

# **DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS BASEADAS EM REALIDADE AUMENTADA E BIM COMO SUPORTE À INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO**

**GONÇALO RODRIGUES GOMES**

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

---

Orientador: Professor Doutor Humberto Salazar Amorim Varum

JUNHO DE 2021

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto: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](mailto: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 - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021.*

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 FAMÍLIA, AOS AMIGOS, A VOCÊS.

*Un líquido es un estado de la materia  
sin una forma particular.  
Cambia fácilmente y sólo queda definido  
por el recipiente que lo contiene.  
El cuerpo humano es un 70% de agua.*



## AGRADECIMENTOS

Cinco anos não cabem representados nesta página, nem tampouco neste documento. Foram cinco anos de crescimento, de aprendizagem e de muitas experiências. Foram momentos de felicidade e de conquista, mas também alguns de tristeza e revolta. Acredito que só dessa forma é que nos definimos, enquanto pessoas, e nos tornamos presentes e ativos na sociedade.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Humberto Varum, pelo tempo despendido, pelos conhecimentos que me transmitiu, mas, sobretudo, pela oportunidade e confiança que depositou em mim para o estudo deste tema e a redação desta dissertação.

Agradeço, de seguida, ao Eng.º António Monteiro pela oportunidade que me concedeu ao desenvolver esta dissertação na empresa A400 - Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda.

Um forte agradecimento ao André Azevedo e ao Tiago Campelo pela coorientação deste documento e por todos os ensinamentos e conhecimentos transmitidos.

Agradeço ao Fábio Dinis pela disponibilidade e auxílio que me prestou e pela oportunidade de desenvolver, no estudo de caso, uma solução compatível com os *Hololens2* da *Microsoft*.

Um grande obrigado a toda a equipa da Buildgest – Inspeção e Diagnóstico que me recebeu e me integrou da melhor forma, desde o primeiro dia. Foram momentos de diversão, mas também de trabalho e aprendizagem, tendo tido a possibilidade de desenvolver alguns trabalhos de campo na área da inspeção e diagnóstico. Ao Vasco e à Inês, por todo carinho e preocupação demonstrados desde sempre mas, principalmente, por esta amizade que se criou.

Um especial agradecimento à Patrícia, que sempre se mostrou incansável em ajudar. Aquela que coloca tudo o que é em tudo o que faz. Obrigado pela tua disponibilidade e amizade em todos os momentos que, certamente, vão mais além destes últimos 5 meses. À Ana, pela eterna amizade, companheirismo e aprendizagem. Obrigado por tudo. Ao Pedro, por me ter acompanhado e ajudado, desde cedo, nesta etapa tão marcante na minha vida.

Aos meus amigos e a todos aqueles que direta ou indiretamente fizeram parte deste percurso.

Agradeço, finalmente, à minha Família... pelo apoio infundável, pela enorme confiança que tiveram em mim e a pela vossa compreensão durante esta fase tão importante. Sem vocês não teria chegado até aqui.

A todos, muito obrigado.



## RESUMO

A existência de anomalias e patologias graves nas estruturas de betão armado levam a que seja necessário a realização de inspeções técnicas para avaliar o estado de conservação das mesmas, mas também verificar a que ações as estruturas estão sujeitas e se foram cumpridas as disposições de projeto. Desta forma, é possível determinar medidas corretivas, eficazes e, sobretudo, adequadas à estrutura em causa.

A inspeção de estruturas é, então, um trabalho por vezes complexo e que implica um conhecimento alargado sobre as temáticas de engenharia de estruturas e do comportamento dos materiais, estando inserida não só na parte de execução de uma obra, mas durante todo o ciclo de vida de uma estrutura.

Por norma, para um trabalho de inspeção, são utilizados desenhos 2D e equipamentos básicos de medição e, de certa forma, a eficácia desta tarefa é comprometida quando estamos perante elementos estruturais complexos onde a informação, mesmo que 3D, é fornecida em 2D, levando a erros ou constrangimentos na leitura.

Face a esta situação, esta dissertação propõe uma abordagem tecnológica que tem como bases a Realidade Aumentada (RA) e a Modelação BIM (*Building Information Modeling*) como suporte à inspeção de estruturas de betão armado.

A metodologia BIM tem vindo a substituir o CAD (*Computer Aided Design*) e, embora a indústria da AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção) ofereça alguma resistência a esta mudança devido não só à necessidade de renovação de metodologias de trabalho e aprendizagem na utilização de novas ferramentas, mas principalmente devido ao investimento monetário relacionado com a aquisição de equipamento e de licenças de *software*, tem-se vindo a observar um crescimento do número de empresas a utilizar esta metodologia.

A Realidade Aumentada não é um conceito novo, mas tem sido explorado nos últimos tempos por forma a servir outros setores, nomeadamente o setor da AEC, atingindo resultados interessantes e de elevado potencial. Através da RA torna-se possível sobrepor a um meio real, por exemplo o ambiente de obra, modelos e componentes 3D com comportamentos e propriedades reais.

Nesse sentido, foram desenvolvidas duas aplicações baseadas em Realidade Aumentada e em Realidade Mista com elementos modelados em *software* BIM, especificamente em *Revit*. Uma APK (*Android Package*), compatível com dispositivos *Android*, e outra API UWP (*Universal Windows Platform*), compatível com equipamentos *Windows*, neste caso *HoloLens 2* da *Microsoft*, que permitem visualizar e interagir com modelos virtuais de elementos estruturais e as suas armaduras, sobrepostos ao ambiente real. Com isto, pretende-se demonstrar a versatilidade desta abordagem tecnológica, através da criação de vários cenários práticos.

PALAVRAS-CHAVE: Realidade Aumentada, Realidade Mista, BIM, Inspeção de Estruturas, *Unity*



## **ABSTRACT**

The existence of serious anomalies and pathologies in reinforced concrete structures leading to the need of technical inspections to assess the state of conservation thereof, but also to verify to which actions the structures are subjected to and whether the design provisions have been complied with. Thus, it is possible to determine corrective measures, which are effective and, above all, proper to the structure concerned.

The inspection of structures is, sometimes, a complex task that implies a broad knowledge about the thematic of structural engineering and behaviour of materials, being inserted not only in the execution, in the construction site, but throughout the life cycle of a structure.

As a rule, for inspection work, 2D drawings and basic measuring equipment are used and, in a way, the effectiveness of this task is compromised when we are faced with complex structural elements where information, even if 3D, is provided in 2D, leading to errors or constraints in reading.

Given this situation, this dissertation proposes a technological approach that is based on Augmented Reality (AR) and BIM (Building Information Modeling) as a support for the inspection of reinforced concrete structures.

The BIM methodology has been replacing CAD (Computer-Aided Design) and although the AEC (Architecture, Engineering and Construction) industry offers some resistance to this change due not only to the need to renew work and learning methodologies in the use of new tools, but mainly due to monetary investment related to the acquisition of equipment and software licenses, there has been a growth in the number of companies using this methodology.

Augmented Reality is not a new concept but has been explored in recent times to serve other sectors, notably the AEC, achieving interesting results of high potential. Through AR it is possible to overlap a real environment, such as the work environment, models, and 3D components with real behaviours and properties.

In this sense, two applications were developed based on Augmented Reality and Mixed Reality with elements modelled on BIM software, specifically in REVIT. An APK (Android Package), compatible with Android devices, and another API UWP (Universal Windows Platform), compatible with Windows devices, in this case, HoloLens 2 from Microsoft, which allow you to view and interact with virtual models of structural elements and their rebar, overlapping the real environment. With this, it is intended to demonstrate the versatility of this technological approach, through the creation of several practical scenarios.

**Keywords:** Augmented Reality, Mixed Reality, BIM, Structural Inspection, Unity



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	I
RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	V
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO .....	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
<b>2. INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS EM BETÃO ARMADO .....</b>	<b>3</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.2. ANOMALIAS EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO .....	3
2.2.1. DEGRADAÇÃO DO BETÃO .....	7
2.2.2. CORROSÃO DAS ARMADURAS .....	9
2.2.3. ERROS DE PROJETO E DE EXECUÇÃO.....	11
2.3. INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS E METODOLOGIAS DE INSPEÇÃO.....	11
2.3.1. METODOLOGIAS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO .....	12
2.3.2. ENSAIOS DE DIAGNÓSTICO.....	14
2.4. MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS .....	15
<b>3. BUILDING INFORMATION MODELING.....</b>	<b>17</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	17
3.2. DEFINIÇÃO DO CONCEITO.....	18
3.2.1. PARADIGMA DA INDÚSTRIA DA AEC .....	18
3.2.2. INTEGRATED PROJECT DELIVERY .....	22
3.2.3. SURGIMENTO DO BIM E O SEU CONCEITO .....	22
3.3. APLICAÇÕES E VANTAGENS DO BIM .....	24
3.4. <i>RETURN ON INVESTMENT</i> .....	25
3.5. <i>SOFTWARE PARA BIM</i> .....	26
3.6. <i>INDUSTRY FOUNDATION CLASSES</i> .....	26
3.7. RISCOS E DESAFIOS.....	27
3.7.1. RISCOS PARA O BIM .....	28
3.7.2. DESAFIOS DO BIM .....	28
3.8. MODELOS BIM.....	30

3.8.1. MODELO 3D - PARAMÉTRICO .....	30
3.8.2. MODELO DE INFORMAÇÃO .....	30
3.9. NORMALIZAÇÃO .....	32
3.9.1. NORMAS BIM .....	33
3.9.2. GUIAS BIM .....	35
3.9.3. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO .....	35
3.9.4. NORMALIZAÇÃO BIM EM PORTUGAL .....	36
<b>4. REALIDADE AUMENTADA .....</b>	<b>37</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	37
4.2. A RVC E A RA .....	37
4.2.1. DEFINIÇÃO DE CONCEITO .....	37
4.2.2. CRIAÇÃO DE VALOR .....	38
4.2.3. FERRAMENTAS POLÍTICAS E INCENTIVOS .....	39
4.3. RISCOS E POTENCIALIDADES .....	40
4.3.1. RISCOS E MITIGAÇÕES .....	41
4.3.2. POTENCIALIDADES .....	42
4.4. <i>HARDWARE E SOFTWARE</i> .....	43
4.4.1. <i>HARDWARE</i> .....	43
4.4.2. <i>SOFTWARE</i> .....	44
<b>5. A REALIDADE AUMENTADA E O BIM COMO SUPORTE À INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS EM BETÃO ARMADO .....</b>	<b>45</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	45
5.2. O BIM E A REALIDADE AUMENTADA .....	46
5.3. O BIM E A RA COMO SUPORTE À INSPEÇÃO .....	47
5.4. MOTORES DE JOGO PARA CRIAÇÃO DE AMBIENTES VIRTUAIS .....	47
5.4.1. <i>UNITY</i> .....	48
5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	49
<b>6. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>51</b>
6.1. ENQUADRAMENTO .....	51
6.2. OBJETIVOS .....	51
6.3. CONFIGURAÇÃO DA APLICAÇÃO .....	52
6.3.1. METODOLOGIA ADOTADA .....	52
6.3.2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	54

6.4. CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA DE RA NO <i>UNITY</i> .....	54
6.5. EXPERIMENTAÇÃO .....	73
6.6. FERRAMENTA SECUNDÁRIA DESENVOLVIDA COM REALIDADE MISTA.....	81
6.6.1. CONSTRUÇÃO DA APLICAÇÃO.....	82
6.6.2. EXPERIMENTAÇÃO .....	89
<b>7. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	<b>95</b>
7.1. CONCLUSÃO .....	95
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	96
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>99</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>A1</b>
TARGET DOS MODELOS DE REALIDADE AUMENTADA: CÓDIGO QR .....	A3
DOCUMENTOS DO SERVIÇO DE ARQUIVO DA FEUP: ELEMENTOS ESTRUTURAIS DA GALERIA ENTRE OS EDIFÍCIOS F E G .....	A5



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fissuração do betão.....	4
Figura 2.2 - Delaminação do betão [45] .....	4
Figura 2.3 - Desagregação do betão [1].....	5
Figura 2.4 - Segregação do betão .....	5
Figura 2.5 – Causas comuns das anomalias estruturais segundo a NP EN 1504-9.....	6
Figura 2.6 – Modelo simplificado do processo de corrosão [46]. .....	10
Figura 2.7 – Técnicas de ensaio de diagnóstico [6]. .....	15
Figura 2.8 - Reposição dos níveis de segurança estrutural [47]. .....	16
Figura 3.1 – Aplicação do BIM ao longo do ciclo de vida de uma construção [42]. .....	18
Figura 3.2 – Metodologia Tradicional [9]. .....	19
Figura 3.3 – Interface da metodologia tradicional, Adaptado de [41]. .....	19
Figura 3.4 – Metodologia colaborativa [9].....	20
Figura 3.5 – Interface da metodologia colaborativa. Adaptado de [41]. .....	20
Figura 3.6 – Curva de esforço/efeito de MacLeamy [9].....	21
Figura 3.7 – Aplicações e usos do BIM, Adaptado de [11].....	25
Figura 3.8 – Produtividade após implementação da metodologia BIM [13]. .....	25
Figura 3.9 – Lições chave de políticas e iniciativas, realizado pela <i>PwC Analysis</i> [20]. .....	29
Figura 3.10 – Níveis de maturidade BIM [49]. .....	30
Figura 3.11 – Constituintes do LOD [43]. .....	31
Figura 3.12 – ISO <i>Deliverables</i> [17].....	33
Figura 3.13 - Interface entre as várias partes para fins de gestão de informações [50].....	35
Figura 3.14 – Fatores fundamentais do plano estratégico da CT179 [38].....	36
Figura 4.1 – Realidade Virtual Continuum [27].....	37
Figura 4.2 – Soluções de RA no setor da AEC [31]. .....	41
Figura 4.3 – Sistema de operação da RA [29].....	43
Figura 5.1 – Interface do <i>Unity</i> . .....	48
Figura 6.1 – Módulos que consistem na aplicação criada.....	52
Figura 6.2 – <i>Workflow</i> para a criação da APK.....	53
Figura 6.3 – Aspeto do Menu Principal.....	55
Figura 6.4 – <i>Script</i> de transição de cenários (ChangeScene). .....	55
Figura 6.5 – <i>Unity Inspector</i> para o <i>script</i> ChangeScene().....	56

