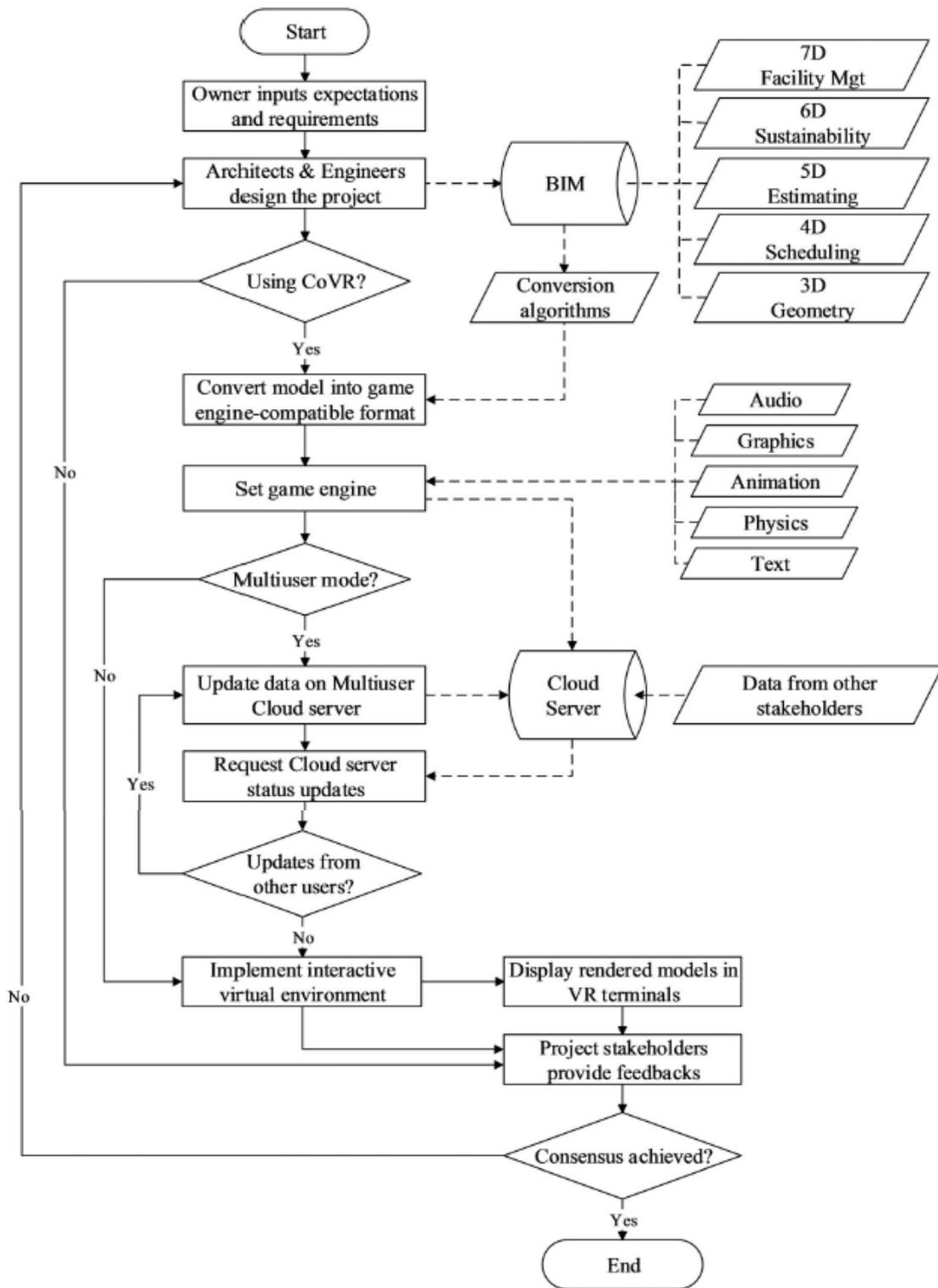


Fig. 3.49 – Fluxo de trabalho do sistema CovR [43]

3.7.1.2. Layer Middleware

Este *layer* tem como objetivo a transformação da informação presente nos modelos BIM, num formato que permita a sua utilização no motor de jogo. O *middleware* torna-se essencial na interação entre BIM e o motor de jogo do sistema. Este *layer* apresenta duas funções, sendo que

a primeira se prende na tradução da informação dos materiais. Grande parte dos motores de jogo têm a capacidade de interpretar as informações geométricas presentes nos modelos BIM, mas poucos conseguem reproduzir os materiais, sendo que o módulo *middleware* assume grande importância por esta conversão. A outra função caracteriza-se pela otimização geométrica, que vai levar a uma redução poligonal dos modelos BIM. Esta situação reduz a carga gráfica dos modelos e aumenta a velocidade de utilização do sistema.

No *CoVR*, a plataforma usada foi a *Autodesk 3DS Max* e o processo de conversão foi realizado com o AMC (atualmente chamado *Universal Material Converter*). O UMC é um *MAXscript* no *Autodesk 3DS Max*, que tem a capacidade de converter todos os materiais presentes na *Autodesk Material Library* em materiais standard. Estes materiais podem ser lidos nos sistemas de RV, de forma a serem visualizados nos cenários virtuais.

3.7.1.3. *Layer* do Motor de Jogo

Este *layer* processa as informações de construção provenientes do *layer* anterior e permite maior interatividade aos modelos do projeto. Estas interações permitem uma melhor experiência aos utilizadores. O motor de jogo apresenta 9 componentes principais: comando do utilizador, motor de *rendering*, câmara, *networking*, animações, motor físico, luz, dispositivos de *input* e dispositivos de *output*. O comando do utilizador permite movimentos básicos e rotações às representações virtuais dos utilizadores (avatars), de forma a fornecer maior realismo ao ambiente virtual.

Existem dois tipos de câmaras no sistema. Uma delas está anexada no comando do utilizador, funcionando como os olhos do avatar, enquanto que as outras são empregues para monitorização dos movimentos dos avatares e fornecem um ponto de vista geral do ambiente virtual.

As animações e o motor físico são essenciais para a criação de um ambiente virtual totalmente imersivo pela utilização de características físicas e dinâmicas. A luz também se apresenta como uma componente capaz de aumentar o realismo da experiência.

Este sistema permite a utilização de diferentes dispositivos de input (comandos, teclado, rato e sensores de movimento) para controlo dos avatares e é, também, compatível com vários sistemas operativos como o iOS, Windows e Android. Desta forma, os utilizadores podem ter acesso ao *CoVR* através de diferentes dispositivos de output como tablets, laptops, consolas ou smartphones.

3.7.1.4. *Layer* do Utilizador

Este *layer* consiste no relacionamento entre os intervenientes do projeto e a transferência de informação. O dono de obra, arquitetos e engenheiros têm a possibilidade de aceder ao sistema, sendo que se existirem mudanças no projeto, ocorre a atualização dos modelos.

O *CoVR* é uma plataforma de RV que facilita a comunicação entre os intervenientes do projeto e apresenta capacidade para dispor as informações necessárias. Dependendo dos diferentes utilizadores, o sistema deve disponibilizar, apenas, as informações de interesse para os mesmos.

3.7.1.5. *Layer* do *Cloud Networking*

Este *layer* é considerado o mais importante do sistema, pois permite a conexão dos utilizadores no mesmo ambiente virtual. Existem 5 componentes que permitem a transferência da informação

do sistema de um dos utilizadores para os outros: componente de aplicação, transporte, *networking*, ligação e física.

A componente de aplicação utiliza a tecnologia *WebSockets*, que permite a comunicação entre o terminal do utilizador e o servidor. A componente de transporte emprega TCP (*transmission control protocol*) para encapsulamento da informação e a componente de *networking* envia estas informações para a componente de ligação.

Esta encontra-se conectada com a componente física do sistema (hardware), sendo que esta transmite sinais para outros dispositivos. Os dispositivos de output executam este processo de forma inversa e atualizam o sistema. Desta forma, o *layer cloud networking* distingue o *CoVR* de outro sistema de RV.

3.7.2. CASO DE ESTUDO

3.7.2.1. Layer BIM

O *Autodesk Revit* foi utilizado como ferramenta BIM para este caso de estudo, de forma a fornecer informações geométricas ao sistema. O modelo inclui arquitetura, estrutura e sistema MEP e foi assegurado que todos os parâmetros possuem as mesmas coordenadas. A figura 3.50 ilustra o modelo BIM utilizado para este estudo.

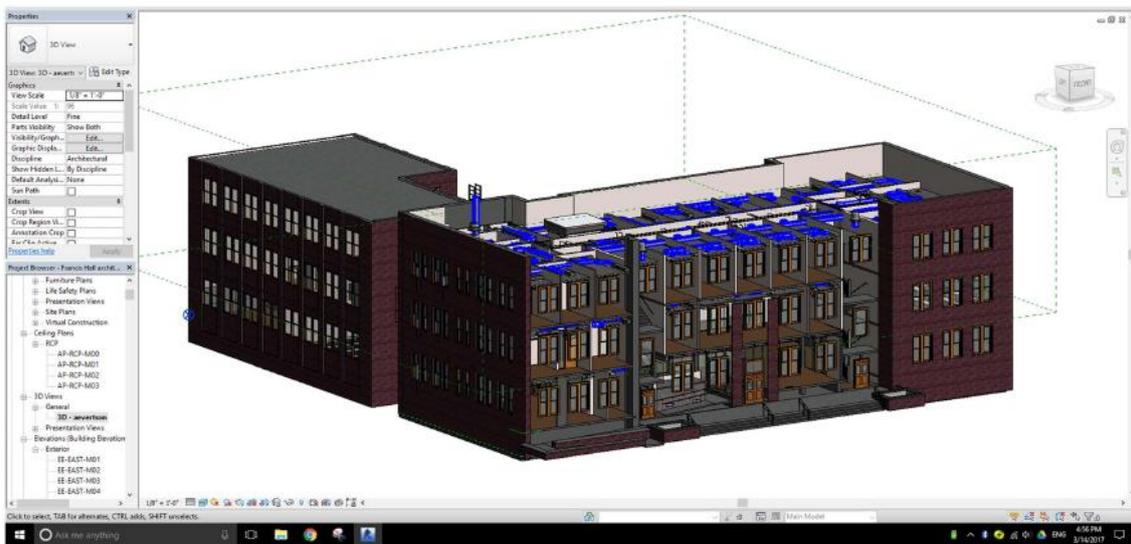


Fig. 3.50 – Modelo BIM para o caso de estudo [43]

3.7.2.2. Layer Middleware

O *Autodesk 3DS Max MAXscript* foi utilizado como ferramenta para otimizar o modelo BIM, previamente construído. O script converte as informações dos materiais tornando-os materiais standard, para que estes possam ser processados no motor de jogo. Ocorreu, também, redução poligonal no sistema para melhor resolução de realidade virtual. Os modelos pré e pós otimização do *middleware* encontram-se representados na figura 3.51.

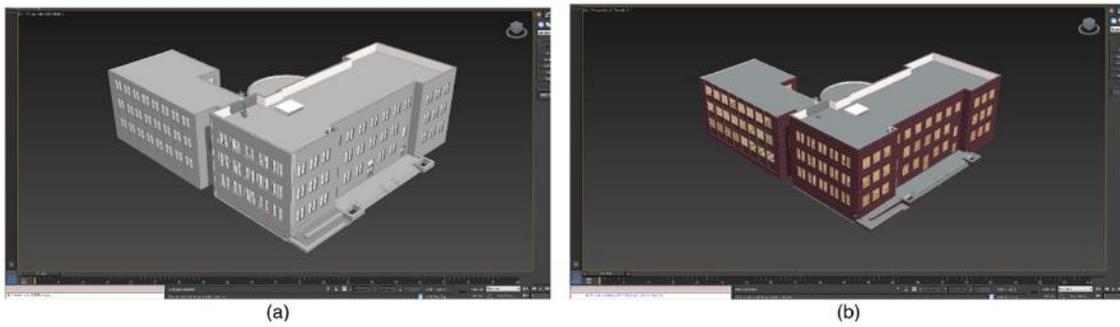


Fig. 3.51 – Otimização do modelo BIM [43]

3.7.2.3. Layer do Motor de Jogo

Neste *layer* utilizou-se o *Unity 3D 5.3.2* como motor de jogo pela sua compatibilidade com vários modelos BIM, estado ele representado na figura 3.52. Após a importação do modelo para o motor, adicionaram-se propriedades físicas aos elementos de construção. Os utilizadores têm a capacidade navegar virtualmente e explorar do edifício com o *CoVR*. Existem dois modos de representação do modelo, representação 3D e representação imersiva, que podem ser analisados na figura 3.53.

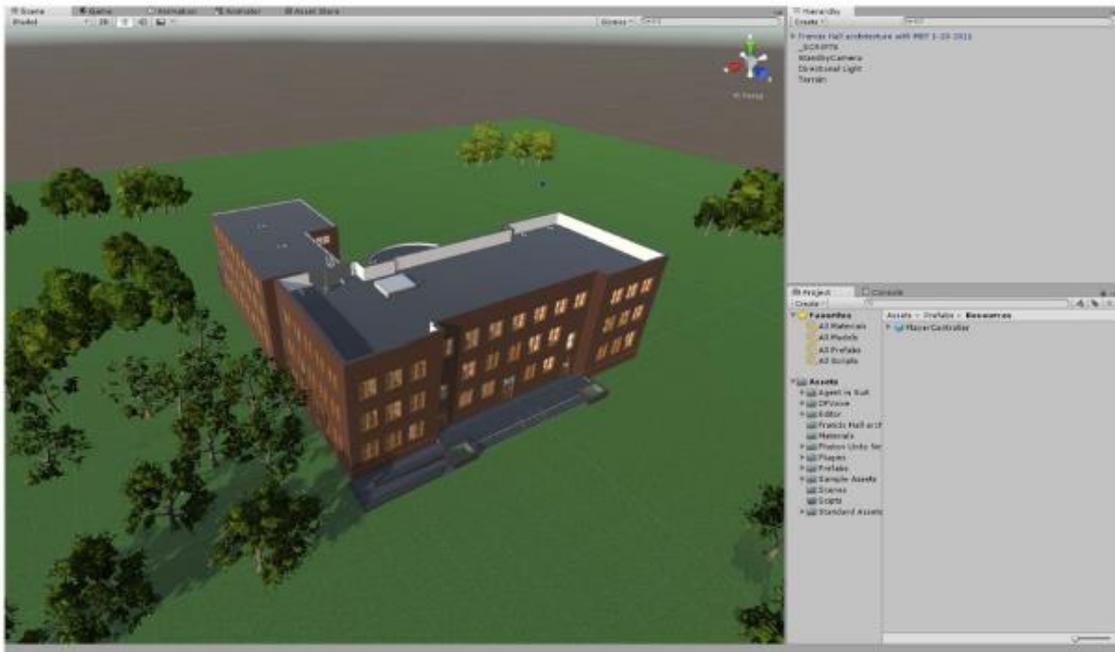


Fig. 3.52 – Modelo BIM representado no motor de jogo [43]

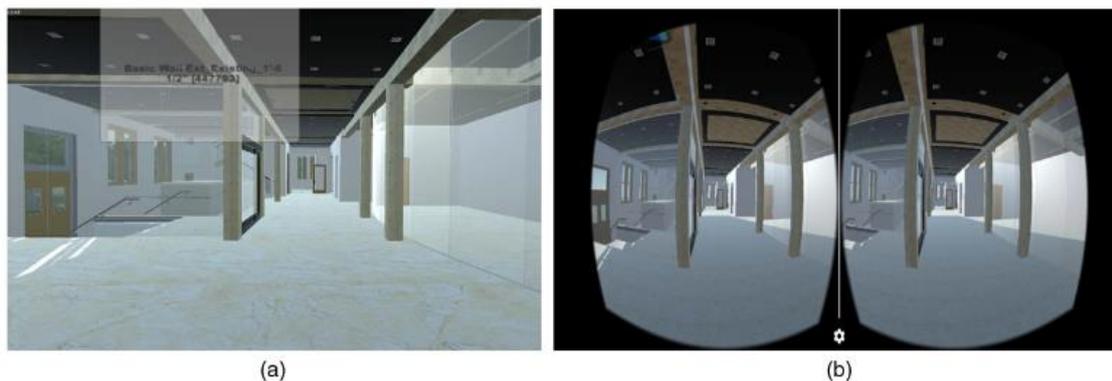


Fig. 3.53 – Modos de representação do modelo: a) representação 3D; b) representação imersiva [43]

3.7.2.4. Layer do Cloud Networking

Como *cloud server* utilizou-se o *Photon Unity Networking* (PUN) para conexão entre os utilizadores. O PUN apresenta benefícios no seu emprego, como a interface API (*application program interface*) que permite modificações na configuração do sistema. O PUN apresenta, também, vantagens por ser uma plataforma que suporta diferentes dispositivos e sistemas operativos.

Esta situação permite o acesso ao *CoVR* por diferentes dispositivos de vários utilizadores. Cada representação virtual transmite a informação para outros utilizadores, que, após receber esta informação, procedem à sua sincronização e atualizam-na com uma RPC no ambiente virtual.

3.7.3. DEMONSTRAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

3.7.3.1. Configuração do Sistema

Os exemplos anteriores pretendem demonstrar a aplicabilidade do sistema *CoVR* num projeto real. Um projeto do Francis Hall, da Universidade A&M de Texas foi usado para este caso de estudo. Este caso de estudo foi avaliado de forma a se validar a aplicabilidade do *CoVR*. Na demonstração, os equipamentos *Dell Workstation Precision Tower 5810* e *Oculus Rift Development Kit HMD 2.0* foram utilizados para teste do sistema. Os equipamentos *Oculus Rift 1.0* e *HTC VIVE* foram, também, testados.

3.7.3.2. Implementação do Sistema

Na figura 3.54 é possível observar o cenário real do Auditório Bob Segner de Francis Hall, local selecionado para teste da aplicabilidade do sistema. A figura 3.55 demonstra o modelo BIM deste local, desenvolvido em *Autodesk Revit*. Esta experiência contou com a participação de três utilizadores, onde dois utilizaram os *Oculus Rift*, enquanto o terceiro utilizou um laptop para visualização não imersiva.

Este último utilizador representava ser o dono de obra, que se encontrava insatisfeito com o design da parede exposta, enquanto que os outros dois participantes desempenhavam papéis de arquiteto e engenheiro de estruturas. O arquiteto tinha a função de renovar a parede, atendendo aos requisitos impostos do dono de obra, e o engenheiro prestava auxílio ao arquiteto na sua tarefa.



Fig. 3.54 – Auditório Bob Segner de Francis Hall [43]

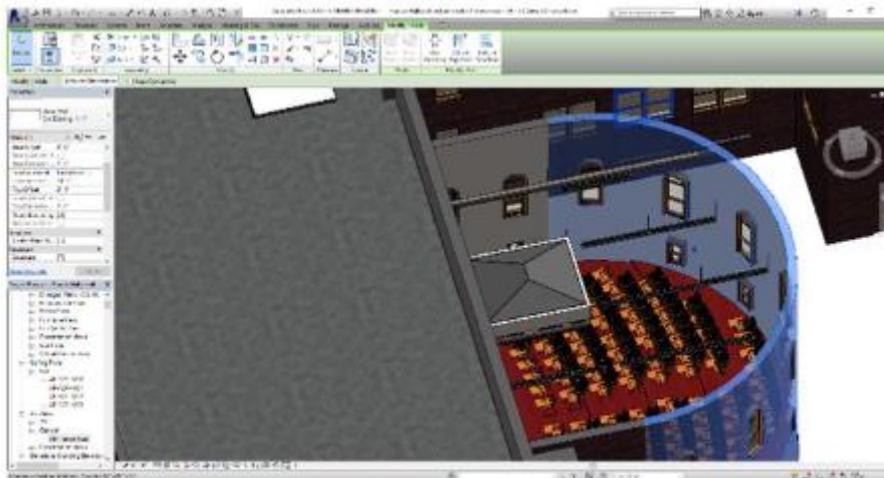


Fig. 3.55 – Modelo BIM do auditório Bob Segner [43]

Após as alterações estruturais e arquitetônicas do auditório executadas em *Revit*, o modelo foi importado para o sistema *CoVR*, onde o dono de obra expôs os componentes que necessitavam de atenção. Estes três utilizadores tinham capacidade para discutir possíveis soluções de design para a parede em estudo. O *CoVR* permite, mesmo quando os utilizadores se encontram em localizações distintas, o acesso ao mesmo ambiente virtual e fornece comunicação interpessoal com a utilização de uma ferramenta VOIP (*voice over internet protocol*).