Figura 6.6 – Aspeto da página informativa.....	56
Figura 6.7 – Aspeto do Menu do módulo de Inspeção.....	57
Figura 6.8 – Modelo BIM do pórtico.....	57
Figura 6.9 – Definição das propriedades da câmara de RA no <i>Unity</i> através do <i>Vuforia Engine</i> .....	58
Figura 6.10 – Aspeto do Cenário de Visualização e Interação com o modelo de um pórtico.....	58
Figura 6.11 – <i>Script</i> de rotação de objetos e controlo de velocidade de rotação.....	59
Figura 6.12 – <i>Unity Inspector</i> para o <i>script RotateObj</i> .....	60
Figura 6.13 – <i>Script</i> para controlo da escala do objeto.....	60
Figura 6.14 – <i>Unity Inspector</i> para o <i>script ScaleObj</i> .....	61
Figura 6.15 – <i>Script</i> para ativar ou desativar objetos.....	61
Figura 6.16 – <i>Unity Inspector</i> para o <i>script HideObj</i> .....	62
Figura 6.17 – Esquema 2D da proposta de um pilar do LESE.....	62
Figura 6.18 – Modelo BIM do pilar.....	63
Figura 6.19 – Posicionamento da estrutura em relação ao target.....	63
Figura 6.20 – Atribuição de características físicas e ações aos objetos.....	64
Figura 6.21 – Aspeto do Cenário de Visualização do modelo de um pilar do LESE.....	64
Figura 6.22 – Aspeto do Cenário de Informação de um pilar do LESE.....	65
Figura 6.23 – <i>Script</i> de translação de um objeto com surgimento de informação (ObjInfo).....	66
Figura 6.24 – <i>Box Collider</i> e aplicação do <i>script</i> “ObjInfo”.....	67
Figura 6.25 – <i>Script</i> de translação de vários objetos com surgimento de informação (ObjInfo2).....	68
Figura 6.26 – <i>Box Collider</i> e aplicação do <i>script</i> “ObjInfo2”.....	69
Figura 6.27 – Modelo BIM da Galeria da FEUP.....	70
Figura 6.28 – Fotografia do aspeto real da Galeria da FEUP.....	70
Figura 6.29 – Aspeto do Cenário de Visualização do modelo da estrutura da Galeria da FEUP.....	71
Figura 6.30 – Posicionamento da estrutura no <i>Unity</i> .....	71
Figura 6.31 – Aspeto do Cenário do Módulo de Fiscalização.....	72
Figura 6.32 – <i>Script</i> de alteração de textura por via de um <i>slider TextureSlider</i> .....	72
Figura 6.33 – Funcionamento da aplicação: Menu Principal.....	73
Figura 6.34 – Funcionamento da aplicação: Janela de Informação.....	74
Figura 6.35 – Funcionamento da aplicação: Menu do módulo de inspeção.....	74
Figura 6.36 – Funcionamento da aplicação: Cenário do modelo de um Pórtico.....	75
Figura 6.37 – Funcionamento da aplicação: Visualização da estrutura betonada.....	75
Figura 6.38 – Funcionamento da aplicação: Visualização da estrutura em rotação.....	76

Figura 6.39 – Funcionamento da aplicação:cenário do modelo de um Pilar do LESE.....	76
Figura 6.40 – Funcionamento da aplicação:comparação de pilares ensaiados com o modelo virtual.	77
Figura 6.41 – Funcionamento da aplicação:cenário das especificações do Pilar do LESE.....	78
Figura 6.42 – Funcionamento da aplicação:interação do utilizador com cenário.....	78
Figura 6.43 – Funcionamento da aplicação:cenário de visualização do modelo da Galeria da FEUP.	79
Figura 6.44 – Funcionamento da aplicação:cenário de visualização do modelo da Galeria da FEUP.	80
Figura 6.45 – Aspeto do cenário de fiscalização.....	81
Figura 6.46 – Definição e verificação do espaçamento entre varões.....	81
Figura 6.47 – Construção do Menu Principal.....	82
Figura 6.48 – <i>Script</i> de transição de cenários.....	83
Figura 6.49 – Atribuição da função <i>ChangeScene</i> a um botão.....	83
Figura 6.50 – Configuração da função <i>RadialView</i> e das <i>BoxCollider</i> .....	84
Figura 6.51 – Configuração da página de informação.....	84
Figura 6.52 – Configuração do cenário do modelo de um pilar do LESE.....	85
Figura 6.53 – Configuração do cenário do modelo da Galeria da FEUP.....	85
Figura 6.54 – Configuração dos botões interativos.....	86
Figura 6.55 – Configuração do Menu interativo do cenário do Pilar do LESE.....	86
Figura 6.56 – Configuração do Menu interativo do cenário da Galeria da FEUP.....	87
Figura 6.57 – Configuração da seta de indicação de direção.....	87
Figura 6.58 – Configuração do cenário de fiscalização de armaduras.....	88
Figura 6.59 – <i>Script</i> de controlo das linhas de espaçamento por via de dois <i>sliders</i> .....	88
Figura 6.60 – Aspeto do Menu Principal.....	89
Figura 6.61 – Aspeto do cenário de informação.....	89
Figura 6.62 – Aspeto do cenário do Pilar do LESE.....	90
Figura 6.63 – Aspeto do cenário da Galeria da FEUP.....	90
Figura 6.64 – Aspeto do modelo separado após selecionar o botão “ <i>Explode</i> ”.....	91
Figura 6.65 – Aspeto da caixa de redimensionamento do modelo do Pilar do LESE.....	91
Figura 6.66 – Aspeto da caixa de redimensionamento do modelo da Galeria da FEUP.....	91
Figura 6.67 – Seta de indicação do modelo no espaço.....	92
Figura 6.68 – Aspeto do cenário do módulo de fiscalização.....	92
Figura 6.69 – Controlo do <i>slider</i> da rotação das linhas.....	93
Figura 6.70 – Controlo do <i>slider</i> do espaçamento das linhas.....	93



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparação entre a metodologia tradicional e a colaborativa, Adaptado de [9]. .....	21
Tabela 3.2 – Lista de <i>softwares</i> para BIM. ....	26
Tabela 3.3 – Ilustração do nível de detalhe (LOD) [36, 44]. ....	31
Tabela 4.1 – Variáveis associadas ao processo de implementação de RV/RA nas empresas [30]. ...	39



## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
AIA	<i>American Institute of Architects</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
APK	<i>Android Package</i>
BA	Betão Armado
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BLM	<i>Building Lifecycle Management</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CEB	<i>Euro-International Committee for Concrete</i>
CEN	Comité Europeu de Normalização
CT	Comissão Técnica
EN	Norma Europeia
FBX	Filmbox
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
fib	<i>International Federation for Structural Concrete</i>
FIP	<i>International Federation for Pre-stressing</i>
HMD	<i>Head Mounted Display</i>
IFC	<i>Industry Foundation Class</i>
IPD	<i>Integrated Project Delivery</i>
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LESE	Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural
LOD	<i>Level Of Development</i>
LoD	<i>Level of Detail</i>
LOI	<i>Level of Information</i>
MIEC	Mestrado Integrado em Engenharia Civil
MRTK	<i>Mixed Reality Toolkit</i>
NP	Norma Portuguesa
PME	Pequenas e Médias Empresas

RA	Realidade Aumentada
RM	Realidade Mista
ROI	<i>Return on Investment</i>
RV	Realidade Virtual
RVC	<i>Realidade Virtual Continuum</i>
SDK	<i>Software Development Kit</i>
UWP	<i>Universal Windows Platform</i>





# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esta dissertação incorpora um estudo sobre o potencial da associação de modelos BIM e tecnologias de Realidade Aumentada no setor da construção e, daí, desenvolver ferramentas de suporte às tarefas de inspeção de estruturas de betão armado. Nesse sentido, foi estabelecida uma parceria entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e a empresa A400 – Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda.

A inspeção de estruturas em betão armado tem vindo a assumir um papel preponderante na construção. Num cenário inicial, estaria associado à deteção e diagnóstico de anomalias estruturais. Agora assume, também, a preocupação com a segurança e, por outro lado, surge associada à necessidade de estudar e analisar os edifícios para a sua correta manutenção e eventual reabilitação.

A construção de edifícios em betão armado tem sido a técnica construtiva mais presente em Portugal e, ao contrário do que se previa, a degradação destas estruturas inicia-se mais cedo, muitas vezes devido à falta de manutenção, por se pensar que eram tão duráveis quanto se previa [1].

Os procedimentos de manutenção não detêm legislação aplicável, o que leva ao descuido por parte dos responsáveis, deixando que muitas anomalias se desenvolvam continuamente até atingirem uma fase crítica e, com isso, torna-se as intervenções morosas e mais dispendiosas.

O BIM é uma metodologia de partilha de informação e comunicação entre os vários intervenientes que integram as várias fases de um projeto e posterior construção de um edifício, caracterizando-se como um modelo digital que pode ser acedido e manipulado com *software* específico.

Por fim, a Realidade Aumentada surge como uma tecnologia de elevado potencial e que pode ser aplicada num vasto número de tarefas de vários setores profissionais. Esta tecnologia do campo da virtualidade permite observar elementos virtuais sobrepostos ao mundo real.

### 1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é a exploração e demonstração das potencialidades de soluções tecnológicas no apoio à inspeção de estruturas em betão armado, através de ferramentas BIM e de Realidade Aumentada. Especificamente, foram desenvolvidos diversos modelos BIM através do *software Revit*, para serem integrados numa aplicação baseada em RA e desenvolvida num motor de jogo, nomeadamente o *Unity*. Foram, posteriormente, explorados e testados os benefícios destas ferramentas através de cenários práticos, em campo.

### 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em oito capítulos, onde serão explorados os conhecimentos inerentes a esta temática, por fim à sua melhor compreensão e contextualização.

No segundo capítulo, será abordado o tema da inspeção das estruturas de betão armado, apresentando as possíveis anomalias que podem ocorrer ao nível do betão e das armaduras, mas também erros de execução e projeto. De seguida, serão apresentadas as metodologias e ensaios associados ao processo de inspeção que levam à conclusão desta tarefa através do relatório de diagnóstico.

No terceiro capítulo, será apresentado o conceito BIM, começando pelas motivações ao seu surgimento, indo até ao paradigma atual em que sua implementação se encontra. Serão, desta forma, abordadas as principais vantagens da adoção de uma metodologia colaborativa, mas também os riscos e desafios inerentes ao processo e, por fim, a normalização BIM nacional e internacional existente.

No capítulo quarto, encontra-se descrito o tema particular da Realidade Aumentada dentro do conceito geral da Realidade Virtual *Continuum*. São abordadas algumas considerações gerais, tais como o surgimento desta tecnologia, a sua aplicabilidade, os principais riscos e desafios e, por último, os requisitos de *hardware* e de *software* para a sua operabilidade.

O quinto capítulo pretende abordar a tecnologia da Realidade Aumentada baseada em modelos BIM, em termos de potencial para o setor, particularizando para a inspeção de estruturas de betão armado. Encontram-se apresentados os principais motores de jogo compatíveis com esta tecnologia, fazendo uma abordagem mais aprofundada do *software* utilizado, o *Unity*.

O sexto capítulo representa o estudo de caso realizado para investigar os benefícios da Realidade Aumentada baseada em BIM, através do desenvolvimento de duas aplicações propostas como suporte às tarefas de inspeção de estruturas de betão armado.

No sétimo capítulo, encontram-se relatadas as conclusões deste estudo e as propostas para desenvolvimentos futuros consideradas.

Finalizando-se no oitavo capítulo, onde é possível verificar as referências bibliográficas que permitiram sustentar o desenvolvimento desta dissertação.

# 2

## INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS EM BETÃO ARMADO

### 2.1. INTRODUÇÃO

O betão armado apareceu em Portugal no final do século XIX em concorrência direta com a construção metálica, tendo sofrido um grande crescimento do parque edificado em meados do século XX. As estruturas de betão constituem um património de elevado valor, não só em termos históricos e de investimento, mas também no suporte ao desenvolvimento tecnológico das organizações e ao bem-estar da sociedade. A construção de tais estruturas tem acompanhado e sustentado o desenvolvimento socioeconómico do país, tendo experimentado um enorme desenvolvimento nas últimas décadas [1, 4].

A inspeção, através de diferentes metodologias, é a análise do estado de conservação e do comportamento de um edifício e dos elementos que o compõe onde, através da elaboração de um diagnóstico, é possível determinar as causas de possíveis anomalias e erros e a partir daí executar um plano de intervenção, tendo em conta o grau dos danos observados.

Neste capítulo serão abordadas as problemáticas que podem afetar as estruturas de betão armado, colocando em causa a segurança e a durabilidade da mesma e daí, quais as soluções a adotar para mitigar ou anular o problema observado. Serão também apresentados os principais ensaios que integram o processo de avaliação de uma estrutura.

### 2.2. ANOMALIAS EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

A importância do betão armado nas estruturas é bastante notória e, não sendo exceção, em Portugal a grande maioria das estruturas são executadas neste material. Como tal, ao longo do tempo foi possível analisar as suas particularidades em termos de comportamento e desempenho estrutural e identificar anomalias e patologias a si inerentes e, a partir daí, determinar soluções que eliminem ou mitiguem as anomalias identificadas por fim a garantir a segurança, a durabilidade e a devida utilização de uma estrutura. Obras bem concebidas, bem executadas e conservadas poderão manter-se operacionais para além do período de vida de cinquenta a cem anos usualmente considerado para a realização das estruturas [1, 4].

Os principais problemas, que se têm vindo a encontrar, prendem-se a nível estrutural, com a resistência à ação sísmica que é em geral inferior aos requisitos atuais, resultante da ausência da consideração da ação sísmica na conceção e projeto das obras mais antigas ou até da deficiente conceção e quantificação desta. Acresce a este aspeto a falta de preocupação de dotar os elementos estruturais da ductilidade

necessária e em evitar roturas frágeis, em particular para situações de inversão do sinal dos esforços resultantes da ação sísmica. No que respeita à durabilidade, tem-se verificado, sobretudo nas últimas duas décadas, a deterioração significativa por corrosão das armaduras, deterioração associada à utilização de um betão de qualidade insuficiente, utilização de camadas de recobrimento reduzidas e, também, deterioração devida a reações químicas expansivas do betão, em particular a reação sulfática interna e reação álcalis-sílica. Qualquer um destes problemas pode ser evitado, com o controlo da qualidade do projeto e da execução, incluindo mesmo o controlo dos materiais [4].

Existem alguns tipos de anomalias que se podem verificar em elementos de betão, entre elas a fissuração, a delaminação, a desagregação, mas também as imperfeições construtivas.

A fissuração, conforme exemplificado na Figura 2.1, pode-se manifestar de diversas formas, tendo em conta a causa que a originou. A principal origem são as solicitações não previstas aquando do seu dimensionamento, onde os elementos ficam sujeitos a esforços que superam a sua capacidade resistente. As fissuras também podem surgir devido a assentamentos da estrutura, mas também devido à retração e a variações térmicas [1, 45].



Figura 2.1 - Fissuração do betão

A delaminação do betão, como se observa na Figura 2.2, ocorre quando a camada de recobrimento se destaca e leva a uma perda de resistência devido à redução da secção do elemento. Além disso, o elemento fica bastante mais vulnerável a ataques de agentes externos, colocando em causa a integridade das armaduras [1, 45].



Figura 2.2 - Delaminação do betão [45]

A desagregação do betão, caracterizada pela destruição química ou física do ligante, leva à perda das camadas superficiais do betão e consequente perda de secção (Figura 2.3). Esta anomalia grave faz com que o betão perca a sua capacidade resistente [1, 45].



Figura 2.3 - Desagregação do betão [1]

No que respeita às imperfeições do betão, falamos em problemas que têm origem no processo de betonagem de um elemento, especificamente a segregação do betão e a existência de chochos. Na segregação do betão (Figura 2.4) verifica-se uma não homogeneidade do material, em termos dos seus constituintes, sendo que os agregados têm tendência a localizarem-se na parte inferior da peça e a água e o cimento na parte superior. Isto pode acontecer, na maioria dos casos, devido a vibração excessiva. Os chochos são zonas ocas no betão, quer a nível interno, quer a nível superficial, que levam a uma redução da secção do elemento e à consequente diminuição da sua capacidade resistente, mas também facilitam a penetração de agentes agressores externos que promovem a deterioração do betão e a corrosão das armaduras. Esta situação está muitas vezes associada à segregação do betão, mas também quando se verifica uma deficiente vibração do betão. [1, 45]



Figura 2.4 - Segregação do betão

Além das anomalias no betão, também é possível identificar alguns problemas que podem surgir ao nível das armaduras. O mais importante, entre eles, é a corrosão e, por esse motivo, será dedicado um subcapítulo para o descrever. No entanto, existem outras problemáticas associadas a erros de execução, como o insuficiente comprimento de amarração, que pode levar ao aparecimento de fissuras paralelas aos varões que apresentem pouca aderência ao betão; a exposição de armaduras, que devido a uma má execução pode originar o destacamento da camada de recobrimento; e, por fim, o posicionamento incorreto das armaduras, causado por uma montagem incorreta ou, até mesmo, a sua deslocação durante a betonagem, podendo originar a segregação do betão e a perda de aderência, o que provoca eventuais deformações e, em casos extremos, a rotura dos elementos, por falta de capacidade resistente [1, 45].

Segundo a norma NP EN 1504-9 de 2009, as causas habituais dos defeitos estruturais podem ser organizados da forma representada na Figura 2.5.

### CAUSAS COMUNS DAS ANOMALIAS

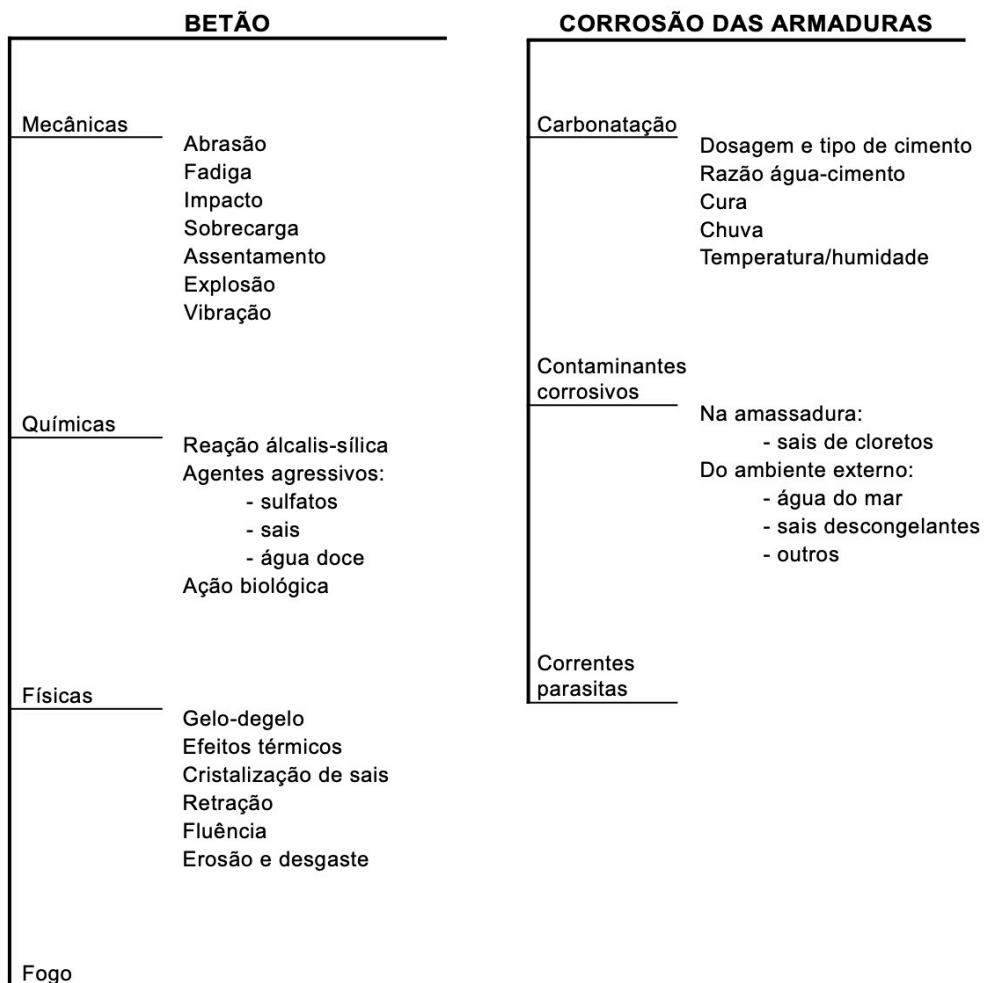


Figura 2.5 – Causas comuns das anomalias estruturais segundo a NP EN 1504-9.

### 2.2.1. DEGRADAÇÃO DO BETÃO

Por fim a garantir a qualidade e a durabilidade do betão, existe um conjunto de disposições regulamentares que devem ser seguidas, nomeadamente os Eurocódigos e os boletins técnicos. Embora estes regulamentos contemplem uma série de coeficientes, não devemos desconsiderar outros fatores que possam colocar em causa uma estrutura, nomeadamente agentes agressores não previstos ou tipos de utilização para os quais a estrutura não foi dimensionada.

De acordo com o apresentado na Figura 2.5, as causas habituais da degradação do betão estão associadas a ações mecânicas, químicas, físicas e também ao fogo. Posto isto, segue-se uma breve referência às principais causas das ações apresentadas.

No que diz respeito às ações mecânicas [1, 45, 48]:

- A **abrasão** é uma forma de desgaste do betão que pode levar a uma diminuição gradual da secção do elemento afetado. Na generalidade dos casos, a resistência do betão está associada à resistência do agregado que o integra, sendo que com o aumento da classe de resistência do betão esta característica passa a estar dependente da pasta de cimento.
- A **fadiga** é um efeito relevante para estruturas sujeitas a ações cíclicas ou, então, muito esbeltas. Tal não se verifica nas estruturas correntes de betão armado visto que estão submetidas, na sua maioria, a ações constantes. Surgem, desta forma, fissuras que conduzem à degradação gradual do betão, marcando o seu início em zonas de maior fragilidade, nomeadamente onde o volume de vazios se verifica superior. Estas fissuras podem ser uma porta de entrada para agentes agressores, que levam à despassivação das armaduras e, com isso, aceleram o processo de corrosão.
- O **impacto** é um acontecimento que pode provocar o esmagamento e a fissuração do betão, originando uma redução da capacidade resistente do elemento, colocando em causa a estabilidade de uma estrutura. Além disso, pode ocorrer o destacamento da camada de recobrimento do elemento de betão ou, até mesmo, uma redução significativa da sua secção, o que facilita o ataque de fatores agressores externos.
- O **excesso de carga** pode levar a deformações elevadas e ao aparecimento de fissuras, sendo que em último caso pode acontecer a rotura dos elementos estruturais, nomeadamente o esmagamento do betão, que ocorre quando a sua capacidade resistente à compressão é excedida, mas também a curvatura destes elementos, quando submetidos a grandes esforços de flexão. Numa fase inicial, começam por surgir fissuras longitudinais ao elemento comprimido e, também, nas suas faces opostas, provocando deformações e destaque dos varões longitudinais. Adicionalmente, podem aparecer fissuras junto às faces tracionadas dos elementos fletidos, de forma transversal a estes.
- Os **assentamentos** numa estrutura podem colocar em risco a sua segurança e estabilidade. A alteração das condições de apoio originam uma redistribuição dos esforços, causando fissuras e, em casos mais severos, provocando a rotura dos elementos estruturais.
- Uma **explosão**, apesar de ser um cenário pouco recorrente em Portugal, por vezes, não é considerado em projeto. Em caso de acontecimento, pode gerar destacamento do betão, deformação dos elementos estruturais e fissuração, sendo que em situações mais graves pode levar à rotura destes elementos.
- As **vibrações** são um fator que pode implicar a estabilidade de uma estrutura, mas também a segurança dos seus utilizadores. De forma geral, este fator é acautelado através do dimensionamento sísmico, que é a causa mais relevante para a existência de vibrações, e tem em conta a zona do país onde a estrutura se localiza. As vibrações podem fazer com que certos elementos sejam solicitados na direção contrária à prevista, afetando maioritariamente os elementos verticais, como paredes e pilares. Deve-se optar pelo dimensionamento de pilares mais

resistentes e vigas mais fracas, redução do peso próprio da estrutura e, sempre que se justifique, instalação de amortecedores na base da estrutura.

Na sua generalidade, estes problemas podem ser detetados e corrigidos atempadamente, sendo que para isso as estruturas devem ser dimensionadas de tal forma que detenham um comportamento dúctil, isto é, possibilitando à estrutura que se deforme sem apresentar danos significativos, apresentando elevada capacidade de dissipação de energia. Aquando do dimensionamento de uma estrutura e, tendo em consideração o meio onde se vai inserir e o fim a que vai servir, devem ser tidos em conta os efeitos necessários para garantir a segurança e estabilidade da estrutura, levando a um sobredimensionamento da mesma, mas também garantindo a máxima qualidade dos materiais utilizados [1, 48].

No que respeita às ações químicas [1, 45, 48]:

- A **reação dos sulfatos** depende fortemente do teor de humidade do betão e pode ter origem interna ou externa ao elemento em causa. O ataque externo verifica-se nas camadas superficiais do betão, sendo que a porosidade do mesmo influencia a profundidade do ataque. Já os ataques internos ocorrem após o endurecimento do betão e envolvem a remobilização dos sulfatos, devido a um aumento de temperatura durante o processo de cura do betão e pode gerar fendilhação generalizada do elemento. De forma semelhante, após a penetração dos sulfatos, estes reagem com a pasta de cimento, dando origem a um gel expansivo que com o aumento de volume promove a fissuração do betão, aumenta a sua permeabilidade e diminui a sua resistência, verificando-se uma degradação do betão a um ritmo mais acelerado.
- A **reação álcalis-silica** ocorre entre os álcalis do cimento ou provenientes do exterior e os minerais de sílica presentes nos agregados do betão. Quando o ataque tem origem exterior, a degradação verifica-se nas camadas superficiais. Por outro lado, o ataque de origem interna pode provocar a degradação de betão em qualquer zona onde este ocorra. Esta reação, na presença de água em quantidade suficiente, gera um gel expansivo que origina pressões nos poros do betão, originando fissuras nos elementos, o que coloca em causa a sua integridade. Trata-se, então, de uma reação que pode ser desprezável para teores de humidade inferiores a 85%.
- Os **agentes ácidos, sais e águas puras** manifestam a sua ação através da decomposição da pasta de cimento que, de forma gradual, vai perdendo as suas capacidades ligantes. Verifica-se, portanto, uma deterioração das camadas superficiais do betão, que leva à redução da secção do elemento.