Este sistema simula conversações entre os participantes, onde o volume é calculado pela distância entre os mesmos. O *CoVR*, em contraste com os métodos tradicionais, fornece uma melhor abordagem para os intervenientes do projeto e possibilita a redução de anomalias e custos de comunicação no processo de construção.



Fig. 3.56 – Cenário virtual do sistema CoVR [43]

3.7.3.3. Inspeção de Segurança

De forma a evidenciar a forma como o *CoVR* pode ajudar a melhorar a comunicação através da interatividade da realidade virtual, um estudo experimental foi realizado. Um total de 71 estudantes foi recrutado para a execução da tarefa de inspeção em ambiente virtual, na qual a sua seleção foi aleatória.

Na experiência, 28 lugares do modelo do Francis Hall foram intencionalmente modificados e foi pedida a identificação das suas discrepâncias, por parte dos utilizadores, após a análise do ambiente virtual e do mundo real. Existem 3 fases na experiência: preparação, revisão em RV e inspeção.

A primeira fase consiste na familiarização do ambiente virtual por parte dos utilizadores e das características da imersão. Na segunda fase, os participantes procedem à revisão do modelo e memorizam os detalhes da sua configuração. Na última fase, os participantes deslocam-se ao edifício real e procuram reconhecer as anomalias identificadas em ambiente virtual.

Existem dois grupos na experiência de inspeção. O primeiro grupo designa-se como o grupo de comunicação, que têm a possibilidade de comunicar entre si enquanto executam a tarefa no mundo real. Eles podiam-se visualizar mutuamente e tinham a capacidade de comunicar verbalmente durante a revisão em RV. O segundo grupo foi designado como o grupo isolado, onde os participantes realizaram a tarefa de forma independente.

Após sessões de revisão de 5 minutos, os estudantes executaram a tarefa de inspeção no edifício real, baseando-se na memorização das discrepâncias identificadas na sessão de revisão. No fim da experiência, foram registados os valores de anomalias reconhecidas.

3.7.4. AVALIAÇÃO E RESULTADOS

Na análise preliminar dos resultados da experiência, demonstrou-se a melhor prestação do grupo de comunicação em relação ao grupo isolado. O grupo de comunicação identificou, em média, 18,67 discrepâncias, enquanto que o grupo isolado registou o valor médio de 12,04, sendo que estes valores ilustram uma melhoria de 55% por parte do grupo de comunicação. Este teste revela

a importância da comunicação interpessoal na tarefa de inspeção, *because two minds are better than one*. Os resultados desta experiência encontram-se na figura 3.57.

A indústria de construção necessita de conectar vários utilizadores aquando da realização de certas tarefas, pela localização remota de alguns intervenientes do projeto, e essa forma é através da utilização de realidade virtual multiutilizador. A RV multiutilizador permite a criação de uma experiência imersiva e dispõe benefícios na colaboração da tarefa de inspeção.

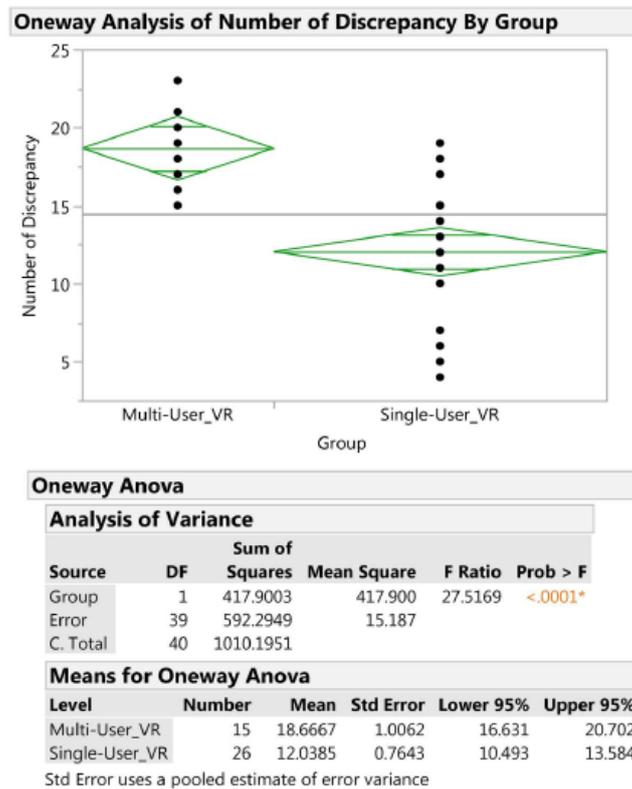


Fig. 3.57 – Resultados da experiência de inspeção [43]

3.8. IMAGE-BASED CONSTRUCTION HAZARD AVOIDANCE SYSTEM (ICHAS)

3.8.1. ESTRUTURA DO SISTEMA

Este sistema divide-se em três módulos: monitorização, avaliação de segurança e visualização de informações de perigo. No primeiro módulo, imagens de perspetiva global são adquiridas em obra e utilizadas para localizar objetos em movimento, de forma a determinar a sua relação espacial e posterior cálculo das informações de segurança. No mesmo módulo, calcula-se, também, a posição dos trabalhadores com o uso de dispositivos móveis.

No segundo módulo, as informações anteriores são processadas e o sistema fornece aos trabalhadores os níveis de segurança. Por fim, o módulo de visualização dispõe essas mesmas informações processadas em forma de RA nos dispositivos dos utilizadores. Na figura seguinte encontra-se representada o fluxo de informação do sistema em estudo.

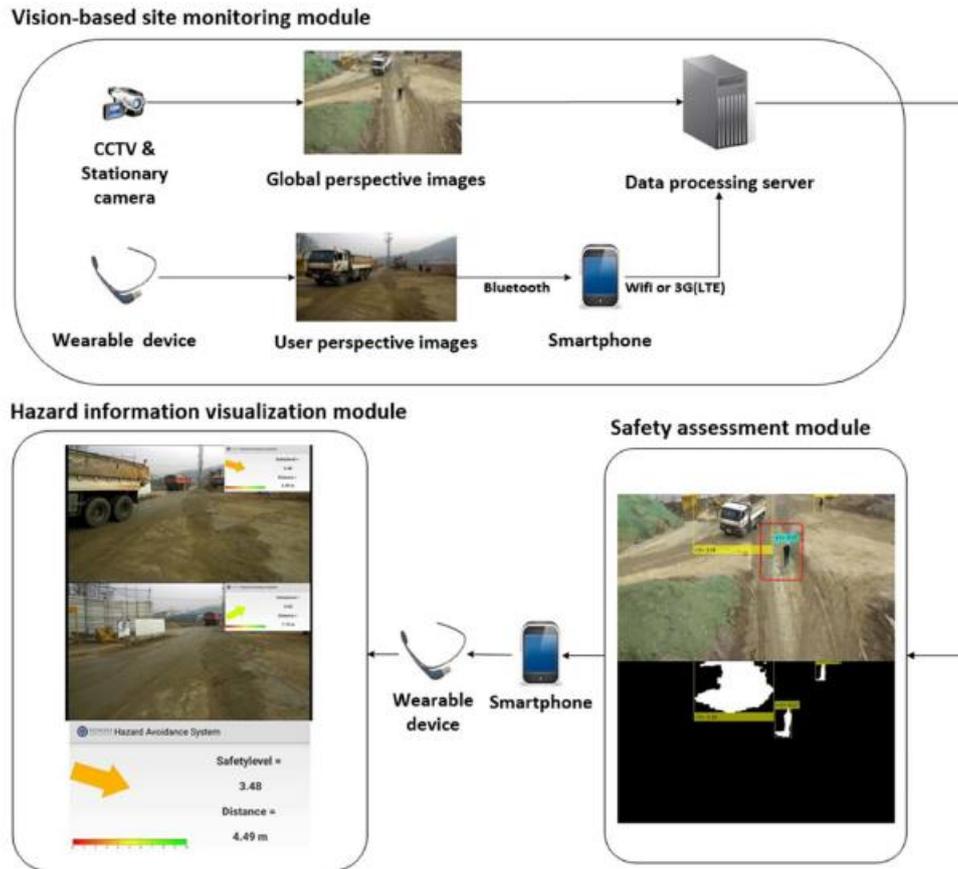


Fig. 3.58 – Fluxo de informação do ICHAS [44]

3.8.1.1. Módulo de Monitorização

Neste módulo, as imagens são captadas através de câmaras CCTV, que utiliza um algoritmo de controlo de movimento dos objetos. Estas imagens de perspectiva global localizam múltiplos objetos em movimento de forma a gerar informações de fatores de risco de construção.

A utilização das imagens em consonância com as informações de orientação dos *wearable devices* permite a confirmação da localização dos trabalhadores. Informações de fatores de risco como a distância entre equipamentos e trabalhadores, nível de congestionamento de uma área de atividade específica ou a direção do movimento dos objetos podem ser calculadas.

3.8.1.2. Módulo de Avaliação de Segurança

Este módulo tem a capacidade de quantificar conhecimentos linguísticos em valores ou índices baseado em funções ou regulamentos. As variáveis de entrada são a proximidade e o nível de congestionamento de cada objeto, informações derivadas do módulo anterior. Esta avaliação fornece níveis de segurança, que variam entre o 0 (mais perigoso) e o 10 (mais seguro).

Este sistema de avaliação permite a substituição dos julgamentos de segurança pelo desenvolvimento baseado em processos de raciocínio humano. Os níveis de segurança são, assim, atribuídos sem intervenção humana, apenas com o emprego de imagens.

3.8.1.3. Módulo de Visualização de Informações de Perigo

A informação de segurança é produzida através da perspectiva dos trabalhadores. Esta informação inclui o nível de segurança de cada trabalhador, a distância dos equipamentos considerados mais perigosos e a orientação destes equipamentos. O cálculo do nível de segurança e as informações de distância realizam-se após a identificação dos trabalhadores nas imagens capturadas. A orientação dos equipamentos é calculada com a consideração da direção atual dos trabalhadores, partilhadas através dos *wearable devices*.

A visualização de informações de segurança pretende aumentar a consciência dos trabalhadores em termos de reconhecimento de situações de risco. A orientação dos equipamentos é descrita através de um código de cores, pois uma disposição visual de informação permite um melhor entendimento das circunstâncias envolvidas. O código de cores, os valores dos níveis de segurança e a distância aos equipamentos são todas dispostas automaticamente nos dispositivos dos trabalhadores, onde estes facilmente compreendem as condições de segurança existentes.

3.8.2. CASO DE ESTUDO

3.8.2.1. Configuração do Sistema

O sistema foi implementado com a utilização do *MATLAB* e do *Android Studio* para a criação do ambiente virtual. As câmaras *Sony HandyCam HDR-CX405* foram instaladas para captura das imagens de perspectiva global e os *Google Glass* foram utilizados como *wearable devices*. As direções dos equipamentos foram calculadas através de um acelerómetro, um sensor de campo magnético e de um giroscópio instalado no *Google Glass*.

3.8.2.2. Monitorização e Avaliação de Segurança

Um total de três cenários (1, 2 e 3) foram utilizados para teste de performance do sistema. A figura 3.59 ilustra o cenário 1, onde estão incluídos os objetos localizados e os seus níveis de segurança. Os números de identificação são atribuídos pela ordem de deteção dos objetos respetivos.

A figura 3.59.a) representa uma área onde os trabalhadores não se encontram próximos de nenhum equipamento, enquanto que a figura b) representa dois trabalhadores bastantes próximos de um equipamento. Como a figura a) caracteriza uma área mais segura que a figura b), o nível de segurança dos trabalhadores em a) será, necessariamente, superior ao nível de segurança dos trabalhadores ilustrados na figura b).

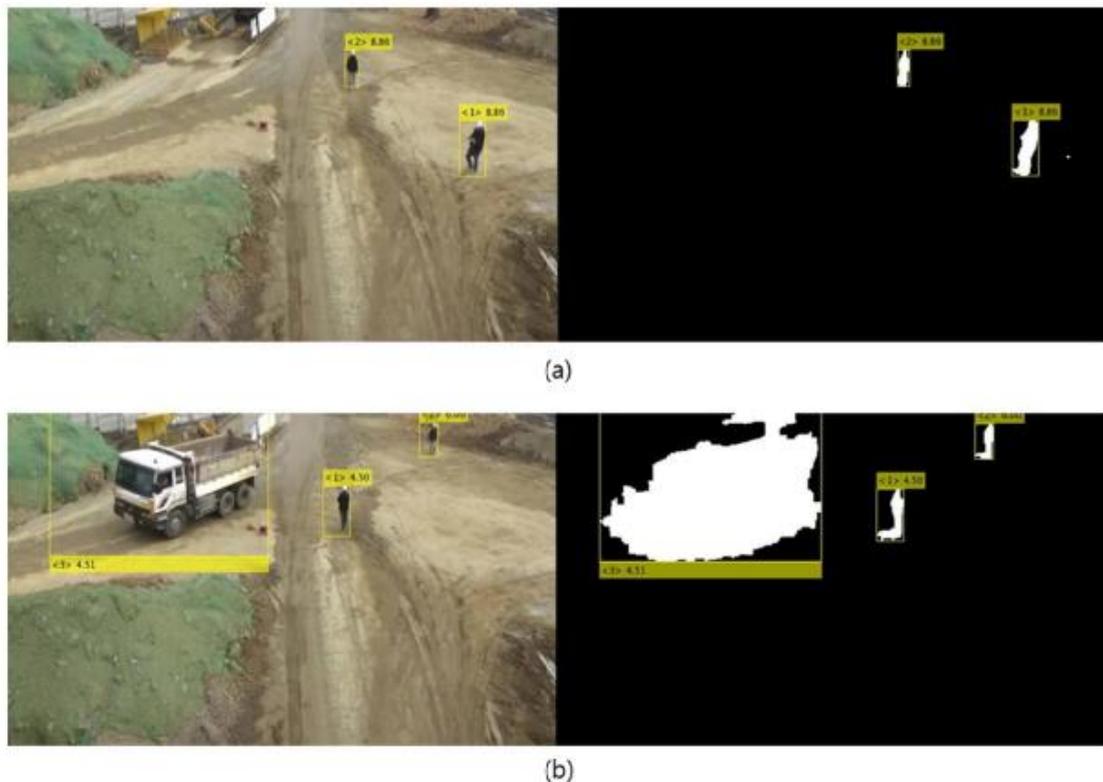


Fig. 3.59 – Identificação de trabalhadores e equipamentos através de níveis de segurança [44]

Na figura 3.60, encontra-se representado os procedimentos utilizados para identificar os trabalhadores nas imagens de perspectiva global. Três pontos foram selecionados e os seus pontos correspondentes foram designados nas imagens de perspectiva global e nas imagens da perspectiva do utilizador, respetivamente. Com a localização do utilizador através das imagens da sua perspectiva, a localização do utilizador na perspectiva global será calculada com o emprego da matriz de transformação.

A figura c) representa quatro localizações possíveis para o trabalhador, sendo as duas da parte inferior da figura consideradas falsas, apesar da sua deteção. Por fim, a localização mais próxima da localização estimada anteriormente, é considerada a localização do trabalhador em estudo. Após a identificação do trabalhador, este será continuamente monitorizado pelo sistema.

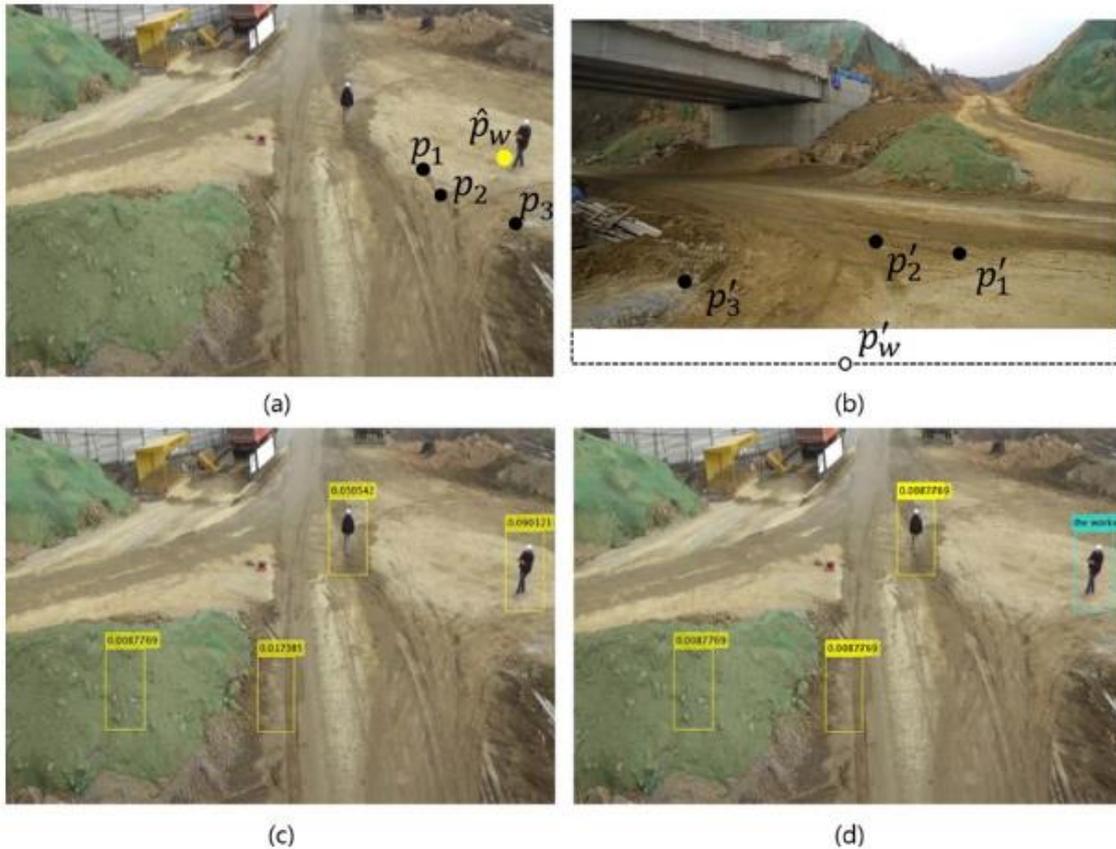


Fig. 3.60 – Processo de identificação de trabalhadores [44]

3.8.2.3. Visualização de Informações de Perigo

Na figura 3.61, encontram-se representadas as informações de processos de identificação de perigos: localização dos trabalhadores, localização de equipamentos, direção da câmara, orientação dos equipamentos na perspectiva do utilizador e o nível de segurança. A figura 3.62, demonstra três imagens da obra e as informações correspondentes do cenário 1. As setas coloridas indicam a orientação dos equipamentos mais perigosos em relação aos trabalhadores, na qual as cores representam o nível de segurança.