Relativamente às ações físicas [1, 45, 48]:

- Os **ciclos gelo-degelo** são um efeito que se verifica a baixas temperaturas, onde a água dos poros congela e aumenta o seu volume. Quando os poros se encontram saturados, este aumento de volume provoca um aumento de pressão no seu interior que, quando excede a resistência do betão à tração, leva a um aumento do tamanho dos poros e, progressivamente, à fendilhação do elemento. É, também, possível que se verifique a ocorrência de delaminação do betão.
- Os **efeitos térmicos** podem gerar a degradação do betão, muito devido à sua variação e amplitudes consideráveis. De facto, o betão sujeito a temperaturas elevadas e mais baixas, tem tendência a expandir e a retrair, respetivamente, podendo levar à fissuração do elemento quando esta amplitude é substancial. Estas variações começam por ser suportadas pelas camadas superficiais, no entanto, logo após sofrerem este efeito térmico e alteração de volume, as camadas

subjacentes não acompanham essa transição e fissuram entre elas, quando aí se regista uma tensão superior à resistência do betão à tração.

- A **crystalização de sais** ocorre quando a água da solução dos poros evapora, podendo ser danosa para o elemento se o processo de evaporação acontecer de forma rápida, o que leva a que os sais fiquem retidos no interior dos poros. De outro modo, o processo de evaporação lenta transporta a grande maioria dos sais para a superfície do betão. Dessa forma, os sais ao ficarem cristalizados no interior dos poros levam a um aumento da pressão no seu interior, o que pode resultar em fissuração, quando ultrapassada a resistência do betão à tração.

- A **retração do betão** é um fenómeno comum às estruturas de betão armado e que se inicia com o betão ainda fresco. Nesta fase verifica-se a sedimentação das partículas sólidas para as camadas inferiores do elemento, que por sua vez fazem com que aconteça a exsudação, que é a ascensão das partículas de ar e de água, facilitando o processo de evaporação da água. Este fenómeno é caracterizado pela diminuição das dimensões dos elementos de betão devido à perda da água presente na pasta de cimento, associada não só à secagem do betão quando se verifica uma humidade exterior inferior à humidade do betão, mas também devido ao carregamento do betão que leva a uma perda constante da sua humidade. Posto isto, podem-se verificar fissuras no interior do elemento de betão e o aparecimento de pequenas fissuras superficiais de baixa gravidade e de aspeto ramificado.

- A **fluência** traduz-se na deformação da estrutura, desde o momento em que é descofrada e as escoras são removidas. Como tal, a estrutura passa a estar carregada com o seu peso próprio, com o de outros elementos construtivos e por outras solicitações. Esta deformação admite um comportamento plástico, pelo que não é reversível na sua totalidade.

Por fim, a **ação do fogo** induz nos materiais algumas alterações devido às elevadas temperaturas a que estes ficam expostos. Com o aumento da temperatura, a água presente no interior do betão evapora, o que faz com que alguns componentes deixem de estar hidratados e a pasta de cimento perca a sua capacidade resistente e, além disso, os agregados terão tendência a dilatar. Estes dois fenómenos conjuntos fazem com que se perca a capacidade de aderência entre estes constituintes do betão. Verifica-se, assim, uma relação de proporcionalidade direta entre o teor de humidade do betão e a gravidade deste fenómeno [1, 48].

### 2.2.2. CORROSÃO DAS ARMADURAS

A corrosão das armaduras em estruturas de betão armado está muitas vezes associada com a deterioração do betão e a exposição ambiental a que uma estrutura está sujeita. A camada de recobrimento, se devidamente executada, é capaz de impedir a penetração de agentes agressivos e origina um meio de elevada alcalinidade capaz de proteger a armadura. Tal deve-se à formação de uma fina película de óxido de ferro estável que a passiva. Esta película tem a capacidade de proteger a armadura contra a corrosão, a menos que se verifique uma redução do pH do betão, comprometendo esta proteção. Sabe-se que o valor do pH de um betão novo varia entre 12.5 e 13.5 [1, 48].

A corrosão é um processo eletroquímico e ocorre devido à diferença de potencial que se verifica em diferentes partes da armadura [1]. Este processo, também designado como célula de corrosão, é exemplificado na Figura 2.6.

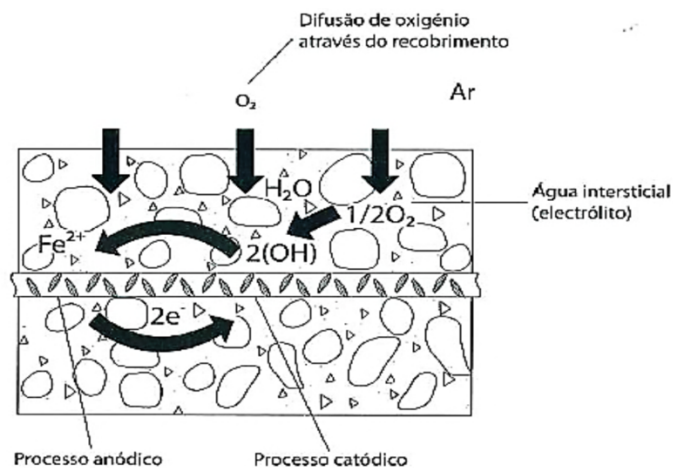


Figura 2.6 – Modelo simplificado do processo de corrosão [46].

Neste processo, verifica-se a dissolução do ferro no ânodo, no qual são libertados dois eletrões por cada átomo desta zona. Estes eletrões, atravessando a armadura, chegam ao cátodo e reagem com a água e o oxigénio gerando iões de hidróxido ( $\text{OH}^-$ ), sendo, por sua vez, atraídos para o ânodo. Cria-se, desta forma, um circuito elétrico, que tem como consequência a despassivação da armadura na zona do ânodo [48].

A velocidade de corrosão está associada com a disponibilidade de oxigénio e água que se encontram presentes no cátodo que, originando reações secundárias, podem levar à fendilhação e delaminação do betão, em resultado do aumento da secção da armadura. Por outro lado, nos casos em que o ânodo não tem contacto com o oxigénio devido à saturação do betão, os iões de ferro ficam retidos na solução dos poros, fazendo com que não exista expansão da armadura e a consequente fendilhação do betão. Esta situação, ao não originar manchas de ferrugem, faz com que a estrutura perca, de forma gradual, a sua resistência de forma “silenciosa”. Nesse sentido, a não ser que, aquando de um processo de inspeção, a camada de recobrimento fosse removida, não são visíveis patologias nas faces do elemento de betão armado [1].

De seguida serão apresentados os principais fenómenos que levam à corrosão das armaduras [1, 45].

- A **carbonatação** ocorre quando se observa um ataque por ácidos, como o dióxido de carbono presente na atmosfera e o trióxido de enxofre presente na água da chuva, sendo o primeiro caracterizado como o mais gravoso. Estes agentes, ao penetrarem no betão, desencadeiam um série de reações químicas, levando à redução do pH do betão para valores na ordem dos 8.5. Como consequência, verifica-se a despassivação das armaduras, podendo levar à corrosão generalizada da armadura de uma estrutura.
- A **penetração dos cloretos** pode ocorrer através dos poros da pasta de cimento, dos poros na interface entre o agregado e a pasta de cimento ou mesmo através de fendas e microfendas que possam existir no elemento. A corrosão resultante da ação dos cloretos é caracterizada pela criação de ânodos de pequenas dimensões em zonas onde o teor de cloretos ultrapassou o valor crítico, e de cátodos de maiores dimensões que resultam numa velocidade de corrosão substancialmente mais elevada. Os produtos resultantes das várias reações químicas promovem a redução do pH do betão conduzindo à despassivação das armaduras e consequente corrosão das mesma.

### 2.2.3. ERROS DE PROJETO E DE EXECUÇÃO

Os erros que possam advir de projeto devem ser mitigados e solucionados de forma atempada, visto que podem levar à degradação do betão e à redução do tempo de vida útil de uma estrutura. Para evitar este tipo de situações, devem ser seguidas as normas em vigor que permitem determinar de forma adequada os materiais a usar no processo de execução, as condições de exposição de uma estrutura e quais as solicitações e sobrecargas de projeto que devem ser consideradas [1].

Além dos erros de cálculo de projeto, podem também ocorrer erros por incompatibilidade de especialidades, devido à falta de coordenação das equipas ou até devido a erros de modelação.

As alterações estruturais necessárias a realizar durante a fase de execução de um projeto devem ser sempre estudadas e novamente dimensionadas evitando, dessa forma, a ocorrência de anomalias graves.

O devido acompanhamento por parte da equipa de fiscalização de uma obra, mas também da equipa de projeto, permite precaver erros na fase de execução de um edifício. Este controlo permite evitar riscos na segurança e na estabilidade de uma estrutura, mas também garantir o seu tempo de vida útil esperado. Devem, neste sentido, ser garantidas não só as disposições de projeto, no que respeita aos materiais a utilizar, à correta montagem das armaduras e à geometria da estrutura e dos elementos que a compõem, mas também a correta execução das tarefas de construção civil, tendo em consideração as boas práticas na construção [1].

## 2.3. INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS E METODOLOGIAS DE INSPEÇÃO

O património edificado é algo que está em constante desenvolvimento, quer em quantidade, quer a nível tecnológico, permitindo responder às necessidades das pessoas, das empresas e do Estado.

As estruturas detêm a particularidade de serem versáteis, ou seja, permitem alterações ao nível da sua funcionalidade e admitem certas adaptações estruturais para servir os interessados sendo, para isso, bastante importante a realização de manutenções durante o seu ciclo de vida. Dessa forma é possível evitar ou detetar anomalias que possam colocar em causa a segurança e estabilidade da estrutura. Sempre que seja necessário realizar alguma intervenção deve-se fazer, primeiramente, uma inspeção técnica do edifício ao nível estrutural, mas também a todos os restantes componentes que o integram.

Olhando para o paradigma atual do setor da AEC, verifica-se um interesse e necessidade ascendentes da reabilitação dos edifícios. Isto torna-se possível porque o período de vida útil das estruturas superou o esperado, da altura da sua construção, mas também pela boa conservação dos edifícios através da sua manutenção. Por esse motivo, a inspeção e o diagnóstico assumem um papel primordial, visto que é necessário realizar uma avaliação e estudo aprofundado de um edifício para, de seguida, identificar eventuais patologias. Através da caracterização estrutural do edifício, torna-se possível determinar as melhores medidas a adotar para a sua intervenção ou reforço estrutural necessário [1].

A nível global, a avaliação das condições de estruturas existentes está se a tornar uma questão cada vez mais relevante para os sistemas de gestão do património e das infraestruturas. A utilização continuada dos edifícios existentes é, devido aos ativos ambientais, económicos e sociopolíticos, de grande importância e está a crescer a cada ano. Deste modo, a complexidade das intervenções necessárias nas estruturas de betão armado que se encontram danificadas acarreta uma grande responsabilidade e preocupação na maioria dos países. As técnicas de monitorização podem ter aqui uma contribuição decisiva para limitar os gastos com manutenção e reparação das estruturas existentes [2].

Dada a sua importância, é possível encontrar documentação técnica específica para estruturas de betão armado elaborada por organismos internacionais e especializados. Um deles é a *fib* (*International Federation for Structural Concrete*), que resultou da união do CEB (*Euro-International Committee for Concrete*) com a FIP (*International Federation for Pre-stressing*), sendo composta por 41 grupos-membro referentes a cada país associado. Até 1998 o CEB realizou uma série de boletins técnicos, sendo um dos mais relevantes para este estudo o boletim nº 243 do ano de 1998 com o título “*Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures affected by Reinforcement Corrosion*”, realizado pelo Grupo de Trabalho 5.4, e onde são identificadas estratégias de inspeção de estruturas de betão com particulares referências à corrosão de armaduras, contemplando atividades de preparação, inspeções de rotina, processos de intervenção e exemplos ilustrativos. A partir dessa data, os boletins são emitidos pela *fib*, sendo o mais notório para este tema o boletim nº 22 do ano de 2003 sob o título “*Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures*”, realizado pelo Grupo de Trabalho 5.1, abordando temas como a monitorização e avaliação de segurança de estruturas existentes de betão, inspeção visual, ensaios *in-situ* e ensaios não-destrutivos, análise de dados, entre outros [2].

O principal objetivo da comissão 5 da *fib* prende-se com aspetos estruturais do ciclo de vida das estruturas, fornecendo um procedimento racional e focado na conceção de desempenhos técnico-económicos ideais para estas estruturas de betão, que se encontram em serviço, e garantir um *feedback* da experiência adquirida com o projeto, execução, manutenção e reabilitação [2].

Existe uma série de motivos que levam uma estrutura a ser alvo de uma avaliação técnica, tanto ao nível do seu estado de conservação, como do seu comportamento estrutural. Podem ser realizadas por via de inspeções, nomeadamente inspeções regulamentares ou de rotina, e por monitorizações. No entanto, existem outros cenários específicos que justificam esta avaliação, em particular em caso de aparecimento de patologias que evidenciem a deterioração da estrutura e, também, no caso de mudanças de geometria, de tipo de uso e das ações a que a estrutura ficará sujeita [1].