Frame	Coordinates of the worker (x, y)	Coordinates of the equipment (x, y)	Heading direction of the worker (θ_w , degree)	Heading direction of the camera (θ_c , degree)	The worker perspective orientation of the equipment (θ_w , degree)	Safety level
70	(609.9, 275.1)	(0.0, 480.0)	84.22	0	-12.79	8.86
362	(437.4, 326.3)	(219.3, 358.1)	332.23	0	109.47	4.50
413	(430.7, 358.3)	(94.1, 315.1)	336.10	0	121.21	6.00

Fig. 3.61 – Identificação de informações de perigo [44]

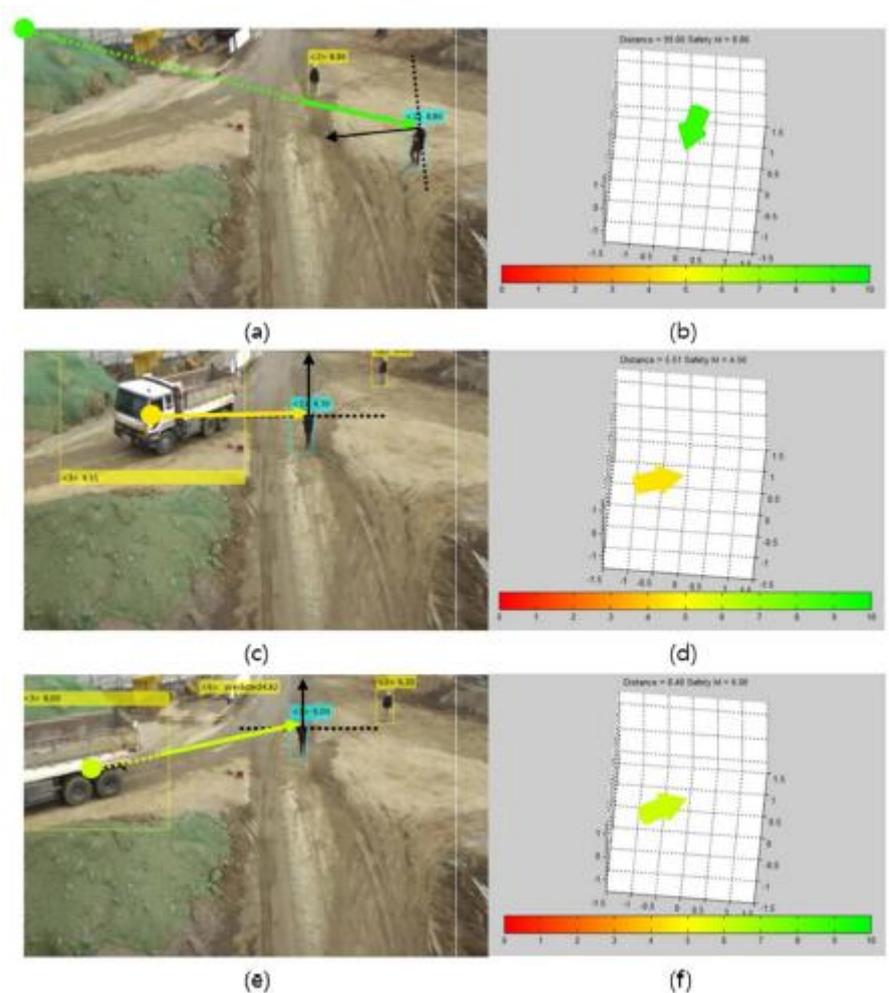


Fig. 3.62 – Identificação de perigos através de um código de cores [44]

Existem duas formas de visualizar a informação disposta pelos *Google Glass*: uma API e um GDK (*glass development kit*). A API é uma plataforma *cloud* de desenvolvimento que interage com o dispositivo. O servidor *cloud* têm a capacidade de conduzir o processo de forma praticamente independente, sendo que a interface dos óculos é, apenas, sincronizada ao servidor por via HTML. Esta interação necessita de conexão à Internet para o seu funcionamento.

Em contraste com a interface API, o kit GDK, em *Android Studio*, fornece um ambiente para o desenvolvimento de uma aplicação para os *Google Glass*. Neste sistema, o GDK é utilizado para visualizar as setas coloridas e as informações de perigos relacionadas, como ilustra a figura 3.63.

Na figura 3.64, é ilustrada a perspetiva do utilizador com as informações representadas na forma de RA. A figura a) mostra uma situação em que os equipamentos perigosos se encontram visíveis, enquanto que na b) os equipamentos já não se encontram dispostos na figura.

Os *Google Glass* são utilizados para capturar as imagens dos cenários de construção e calcular as direções relativas dos trabalhadores. Estas informações são, posteriormente, transferidas para laboratório para implementação e validação do sistema.



Fig. 3.63 – Utilização do GDK neste sistema [44]



(a)



(b)

Fig. 3.64 – Perspetiva do utilizador com o emprego dos *Google Glass* [44]

3.8.3. VALIDAÇÃO DO SISTEMA

A validação foi dividida em duas fases: avaliação da performance do sistema e eficiência. A performance do sistema foi avaliada através da comparação da informação registada com o julgamento de um engenheiro. As figuras 3.65, 3.66 e 3.67 traduzem este cruzamento de informação. Os termos “seguro” e “inseguro” indicam a existência de equipamentos na área de

análise. O nível de perigo não foi aferido nesta avaliação pois este já tinha sido verificado anteriormente.

TP (*true positive*) é o caso em que tanto o sistema como o engenheiro não detetaram equipamentos presentes na área analisada. TN (*true negative*) representa o caso em que ambos concordam com a existência do equipamento e sua respetiva direção. FN (*false negative*) regista o caso onde o sistema confunde um objeto com um equipamento, enquanto que o caso FP (*false positive*) ocorre quando o sistema não identifica um equipamento presente.

Um parâmetro adicional foi desenvolvido para a avaliação deste sistema, o fenómeno da oclusão. A oclusão consiste na sobreposição de vários objetos, sendo estes considerados como apenas um objeto. A ocorrência de oclusão pode levar ao registo de informações incorretas e ao aparecimento de discrepâncias. Este fenómeno pode ser evitado pela existência de um maior número de câmaras e suas posições com avançados processos de imagem. O sistema utilizou este parâmetro, de forma a se verificar as capacidades e limitações do mesmo.

As figuras 3.66 e 3.67 demonstram os resultados dos cenários 2 e 3, cenários que apresentam ocorrência de oclusões. A descrição “*occlusion as true*” assume a identificação correta de um objeto sob o fenómeno em estudo. A descrição “*occlusion as false*” refere a avaliação incorreta dos objetos sobrepostos.

The proposed system Engineer's judgment	Safe	Unsafe	
	True Positive: 193 frames	False Negative: 18 frames	
Unsafe	False Positive: 0 frames	True Negative: 208 frames	
		Precision: 0.9204	Accuracy: 0.9570

Fig. 3.65 – Performance do sistema para o cenário 1 [44]

The proposed system Engineer's judgment	Safe		Unsafe			
	True Positive		False Negative			
Safe	Occlusion as true	Occlusion as false	Occlusion as true	Occlusion as false		
	0 frames	0 frames	19 frames	80 frames		
Unsafe	False Positive		True Negative			
	Occlusion as true	Occlusion as false	Occlusion as true	Occlusion as false		
	0 frames	0 frames	288 frames	227 frames		
			Precision		Accuracy	
			Occlusion as true	Occlusion as false	Occlusion as true	Occlusion as false
			0.9381	0.7394	0.9381	0.7394

Fig. 3.66 – Performance do sistema para o cenário 2 [44]

The proposed system Engineer's judgment	Safe		Unsafe			
	True Positive		False Negative			
Safe	Occlusion as true	Occlusion as false	Occlusion as true	Occlusion as false		
	253 frames	190 frames	168 frames	240 frames		
Unsafe	False Positive		True Negative			
	Occlusion as true	Occlusion as false	Occlusion as true	Occlusion as false		
	14 frames	50 frames	103 frames	58 frames		
			Precision		Accuracy	
			Occlusion as true	Occlusion as false	Occlusion as true	Occlusion as false
			0.3801	0.1946	0.6617	0.4610

Fig. 3.67 – Performance do sistema para o cenário 3 [44]

Duas experiências adicionais foram realizadas para avaliação de eficiência do sistema. Na primeira experiência (*Experiment 1*), o tempo de resposta na identificação de perigos foi medido a partir do momento em que o trabalhador se apercebe da existência do fator de risco.

Na segunda experiência (*Experiment 2*), foi aferido se o trabalhador tem a capacidade de detetar perigos sem ser informado dos mesmos. A primeira experiência pretende calcular o tempo que um trabalhador demora a perceber a direção do perigo existente, enquanto que na segunda experiência, se pretende avaliar a percepção de risco.

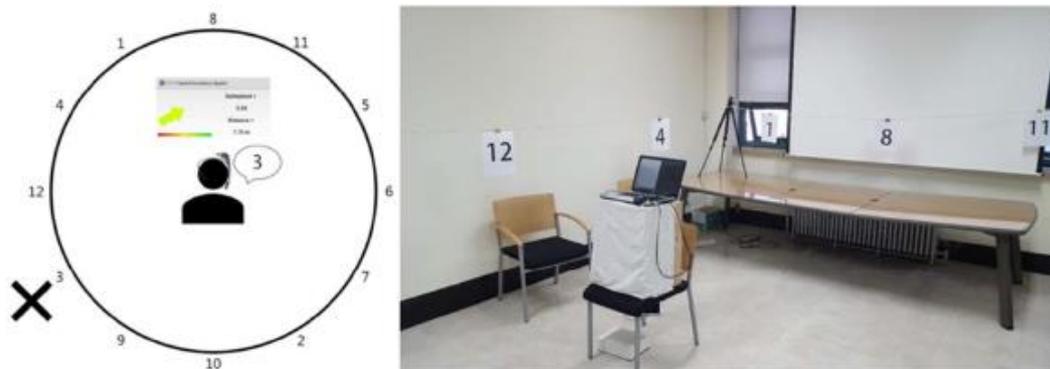


Fig. 3.68 – Experiência 1 [44]

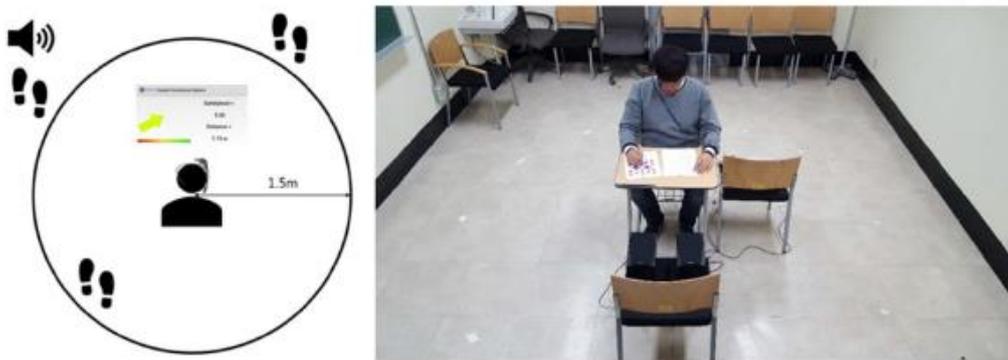


Fig. 3.69 – Experiência 2 [44]

Na experiência 1, o participante encontra-se no centro de uma sala, tendo sido colocados números de 1 a 12 na parede, intervalados a 30° uns dos outros. Um modelo de equipamento foi colocado, aleatoriamente, num desses números, sem o trabalhador ser informado. O trabalhador encontra-se com os olhos fechados, e após uma mensagem de aviso, este visualiza o modelo e identifica-o.

O tempo de resposta é medido, existindo três casos nesta experiência. O *wearable device* só não é utilizado no caso 1, enquanto que nos casos 2 e 3 são utilizadas as setas coloridas para informação de direção (verde para o caso 2, vermelho para o caso 3).

Na experiência 2, numa sala desenha-se um círculo de diâmetro 1,5m, onde o participante se situa no centro. Este círculo representa uma zona de perigo, onde os equipamentos se consideram perigosos se entrarem neste espaço. É fornecida uma atividade aos trabalhadores, simulando que estes se encontram a executar uma tarefa de construção. Dois ajudantes à experiência percorrem a sala, até que um deles entra na zona de perigo de forma surpreendente.

Se o participante detetar esta abordagem em menos de 2s, esta experiência é considerada bem-sucedida, de outra forma, considera-se um insucesso. Dois casos foram empregues nesta experiência: caso 1, sem a utilização do *wearable device*; caso 2, com a utilização do *wearable device*. Cerca de 30 utilizadores estiveram envolvidos nestas experiências e a ordem de seleção foi aleatória.

3.8.4. RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS

Na figura 3.70 encontram-se representados os valores médios dos tempos de resposta para cada caso, relacionados com a experiência 1. A utilização dos dispositivos provoca uma redução dos tempos em relação ao caso 1.

A figura 3.71 ilustra o tempo de resposta de acordo com a orientação do equipamento. Os resultados demonstram que ocorre grande melhoria de resultados quando o equipamento se encontra na retaguarda dos utilizadores, o que se revela muito encorajador, pois a maioria dos acidentes se regista nesta situação.

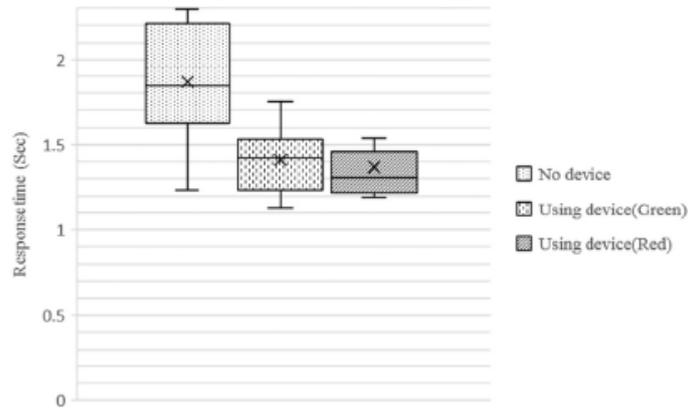


Fig. 3.70 – Resultados da experiência 1 [44]

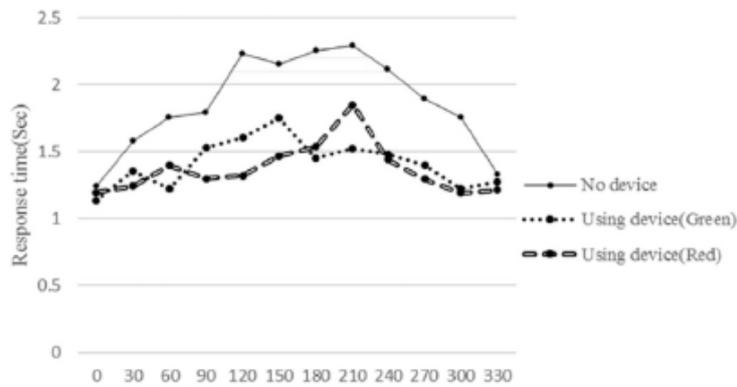


Fig. 3.71 – Resultados da experiência 1, de acordo com a orientação [44]

As figuras 3.72 e 3.73 ilustram os resultados da experiência 2, demonstrando a utilidade dos *wearable devices*. Os participantes no caso 1 apresentaram muita dificuldade nas situações em que os ajudantes entravam na zona de perigo nas suas costas, situação que teve uma grande melhoria no caso 2, o que demonstra a grande aplicabilidade do sistema.

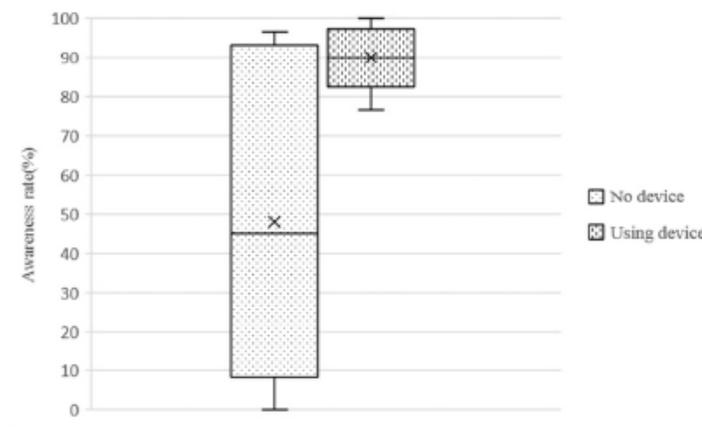


Fig. 3.72 – Resultados da experiência 2 [44]

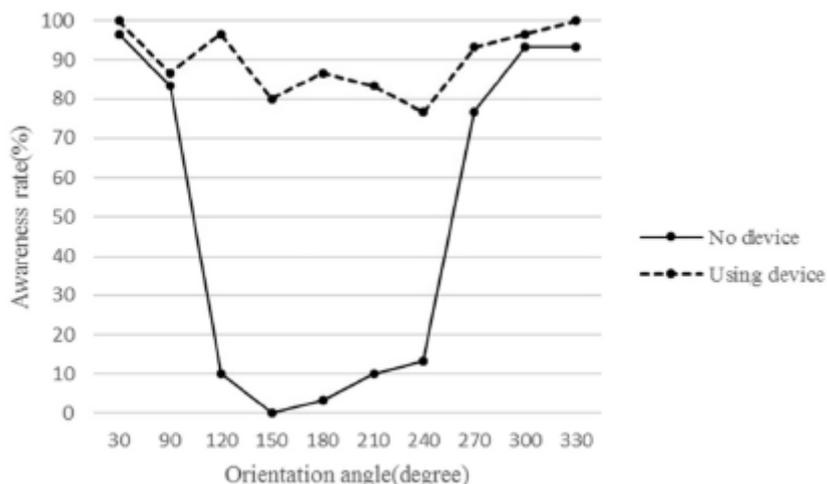


Fig. 3.73 – Resultados da experiência 2, de acordo com a orientação [44]

Em adição, o erro angular também foi calculado por comparação entre os valores do sistema com os valores obtidos por imagens registadas por *drones*. Quatro imagens foram utilizadas, estando elas representadas na figura 3.74. Os valores entre parêntesis representam os valores calculados na utilização deste sistema, enquanto que os valores sem parêntesis foram estimados nas imagens aéreas. Os valores variam entre 2.37° (cenário 2) e 5.69° (cenário 3), o que foi considerado como aceitável por parte dos trabalhadores em termos de identificação de equipamentos perigosos.

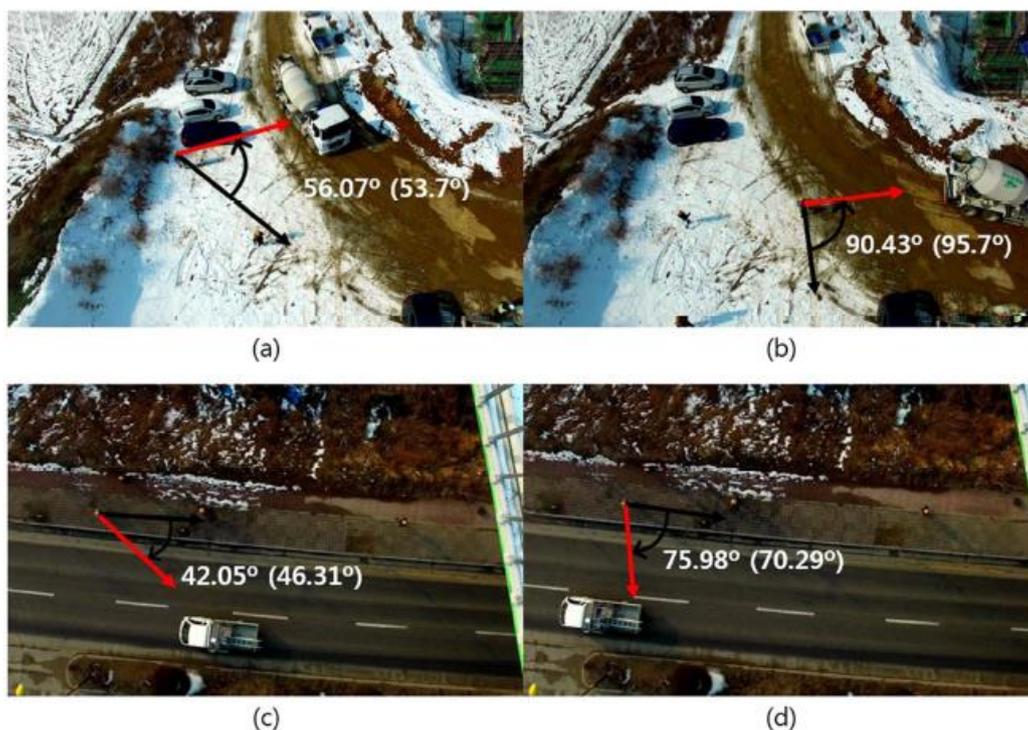


Fig. 3.74 – Resultados do teste para o erro angular [44]

3.9. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo procedeu-se à apresentação dos casos de estudo mais relevantes em termos de prevenção de acidentes com a utilização de RV e RA, sendo eles:

- *Safety Management and Visualization System (SMVS)*
- *Virtual Safety Assessement System (VSAS)*
- *Experimental Construction Safety Education System (ECSES)*
- *Game Technology-based Safety Training System (GTSTS)*
- *SimCrane 3D⁺*
- *CoVR: Cloud-based Multiuser Virtual Reality Headset System*
- *Image based Construction Hazard Avoidance System (ICHAS)*

Estes sistemas foram analisados e sua estrutura e processo de aplicação foram, também, descritos. Cada sistema apresenta um caso de estudo real para teste de aplicabilidade, registando-se a implementação e resultados de avaliação existentes.