### 2.3.1. METODOLOGIAS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO

Os aspetos base necessários a estudar para a inspeção de uma estrutura de betão armado estão associados à avaliação do seu estado de conservação, nomeadamente aos vários elementos que a compõe, e a uma análise de segurança estrutural.

A avaliação do estado de conservação de uma estrutura pode ser realizada através do recurso a diferentes técnicas, nomeadamente a inspeção visual, a realização de ensaios laboratoriais através da recolha de amostras e/ou ensaios *in-situ*. Através da inspeção visual, com a possibilidade de recorrer a equipamento ótico de apoio, é possível avaliar características geométricas da estrutura, identificar os materiais que a compõe e registar eventuais anomalias que possam existir. Os ensaios laboratoriais, através da recolha de amostras, permitem obter informações relevantes para a caracterização estrutural, quer a nível da classificação da resistência dos materiais, mas também do seu estado de conservação. Os ensaios *in-situ* podem ser destrutivos, como sondagens para identificar pormenores construtivos e profundidades de carbonatação e, também, não destrutivos através do recurso a equipamentos tecnológicos, como por exemplo para deteção de armaduras, termografia e ensaios mecânicos rápidos.

Para a realização de uma análise de segurança estrutural, genericamente, é elaborado um modelo em *software* de cálculo por fim a determinar o seu comportamento e capacidade resistente, tendo em atenção fatores externos e condições fronteira. Este modelo é construído com base em informação recolhida através do levantamento geométrico dos elementos estruturais ou conforme informações de projeto, se este estiver em concordância com o executado [1].

Os métodos mais recentes de teste e medição, bem como a mecânica computacional, permitiram abrir portas para uma grande variedade de aplicações de monitorização. A necessidade de conhecimento quantitativo e qualitativo levou ao desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de acompanhamento [2].

Como tal, serão abordados alguns aspetos essenciais no que respeita às metodologias de inspeção e diagnóstico.

O primeiro passo num processo de inspeção é a pré-inspeção ou inspeção preliminar. Esta envolve a recolha de informação e a seleção do equipamento necessário, tendo em conta os condicionalismos do edifício alvo de estudo. A recolha de informação prevê a consulta de processos e memórias descritivas relativas às várias fases de projeto, mas também de projetos de especialidades de um edifício e o registo de intervenções e inspeções que tenham sido realizadas. Por conseguinte, obtém-se um enquadramento geral do edifício complementado por dados de estudo relevantes para o processo. Também nesta fase deve ser realizada uma caracterização prévia do edifício, tendo em conta a informação obtida, ao nível da geometria do edifício e dos elementos estruturais, das soluções construtivas e estruturais adotadas e dos materiais que as constituem, mas também a regulamentação que esteve na base do cálculo estrutural, à data da sua conceção.

A segunda fase deste processo fixa-se com a inspeção visual e a realização de ensaios complementares. A inspeção visual tem como propósito identificar e localizar possíveis anomalias num edifício e, para isso, recorre a registos fotográficos e/ou vídeo, a plantas e alçados, mas também a *softwares* interativos de visualização tridimensional de modelos. Esta fase de inspeção pode ser realizada no local ou à distância, sendo neste caso a partir de equipamentos de transmissão de imagem e som, recorrendo a um técnico no local em comunicação com o responsável da inspeção ou através de equipamentos tecnológicos autónomos, como *drones*. Nesta fase é, então, realizado um levantamento geométrico da estrutura com recurso a representações gráficas ou a modelação, tendo em conta as suas dimensões reais, e deve contemplar a identificação dos vários elementos estruturais. Seguidamente, deve ser realizado um levantamento das anomalias e pesquisa das suas causas, elaborando um registo que contenha as suas características detalhadas, através de observação, e a sua localização na estrutura acompanhado de um registo fotográfico. Em casos de zonas ocultas ou internas a elementos, e se assim for possível, podem ser executadas janelas de sondagem que permitam o acesso e a observação destas zonas para, de seguida, realizar ensaios não destrutivos. Adicionalmente, com o propósito de conhecer as propriedades mecânicas dos materiais existentes, podem ser extraídos provetes para ensaio em laboratório, através de técnicas de carotagem.

Por fim, apresenta-se o diagnóstico baseado no tratamento dos dados e da informação recolhida elaborando, neste sentido, o relatório de inspeção. Para tal, a informação obtida deve ser analisada e apresentada de forma organizada, obtendo uma caracterização completa da estrutura e o seu estado de conservação. Este documento deve fazer referência aos materiais que compõe o edifício alvo de estudo e igualmente identificar e caracterizar não só as zonas que apresentem anomalias, mas conjuntamente aquelas que necessitem de intervenção, seja esta de reparação ou de reforço. Além disso, o relatório deve ser acompanhado pelos ensaios laboratoriais, caso tenham sido realizados, descrevendo as características reais da estrutura, como a capacidade resistente dos materiais, levantamento dos elementos estruturais, verificações de segurança e, daí, sustentar as possíveis soluções de intervenção.

Durante a década de oitenta, o Comité Europeu de Normalização (CEN) foi responsável pela elaboração de um conjunto de normas referentes à reparação e proteção de estruturas de betão armado, resultando na Norma NP EN 1504 sob o título “Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão”. Este documento reúne informação alusiva a produtos e sistemas para a manutenção e proteção,

reabilitação e reforço de estruturas de betão [3]. No que respeita ao tema em estudo, esta norma incorpora as fases de inspeção, monitorização, manutenção e diagnóstico e, igualmente, as de dimensionamento e execução devendo, para tal, atender como base para o processo de inspeção e diagnóstico de estruturas de betão armado.

### 2.3.2. ENSAIOS DE DIAGNÓSTICO

Para alcançar um estudo mais detalhado e melhor compreender a origem de algumas anomalias, é importante a realização de ensaios complementares. Os ensaios *in-situ* podem ser destrutivos, como a determinação da espessura da camada de recobrimento e a deteção e determinação do tipo de armadura através de sondagens. Por outro lado, podem ser não-destrutivos, como o ensaio com esclerómetro, que permite determinar a resistência do betão, o da penetração de cloretos, do estado de corrosão das armaduras, profundidades de carbonatação, entre outros.

Com o recurso à tecnologia mais recente em equipamentos específicos, tem vindo a ser possível realizar ensaios outrora destrutivos, mas desta vez de forma a que não sejam invasivos para o elemento.

Em cenários nos quais se justifique a necessidade de estudar as propriedades e as características mecânicas dos materiais, procede-se à realização de ensaios em laboratório através de recolha de amostras. Estas podem ser obtidas através de técnicas de carotagem, permitindo obter dados como resistência à compressão ou tração dos materiais, dimensão máxima do agregado e teor de cloretos. A partir desta informação, é possível estimar a classe de resistência dos materiais existentes e, daí, verificar se está conforme o estipulado em projeto, mas também caracterizar o estado de conservação destes elementos.

O esquema representado na Figura 2.7 apresenta, de forma sumária, os principais ensaios realizados num processo de inspeção e diagnóstico de estruturas de betão armado [6].

<b>TÉCNICAS DE ENSAIO DE DIAGNÓSTICO</b>			
<b>ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS</b>	<b>ESCLERÓMETRO</b>	Modo de elasticidade	
	<b>ENSAIO PULL-OFF</b>	Resistência à tração do betão Avaliar aderência entre materiais	
	<b>ENSAIO PULL-OUT</b>	Resistência à compressão do betão	
	<b>PERMEABILIDADE AO AR</b>	Qualidade do betão de recobrimento	
	<b>PERMEABILIDADE À ÁGUA</b>		
	<b>VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS</b>	Avaliação qualitativa resistência compressão betão Modo de elasticidade Deteção de fissuras	
	<b>RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO</b>	Monitorizar a corrosão das armaduras Variação de humidade no interior do betão	
	<b>DETEÇÃO DE ARMADURAS E AVALIAÇÃO DO RECOBRIMENTO</b>	Equipamento de indução eletromagnética Não influenciável pela composição e humidade do betão	
	<b>ENSAIOS DESTRUTIVOS</b>	<b>EXTRAÇÃO E ENSAIO DE CAROTES</b>	Resistência à compressão e tração Modo de elasticidade elástico Absorção capilar Coeficiente de permeabilidade Cloretos Profundidade de carbonatação Densidade Resistividade elétrica do betão

Figura 2.7 – Técnicas de ensaio de diagnóstico [6].

## 2.4. MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

Em conjunto com as estruturas mais recentes, o parque edificado conta ainda com outras bem mais antigas, algumas das quais com mais de um século de existência. Para a conservação deste património urge a necessidade do desenvolvimento de metodologias de avaliação que permitam de forma indireta prolongar, tanto quanto possível, o período de vida útil destes edifícios. Estas metodologias devem enquadrar-se numa resposta economicamente sustentável, ir ao encontro das mais recentes exigências funcionais e reunir as devidas condições de segurança [5].

Os sistemas de monitorização, atualmente, permitem avaliar as condições de segurança estrutural e a durabilidade das estruturas, alargando o conhecimento acerca do seu funcionamento, por via da aferição de modelos numéricos. Estes sistemas são capazes de acompanhar todo o ciclo de vida útil de uma estrutura, desde a sua execução, fase de exploração e, até mesmo, em eventuais fases posteriores de reabilitação e de reforço estrutural [5].

A avaliação das condições de utilização das estruturas constitui, hoje-em-dia, um dos maiores desafios colocados às entidades responsáveis pela sua exploração. O envelhecimento das estruturas existentes confrontado com as novas exigências funcionais e de segurança levam à necessidade do desenvolvimento de estratégias de intervenção em obra que, com a devida gestão dos recursos, assegure ou aumente o seu período de exploração com qualidade garantida, mas também de forma económica. Nesse sentido, os sistemas de monitorização do comportamento tomam um papel primordial ao fornecerem informação aos modelos de decisão que permitem calendarizar e tipificar intervenções em obra, tendo em conta as condições de segurança e de durabilidade da estrutura e, juntamente, a gestão otimizada dos recursos [5].

Conforme o apresentado na Figura 2.8, o envelhecimento das estruturas traduz-se numa redução progressiva das características do comportamento estrutural. As intervenções de rotina para preservar o comportamento expectável podem ter um carácter preventivo, manutenção preventiva, ou serem essenciais para manter a estrutura dentro dos limites aceitáveis de segurança, manutenção essencial.

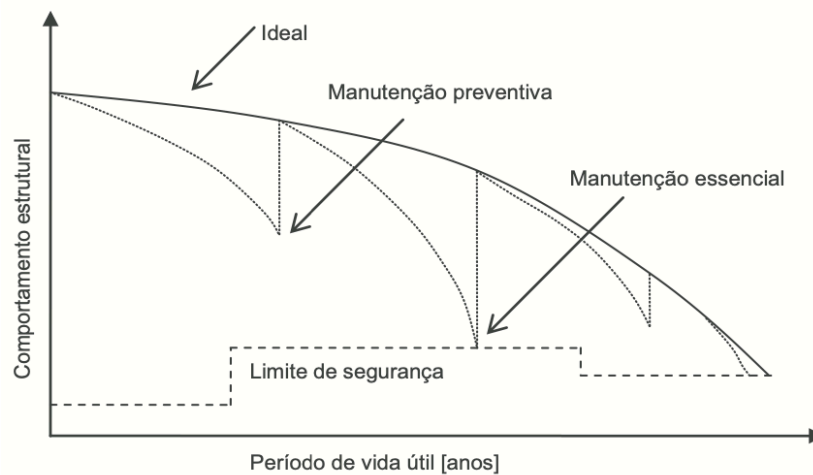


Figura 2.8 - Reposição dos níveis de segurança estrutural [47].

Na monitorização do comportamento das estruturas, as medições são realizadas em permanência com recurso a sistemas integrantes na estrutura, constituídos por sensores, sistemas de aquisição, de processamento e de armazenamento de informação e sistemas de comunicação com elevado grau de automação, versatilidade e flexibilidade [47].

Estes sistemas, por serem parte integrante da estrutura viabilizam o seu acompanhamento permanente, medindo e interpretando o seu comportamento. Atualmente é possível estabelecer a comunicação entre o sistema instalado na estrutura e uma estação remota, permitindo a transferência, em tempo real, de toda a informação disponível, para uma rede de informação [5].

Uma outra característica importante dos sistemas de monitorização é a possibilidade de gerarem sinais de alarme, quando determinados parâmetros pré-definidos são excedidos. Quando estes sistemas, além destas características, têm poder decisório e podem intervir automaticamente nas estruturas, constituem a essência das designadas estruturas inteligentes [5].

# 3

## **BUILDING INFORMATION MODELING**

### **3.1. INTRODUÇÃO**

A digitalização do setor da construção é cada vez mais reconhecida ao nível do seu potencial para o setor, o que pode contribuir significativamente para o desenvolvimento sustentável. Estima-se que a digitalização em grande escala na construção não residencial levaria a uma economia de custo global anual de 0,6 mil milhões de euros a 1,0 mil milhões de euros (13% a 21%) nas fases de engenharia e construção e de 0,3 mil milhões de euros a 0,4 mil milhões de euros (10% a 17%) na fase de operação e manutenção [20].

A Comissão Europeia tem assim apoiado, promovido e desenvolvido várias políticas e iniciativas com o objetivo de fomentar a digitalização no setor da construção, incluindo, entre outros, a estratégia para a competitividade sustentável do setor da construção e das suas empresas, o *EU BIM Task Group* e a futura plataforma de construção digital da *EU Digital Construction Platform*. A digitalização do setor da construção também está integrada noutras áreas políticas, como a diretiva da UE sobre Contratos Públicos, que promove o uso do *Building Information Modeling*, BIM, em projetos de construção [20].

A modelação BIM está a ocupar um lugar central na transformação digital da indústria da construção, servindo como plataforma integrada de software para desenho, modelação, planeamento e colaboração, fornecendo a todos os interessados uma representação digital das características de um edifício ao longo de todo o seu ciclo de vida. Desta forma, ao basear-se num fluxo acessível e contínuo de informações entre todas as partes interessadas, este tipo de modelação reduz a perda de informações e a existência de erros e omissões [20]. O BIM promove a colaboração ao longo das diferentes fases de projeto, conforme se verifica na Figura 3.1.

Tudo isto se traduz em grandes ganhos na eficiência, ou seja, com menores custos associados, entregas mais rápidas, com menos falhas na comunicação, menos imprecisões e atrasos, com oportunidades de negócios crescentes e, conjuntamente, menores emissões e quantidade de resíduos. De facto, cerca de 75% das empresas que adotam o BIM relataram retornos positivos sobre os seus investimentos com tempos mais curtos do projeto e com economia de custos de material. O BIM torna-se essencial para grandes, complexos e integrados projetos de infraestruturas, envolvendo uma ampla gama de atividades e *stakeholders* [20].

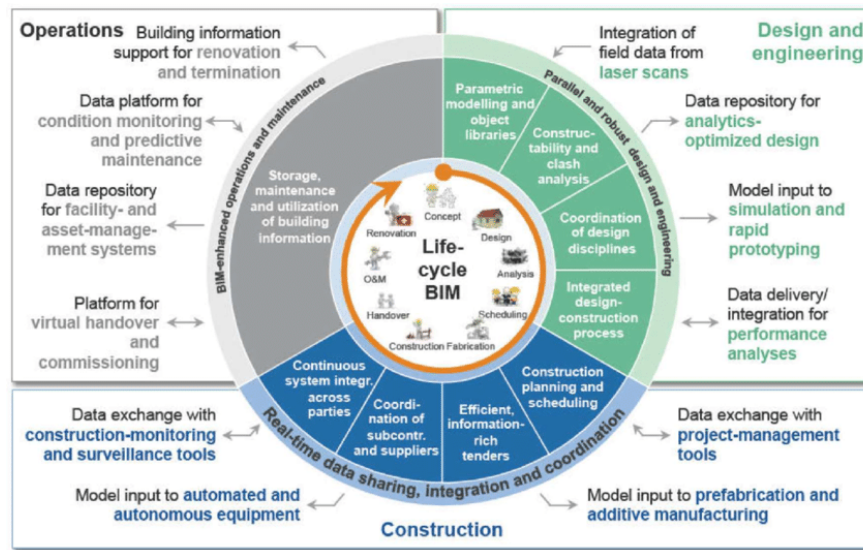


Figura 3.1 – Aplicação do BIM ao longo do ciclo de vida de uma construção [42].

Neste capítulo será apresentado o conceito BIM e o que motivou ao seu surgimento, as suas vantagens e aplicações no setor, os riscos e desafios inerentes à adoção desta metodologia e os principais incentivos e normalizações existentes.

## 3.2. DEFINIÇÃO DO CONCEITO

### 3.2.1. PARADIGMA DA INDÚSTRIA DA AEC

A indústria da AEC tem vindo a procurar uma solução de otimização com o objetivo de diminuir o custo do projeto e o tempo de entrega, aumentar a produtividade e melhorar a qualidade mas, ao mesmo tempo, aplicar práticas sustentáveis em todo o seu processo [8]. Contudo, este setor assume um caráter pouco industrial devido a cada atividade ser particular a cada projeto, existindo uma fraca comunicação entre os vários intervenientes de um projeto, onde a aplicação de tecnologias assume níveis muito baixos e a curva de aprendizagem é lenta [7].

Estas características surgem como um obstáculo para o alcance dos objetivos do setor e, de forma a que seja possível alcançá-los, torna-se necessário mitigar ou superar alguns desses aspetos recorrendo, para isso, a uma linha orientadora de trabalho transversal à atividade. Desta forma vê-se possível convergir as várias competências envolvidas, melhorando o planeamento das operações e as soluções a executar, sendo possível detetar precocemente possíveis erros nas várias fases do ciclo da construção e, assim, agarrar os benefícios decorrentes como a poupança de recursos, o cumprimento de prazos, a contenção de custos e conseqüentemente uma maximização dos lucros [7].

O processo tradicional de conceção-construção é um modelo faseado, que apresenta uma maior tendência para o aparecimento de erros e omissões, oferecendo alguma resistência à introdução de alterações. Como resposta do setor, este processo começa a ser substituído por novas metodologias de trabalho que vão ao encontro das novas ideologias, tais como o processo colaborativo e o modelo de partilha de risco [9].

Relativamente ao modelo de risco, este apresenta-se de uma forma semelhante ao do processo tradicional. Contudo, é feita a integração do empreiteiro na fase de projeto e a partilha de responsabilidade nas derrapagens de custos com o Dono de Obra.

Conforme a Figura 3.2, esta metodologia é caracterizada por uma estrutura organizacional sequencial, que logo à partida apresenta defeitos pelo tempo de espera na obtenção de respostas. Na eventualidade de algum dos pontos do processo não dar seguimento ou ficar comprometido de alguma forma, não é possível passar ao seguinte enquanto este não for solucionado, representando assim um grande inconveniente (Figura 3.3) [23].

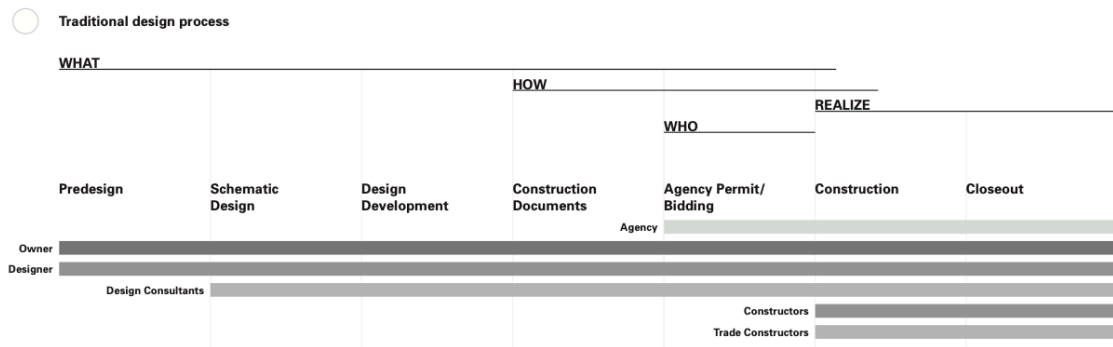


Figura 3.2 – Metodologia Tradicional [9].

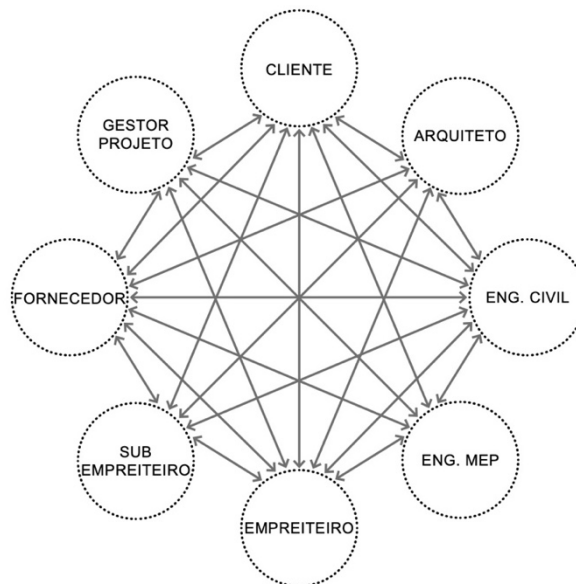


Figura 3.3 – Interface da metodologia tradicional, Adaptado de [41].

Por sua vez, o processo colaborativo consiste num modelo cíclico (Figura 3.5) onde todos os envolvidos conseguem partilhar os ficheiros numa tipologia comum a todos, que leva ao conceito de modelo único do BIM. Neste processo, todos os intervenientes podem trabalhar simultaneamente (Figura 3.4) e de forma individual no mesmo modelo, levando à deteção prévia de possíveis erros, interferências e omissões [23].

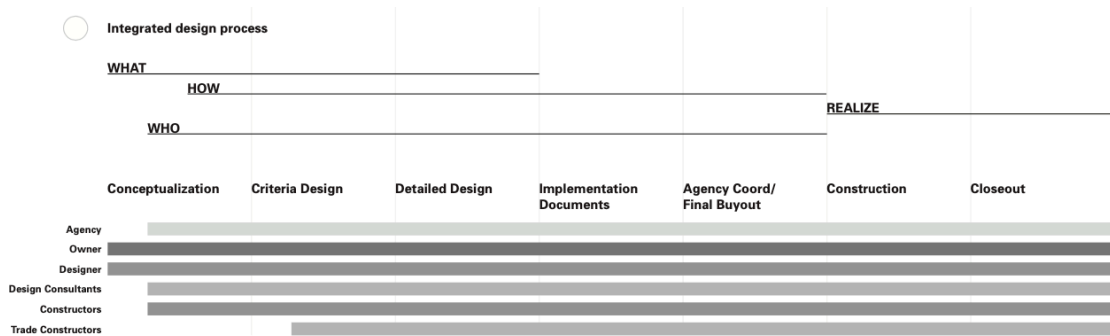


Figura 3.4 – Metodologia colaborativa [9].

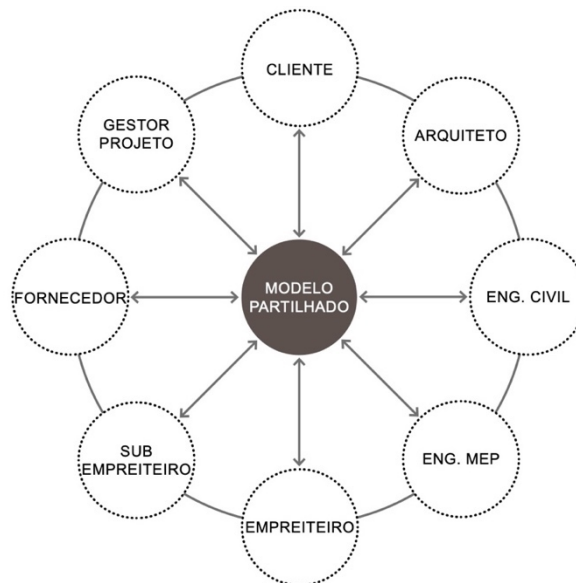


Figura 3.5 – Interface da metodologia colaborativa. Adaptado de [41].

Segundo o Guia da AIA (*American Institute of Architects*) de *Integrated Project Delivery*, é possível realizar uma análise comparativa entre ambas as metodologias, conforme se concluiu na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Comparação entre a metodologia tradicional e a colaborativa, Adaptado de [9].

METODOLOGIA TRADICIONAL		METODOLOGIA COLABORATIVA
Fragmentadas; assentes numa ideologia do “mínimo necessário”; de controlo fortemente hierárquico.	<b>EQUIPAS</b>	Funcionamento integrado das equipas, integrando, desde cedo, os <i>stakeholders</i> de forma aberta e colaborativa.
Linear, distinto e segregado; Especialidades integradas à medida de que vai sendo necessário; informação acumulada; informação isolada.	<b>PROCESSO</b>	Simultâneo e em vários níveis; contribuição das especialidades desde cedo; informação partilhada de forma aberta; respeito e confiança dos <i>stakeholders</i> .
Gerido de forma individual.	<b>RISCO</b>	Gerido de forma coletiva, devidamente partilhado.
Adquirida de forma individual; mínimo esforço para um retorno máximo; geralmente baseado no preço de custo.	<b>REMONERAÇÃO</b>	Sucesso da equipa ligado ao sucesso do projeto; baseada no valor.
Em papel, 2D; analógico	<b>COMUNICAÇÕES/ TECNOLOGIA</b>	Digital e virtual; BIM (3D, 4D e 5D)
Incentivam o esforço de forma unidirecional; risco alocado e transferido; sem partilha.	<b>ACORDOS</b>	Incentivam, promovem e apoiam a adoção de uma metodologia colaborativa de partilha livre e multidirecional; partilha de risco.

MacLeamy representa uma comparação entre os resultados do método tradicional e os do método colaborativo, durante o ciclo de vida de um edifício, conforme se verifica na Figura 3.6. Desta forma, entende-se que o ideal passa por colocar mais esforço numa fase embrionária do projeto, que permitirá detetar erros e conflitos numa fase inicial, evitando desta forma custos acrescidos numa fase posterior, reduzindo eventuais esforços associados a essa fase.

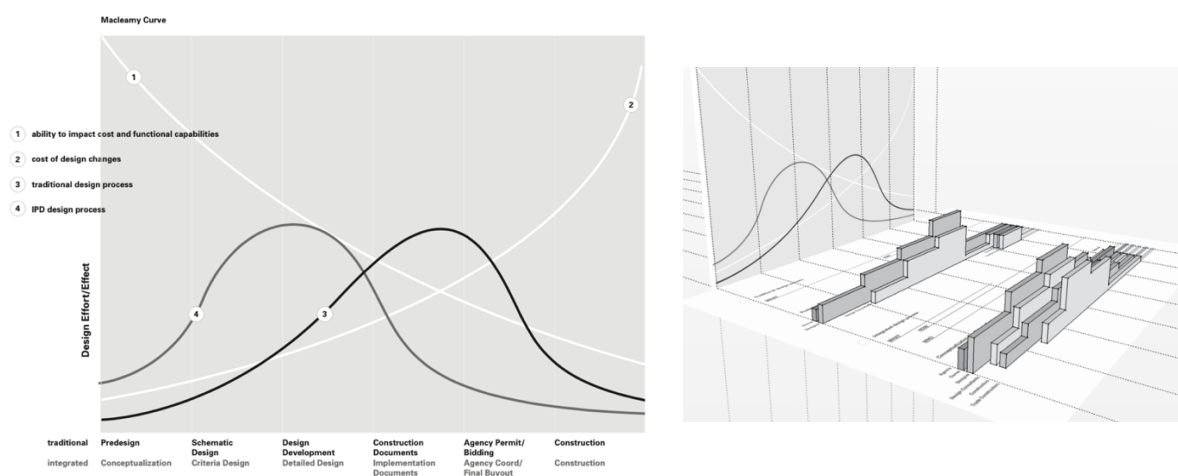


Figura 3.6 – Curva de esforço/efeito de MacLeamy [9].