Todos os sistemas apresentam excelentes resultados com a utilização de tecnologias de visualização, em comparação com os métodos tradicionais de construção, mostrando grandes benefícios nesta abordagem para o projeto e os seus intervenientes.

4

CLASSIFICAÇÃO E SELEÇÃO DO SISTEMA

4.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo são classificados os sistemas dos casos de estudo analisados no capítulo anterior, em termos de benefícios e limitações da sua aplicação. Compara-se, também, os custos dos equipamentos. Posteriormente, procede-se à seleção do sistema, de forma ponderada e devidamente justificada, para sua simulação de aplicação no capítulo seguinte.

4.2. CUSTO DOS EQUIPAMENTOS

Na tabela seguinte, é possível observar os principais equipamentos utilizados nos sistemas analisados anteriormente. Esta análise será sustentada pela descrição dos preços de cada um, de forma a se realizar a uma comparação económica.

Quadro 1 – Correspondência dos equipamentos de tecnologias de visualização utilizados com os sistemas em estudo

Sistemas	Equipamentos
SMVS	<i>Microsoft XNA Game Studio</i>
	<i>Autodesk Revit</i>
VSAS	<i>Unity 3D</i>
ECSES	<i>Autodesk Revit</i>
	<i>Blender</i>
GTSTS	<i>3DVIA Vrttools</i>
<i>SimCrane 3D⁺</i>	<i>NVIDIA 3D Vision Glasses</i>
	<i>Microsoft Kinect</i>
	<i>Microsoft XNA</i>
CoVR	<i>Autodesk Revit</i>
	<i>Unity 3D</i>
	<i>Oculus Rift</i>
	<i>HTC VIVE</i>
ICHAS	<i>MATLAB</i>
	<i>Google Glass</i>

O *Autodesk Revit* apresenta-se como um software BIM, que fornece uma abordagem colaborativa de design a projetos de construção. Este programa permite a produção de modelos de infraestruturas e funciona como suporte dos sistemas de RV. O *Revit* permite a ligação de ferramentas numa única interface e a sua licença pode ser adquirida da seguinte forma [45]:

- Licença mensal: 279,69€;
- Licença anual: 2223,75€, 186,15€/mês;
- Licença a três anos: 6015,59€, 166,90€/mês.

O *Microsoft XNA Game Studio* é considerado um IDE (*integrated development environment*) de criação de videojogos na plataforma Microsoft XNA. A sua principal utilização baseia-se no desenvolvimento de ambientes virtuais para *gaming* e a sua licença é gratuita [46].

O motor de jogo *3DVIA Virtools* fornece um ambiente virtual e uma plataforma multiutilizador interativa para os utilizadores. Esta tecnologia caracteriza-se pela interação dos utilizadores e pelo desenvolvimento de conteúdos 3D. A sua aquisição não apresenta custos [47].

O *Unity 3D* caracteriza-se como uma plataforma de motores de jogo desenvolvida pela *Unity Technologies*. Este permite a criação de modelo 3D com cenários de RV e RA e simulações em tempo real com características físicas e a sua licença pode ser obtida de forma gratuita [48].

O *Blender*, por seu lado, é uma ferramenta de software computacional 3D que permite a criação de filmes de animação, efeitos visuais, modelos 3D, *motion graphics*, aplicações interativas e videojogos. Apresenta grande utilidade na interação com as tecnologias de visualização, e a sua licença, pode, também, ser obtida sem custos [49].

Em termos de ferramentas de hardware como os HMD's, nestes sistemas foram utilizados os seguintes equipamentos: *NVIDIA 3D Vision Glasses*, *Oculus Rift*, *HTC VIVE* e o *Google Glass*.

Os seus preços são descritos da seguinte forma:

- *NVIDIA 3D Vision Glasses*: \$149 (wireless), \$99 (wired) [50];
- *Oculus Rift*: \$399 [51];
- *HTC VIVE*: 619€ (Cosmos Elite Headset), 999€ (Cosmos Elite), 1439€ (Pro Eye Series) [52];
- *Google Glass*: \$1195 [53].

O *Microsoft Kinect* é um sensor de movimento que permite o reconhecimento gestual em tempo real, reconhecimento vocal e a deteção do corpo do utilizador, em conjunto com outras capacidades. Este dispositivo interage com os sistemas computacionais e o seu custo é de 149,99 GBP [54].

Por fim, o *MATLAB* classifica-se como um software interativo, baseado no cálculo matemático e permite a construção gráfica que funciona como suporte para a RV ou RA. A sua aquisição pode ser obtida de duas formas [55]:

- Licença anual: 800€;
- Licença vitalícia: 2000€.

Desta forma, pode-se concluir que os sistemas *SimCrane 3D+*, *CoVR* e o *ICHAS* apresentam custos mais elevados de hardware, em relação aos outros sistemas. A integração dos HMD's para a imersão das experiências acarreta maiores despesas para a sua aplicação. Os sistemas *SMVS* e *ECSES* apresentam a utilização de motores de visualização gratuitos, mas o suporte oferecido pelo *Autodesk Revit* exige algum investimento para a sua aplicação. Por outro lado, os sistemas *VSAS* e *GTSTS* apenas empregam um motor de jogo gratuito, pelo que a sua implementação se torna livre de custos. Esta análise de custos vai permitir uma seleção mais ponderada do sistema a implementar no capítulo seguinte.

4.3. CLASSIFICAÇÃO TÉCNICA DOS SISTEMAS

4.3.1. SAFETY MANAGEMENT AND VISUALIZATION SYSTEM (SMVS)

Vantagens:

- Com a integração dos modelos 3D, os trabalhadores têm a capacidade de entender o ambiente de trabalho de uma construção.
- Com o código de cores aplicado, é facilitada a localização onde a medida preventiva de acidente é requerida. É possível, também, a execução de um plano de segurança, que consiste na escolha do tipo de instalações de segurança, ajustamentos na sequência dos trabalhos, controlo de localização, entre outros.
- A imersão dos modelos promovida pela RV permite uma melhor aprendizagem sobre os fatores de risco presentes nas áreas de atividade virtuais, antes da ocorrência de acidentes.
- A eficiência da comunicação interpessoal será, também, melhorada com a aplicação deste sistema. O sistema de controlo de localização integrado com RA vai permitir uma melhor comunicação entre os trabalhadores em tempo real, na qual estes têm a capacidade de reconhecer a localização e a natureza dos perigos em pouco tempo.
- Os trabalhadores aumentam a sua compreensão em termos de medidas preventivas num ambiente de trabalho real, levando a uma redução temporal na execução das tarefas projetadas.

Desvantagens:

- O nível de interoperabilidade deve ser examinado num modelo virtual contendo informação mais detalhada dos elementos BIM e da calendarização do projeto.
- Em caso de existência de múltiplos fatores de risco numa área específica, é requerida, também, uma maior precisão em termos de receção de sinal no sistema de localização com a interação dos dispositivos móveis, de forma a assegurar informações relativas mais exatas.
- O sistema necessita de ser validado em termos de rácio de prevenção de acidentes e análise de custos e benefícios.

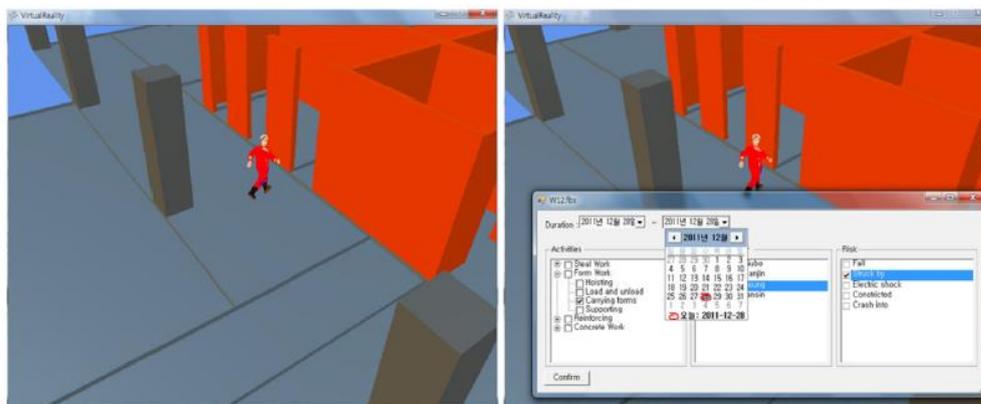


Fig. 4.1 – Processo de identificação de perigos do SMVS [2]

4.3.2. VIRTUAL SAFETY ASSESSMENT SYSTEM (VSAS)

Vantagens:

- O sistema fornece maior quantidade de informações de segurança pela transformação das questões em formato 3D ou 4D.
- O enquadramento das questões do sistema visa os procedimentos e métodos construtivos reais de uma obra e os trabalhadores podem responder com base na sua experiência.
- O relatório final fornecido pelo VSAS foi considerado muito útil pela forma como aponta as fraquezas e limitações na abordagem dos participantes em termos de requisitos de segurança.
- O VSAS permite uma melhor aprendizagem por parte dos trabalhadores pela experiência prática fornecida em ambiente virtual, levando a melhores tomadas de decisão dos mesmo no mundo real.

Desvantagens:

- A navegação virtual foi considerada complexa por parte dos utilizadores pela dificuldade no controlo do ponto de vista dos mesmos.
- O desenvolvimento dos conteúdos virtuais e a classificação das informações de segurança foram, também, considerados como morosos e árduos.
- Necessária a estabilização de conteúdos virtuais pelo acesso a projetos anteriores, de forma a aliviar a execução desta fase.



Fig. 4.2 – Cenário virtual do VSAS [4]

4.3.3. EXPERIMENTAL CONSTRUCTION SAFETY EDUCATION SYSTEM (ECSES)

Vantagens:

- Os módulos SKD e SKR permitem interação e envolvimento nos estudantes na aprendizagem e no desenvolvimento cognitivo.
- O jogo virtual e o seu questionário fornecem ferramentas para melhor compreensão dos estudantes em termos de equipamentos de proteção individual e procedimentos de segurança.
- A utilização de RV e RA demonstrou grande potencial na transferência de conhecimentos por parte dos utilizadores.
- O emprego dos dispositivos móveis não provoca distrações nos estudantes durante a experiência do sistema.
- A inspeção das áreas de atividade em ambiente virtual foi considerada eficiente na identificação de perigos e percepção de risco.

Desvantagens:

- O desenvolvimento dos conteúdos de RV e RA apresentam grande consumo de tempo e foi considerada como árdua.
- Apesar do conforto identificado com a utilização dos dispositivos móveis, alguns visores mais pequenos não permitem a navegação correta em alguns pontos.
- Alguns cenários virtuais não refletiram experiências práticas de construção, pelo que a sua interação foi descrita como neutra.
- A memorização dos conhecimentos adquiridos deve ser testada a longo prazo de forma a se garantir a competência do sistema.



Fig. 4.3 – Processo de inspeção do ECSES [41]

4.3.4. GAME TECHNOLOGY-BASED SAFETY TRAINING SYSTEM (GTSTS)

Vantagens:

- O sistema apresenta um grande impacto na capacidade dos utilizadores na identificação nas tarefas de operação e na aprendizagem das características dos equipamentos.

- O sistema permite a melhoria na colaboração entre os trabalhadores na identificação de problemas de segurança e, desta forma, aumenta as competências pessoais na execução das tarefas.
- O GTSTS permite, também, a detecção de potenciais fatores de risco em tempo real e reduz a possibilidade de ocorrência de acidentes.
- Em contraste com os métodos tradicionais, este sistema garante um ambiente virtual multiutilizador realista, que permite uma maior eficiência dos treinos de formação nos trabalhadores.

Desvantagens:

- Os comportamentos inadequados dos trabalhadores foram considerados a principal causa da ocorrência de problemas de segurança, sendo que o sistema não apresentou grande impacto na prevenção dos mesmos.
- Necessária a validação do sistema para um maior número de equipamentos, de forma a não limitar as sequências construtivas aplicadas.



Fig. 4.4 – Cenário virtual do GTSTS [36]

4.3.5. *SIMCRANE 3D+*

Vantagens:

- A visão cinestésica permite a sincronização dos movimentos do corpo do utilizador com a sua visão, de forma a maximizar a sua percepção de distância e visibilidade, situação inexistente nos métodos tradicionais de formação.
- Com a visão estereoscópica, os utilizadores têm a capacidade de percepção do sentido espacial de um ambiente virtual. Esta situação é de grande importância durante a rotação dos equipamentos.
- Este sistema fornece uma experiência realista em termos de percepção de profundidade, o que provoca uma formação mais eficiente.
- Este sistema aumenta a qualidade das simulações em ambiente virtual, sendo a necessidade de competência menor na transferência para o mundo real.

Desvantagens:

- O desenvolvimento do sistema requer uma maior precisão visual dos trabalhadores, de forma a que as tarefas que ocorrem em simultâneo com a sua tarefa em execução, não sejam ignoradas.
- O sistema apresenta uma perspectiva linear de modelação, que provoca grande dificuldade de representação de objetos mais distantes do utilizador, principalmente se estes se encontrarem próximos uns dos outros.
- Existe alguma dificuldade de sincronização do corpo dos utilizadores com a sua visão, se os movimentos executados forem muito rápidos.
- Grande exigência física dos participantes, situação que pode reduzir a performance da experiência, pela desfocagem dos objetos visualizados.



Fig. 4.5 – Grua virtual do *SimCrane 3D+* [42]

4.3.6. CoVR: CLOUD-BASED MULTIUSER VIRTUAL REALITY HEADSET SYSTEM

Vantagens:

- Este sistema aumenta a interação interpessoal pelo contacto social fornecido e a visualização ativa de informações de construção.
- O *CoVR* permite um aumento de comunicação na execução das tarefas de construção pela interatividade em ambiente imersivo. A eficiência da execução das tarefas será melhor porque *two minds are better than one*.
- O sistema possibilita uma melhor execução da tarefa de inspeção em comparação com os métodos tradicionais de construção. A utilização de RV permite uma melhor aprendizagem na identificação de perigos e perceção de risco pela memorização mais eficiente por parte dos utilizadores.
- O *CoVR* permite uma visão partilhada do projeto entre os intervenientes antes da sua construção. Comunicação interativa dos intervenientes do projeto considera-se como essencial na performance dos projetos de construção.

Desvantagens:

- A examinação dos elementos de construção presentes no *Revit* para visualização da informação de construção é realizada manualmente. A necessidade de atualização, quando existirem mudanças no projeto, pode levar a transtornos na sua execução.
- O sistema foi desenvolvido no *Revit 2015* e no *Unity 5.3.2*, logo podem surgir incompatibilidades com a utilização de novas versões desta ferramenta.
- A visualização de modelos complexos leva à necessidade de utilização de hardwares dispendiosos. Esta situação torna-se um entrave na adoção da RV em termos de projetos reais de construção.

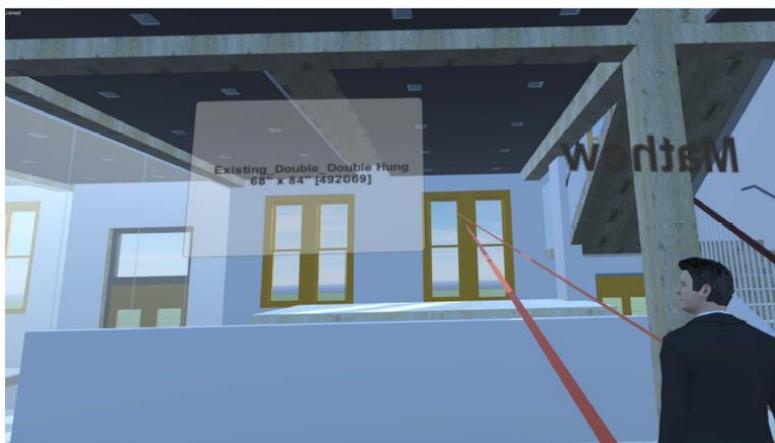


Fig. 4.6 – Perspetiva do utilizador no CoVR [43]

4.3.7. IMAGE-BASED CONSTRUCTION HAZARD AVOIDANCE SYSTEM (ICHAS)

Vantagens:

- Este sistema tem a capacidade de gerar informações sobre a localização de perigos de construção através de imagens de perspetiva global sem a necessidade de julgamento humano.
- O sistema desenvolveu um método de visualização eficiente de situações de perigo, onde os equipamentos são representados graficamente de forma a permitir a identificação dos riscos intuitivamente.
- Os dispositivos utilizados com o auxílio da RA apresentam uma grande utilidade no tratamento de informações de fatores de risco de construção aos trabalhadores. Esta transferência de informação permite a execução das tarefas projetadas sem a necessidade de ocorrência de interrupções.
- As informações são sempre dispostas aos utilizadores, independentemente da direção da visão do mesmo.
- Qualquer dispositivo que permita a captura de imagens pode ser empregue como hardware deste sistema.

Desvantagens:

- Os *wearable devices* utilizados ainda não são, correntemente, comercializados e a sua aquisição pode não ser facilitada.

- Os *wearable devices* podem distrair os utilizadores das suas tarefas, podendo esta situação, levar à ocorrência de acidentes.
- A monitorização deste sistema exige uma altura apropriada das câmaras CCTV e uma adequada seleção de pontos correspondentes para evitar a ocorrência de oclusões.
- O sistema assume a área de atividade como plana, situação que não permite a identificação de perigos como elevações irregulares.



Fig. 4.7 – Perspetiva do utilizador no ICHAS [44]

4.4. SELEÇÃO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO

Todos os casos de estudo analisados apresentam sistemas de gestão de segurança na construção. Foram consideradas como as mais importantes fases dos processos de gestão de segurança, as fases de planeamento, formação educacional e inspeção, onde a interação destas com a RV e RA, vão permitir uma melhor eficiência na prevenção de acidentes em obra e respetiva segurança dos trabalhadores.

A classificação de cada sistema, pela descrição dos seus benefícios e identificação das suas limitações, forneceu informações técnicas essenciais para uma seleção consciente e precisa do sistema a simular no capítulo seguinte. Refletiu-se em termos de aplicabilidade, eficiência, custos, equipamentos de hardware e software, de forma a se tomar uma decisão coerente com o trabalho executado.

O *SimCrane 3D+* e o *GTSTS* foram os sistemas escolhidos para demonstração da aplicabilidade da RV na formação dos trabalhadores com a utilização de equipamentos como gruas e guindastes em obra. Ambos os sistemas permitiram aos utilizadores manobrar estes equipamentos virtualmente na execução de tarefas como o desmantelamento de elementos de construção.

Estes sistemas apresentam vantagens na prevenção de acidentes relacionados com estes equipamentos, mas não permitem a análise e execução de outro tipo de tarefas, limitando, assim, a sua posterior simulação neste trabalho. O *SimCrane 3D+* apresenta, ainda, desvantagens económicas, pela necessidade de aquisição de equipamentos como o *Microsoft Kinect* e o *NVIDIA 3D Vision Glasses*.

Quadro 2 – Custos dos equipamentos de RV e RA utilizados nos casos de estudo

Sistemas	Equipamentos	Custos
SMVS	<i>Microsoft XNA Game Studio</i>	Licença gratuita
	<i>Autodesk Revit</i>	Licença mensal: 279,69€
		Licença anual: 2223,75€; 186,15€/mês Licença a 3 anos: 6015,59€; 166,90€/mês
VSAS	<i>Unity 3D</i>	Licença gratuita
ECSES	<i>Autodesk Revit</i>	Licença mensal: 279,69€
		Licença anual: 2223,75€; 186,15€/mês Licença a 3 anos: 6015,59€; 166,90€/mês
	<i>Blender</i>	Licença gratuita
GTSTS	<i>3DVIA Virtools</i>	Licença gratuita
SimCrane 3D ⁺	<i>Microsoft XNA</i>	Licença gratuita
	<i>Microsoft Kinect</i>	149,99 GBP
	<i>NVIDIA 3D Vision Glasses</i>	Wireless: 149 GBP
		Wired: 99 GBP
CoVR	<i>Autodesk Revit</i>	Licença mensal: 279,69€
		Licença anual: 2223,75€; 186,15€/mês
		Licença a 3 anos: 6015,59€; 166,90€/mês
	<i>Unity 3D</i>	Licença gratuita
	<i>Oculus Rift</i>	\$399
	<i>HTC VIVE</i>	619 €
999 €		
		1 439 €
ICHAS	<i>MATLAB</i>	Licença anual: 800€
	<i>Google Glass</i>	Licença vitalícia: 2000€ \$1195

Desta forma, estes sistemas foram considerados neste trabalho pela sua grande utilidade na formação dos trabalhadores nas operações acima referidas, mas não serão considerados na simulação do capítulo seguinte.

O *CoVR* caracteriza-se por ser um sistema multiutilizador de RV baseado na utilização de uma *cloud*, que combina informação de modelos BIM e as converte em ambientes virtuais, de forma a melhorar a comunicação entre os intervenientes de um projeto de construção. O caso de estudo apresentado no capítulo anterior revela excelentes resultados tanto em termos de comunicação interpessoal como identificação de discrepâncias na inspeção em obra realizada.

Apesar deste bom desempenho, este sistema acarreta grandes custos na aquisição dos HMD's como o *Oculus Rift* e o *HTC VIVE*. Esta condição afasta-o da simulação da aplicação neste trabalho, apesar das suas vantagens na prevenção de acidentes.

O sistema ICHAS foi integrado neste trabalho para demonstração das potencialidades da RA em conjunto com sistemas de localização de movimento na gestão de segurança na construção. Este sistema utiliza *wearable devices*, que a partir de imagens de perspetiva global capturadas através

de câmaras CCTV, calcula a distância relativa entre os trabalhadores e os equipamentos considerados perigosos, de forma a prevenir acidentes.

Os resultados alcançados foram muito satisfatórios, mas o sistema não aborda todas as fases referidas acima em termos de prevenção de acidentes em obra. A sua aplicação obriga, ainda, a aquisição de equipamentos dispendiosos como o *Google Glass*, pelo que a sua simulação não foi considerada.

Desta forma, os sistemas SMVS, VSAS e ECSES são os sistemas que apresentam mais competências em termos de gestão de segurança com a utilização de tecnologias de visualização nos casos de estudo selecionados. Todos estes sistemas permitem a inspeção da área de atividade de construção, por parte dos seus utilizadores em ambiente virtual, para identificação de perigos e perceção de risco e avaliam a aquisição de conhecimentos de segurança.

O sistema VSAS apresenta bons resultados em termos de identificação de fatores de risco, identificação de comportamentos de segurança inadequados e na identificação de métodos de construção ineficientes, mas este sistema, em contraste com o SMVS e o ECSES, não emprega RA na sua aplicação, situação que o coloca de parte em termos de seleção para o capítulo seguinte.

A RA fornece aos utilizadores a capacidade de simulação e visualização, permitindo a interação de ambientes reais com ambientes virtuais. Possibilita, também, a monitorização do progresso construtivo por comparação dos trabalhos projetados com os trabalhos já executados em obra e o seu emprego foi considerado muito útil na prevenção de acidentes para este trabalho.

Assim, a seleção do sistema de simulação focou-se nos sistemas SMVS e ECSES. Ambos demonstram grande capacidade na prevenção de acidentes e gestão de segurança na construção, mas a escolha recaiu no *Experimental Construction Safety Education System (ECSES)*.

Este sistema pode ser empregue em estudantes universitários ou em estagiários de construção e foca a aquisição de conhecimentos através de uma abordagem interativa educacional, que foi considerada como cativante e envolvente pelos seus utilizadores.

Os seus módulos representam uma análise simples pela familiarização do seu processo de aplicação e os requisitos de segurança são facilmente compreendidos e memorizados. A presença de formadores de segurança garante um suporte importante aos participantes nesta experiência, pela avaliação constante que lhes é fornecida por cada módulo do sistema.

Conclui-se, anteriormente, que os estagiários estão sujeitos a cometer mais erros quando se baseiam na sua memória para a realização de tarefas. O sistema ECSES permite a análise de casos de estudo onde os participantes, a partir de troca de ideias e partilha de conhecimentos, têm a capacidade de relacionar os regulamentos de segurança com a performance dos trabalhadores na execução das tarefas de construção.

Na tarefa de inspeção de segurança, concluiu-se, também, que esta depende da capacidade dos trabalhadores de extrair a informação necessária e de compará-la com o que foi projetado inicialmente, podendo este ser insuficiente e pouco efetivo.

Este sistema promove uma oportunidade experimental aos utilizadores, sendo possível aplicar os conhecimentos adquiridos no módulo SKD. Os utilizadores são sujeitos a executar uma inspeção num ambiente virtual, com o objetivo de reconhecer os fatores de risco existentes em obra.

Por fim, os métodos tradicionais para o reconhecimento de perigos e perceção de risco na construção regem-se pelo acesso da informação convencional através de desenhos, casos de acidente ou conhecimento heurístico que são transmitidos por aulas e reuniões, sendo que se

considerou que estas abordagens não são fáceis de ser absorvidas diretamente e não se refletem em obra.

Com o ECSES, procede-se à avaliação dos conhecimentos adquiridos pelos participantes ao longo dos módulos do sistema. O módulo SKA foi desenvolvido pela execução de um jogo com a utilização de RV, que possibilita a identificação de perigos e determina estratégias de mitigação. O jogo fornece aos utilizadores uma experiência virtual antes de entrar verdadeiramente numa obra e no seu espaço de atividades, e as suas capacidades de perceção de risco e os seus comportamentos serão avaliados.

Desta forma, conclui-se que o sistema ECSES aborda todas as fases de gestão de segurança anteriormente referidas e apresenta excelentes resultados de performance dos seus utilizadores.

O sistema SMVS apresenta a maior parte destas faculdades na identificação de perigos e perceção de risco, mas não apresenta o enquadramento educacional do ECSES. A análise inicial de casos de acidente por parte dos utilizadores e dos formadores no ECSES permite uma melhor compreensão e memorização dos requisitos de segurança apresentados e foi considerada de grande interesse para este trabalho.

A representação destes casos de acidentes pela criação de cenários virtuais garante uma maior aquisição de conhecimentos antes da execução da inspeção de segurança, sendo que a performance dos seus participantes nesta tarefa será melhorada após esta abordagem.

4.5. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, procedeu-se à classificação técnica e económica dos sistemas selecionados para este trabalho. Os preços de mercado dos equipamentos de RV e RA foram dispostos e comparados para uma seleção de sistema mais consciente.

Após a análise dos preços, os sistemas foram descritos em termos de vantagens (benefícios) e desvantagens (limitações) técnicas. Esta descrição sumária forneceu informações essenciais que, em conjunto com a análise económica, permitiu uma escolha ponderada e justificada do sistema a simular no capítulo seguinte.

Esta seleção recaiu no sistema ECSES e justificou-se pela sua abordagem eficiente em termos de planeamento, formação e inspeção de segurança na construção, apresentando ainda vantagens económicas pela licença gratuita do *Blender*.

Este sistema:

- Apresenta capacidade de relacionar os regulamentos de segurança com a performance dos trabalhadores na execução das tarefas de construção;
- Apresenta, também, capacidade de aceder aos ambientes virtuais através de dispositivos móveis;
- Permite a execução de uma inspeção num ambiente virtual, com o objetivo de reconhecer os fatores de risco existentes em obra;
- Possibilita a identificação de perigos e determina estratégias de mitigação;
- Permite, também, a avaliação da perceção de risco e dos comportamentos de segurança dos seus utilizadores.

Desta forma, foi selecionado o sistema que será simulado no capítulo seguinte.

5

SIMULAÇÃO DA APLICAÇÃO DO SISTEMA

5.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo procede-se à simulação da aplicação do sistema selecionado anteriormente, onde foi escolhida uma tarefa de construção específica, de forma a simplificar este processo. Descreve-se os fatores de risco que mais se adequam a esta tarefa relacionados com este trabalho, baseando-se nos fatores de riscos analisados no sistema ECSES e, também, em fatores de risco mais específicos da própria tarefa.

Posteriormente, procede-se a uma simulação da aplicação do sistema em estudo, na qual se apresenta o processo de aplicação utilizado neste sistema. Esta simulação engloba a introdução dos cenários virtuais criados para este trabalho e, de seguida, é apresentada a inspeção de segurança para identificação dos perigos anteriormente selecionados.

Após este método, descreve-se uma proposta de recomendações para o sistema ECSES, de forma a suprimir as suas limitações e tornar mais completa a sua aplicação em obra para os seus utilizadores.

5.2. SELEÇÃO DA TAREFA DE CONSTRUÇÃO ESPECÍFICA

A seleção da tarefa para aplicação do sistema recaiu na tarefa de betonagem. A tarefa de betonagem caracteriza-se pela colocação de betão fresco em zonas limitadas, normalmente por cofragens, bem como as suas atividades complementares como transporte, bombagem e vibração. Todo o processo de colocação de betão deve evitar a segregação e a desagregação dos componentes e encher perfeitamente todos os espaços dos moldes, de forma a envolver, convenientemente, as armaduras. Esta tarefa apresenta inúmeros fatores de risco associados, sendo que os analisados neste trabalho se encontram descritos de seguida.



Fig. 5.1 – Betonagem de uma laje [56]

5.3. RISCOS ASSOCIADOS À TAREFA SELECIONADA

A tarefa de betonagem apresenta diferentes tipos de riscos associados dependendo do modo de transporte e bombagem executados. Neste capítulo, considerou-se uma representação de uma betonagem de uma laje de piso superior, com a bombagem realizada por autobomba com lança.

Inicialmente, foram analisados os riscos de queda de trabalhadores, pois o sistema ECSES foca-se nesta abordagem. De seguida, verificou-se a existência de riscos associados aos veículos de transporte de betão e aos equipamentos que permitem a descarga deste material.

Desta forma, as dimensões de uma laje obrigam à colocação de equipamentos de proteção periféricos pelo exterior, através de guarda corpos fixos à cofragem [57]. A utilização de soluções inadequadas, fixação incorreta destes equipamentos e falta de qualidade de alguns modelos pode provocar o risco de queda em altura dos trabalhadores. A figura seguinte ilustra o equipamento que será utilizado na representação virtual.

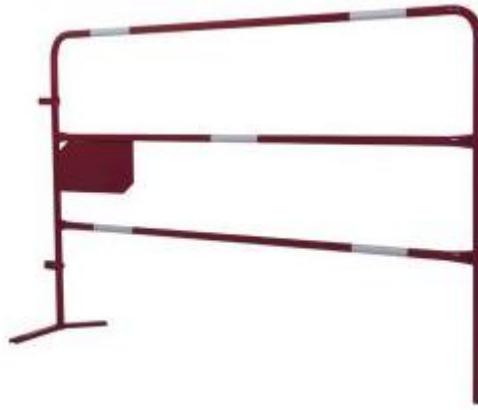


Fig. 5.2 – Guarda corpos utilizado na representação virtual [58]

Posteriormente, foram analisados os comportamentos da cofragem e do escoramento, em especial o seu nivelamento, verticalidade e resistência. Anomalias na sua instalação pode provocar instabilidade na estrutura e pode levar ao seu colapso. Esta situação poderia levar à queda e ao esmagamento de vários trabalhadores.



Fig. 5.3 – Escoramento de uma laje [59]

Para finalizar os riscos associados com quedas, serão verificados os equipamentos de acesso aos postos de trabalho. Nesta representação, foram utilizados escadas exteriores e, estes equipamentos serão avaliados em termos de estabilidade e correta instalação. Uma fixação incorreta das escadas pode, também, levar à queda de trabalhadores. Na figura 5.4, é possível observar o equipamento que será utilizado na representação virtual.



Fig. 5.4 – Escada utilizada na representação virtual [60]

Após a análise dos fatores de risco associados a quedas de trabalhadores, foram analisados os riscos associados aos equipamentos de transporte e bombagem do betão. Em relação à autobomba de betão, deve ser garantida uma área de segurança em redor deste equipamento de raio igual ou superior à dimensão da lança da bomba [61]. Desta forma, trabalhadores que não estejam a executar esta tarefa, não podem estar presentes nesta área. Existe, ainda, o risco de atropelamento de trabalhadores por parte deste veículo, pela pouca visibilidade traseira do mesmo.



Fig. 5.5 – Autobomba com lança [62]

Por fim, considerou-se a análise das condições de manuseamento da mangueira da bomba, que permite a descarga de betão. Este processo exige a presença de dois trabalhadores para

manuseamento da mangueira de betão, pois a mangueira é muito pesada e podem ser provocados movimentos descontrolados da mesma [63]. Esta situação encontra-se representada na figura 5.6.



Fig. 5.6 – Presença de vários trabalhadores no manuseamento da mangueira de betão [64]

Esta tarefa exige a utilização de óculos de proteção, por parte dos trabalhadores próximos da zona de descarga de betão [65]. A figura 5.7 demonstra uma situação em que os EPI's se encontram adequadamente empregues e esta situação, também, será alvo de verificação neste capítulo.



Fig. 5.7 – Correta utilização dos EPI's na execução de uma betonagem [66]

Estes fatores de risco serão analisados, após a criação do cenário virtual a utilizar neste trabalho. Será realizada a inspeção virtual da área de atividade de construção, de forma a verificar a existência destes riscos e confirmar o potencial do sistema ECSES em termos de prevenção de acidentes e gestão de segurança.

5.4. PROCESSO DE SIMULAÇÃO DA APLICAÇÃO DO SISTEMA

5.4.1. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

Este trabalho pretende demonstrar a aplicabilidade deste sistema com uma simulação simplificada da criação dos cenários virtuais e, posterior inspeção da área de atividades para identificação de perigos e percepção de riscos. Desta forma, recorreu-se ao programa *SketchUp Pro 20* e à plataforma *3D Warehouse* para acesso dos modelos virtuais necessários. Com estes softwares, foi possível aceder aos cenários virtuais para esta simulação. A figura 5.8 apresenta um cenário fornecido pela plataforma *3D Warehouse*, onde se representa um processo de betonagem.

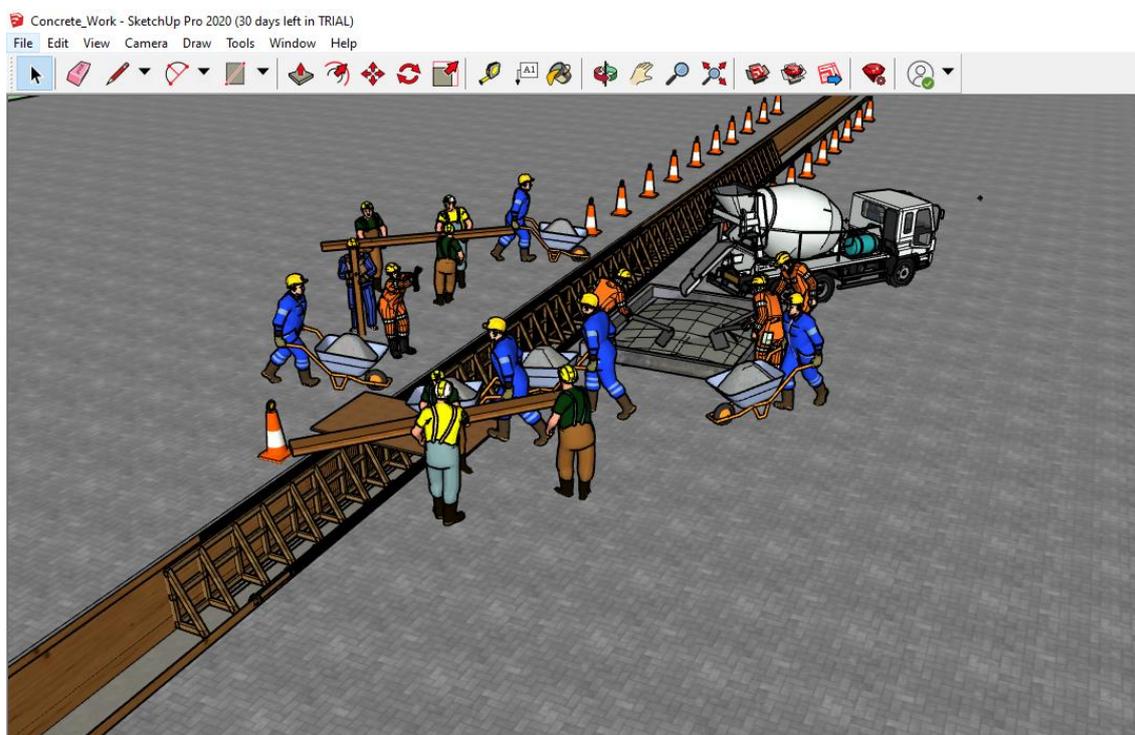


Fig. 5.8 – Cenário virtual existente no *3D Warehouse* [67]

5.4.2. INTRODUÇÃO DO CENÁRIO VIRTUAL

No sistema ECSES, os estudantes têm a possibilidade de aceder a cenários virtuais que representam diferentes atividades específicas de construção. Estes cenários focam casos de acidente envolvendo quedas de trabalhadores e estas experiências permitem aos formadores explicar as causas e apresentar as medidas corretivas de acordo com os requerimentos estabelecidos.

Neste trabalho, procedeu-se à criação de um cenário virtual que tivesse a capacidade de representar a execução da tarefa de betonagem, de forma a avaliar os riscos associados para prevenção de acidentes e gestão de segurança.

Apesar da capacidade da plataforma *3D Warehouse* em fornecer cenários existentes, considerou-se a própria criação de um cenário virtual com as componentes de construção existente no catálogo deste software, de forma a obter melhor entendimento da área de atividades. Após a pesquisa pelos componentes necessários, estes foram transferidos para o *SketchUp Pro 20*.

Criou-se um cenário virtual simples, de forma a recriar a execução de uma betonagem, como foi explicado anteriormente. O cenário apresenta a cofragem e o escoramento da laje para a colocação de betão, sendo este betão descarregado através de uma autobomba de lança. Foram inseridos guarda corpos para a segurança dos trabalhadores e para acesso aos postos de trabalho, foram integradas escadas exteriores. Este cenário está representado na figura 5.9.

Foram notadas dificuldades na transferência destes cenários virtuais para o *Blender 2.8*, que tinha como objetivo aproximar esta simulação ao processo real de aplicação do sistema ECSES. Como não houve capacidade para uma correta representação dos cenários nesse software, optou-se pela ilustração dos mesmos no *SketchUp Pro 20*.