### 3.2.2. INTEGRATED PROJECT DELIVERY

Face aos pressupostos apresentados surge o conceito de *Integrated Project Delivery* (IPD), identificando-se como uma abordagem aos projetos integrando pessoas, sistemas, estruturas de negócio e diferentes práticas num processo colaborativo. Este conceito baseia-se na contribuição e na experiência dos vários integrantes levando à otimização dos resultados do projeto, ao acréscimo de valor para o seu detentor, à redução de desperdícios e finalmente à eficiência ao longo de todas as fases de projeto [9]. Para tal, este modelo assenta em alguns princípios como o da confiança, da transparência, da colaboração, da partilha irrestrita de informação, do interesse da equipa no sucesso do projeto, da partilha do risco e da recompensa e da utilização aberta de todas as capacidades tecnológicas disponíveis [7].

No setor da AEC, os novos métodos de trabalho colaborativo, tal como o IPD, têm ganho algum ênfase nos últimos tempos devido, em grande parte, à evolução tecnológica em muito associada ao crescente interesse por parte dos gestores de projetos. Isto resulta em melhores projetos, elaborados de forma mais rápida e com menos custos associados. Existe, no entanto, alguma inércia à implementação deste modelo devido essencialmente a três fatores, nomeadamente a falta de confiança entre os intervenientes, a necessidade de tecnologia capaz de realizar num único modelo toda a construção virtual de forma integrada e, por fim, prende-se com questões de caráter jurídico de responsabilidade e direito de propriedade intelectual do modelo [7].

### 3.2.3. SURGIMENTO DO BIM E O SEU CONCEITO

Em meados dos anos noventa, um novo conjunto de projetos na área das Tecnologias de Informação e Comunicação associados ao sector da AEC, começaram a desenvolver sistemas sofisticados de CAD onde era possível, para além da informação vetorial, enriquecer os modelos 3D dos edifícios e estruturas com dados complementares, como características físicas, custos, quantidades de materiais necessários, entre outros. Este tipo de sistemas passaram então a denominar-se de *Building Information Modeling* [36]. Esta plataforma informática de modelação é capaz de simular as fases de operação de um empreendimento, sendo possível obter uma representação digital inteligente do conjunto de elementos que constituem uma infraestrutura onde, consoante as necessidades e expectativas dos utilizadores e *stakeholders*, é possível extrair esquemas planimétricos, tridimensionais e muitos outros dados associados.

De acordo com o que foi anteriormente apresentado, em particular a procura por parte do setor da AEC de formas de otimizar os seus projetos por via do aumento da produtividade, da qualidade e da redução do tempo de entrega dos mesmos, o BIM surge como uma solução para alcançar estes objetivos [8].

A tecnologia BIM permite a construção de um modelo digital 3D bastante preciso e detalhado que, uma vez finalizado, contém nele informação suficiente para dar apoio a todas as fases da conceção de um edifício e, até mesmo, noutras fases futuras do ciclo de vida de um projeto, como é o caso da fase de exploração para a realização de tarefas de manutenção e inspeção. Este modelo digital agrega então um variado tipo de informação relevante para o projeto, tais como a geometria do edifício e dos seus elementos, a geografia do terreno, as quantidades e propriedades dos elementos, custos e prazos, fabricantes e fornecedores, assim como todo o planeamento do projeto. Esta propriedade permite que a informação seja extraída de forma célere e sem prejuízo de perda de qualidade, representando de forma fiel o ciclo de vida de um projeto.

Através desta metodologia é possível que os diferentes intervenientes de um processo colaborem de forma mais rigorosa e eficiente, comparativamente a um caso de adoção de um processo tradicional. Isto significa que à medida que o projeto é criado, as várias equipas estão constantemente a redefinir e a ajustar as suas parcelas de trabalho, de acordo com as disposições do projeto ou alterações submetidas, para que desta forma forneçam um modelo bastante preciso antes do início da fase de construção de uma estrutura [10].

O conceito BIM não se circunscreve apenas a uma tecnologia aplicada à construção, é também uma metodologia e, dessa forma, implica algumas mudanças significativas no atual paradigma do fluxo de trabalho e entrega de projetos. O conceito BIM, que incorpora os princípios do conceito IPD, incentiva a participação de todas as partes interessadas no projeto, procurando uma maior eficiência e sinergia entre todas elas, quando outrora existiam conflitos [11].

Em suma, um *Building Information Model* é um modelo estrutural de informação digital, tridimensional, onde constam os vários objetos que compõem o edifício, capturando a sua forma, comportamento e relações dos seus vários componentes, sendo possível indexar todo um conjunto de dados a um elemento em particular. Neste sentido, o BIM permite a elaboração de modelos digitais com informação completa de todos os diferentes domínios do projeto, contendo a geometria e a informação relevante e necessária para dar suporte à construção e gestão das atividades inerentes à conceção de um edifício [22].

O BIM 3D convencional tem vindo a ser transformado em 4D, 5D, 6D ou mesmo 7D e, no futuro, em versões 8D com base na aplicação do *Building Lifecycle Management* (BLM) à construção, representando uma consequência lógica do uso de grandes quantidades de informações disponíveis em modelos de edifícios 3D inteligentes [13]. As dimensões do BIM acima da tridimensional podem ser descritas da seguinte forma [24]:

- 4D – modelo virtual da estrutura construída, que inclui planos de construção e mapas de progresso. Possibilita a visualização virtual do edifício construído associado a qualquer momento temporal;
- 5D - os dados de custo são inseridos num modelo 3D associado com o cronograma de obra. Os benefícios da quinta dimensão do BIM podem consistir na maior precisão e previsibilidade das mudanças que ocorrem no projeto, juntamente com uma análise de custo mais confiável de diferentes cenários de construção;
- 6D - introdução do princípio do desenvolvimento sustentável no processo de investimento com ênfase na eficiência energética. A sexta dimensão do BIM permite a obtenção de dados sobre o consumo de energia projetado do edifício numa fase inicial;
- 7D - integração do conceito de *Facility Management* no BIM. Permite rastrear o estado de determinados componentes do edifício, as suas especificações e períodos de garantia. A sétima dimensão do BIM abrange a gestão de todo o ciclo de vida de um edifício, desde a conceção até à demolição;
- 8D - complementa o modelo com informações de segurança e saúde. Esta dimensão centra-se em três tarefas: identificação de ameaças decorrentes das soluções de projeto e construção escolhidas, indicação de alternativas às soluções de maior risco e sinalização dos riscos específicos necessários de controlar em obra.

### 3.3. APLICAÇÕES E VANTAGENS DO BIM

A utilidade e a aplicabilidade de um modelo BIM são bastante vastas e de grande interesse, sendo possível destacar entre muitas, as mais relevantes [7, 23, 36].

- Administração e elaboração do projeto, onde toda a informação relevante está contida num modelo único ou na base de dados da empresa;
- Melhoria na comunicação com a equipa de projeto, pois a qualidade do conteúdo do modelo BIM trocada entre membros da equipa de projeto reduz o número de iterações para chegar a um ponto ótimo. A eficiente comunicação entre membros da equipa leva à deteção precoce de erros e incompatibilidades;
- Boa visualização gráfica, sendo possível gerar diferentes vistas 2D e 3D. Pode ser utilizado para simular situações e verificar falhas de projeto;
- Facilidade em obter estimativas de custo, uma vez que os *softwares* BIM possuem capacidade de cálculo deste tipo de parâmetros, sendo que as quantidades de material são extraídas e atualizadas automaticamente aquando de eventuais alterações no modelo;
- Melhoria na comunicação com empreiteiros, pois para que a construção seja realizada e programada da melhor forma, é necessário garantir boa qualidade de informação do projeto, clareza e consistência;
- Coordenação de tarefas, pedidos de material, fabricação e cronogramas de entregas para todos os materiais de construção;
- Deteção de erros, dado que os modelos são criados e dimensionados no espaço 3D, e os sistemas podem ser verificados automática e instantaneamente para a deteção de incompatibilidades;
- Gestão das instalações, visto que os departamentos de gestão de instalações podem usufruir da informação para renovar e organizar espaços, mas também para operações de manutenção;
- A informação é partilhada de forma simplificada e pode ser alterada ou reutilizada, o que se traduz numa maior eficiência e celeridade nos processos;
- Visto que os modelos BIM são mais completos, as propostas e orçamentos podem ser rigorosamente analisadas, permitindo a elaboração de melhores soluções;
- Controlo e análise de informação sobre custos decorrentes das várias fases do ciclo de uma construção;
- Constitui uma melhoria dos serviços prestados ao cliente, dado que as propostas são melhor percecionadas através do recurso a uma visualização mais interativa e imersiva.

A Figura 3.7 pretende representar, de forma esquemática e sucinta, os principais meios de aplicação e uso do BIM.

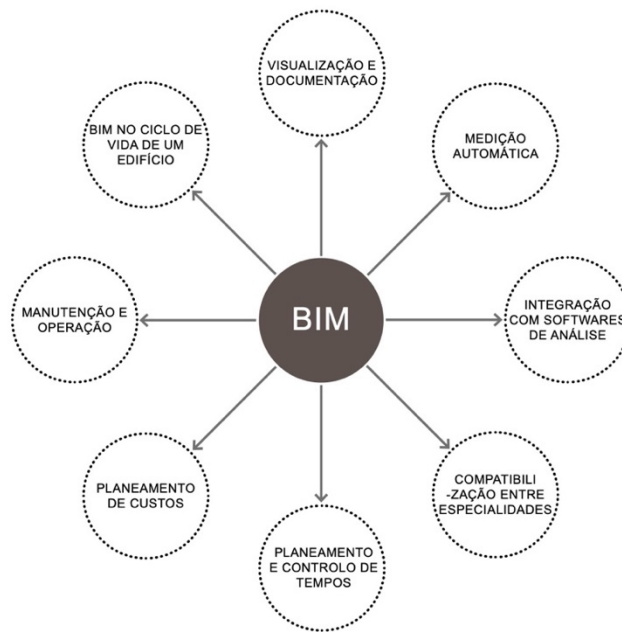


Figura 3.7 – Aplicações e usos do BIM, Adaptado de [11].

### 3.4. RETURN ON INVESTMENT

A alteração para um fluxo de trabalho com modelação 3D inteligente requer um investimento. Dessa forma, torna-se necessário, e de certo modo interessante, calcular o retorno sobre o investimento, ROI (*Return On Investment*). De forma simples, calcula-se  $ROI = (G-C) / C$ , onde G é o ganho devido ao seu investimento e C é o custo desse investimento. Para o caso em que a razão é superior a 1, conclui-se que o investimento teve um resultado positivo, traduzido em lucro [12].

A Figura 3.8 ilustra a produtividade de uma equipa ao longo do tempo onde foi implementada a metodologia BIM em comparação com um sistema corrente.

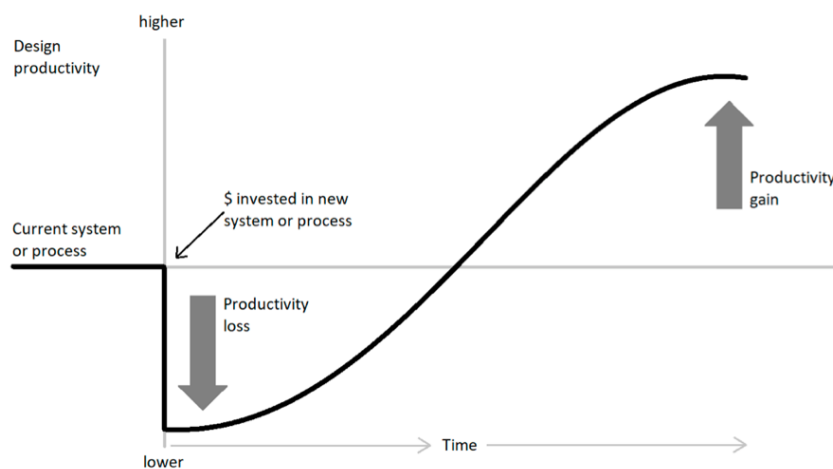


Figura 3.8 – Produtividade após implementação da metodologia BIM [13].

Pela análise da figura supra verifica-se, após a implementação da nova metodologia BIM, uma perda na produtividade relacionada com a necessidade de adaptação ao novo processo de trabalho. Esta perda é recuperada ao longo do tempo, com tendência a superar os valores do processo adotado anteriormente.

Nem sempre é fácil obter os custos e ganhos de metodologias de trabalho BIM porque existem outros custos e taxas inerentes ao processo. Contudo, através de uma análise, é possível identificar algumas tendências, comparando projetos distintos mas idênticos ao nível de geometria, sistema estrutural e equipa de projeto, por fim a reduzir algumas variáveis. Obtém-se, assim, informação relacionada com o tempo despendido em cada tarefa, custos inerentes e esforço aplicado nas várias fases [12].