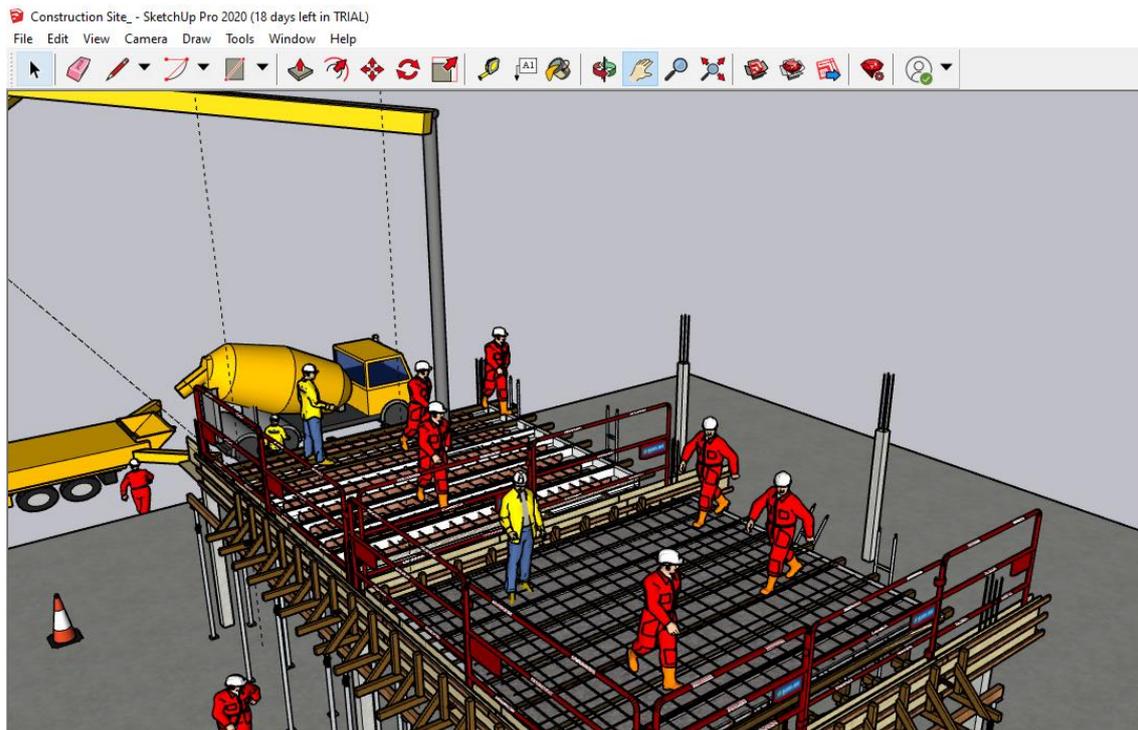


Fig. 5.9 – Cenário virtual criado no *SketchUp Pro 20*

5.4.3. INSPEÇÃO DE SEGURANÇA

No sistema ECSES, os utilizadores têm a capacidade de executar uma inspeção virtual de segurança, para reflexão dos conhecimentos adquiridos, através dos dispositivos móveis. Os formadores explicam a tarefa de inspeção e, de seguida, os estudantes são sujeitos à identificação de perigos nos cenários virtuais existentes no sistema.

Neste trabalho, considerou-se a simulação da aplicação destes métodos, de forma a verificar o potencial do sistema ECSES em termos de prevenção de acidentes na construção. Utilizou-se o cenário criado anteriormente como área de atividades de construção nesta tarefa e procedeu-se ao reconhecimento dos fatores de riscos associados à tarefa selecionada. O sistema ECSES foca a sua abordagem nos acidentes relacionados com quedas dos trabalhadores e, neste trabalho, a inspeção de segurança iniciou-se com a análise destes fatores de risco.

Desta forma, em termos de risco de queda em altura, verificou-se a inexistência de guarda corpos de um dos lados da cofragem. Esta situação, representada na figura 5.10, foi considerada como muito perigosa.

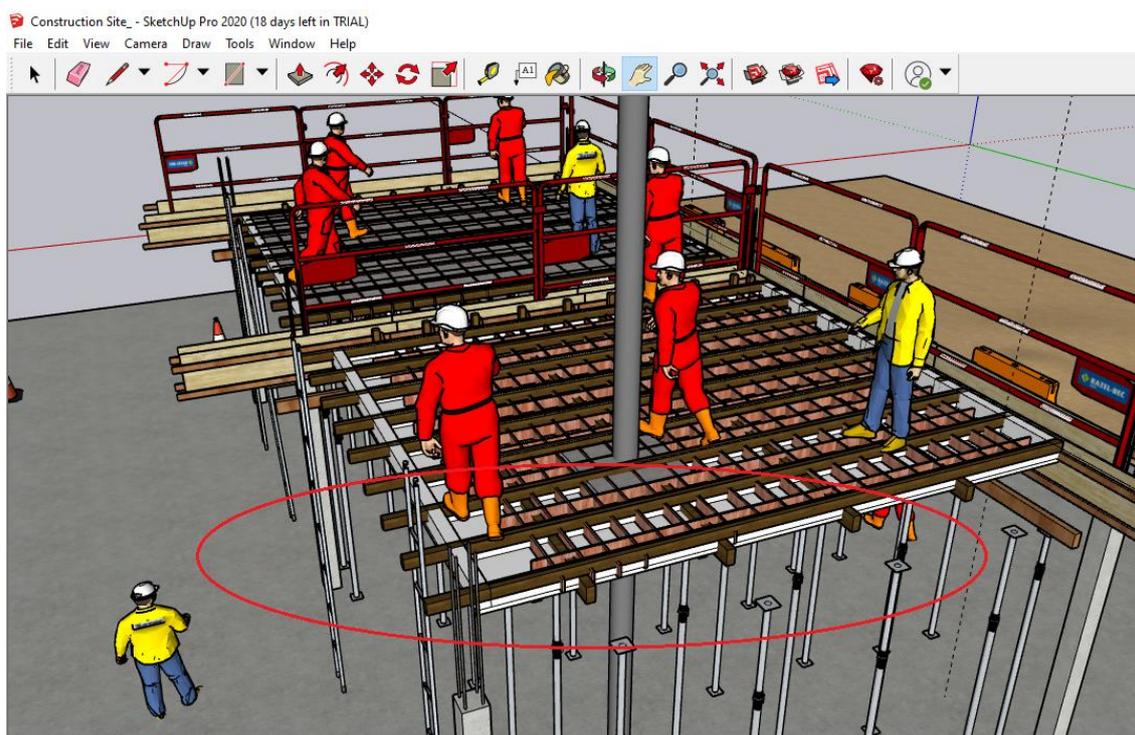


Fig. 5.10 – Inexistência de guarda corpos num dos lados da cofragem

De seguida, foram verificados os comportamentos da cofragem e do escoramento, em especial, a sua verticalidade, nivelamento e resistência. Foram encontradas anomalias na estrutura, na qual duas escoras não se encontram fixadas ao solo. Esta situação, ilustrada na figura 5.11, pode provocar instabilidade na estrutura e o seu consequente colapso.

Posteriormente, foram analisados os acessos aos postos de trabalhos, no qual o cenário virtual foi equipado com escadas exteriores. Verificou-se a existência de um equipamento instável, por não se encontrar corretamente instalado. A figura 5.12 demonstra esta situação grave, que pode levar à queda dos trabalhadores.

Após a análise dos fatores de risco associados a quedas de trabalhadores, a inspeção de segurança prosseguiu, de forma a se alcançar uma execução mais completa desta tarefa. Desta forma, aferiu-se a existência de trabalhadores nas proximidades da autobomba de betão. A área não se encontra vedada corretamente e os trabalhadores não estão no campo de visão do manobrador deste equipamento. A figura 5.13 ilustra esta situação, que pode resultar no atropelamento destes trabalhadores.

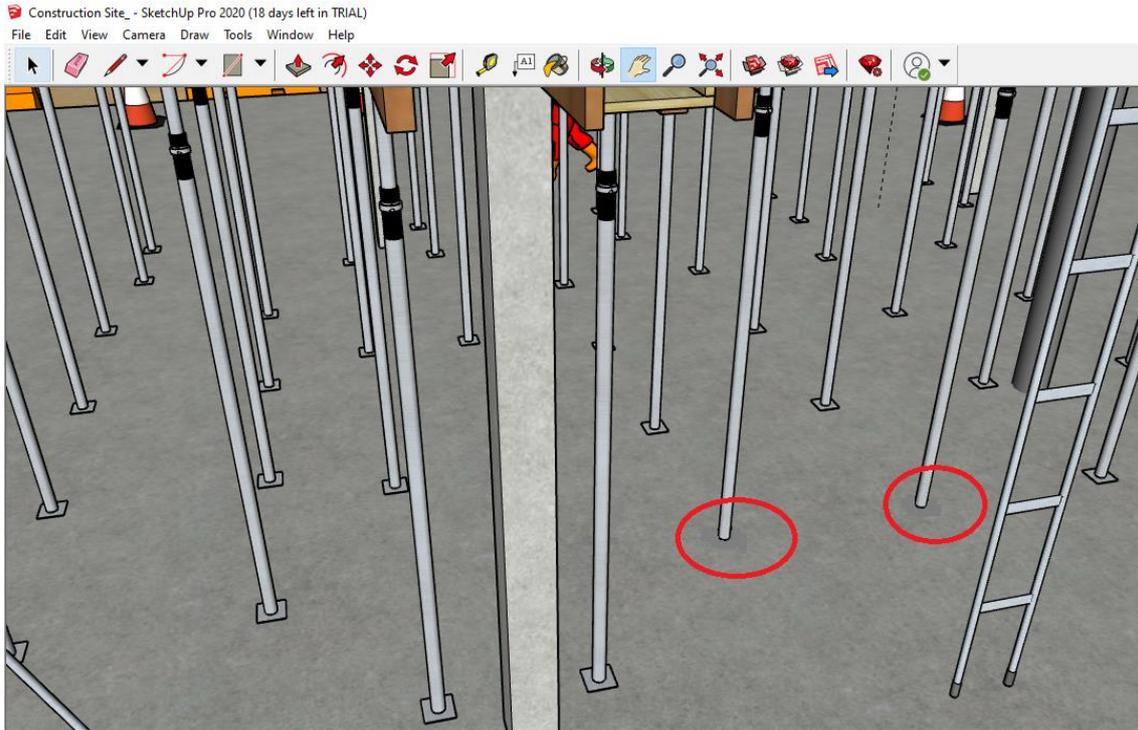


Fig. 5.11 – Incorreta fixação das escoras ao solo

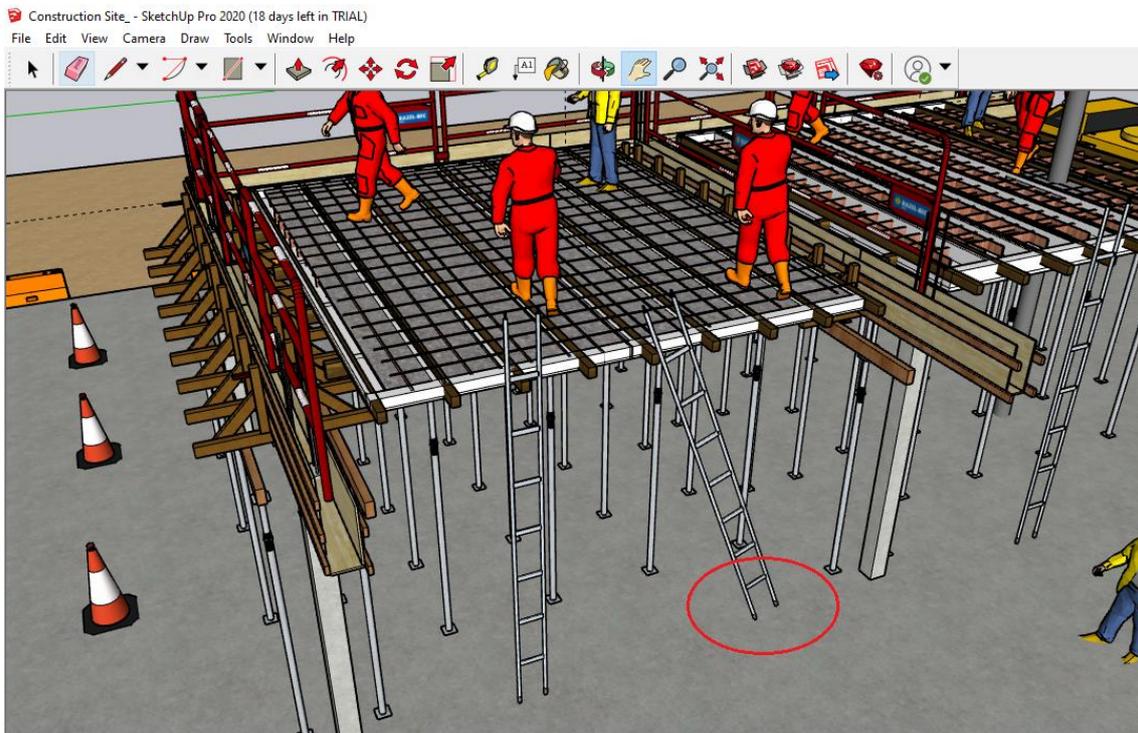


Fig. 5.12 – Incorreta instalação da escada

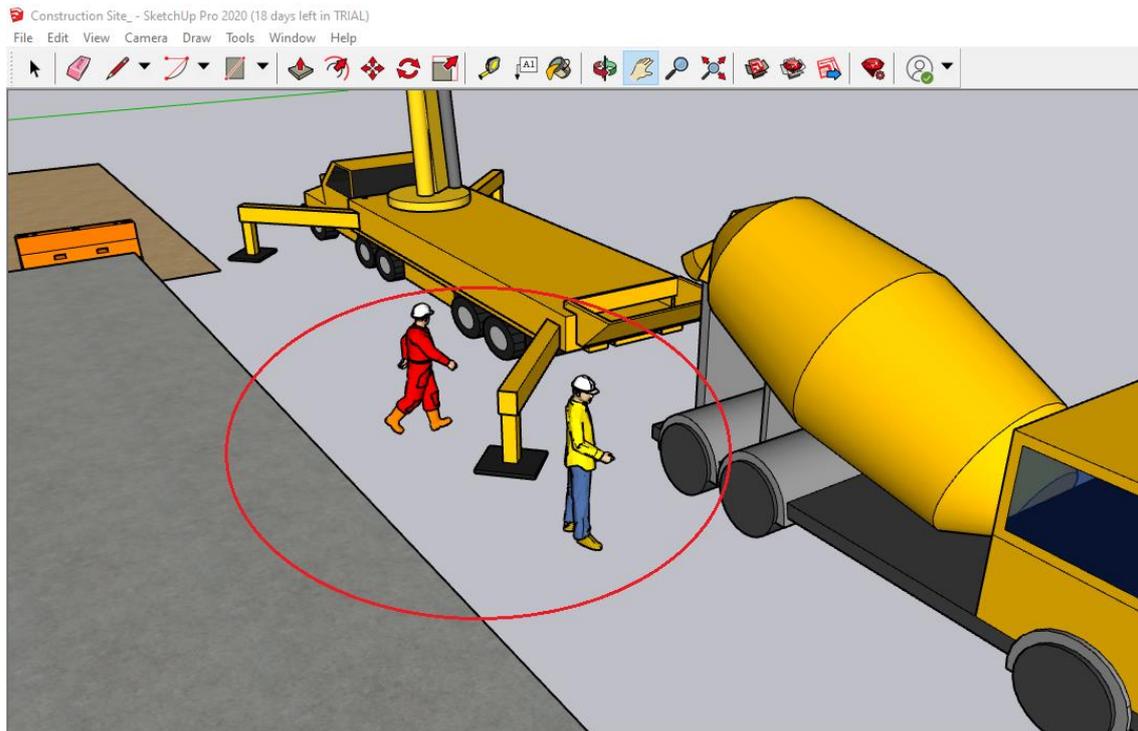


Fig. 5.13 – Presença indevida de trabalhadores nas proximidades da autobomba de betão

Posto isto, finalizou-se esta inspeção com verificação da existência de fatores de risco na utilização da mangueira anexada à lança da autobomba de betão. Conclui-se que apenas um trabalhador se encontra a realizar esta tarefa, ao invés dos dois necessários, como se encontra ilustrado na figura 5.14. Esta situação pode provocar movimentos descontrolados da mangueira e o choque deste equipamento com os trabalhadores presentes na mesma área.

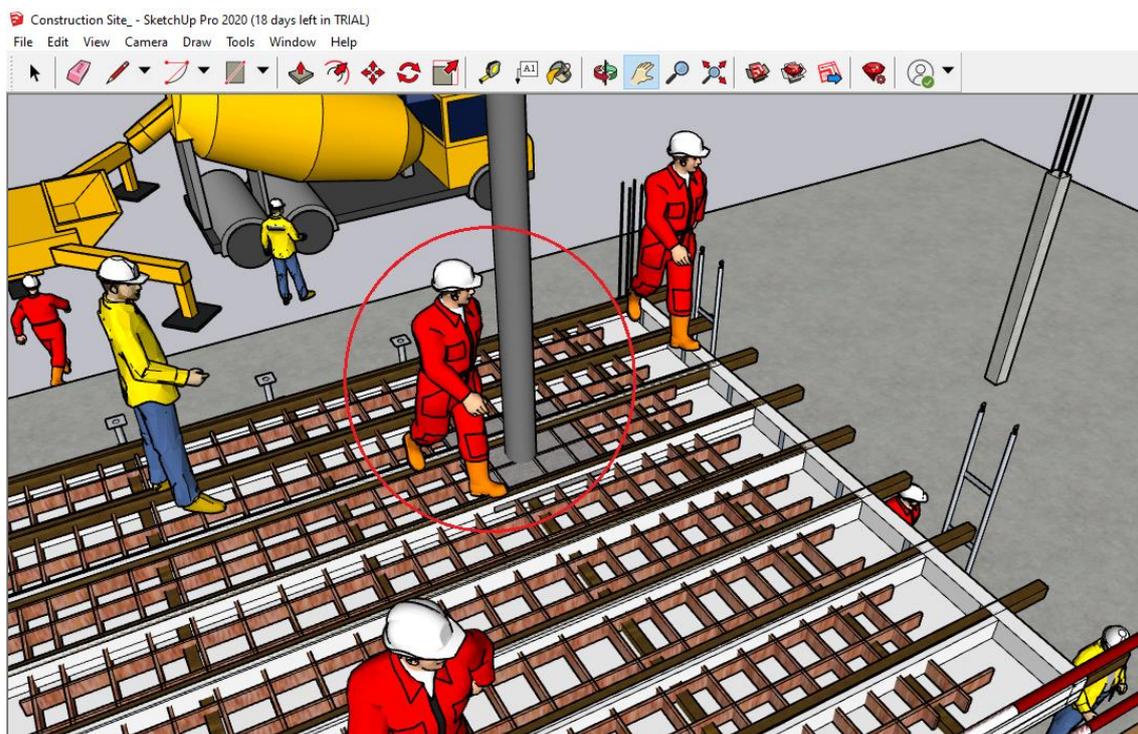


Fig. 5.14 – Incorreto manuseamento da mangueira de betão

Na continuação desta análise, observa-se, também, a não utilização de óculos de proteção quando da descarga de betão, por parte do mesmo trabalhador. A figura 5.15 demonstra esta segunda situação, que pode levar a graves lesões nos olhos dos executantes desta tarefa.

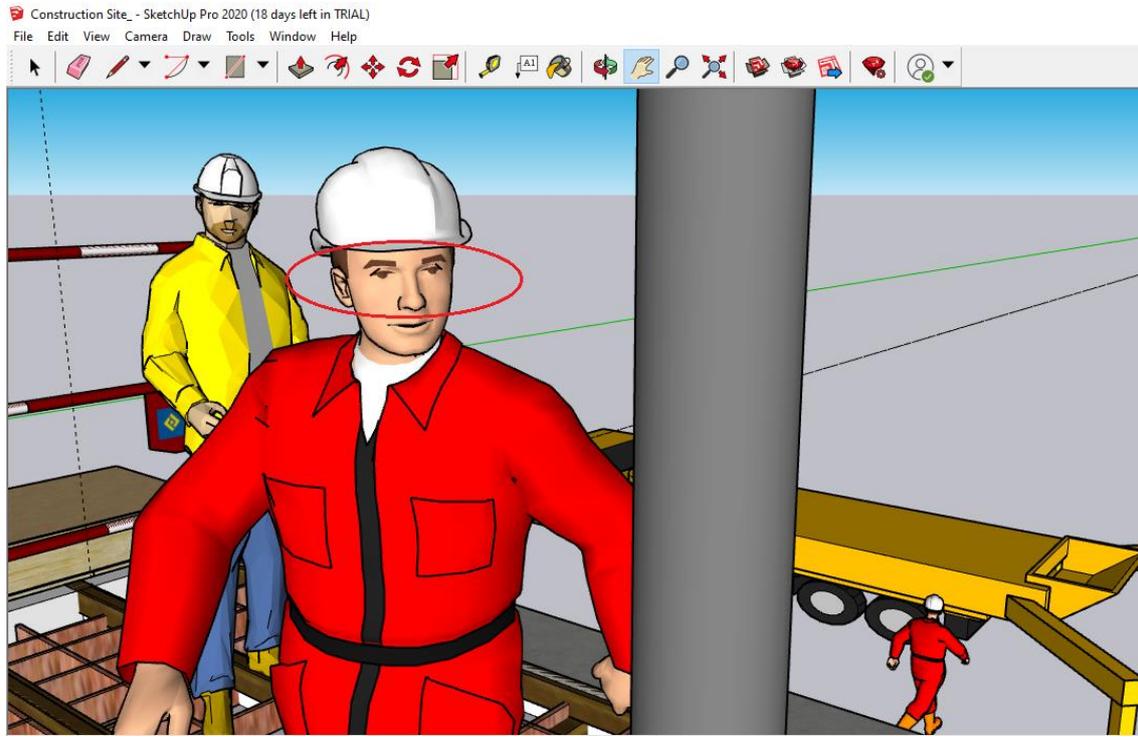


Fig. 5.15 – Ausência de óculos de proteção durante a execução de uma betonagem

A criação própria dos cenários virtuais permitiu, desde logo, uma melhor perceção da área de atividades representada, ainda antes da sua análise para gestão de segurança. Desta forma, obteve-se um grande aumento em termos de memorização das suas componentes, fornecendo ferramentas para uma melhor performance durante a execução da tarefa de inspeção.

Apesar da simulação simplificada que foi aplicada neste trabalho, foi facilmente perceptível, na realização tarefa de inspeção, a facilidade na visualização virtual com o emprego destas tecnologias. O potencial das mesmas foi demonstrado em termos de identificação de perigos e perceção de riscos, sendo que a aplicação do ECSES pode levar a aumento de conhecimento de segurança por parte dos seus utilizadores. De seguida, é apresentada uma proposta de recomendações para o sistema simulado.

5.5. PROPOSTA DE RECOMENDAÇÕES

Após a simulação da aplicação do ECSES, procede-se a uma proposta de recomendações do sistema selecionado, de forma a ultrapassar as limitações identificadas. Pretende-se analisar cada módulo do sistema e sugerir algumas alterações, na procura de aumentar a performance dos utilizadores em termos de prevenção de acidentes na construção. Após a análise de cada módulo, redefine-se o processo de aplicação do sistema.

Esta proposta visa a aplicação deste sistema numa empresa de construção, na qual este sistema seria aplicado por estagiários ou trabalhadores com pouca ou nenhuma experiência em obra. A

formação oferecida por este sistema leva a aquisição de conhecimentos em termos de gestão de segurança por parte dos trabalhadores, de forma a aumentar a sua performance na execução de tarefas de construção. Nestas recomendações, vão ser integrados procedimentos existentes no sistema presente no artigo *A Social Virtual Reality Based Construction Safety Education System for Experimental Learning* [68].

Este artigo, apresenta um sistema com algumas semelhanças com o sistema ECSES, mas que acabou por não ser integrado nos casos de estudo relevantes. O sistema não emprega a RA e a sua tecnologia, pelo que os sistemas SMVS e ECSES foram considerados como mais completos, em termos de gestão de segurança na construção.

Apesar desta situação, o sistema apresenta métodos de visualização que foram considerados para uma melhor aplicação do sistema ECSES. A adição de processos inerentes à prevenção de acidentes presente neste artigo, pode levar a um sistema mais completo e uma performance mais eficiente dos seus utilizadores.

5.5.1. MÓDULO SKD

O SKD focou-se no ensino e transferência de conhecimento aos estudantes, baseado em casos de acidente reais de construção. Com a análise destes casos, os formadores introduziram regulamentos de segurança, orientações e métodos construtivos com a utilização de RV e RA.

Propõe-se, neste trabalho, a integração de uma sala de aula em ambiente virtual, descrita no artigo anteriormente mencionado, desenvolvida com a utilização do *Autodesk Revit*, de forma a que esta permita a sincronização em tempo real de todos os utilizadores (trabalhadores e formadores). Serão permitidas interações entre os participantes num ambiente colaborativo, onde se ilustra e analisa áreas de atividade e as suas tarefas de construção.

A sala de aula em ambiente virtual apresenta vantagens em relação aos métodos tradicionais de formação em espaço real nos seguintes parâmetros:

- Acesso alargado de estudantes à experiência (inexistência da limitação no número de estudantes dentro de uma sala no mundo real);
- Facilidade no acesso a materiais e equipamentos de construção em ambiente virtual com a utilização da base de dados do sistema;
- Independência na localização, possibilidade de acesso remoto à experiência.

Esta abordagem deve garantir boas condições de visualização e de áudio, para que a transferência de conhecimentos e respetiva aprendizagem dos trabalhadores não seja comprometida. Esta sala virtual encontra-se representada na figura 5.16.



Fig. 5.16 – Sala de aula virtual [68]

Propõe-se, também, a integração de cenários virtuais que representam diferentes fatores de riscos de construção, ao invés de, apenas, se apresentar casos de acidentes relacionados com quedas dos trabalhadores. As quedas apresentam-se como o fator de risco mais comum em acidentes de construção, mas a representação de maior quantidade e diversidade de perigos irá consciencializar de forma mais eficiente os utilizadores do sistema.

De forma a tornar o sistema mais completo, propõe-se a criação de cenários virtuais que representem acidentes de construção relacionados com os *Fatal Four*. Os *Fatal Four* representam os quatro fatores de risco que levam à ocorrência de um maior número de mortes em acidentes de construção. Estes foram responsáveis pela morte de 591 trabalhadores, de um total de 1008 fatalidades ocorridas na indústria de construção (58,6%), em 2018, nos EUA (Estados Unidos da América). Estes fatores de risco apresentaram os seguintes números [69]:

- Quedas (*falls*): 338 mortes (33,5%);
- Choque com objetos (*struck-by*): 112 mortes (11,1%);
- Esmagamento/entalamento (*caught-in or between*): 86 mortes (8,5%);
- Eletrocussões (*electrocution*): 55 mortes (5,5%).

Conclui-se, portanto, que estes fatores de risco representam mais de metade das fatalidades ocorridas em 2018, nos EUA.

Desta forma, a sua integração no módulo SKD é de grande importância, permitindo aos trabalhadores a aquisição de conhecimento dos requisitos de segurança de cada um destes fatores de risco. A performance dos seus utilizadores será melhorada pelo acesso a mais casos de acidentes em ambiente virtual e análise e seleção das medidas de prevenção adequadas. Estes fatores de risco estão representados na figura 5.17.

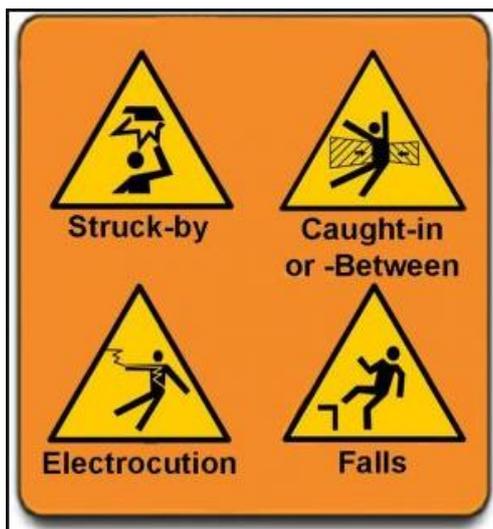


Fig. 5.17 – Fatal Four [70]

5.5.2. MÓDULO SKR

O módulo SKR promoveu uma oportunidade experimental prática aos utilizadores, sendo possível aplicar os conhecimentos adquiridos no módulo anterior. Estes foram sujeitos a executar uma inspeção num ambiente virtual, com o objetivo de reconhecer os fatores de risco existentes em obra.

A proposta de recomendação para este módulo prende-se com a integração da descrição sequencial de tarefas construtivas de forma coletiva, por parte dos trabalhadores. Após uma minuciosa inspeção individual das áreas de atividade de construção, a realização conjunta destes procedimentos em ambiente virtual demonstra grande utilidade para os participantes desta experiência.

Os trabalhadores seriam fornecidos, individualmente, com cenários virtuais com a representação de uma etapa específica de uma tarefa de construção. Recomenda-se a colaboração entre os integrantes do grupo, de forma a se concluir a sequência construtiva e identificar os erros e perigos associados a estes cenários. Cada grupo vai decidir o método construtivo que considerem mais adequado e apresentam a sua solução aos restantes colegas e formadores. Cada grupo será avaliado pelos formadores e estes finalizam este processo com a apresentação da sequência correta e explicação da mesma.

A divisão em grupos, de forma a que os trabalhadores apresentem capacidade de colaborar em simultâneo entre eles, apresenta-se como uma ferramenta muito útil na aquisição de conhecimentos sobre os requisitos de segurança na construção. Além disto, a comunicação interpessoal poderia ser melhorada e os métodos construtivos seriam memorizados de forma mais eficiente.

Após a aquisição de conhecimento em termos de medidas de prevenção de acidentes em tarefas de construção, torna-se bastante apelativa a integração destas representações, pela quantidade elevada de trabalhadores necessária na execução destas tarefas. Se a comunicação e as relações laborais entre os trabalhadores forem melhoradas, a performance individual de cada participante pode ser aumentada. Desta forma podem ser reconhecidos comportamentos inadequados e métodos construtivos ineficientes de construção por parte dos utilizadores do sistema.

Exemplificando com a tarefa de betonagem abordada neste capítulo, cada integrante do grupo seria encarregue de descrever uma etapa desta tarefa. Considerando um grupo de quatro, as etapas entregues, de forma aleatória, pelos formadores seriam as seguintes:

- Transporte de betão;
- Bombagem de betão;
- Descarga e colocação de betão;
- Vibração de betão.

Após o fornecimento destas etapas construtivas da tarefa, o grupo deve discutir qual a sequência construtiva correta e de que forma esta será realizada. Identificam-se os riscos e propõe-se medidas de prevenção adequadas.

Após esta abordagem, os formadores apresentam as sequências de trabalho corretas, os riscos e as medidas adequadas e explicam de que forma se pode garantir uma presença segura de vários trabalhadores na mesma área de atividade, em simultâneo. A figura 5.18 ilustra uma betonagem com a presença de vários trabalhadores na mesma área, onde as relações comunicativas e colaborativas devem imperar, para a correta execução da tarefa projetada.



Fig. 5.18 – Existência de múltiplos trabalhadores na mesma área de atividades [71]

5.5.3. MÓDULO SKA

Por fim, o módulo SKA teve, como função essencial, a avaliação dos conhecimentos adquiridos pelos utilizadores ao longo dos módulos anteriores. Este módulo foi desenvolvido pela execução de um jogo com a utilização de RV, que possibilitou a identificação de perigos e percepção de risco. O jogo forneceu aos trabalhadores uma experiência virtual antes de entrar verdadeiramente numa obra e no seu espaço de atividades, e as suas capacidades de reconhecimento de fatores de risco e os comportamentos dos participantes foram testados.

Neste módulo, recomenda-se a integração de questões teóricas no jogo já existente, relacionadas com os fatores de risco adicionados no módulo SKD. O sistema focava, sobretudo, os acidentes

em obra relacionados com quedas de trabalhadores, mas após a aquisição de conhecimentos sobre os restantes fatores dos *Fatal Four*, propõe-se a sua avaliação em termos de prevenção de acidentes.

As questões são dispostas com o auxílio da RA e permitem o teste de aplicabilidade de requerimentos de segurança sobre áreas e tarefas específicas de construção. Desta forma, avalia-se um maior número de tipos de acidentes em obra, e os participantes têm a capacidade de aferir quais as áreas em que sentem maiores dificuldades e que necessitam de adquirir maiores competências para a segurança em obra.

5.5.4. PROCESSO DE APLICAÇÃO DO SISTEMA

Após a descrição das recomendações propostas em cada módulo, é apresentado o novo processo de aplicação do sistema ECSES. Antes de se iniciar o módulo SKD, mantém-se a apresentação dos EPI's aos trabalhadores e a consequente visualização dos mesmos, no corpo dos participantes, com a utilização da RA.

O objetivo deste processo passa pela aprendizagem na identificação de perigos e na utilização dos respetivos equipamentos de proteção em consonância com os regulamentos de segurança. Posto isto, procede-se à interação dos trabalhadores com a sala de aula virtual e inicia-se o módulo com a divisão em grupos, por parte dos participantes desta experiência, sendo-lhes fornecidos casos de acidente em obra.

Estes casos de acidentes são descritos com informações da sua natureza, localização, fase de execução da tarefa respetiva e consequente resultado da anomalia, de forma a que os trabalhadores apresentem capacidade clara de compreensão sobre os casos analisados. A figura 5.19 apresenta um destes casos de acidente presentes no artigo *A Social Virtual Reality Based Construction Safety Education System for Experimental Learning*.

Procede-se, de seguida, à sua visualização através de cenários virtuais, onde se discute, de forma ativa, entre os integrantes de cada grupo, as causas do acidente em análise e as suas respetivas medidas de prevenção. Esta abordagem permite a seleção, por grupo, das causas e medidas de prevenção e respetiva proposta de solução aos formadores e restantes colegas.

O módulo é finalizado com a avaliação, por parte dos formadores, das propostas de cada grupo e discussão das mesmas, na qual estes revelam as causas e medidas de prevenção adequadas ao caso de acidentes. A figura 5.20 demonstra esta interação entre os integrantes de cada grupo e os formadores.

Fall off a toppling scaffold

Admin | 2 | [Icons]



(1) Falling Accident Direction, (2) Roof Painting Area, (3) The Castor Wheels, (4) The Scaffold with Cantilever

General Information	
Date	
The Location	
Accident Case	Fall to below
Work Phase	Maintenance
Work Type	Roof Painting
Spaces	Third Floor
Related Element	Scaffold
Additional Information	

Description

- A worker was assigned to service some [roof](#) painting work at a building. He was erecting a [mobile scaffold](#) along a corridor at the fourth storey of the building when the scaffold toppled. During the erection process, a worker didn't check the quality of steel bar of scaffold. Furthermore, the scaffold ladder was not installed for climbing. After finishing scaffold erection, the worker didn't check the stability of scaffold and directly stand on the concrete wall under handrail to climb to the scaffold. As a result, the worker fell off from the scaffold and out of the building onto the ground 12m below.

Result

- The mobile scaffold (with a [cantilevered](#) structure) was not in a stable position and as not secured to the building structure or metal railing along the building corridor at the time of accident.
- When the worker climbed onto the mobile scaffold to tie the metal deck to cantilevered structure, the mobile scaffold toppled and the worker fell off from the scaffold and building.
- One worker death.

Causes Like - Dislike - Edit

Direct cause(s):	Indirect cause(s):	Basic cause(s):
<ul style="list-style-type: none"> Improper position for climbing to scaffold Inadequate or improper protective equipment Failure to secure scaffold 	<ul style="list-style-type: none"> Lacking of hazard analysis and risk assessment in designing the painting method Problems in safety rules transferring 	<ul style="list-style-type: none"> Lack of the real experience Inadequate work standard (scaffold installation and painting task process)

Ontologies tagging: lack of hazard & risk analysis, Inadequate training

Recommends Like - Dislike - Edit

- Use an alternative method of work - using [automatic exterior spraying equipment](#), or using [mobile crane](#) as platform for a painting worker.
- Conduct risk assessment prior to job commencement, institute safety work procedures for such work: [scaffold repair](#) (steel bar, ladder, sheeting), [safety personal equipment](#) (safety belt, dust mask, goggles, painting clothes, gloves).
- Ensure proper safety measures are in place such as securing of mobile scaffold to the building structure and provision of [lifelines](#) for the works.

Ontologies tagging: Necessary safety method design, Hazard & risk analysis requirement, Careful safety inspection

Tags: link, visited, hovered

Fig. 5.19 – Representação detalhada de um caso de acidente [68]

Posteriormente, os trabalhadores realizam a inspeção, em ambiente virtual, através dos dispositivos móveis para reconhecimento de perigos e percepção de risco. É explicado aos utilizadores, a execução desta tarefa e de que forma pode ser utilizado o dispositivo para a sua execução, seguido da apresentação de estratégias de mitigação.

Finalizada a inspeção individual, os formadores atribuem tarefas de construção aos grupos iniciais e explicam o seu processo construtivo e as etapas necessárias para a realização da tarefa em análise. Cada integrante do grupo recebe as informações correspondentes à sua etapa de execução e, de forma colaborativa, comunicam entre si para a finalização da tarefa e identificação dos perigos associados, em ambiente virtual.



Fig. 5.20 – Discussão, entre grupos, na sala de aula virtual [68]



Fig. 5.21 – Processo de inspeção virtual do ECSES [41]

Este processo fornece uma representação virtual para cultivo das competências cooperativas entre os membros de cada grupo e a aquisição de conhecimentos de segurança e percepção de risco torna-se mais eficiente. Adquire-se, também, conhecimentos de segurança em termos de sequências construtivas nas tarefas realizadas. Após a execução conjunta desta tarefa, os trabalhadores têm a capacidade de rever a sua performance e os formadores fornecem feedback sobre os métodos e sequências construtivas analisadas.

Por fim, o jogo virtual vai ser empregue para avaliação dos conhecimentos de segurança e da capacidade de identificação de perigos e percepção de risco dos trabalhadores. Com a utilização

das tecnologias de visualização, os participantes respondem a um questionário de escolha múltipla sobre processos e equipamentos na prevenção de acidentes e gestão de segurança.



Fig. 5.22 – Questão teórica do teste do ECSES [41]

Em contraste com os métodos tradicionais de prevenção de acidentes, esta abordagem permite aos estudantes a visualização destes cenários. O teste apresenta vários níveis de dificuldade e os resultados dos participantes serão armazenados na base de dados do perfil de cada utilizador. Com base nestes resultados, o sistema reconhece quais os temas que cada estudante se deve focar mais em termos de segurança na construção.

5.6. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo ocorreu a seleção de uma tarefa de construção específica para simulação da aplicação do sistema ECSES. Caracterizou-se a tarefa de betonagem e foram escolhidos os fatores de risco a analisar na simulação do sistema. Estes fatores de risco foram os seguintes:

- Risco de queda em altura;
- Risco de queda ou esmagamento por colapso do escoramento;
- Risco de queda de uma escada;
- Risco de atropelamento pela autobomba de betão;
- Risco de choque com a mangueira de betão;
- Risco de lesão nos olhos dos trabalhadores por incorreta utilização dos EPI's.

Após isto, iniciou-se a descrição da simulação da aplicação do sistema ECSES. Criou-se um cenário virtual, com a utilização dos softwares *SketchUp Pro 20* e *3D Warehouse*, que apresentasse capacidade de representar a execução da tarefa anteriormente selecionada. Gerou-se, portanto, um cenário de uma betonagem de uma laje de um piso superior, com a bombagem de betão realizada com autobomba de betão com lança.

Após a introdução do cenário virtual, procedeu-se à inspeção de segurança virtual, de forma a verificar a existência dos fatores de risco criados. Apresenta-se as representações respetivas e confirma-se o potencial do sistema ECSES em termos de gestão de segurança.

Posto isto, a proposta de recomendações foi apresentada, onde se detalhou cada módulo integrante do ECSES e as suas sugestões, de forma a aumentar a performance dos trabalhadores em termos de prevenção de acidentes. Redefiniu-se o processo de aplicação do sistema, sendo ele o seguinte:

- Apresentação dos EPI's aos trabalhadores e a consequente visualização dos mesmos com a utilização da RA;
- Divisão em grupos de trabalhadores, sendo-lhes fornecidos casos de acidente em obra;
- Visualização através de cenários virtuais onde se discute as causas do acidente em análise e as suas respetivas medidas de prevenção;
- Avaliação, por parte dos formadores, das propostas de cada grupo e discussão das mesmas, onde estes revelam as causas e medidas de prevenção adequadas ao caso de acidente;
- Inspeção individual, em ambiente virtual, através dos dispositivos móveis, por parte dos trabalhadores;
- Reconhecimento de perigos nos cenários virtuais criados;
- Atribuição de tarefas de construção aos grupos iniciais e explicação do processo construtivo e as etapas necessárias para a realização da tarefa em análise;
- Caracterização sequencial da tarefa e identificação dos perigos associados, de forma colaborativa e em ambiente virtual;
- Avaliação dos participantes através de um questionário de escolha múltipla sobre processos e equipamentos na prevenção de acidentes e gestão de segurança.

Com esta redefinição do processo de aplicação do sistema, os utilizadores têm capacidade de aumentarem os seus conhecimentos de segurança sobre um maior número de fatores de risco, aumentar a sua capacidade colaborativa entre eles e melhorar a eficiência na execução das suas tarefas.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta inicial desta dissertação tinha como base a pesquisa e seleção de experiências e casos de estudo de sistemas, com o emprego de tecnologias de visualização, em termos de prevenção de acidentes. A realização deste trabalho permitiu uma grande aquisição de conhecimentos destas tecnologias, em especial, da realidade virtual e da realidade aumentada.

Considerou-se a formação, o planeamento e a inspeção de segurança, como as fases mais importantes em termos de gestão de segurança, com a utilização destas tecnologias. Cada uma destas fases apresenta benefícios para a segurança dos trabalhadores e, desta forma, foram selecionados variados sistemas, nos quais se analisou a sua estrutura e processo de aplicação, assim como o caso de estudo experimental e os seus resultados de avaliação.

Após este procedimento, foi realizada, neste trabalho, a comparação técnica e económica destes sistemas para uma seleção ponderada e justificada do sistema posteriormente simulado. Em termos de software, a RV apresenta motores de jogo, que permitem a criação de animações e jogos para prevenção de acidentes de forma gratuita, sendo o *Unity 3D* e o *Blender* os mais utilizados. Estes programas podem ser obtidos sem custos e permitem a representação de cenários virtuais bastante realistas.

De forma a tornar as experiências mais imersivas, considerou-se a integração de displays visuais, como os HMD's. Estes equipamentos são de grande utilidade para SRV's, mas apresentam custos muito elevados para a realidade deste trabalho.

Esta dissertação tinha como objetivo a descrição de um sistema relativamente económico e de fácil aplicação numa empresa de construção. Assim, a seleção recaiu no sistema ECSES, que aborda todas as fases principais em termos de gestão de segurança e não apresenta custos muito elevados, pela sua configuração ficar ao cargo do *Autodesk Revit* e do *Blender*.

Após esta seleção, considerou-se imprescindível um teste de aplicabilidade do sistema para avaliação do verdadeiro potencial do mesmo em termos de prevenção de acidentes. Este teste focou-se na simulação da aplicação do sistema na identificação de perigos e perceção de risco, ou seja, a simulação do módulo SKR do ECSES.

Este módulo promove uma oportunidade experimental aos utilizadores, sendo possível aplicar os conhecimentos adquiridos no módulo SKD. Os utilizadores foram sujeitos à realização de uma inspeção num ambiente virtual, com o objetivo de reconhecer os fatores de risco existentes em obra.

Como demonstração dos conhecimentos adquiridos, considerou-se a criação própria do cenário virtual, com o suporte do software *SketchUp Pro 20* e dos catálogos do *3D Warehouse*. A tarefa de construção selecionada foi a betonagem e simulou-se a execução desta tarefa com o recurso a estes programas.

Uma das grandes dificuldades neste trabalho foi a transferência correta destas representações para o *Blender 2.8*, que tinha o objetivo de aproximar esta abordagem ao processo de aplicação real do sistema. Desta forma, a demonstração realizada foi apresentada com os cenários do *SketchUp Pro 20*.

A realização da inspeção virtual permitiu a demonstração da identificação correta dos fatores de risco presentes na área de atividade criada, assim como um maior entendimento e uma melhor memorização dos perigos associados.

Posto isto, apresentou-se uma proposta de recomendações para a aplicação deste sistema, onde se realçam as seguintes:

- Integração de uma sala virtual, procedimento presente no sistema do artigo *A Social Virtual Reality Based Construction Safety Education System for Experimental Learning*.
- Integração dos restantes membros dos *Fatal Four* para os casos de acidente analisados no módulo SKD, ou seja, análise de casos de acidentes relacionados com esmagamento dos trabalhadores, choque com objetos e eletrocussões;
- Atribuição de tarefas de construção e caracterização sequencial da tarefa e identificação dos perigos associados, de forma colaborativa e em ambiente virtual;
- Integração dos restantes integrantes dos *Fatal Four* no questionário de avaliação dos utilizadores do ECSES.

Estas recomendações visam tornar o sistema mais completo e aumentar a performance dos utilizadores na execução de tarefas de construção, assim como se espera um aumento na aquisição de conhecimentos de segurança em termos de prevenção de acidentes.

A realização deste trabalho permitiu, não só, a verificação do potencial das tecnologias de visualização na gestão de segurança na construção, como, também, a seleção de um sistema robusto e capaz de aumentar as competências dos seus trabalhadores e aumentar a sua performance.

6.2. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

De forma a complementar e dar continuidade a este trabalho, são propostas algumas situações:

- Implementação completa do sistema, com a abordagem de todos os módulos do ECSES;
- Aplicação do sistema numa empresa de construção e avaliação dos resultados;
- Aplicação do sistema com as recomendações propostas neste trabalho e avaliação destes resultados;
- Comparação das duas abordagens e avaliação de eficiência de ambas;
- Com base nestes resultados, aperfeiçoamento do sistema;
- Validação do sistema e conseqüente comercialização do mesmo.

A realidade virtual e a realidade aumentada ainda não se popularizaram totalmente na construção, mas encontram-se cada vez mais próximas de revolucionar esta indústria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Zhou, Zhipeng; Goh, Yang Miang; Li, Qiming. *Overview and analysis of safety management studies in the construction industry*. Safety Science, fevereiro 2015, 337-350, Elsevier.
- [2] Park, Chan-Sik; Kim, Hyeon-Jin. *A framework for construction safety management and visualization system*. Automation in Construction, agosto 2013, 95-103, Elsevier.
- [3] Chi, Hung-Lin; Kang, Shih-Chung; Wang, Xiangyu. *Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction*, Automation in Construction, agosto 2013, 116-122, Elsevier.
- [4] Li, Heng; Chan, Greg; Skitmore Martin. *Visualizing safety assessment by integrating the use of game technology*. Automation in Construction, março 2012, 498-505, Elsevier.
- [5] Behzadi, Ajang. *Using Augmented and Virtual Reality Technology in the Construction Industry*. American Journal of Engineering Research, 2016, 350-353.
- [6] Milgram, Paul; Kishino, Fumio. *A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*. IEICE Transactions on Information Systems, dezembro 1994, 1321-1329.
- [7] Steuer, Jonathan. *Defining Virtual Reality: Dimensions Determinating Telepresence*. Journal of Communication, dezembro 1992, 73-93.
- [8] Azuma, Ronald T. *A Survey of Augmented Reality*. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, agosto 1997, 355-385.
- [9] <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/virtual-reality>. Acedido em abril 2020.
- [10] Poetker, Bridget. *The Very Real History of Virtual Reality (+A Look Ahead)*. 2019. <https://learn.g2.com/history-of-virtual-reality>. Acedido em abril 2020.
- [11] Boshé, Frédéric; Abdel-Wahab, Mohamed; Carozza, Ludivico. *Towards a Mixed Reality System for Construction Trade Training*. Journal of Computing in Civil Engineering, março 2016, ASCE Library.
- [12] Zhang, Hui. *Head-mounted display-based intuitive virtual reality training system for the mining industry*. International Journal of Mining Science and Technology, julho 2017, 717-722, Elsevier.
- [13] Thornson, Carol A; Goldiez, Brian F; Le, Huy. *Predicting presence: Constructing the Tendency toward Presence Inventory*. International Journal of Human-Computer Studies, janeiro 2009, 62-78, Elsevier.
- [14] Bae, Hyojoon; Golparvar-Fard; Manu, White, Jules. *Image-based Localization and Content Authoring in Structure-from-Motion Point Cloud Models for Real-Time Field Reporting Applications*. Journal of Computing in Civil Engineering, julho 2015, ASCE Library.
- [15] Perlman, Amotz; Sacks, Rafael; Barak, Ronen. *Hazard recognition and risk perception in construction*. Safety Science, abril 2014, 22-31, Elsevier.
- [16] Hou, Lei; Chi, Hung-Lin; Tarng, Wernhuar; Chai, Jian; Panuwatwanich, Kriengsak; Wang, Xiangyu. *A framework of innovative learning for skill development in complex operational tasks*. Automation in Construction, novembro 2017, 29-40, Elsevier.
- [17] Li, Xiao; Yi, Wen; Chi, Hung-Lin; Wang, Xiangyu; Chan, Albert P.C. *A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety*. Automation in Construction, fevereiro 2018, 150-162, Elsevier.

- [18] <http://www.visbox.com/products/cave/>. Acedido em abril 2020.
- [19] <http://www.visbox.com/VisCube-C4-T3-datasheet.pdf>. Acedido em abril de 2020.
- [20] The Verge. *The rise and fall and rise of Virtual Reality*. 2017. <https://www.theverge.com/a/virtual-reality>. Acedido em abril 2020.
- [21] Unity. *VR Best Practice*. 2020. <https://learn.unity.com/tutorial/vr-best-practice#>. Acedido em abril de 2020.
- [22] PCMag. *The Best VR Headsets for 2020*. 2020. <https://www.pcmag.com/picks/the-best-vr-headsets>. Acedido em abril 2020.
- [23] Virtual Living. *The Most Promising VR Headsets Available Today*. 2017. <https://www.virtualliving.io/virtual-reality-technologies/the-most-promising-vr-headsets-available-today>. Acedido em abril 2020.
- [24] Wang, Xiangyu; Truijens, Martijn; Hou, Lei, Wang, Ying; Zhou, Ying. *Integrating Augmented Reality with Building Information Modeling: Onsite construction process controlling for liquefied natural gas industry*. Automation in Construction, abril 2014, 96-105, Elsevier.
- [25] Ward, Jeff. *What is a Game Engine?* 2017. https://www.gamecareerguide.com/features/529/what_is_a_game_.php. Acedido em abril 2020.
- [26] Poetker, Bridget. *A Brief History of Augmented Reality (+Future Trends & Impact)*. 2019. <https://learn.g2.com/history-of-augmented-reality>. Acedido em abril 2020.
- [27] Alder, Mike; Suerth, Jennifer. *When Augmented Reality becomes reality*. 2019. <https://www.pepperconstruction.com/blog/when-augmented-reality-becomes-reality>. Acedido em abril 2020.
- [28] Liao, Longhui; Teo, Evelyn Ai Lin. *Organizational Change Perspective on People Management in BIM Implementation in Building Projects*. Journal of Management in Engineering, maio 2018, ASCE Library.
- [29] Ghaffarianhoseini, Ali; Tookey, John; Ghaffarianhoseini, Amirhosein; Naismith, Nicola; Azhar, Salman; Efimova, Olia; Raahemifar, Kaamran. *Building Information Modeling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, agosto 2017, 1046-1053, Elsevier.
- [30] Wang, Xiangyu; Love, Peter E.D; Kim, Mi Jeong; Park, Chan-Sik; Sing, Chun-Pong; Hou, Lei. *A conceptual framework for integrating building information modeling with augmented reality*. Automation in Construction, setembro 2013, 37-44, Elsevier.
- [31] Sacks, Rafael; Whyte, Jennifer; Swissa, Dana; Raviv, Gabriel; Zhou, Wei; Shapira, Aviad. *Safety by design: dialogues between designers and builders using virtual reality*. Construction Management and Economics, abril 2015, 55-72.
- [32] Bahn, Susanne. *Workplace hazard identification and management: The case of an underground mining operation*. Safety Science, agosto 2013, 129-137, Elsevier.
- [33] Ge, Li; Kuester, Falko. *Integrative Simulation Environment for Conceptual Structural Analysis*. Journal of Computing in Civil Engineering, julho 2015, ASCE Library.
- [34] Teizer, Jochen; Cheng, Tao; Fang, Yihai. *Location tracking and data visualization technology to advance construction ironworkers' education and training in safety and productivity*. Automation in Construction, novembro 2013, 53-68, Elsevier.

- [35] Build. Virtual Reality – The Ultimate Safety and Training Technology. 2019. <https://www.build-review.com/virtual-reality-the-ultimate-safety-and-training-technology/>. Acedido em abril 2020.
- [36] Guo, Hongling; Li, Heng; Chan, Greg; Skitmore, Martin. *Using game technologies to improve the safety of construction plant operations*. Accident Analysis and Prevention, setembro 2012, 204-213, Elsevier.
- [37] Ahmed, Shakil. *A Review on Using Opportunities of Augmented Reality and Virtual Reality in Construction Project Management*. Organization, Technology and Management in Construction 2019, novembro 2018, 1839-1852.
- [38] Yeh, Kai-Chen; Tsai, Meng-Han; Kang, Shih-Chung. *On-Site Building Information Retrieval by Using Projection-Based Augmented Reality*. Journal of Computing in Civil Engineering, maio 2012, ASCE Library.
- [39] Dong, Suyang; Feng, Chen; Kamat, Vineet R. *Sensitivity analysis of augmented reality-assisted building damage reconnaissance using virtual prototyping*. Automation in Construction, agosto 2013, 24-36, Elsevier.
- [40] Wong, Johnny; Wang, Xiangyu; Li, Heng; Chan, Greg; Li, Haijiang. *A review of cloud-based BIM technology in the construction setor*. Journal of Information Technology in Construction, setembro 2014, 281-291.
- [41] Le, Quang Tuan; Pedro, Akeem; Lim, Chung Rok; Park, Hee Taek; Park, Chansik; Kim, Hong Ki. *A Framework for Using Mobile Based Virtual Reality and Augmented Reality for Experimental Construction Safety Education*. International Journal of Engineering Education, maio 2015, 713-725.
- [42] Juang, J.R; Hung, W.H; Kang, S.C. *SimCrane 3D⁺: A crane simulator with kinesthetic and stereoscopic vision*. Advanced Engineering Informatics, outubro 2013, 506-518, Elsevier.
- [43] Du, Jing; Shi, Yangming; Zou, Zhengbo; Zhao, Dong. *CoVR: A Cloud-Based Multiuser Virtual Reality Headset System for Project Communication of Remote Users*. Journal of Construction Engineering and Management, fevereiro 2018, ASCE Library.
- [44] Kim, Kinam; Kim, Hongjo; Kim, Hyoungkwan. *Image-based construction hazard avoidance system using augmented reality in wearable device*. Automation in Construction, novembro 2017, 390-403, Elsevier.
- [45] <https://www.autodesk.com/products/revit/subscribe?plc=RVT&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1#>. Acedido em maio 2020.
- [46] <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=23714>. Acedido em maio 2020.
- [47] <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS/3DVIA/3DVIAVirtools/demoshowcase/html/index.html>. Acedido em maio 2020.
- [48] <https://store.unity.com/#plans-individual>. Acedido em maio 2020.
- [49] <https://www.blender.org/download/>. Acedido em maio 2020.
- [50] <https://www.nvidia.com/content/newsletters/web/3D-Vision/3d-vision-glasses-web.html>
- [51] <https://www.microsoft.com/en-us/store/locations/OculusRift>. Acedido em maio 2020.
- [52] <https://www.vive.com/eu/product/>. Acedido em maio 2020.

- [53] <https://www.mobileadvance.com/glass-enterprise-edition-2-developer-kit/>. Acedido em maio 2020.
- [54] https://www.ebay.com/itm/XBOX-ONE-KINECT-MOTION-SENSOR-Xbox-One-MINT-SUPER-FAST-DELIVERY-/112117712409?ef_id=CjwKCAjwvtX0BRAFEiwAGWJyZB_zAlx2vNYrwyT-Q8CI3a_yNsnBL9L6TAXHtDABWc17G7hBldoi4xoCzSgQAvD_BwE:G:s. Acedido em maio 2020.
- [55] <https://www.mathworks.com/pricing-licensing.html>. Acedido em maio 2020.
- [56] <http://www.gruposoenharia.com/426893461?i=129469748>. Acedido em junho 2020.
- [57] Palhinha, Paulo; Santos, Paulo; Teixeira, José Cardoso. *Segurança nos Trabalhos de Betonagem em Estaleiro*. Congresso Construção 2007 – 3º Congresso Nacional, 17 a 19 de dezembro de 2007, Coimbra, 1-9.
- [58] http://www.chavevertical.pt/crbst_639.html. Acedido em junho 2020.
- [59] <http://www.rmacontainers.com.br/escoras-metalicas-construcao-civil>. Acedido em junho 2020.
- [60] https://www.manutan.pt/pt/map/escada-simples-com-degraus-inclinados-a037248?shopping=true&gclid=CjwKCAjwxLH3BRApEiwAqX9arR5N1xUouoxIHJpRDP1xRthmaQvj05WiVdaTqdcYjNZ4cWr1WBiOJRoCxBgQAvD_BwE. Acedido em junho 2020.
- [61] Ibera. *Segurança, Saúde e Meio Ambiente na Colocação de Betão em Obra*. Dezembro 2014. https://ibera.pt/wp-content/uploads/2018/11/REGRAS.SEG_.IBERA_.pdf. Acedido em junho 2020.
- [62] https://roadstars.mercedes-benz.com/pt_PT/magazine/transport/01-2017/two-arocs-4148-with-concrete-pumps-at-bombeos-de-hormigon-almargen.html. Acedido em junho 2020.
- [63] Pinto, Rui. *Avaliação e controlo de riscos na execução de uma ponte com recurso a carro de avanço*. Dissertação de Mestrado, UM, 2013.
- [64] <https://pt.dreamstime.com/fotografia-editorial-um-grupo-de-trabalhadores-da-constru%C3%A7%C3%A3o-que-derramam-o-concreto-no-trabalho-do-formul%C3%A1rio-da-laje-de-assoalho-image67901807>. Acedido em junho 2020.
- [65] <https://www.eda.pt/Profissionais/Fichas%20de%20Procedimentos%20de%20Segurana/CC%20-%20Constru%C3%A7%C3%A3o%20Civil/CC09%20%E2%80%93%20Betonagem.pdf>. Acedido em maio 2020.
- [66] <https://www.pontofrio.com.br/ferramentas/ferramentaseletricas/diversosferramentas/vibrador-de-concreto-2200w-sem-mangote-gvc-22-ex-bosch-14112705.html>. Acedido em junho 2020.
- [67] <https://3dwarehouse.sketchup.com/search/?q=concrete%20work>. Acedido em junho 2020.
- [68] Le, Quang Tuan; Akeem, Park; Park, Chan-Sik. *A Social Virtual Reality Based Construction Safety Education System for Experimental Learning*. Journal of Intelligent & Robotics Systems, setembro 2014, 487-506.
- [69] <https://www.osha.gov/data/commonstats>. Acedido em junho 2020.

- [70] KHA. *The Fatal Four: Prolific hazards in the construction industry*. 2018.
<https://www.kha.com/the-fatal-four-prolific-hazards-in-the-construction-industry/>. Acedido em junho 2020.
- [71] <https://andrelit.com.br/qual-o-melhor-revestimento-para-as-construcoes-de-paredes-de-concreto-in-loco-2/>. Acedido em junho 2020.