### 3.5. SOFTWARE PARA BIM

Existe uma grande variedade de *softwares* que operam em BIM, onde a sua escolha deve ir ao encontro dos objetivos pretendidos e da especialidade em causa usufruindo, desse modo, das várias valências de cada um em particular. A Tabela 3.2 expõe uma lista dos principais *softwares* que operam nesta metodologia particularizando-os a cada especialidade.

Tabela 3.2 – Lista de *softwares* para BIM.

Arquitetura	ArchiCAD	Planeamento	AutoCAD Civil 3D	
	Revit Architecture		Bentley PowerCivil	
	Allplan Architecture		Gestão de Projetos	Navisworks
	Vectorworks Architect			Solibri Model Checker
Bentley Architecture	Estruturas	Gestão e Orçamentação de Projeto	Synchro	
Tekla Structures			MS Project	
Revit Structures		Allplan BCM		
CypeCAD		Operação e Manutenção	ArchiFM	
Bentley Structural	Bentley Facilities			
Revit MEP	Allplan Alfa			
Bentley Mechanical Systems	Sistemas Mecânicos e AVAC	Visualizador de IFC	Archibus	
Vectorworks Architect			TeklaBIMsight	
Revit MEP			BIMx	
Bentley Electrical Systems			Solibri Nodel Viewer	
Vectorworks Architect	Sistemas Elétricos	Sistemas Hidráulicos	Autodesk Design Review	
Revit MEP			Bentley Navigator	
Bentley Mechanical Systems				
Pipedesigner 3D				

### 3.6. INDUSTRY FOUNDATION CLASSES

O principal propósito do BIM é o de melhorar a comunicação, produtividade, tempo de entrega, custos e qualidade durante todo o ciclo de vida do edifício, através da possibilidade de permuta de informação entre os intervenientes no projeto independentemente dos programas usados por cada um. Sendo já considerado um pré-requisito para melhorar os fluxos de trabalho na construção, esta metodologia contribui significativamente para eliminar desperdícios gerados por uma interoperabilidade inadequada.

O formato de ficheiros independente IFC (*Industry Foundation Classes*), é um formato aberto que atua de forma neutra, permitindo capturar não só a geometria, mas também todas as outras propriedades associadas aos objetos e as suas relações dentro de um modelo BIM, facilitando o processo de troca de informações que de outro modo não seria possível de realizar.

O IFC é uma base de dados de informação dos objetos que permite a partilha e troca de dados entre *softwares*, em que cada versão do protocolo IFC permite uma especificação segundo o protocolo ifcXML ou segundo o protocolo EXPRESS [21].

As aplicações compatíveis com este formato podem abrir ou importar arquivos IFC, ou seja, estão habilitados a reutilizar dados gerados noutros programas e adicionar, eliminar ou alterar a sua informação e, de seguida, voltar a exportar o modelo modificado para IFC [21].

Os sistemas BIM modernos são, então, capazes de gerar representações ricas em componentes de construção, onde o IFC permite acrescentar uma linguagem comum para a transferência de informações. Deste modo, as vantagens da exploração do BIM são maximizadas, traduzindo-se na extinção da necessidade de refazer modelos de edifícios aquando da utilização de diferentes aplicações. Trata-se de um facto que é incontornável, visto que o uso produtivo dos BIM requer troca de dados entre diferentes especialidades [21].

Cada implementação para a troca de dados usando o IFC deve seguir as exigências de comutação. Estas exigências especificam as informações que são necessárias para a troca e partilha de informação numa determinada fase do projeto, sendo esta especificidade de grande importância para prevenir incertezas, mas igualmente para certificar e averiguar se a informação em causa foi salvaguardada [21].

Assim, os principais objetivos do IFC são [36]:

- A coordenação interdisciplinar de modelos de informação de edifícios;
- A troca e partilha de informação entre *softwares*;
- A transmissão e reutilização de informação para dimensionamento e operações a jusante do projeto;
- Melhorar a comunicação, produtividade, tempo de entrega, custos e qualidade durante todo o ciclo de vida do edifício;
- Permite a permuta de informação entre os intervenientes no projeto independentemente dos programas usados por cada um.

Em suma, o modelo de informação IFC é visto como uma das chaves que permite transpor barreiras e ineficiências que se opõem ao desenvolvimento das tecnologias na indústria AEC, consistindo numa biblioteca de objetos e propriedades que podem ser usados para representar projetos de edifícios e informação de suporte. [21]

### 3.7. RISCOS E DESAFIOS

A implementação do BIM entre a indústria europeia permanece limitada impedindo, dessa forma, a obtenção dos potenciais benefícios associados à sua adoção. Na Europa, cerca de 29% das construtoras usam BIM 3D, enquanto que as restantes nunca o usaram. Os números pioram em relação ao BIM 4D, com apenas cerca de 6% das empresas que o implementaram. As empresas utilizam o BIM, principalmente, para atividades relacionadas com a coordenação espacial, para a redução de conflitos em obra, para a visualização renderizada e navegação virtual de forma a aliciar *stakeholders* e para a elaboração do projeto preliminar. A indústria aponta a redução de erros, maior previsibilidade de custos e melhor compreensão do projeto, como os principais benefícios do BIM [20].

### 3.7.1. RISCOS PARA O BIM

Já é possível reconhecer os impactos da implementação da metodologia BIM na indústria da AEC. Contudo, e à semelhança de qualquer outra metodologia nova a implementar, existem riscos e desafios inerentes, que apenas com o tempo e o aprofundar do conhecimento podem ser mitigados.

O risco associado à utilização do BIM pode ser dividido em duas vertentes, uma jurídica e outra técnica.

Do lado dos riscos jurídicos decorrentes da implementação desta metodologia, verifica-se que ainda não é possível determinar com exatidão o verdadeiro autor da informação BIM, sendo necessário proteger essa informação por via legal, lei de direitos de autor, evidenciando-se um conflito de propriedade intelectual [14]. Ainda nesta categoria surge outro problema relacionado com a divulgação de informação por parte de outrem, que não o proprietário, engenheiro responsável ou arquiteto, a terceiros, nomeadamente fornecedores e equipas subcontratadas [15]. Outra situação a ter em atenção, prende-se com a responsabilidade no controlo de entrada de informação no modelo e de eventuais imprecisões ou erros que possam existir, nomeadamente a pessoa responsável por tal. Desta forma, é necessário estipular aspetos relativos a indemnizações exigidas pelos utilizadores BIM e a oferta de garantias e isenções de responsabilidade por parte dos projetistas [15].

No que respeita à categoria técnica, destaca-se a interação tecnológica entre os vários planos, isto porque existem diversas plataformas BIM. Dessa forma, existe um responsável por organizar e compilar toda a informação, de forma atempada, num único plano geral e acessível por todos, contendo planos de custos e durações. Já no caso de todos os intervenientes utilizarem o mesmo *software*, a integração da informação é feita de forma harmoniosa. Torna-se necessário esclarecer contratualmente toda a responsabilidade relativa a questões sobre a coordenação e a precisão dos dados, no que respeita a custos e durações a serem inseridos no modelo da construção [15].

### 3.7.2. DESAFIOS DO BIM

A adoção da metodologia BIM tem sido muito mais lenta do que o previsto por alguns especialistas, isto porque existem desafios inerentes a esta nova metodologia. Essencialmente, distinguem-se duas razões, uma de ordem técnica e outra de gestão.

As razões técnicas podem ser sintetizadas em três tópicos [15]:

- A necessidade de criação de modelos de construção transacionáveis, de forma a eliminar problemas de interoperabilidade de dados;
- A requisição de dados digitais que possam ser editáveis informaticamente;
- A necessidade de estratégias práticas bem definidas, com o propósito de promover a troca e integração de informação valiosa entre os diferentes componentes do BIM.

As problemáticas de gestão incorrem da implementação da metodologia BIM. Existe a necessidade de definir um modelo *standard* para esta metodologia e criar diretrizes para a sua implementação. Como tal, torna-se relevante desenvolver políticas e processos que promovam e incentivem a utilização do BIM e que sejam capazes de solucionar os problemas correntes relacionados com a titularidade dos direitos e riscos de gestão [7].

Na Europa, a utilização do BIM foi reforçada pela Diretiva 2014/E.U., em particular o artigo 22. Este menciona que para os contratos de empreitada de obras públicas e concursos para projetos, os Estados-Membros podem exigir a utilização de ferramentas eletrónicas específicas, como ferramentas eletrónicas de modelação da informação sobre a construção ou semelhantes.

A implementação do BIM também é afetada pela estrutura do mercado e pelo tamanho das empresas sendo, na grande maioria, liderada pelas grandes companhias. Por outro lado, as PME's apresentam uma experiência limitada em BIM por toda a cadeia de valor, fortemente explicado por três fatores [20]:

- As grandes empresas têm maior capacidade, recursos humanos e económicos para implementar o BIM do que as PME's;
- As grandes empresas, provavelmente, trabalharão em maiores projetos e de maior complexidade, exigindo uma forte coordenação, o que torna os benefícios do BIM mais tangíveis;
- Estas empresas também são mais propensas a serem solicitadas ao uso do BIM do que as de menor dimensão.

Como tal, através de políticas de iniciativas, os governos desempenham um papel central no início do processo de implementação do BIM. Ao mesmo tempo, os governos também devem facilitar e estimular iniciativas da indústria, o que é de importância primordial para garantir a propriedade da indústria da construção e, assim, a adesão ao processo de implementação desta metodologia [20].

A Figura 3.9 apresenta algumas lições chave retiradas das políticas e iniciativas aplicadas.



Figura 3.9 – Lições chave de políticas e iniciativas, realizado pela PwC Analysis [20].

Uma organização que esteja a realizar testes ou projetos-piloto para determinar os benefícios do BIM pode-se encontrar na primeira fase de capacidade, ou seja, modelação baseada em objetos e, dentro desta fase, estão a uma maturidade *ad-hoc*, trabalhando para otimizar esse processo [25]. O nível de maturidade BIM de uma organização em particular pode ser estimado consoante objetivos gerais baseados num mapa de maturidade BIM proposto na ISO 19650-1:2018, como se pode observar na Figura 3.10.

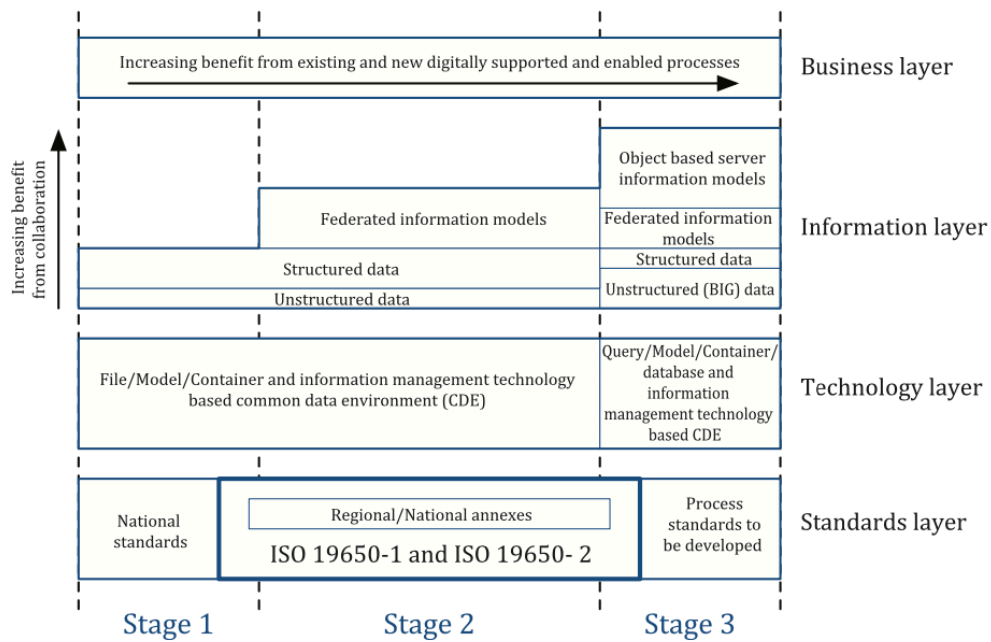


Figura 3.10 – Níveis de maturidade BIM [49].

### 3.8. MODELOS BIM

#### 3.8.1. MODELO 3D - PARAMÉTRICO

As aplicações mais correntes utilizam o modelo tridimensional do edifício, em concreto o modelo BIM, como um repositório dinâmico para integrar a informação da construção ao longo de todo o seu ciclo de vida.

Os elementos constituintes do modelo encontram-se ligados por relações paramétricas, de modo a que a informação seja introduzida de forma estruturada e que as alterações se propaguem em tempo real. A metodologia das relações paramétricas consiste na atribuição de relações de vizinhança aos vários elementos que compõem o modelo. As relações de vizinhança são processadas através de parâmetros que definem constrangimentos e implicações associados às entidades, o que resulta num modelo dito inteligente, que adapta automaticamente todos os elementos do modelo, quando se fornecem valores a parâmetros respetivos a um dos elementos [16].

Evidenciam-se, ainda, alguns aspetos positivos de um modelo 3D em BIM [7]:

- Permite a produção automática de plantas, alçados, cortes e pormenores construtivos;
- É possível interagir com ferramentas de *software*, denominadas *BIM tools*;
- Possibilita a criação e a programação de aplicações, API's, que são interligados com o modelo 3D paramétrico.

#### 3.8.2. MODELO DE INFORMAÇÃO

Um modelo de informação é um conjunto de representações de conceitos, relações, restrições, regras e operações para especificar a semântica de dados para um determinado domínio. A vantagem de usar um modelo de informação é que este permite fornecer uma estrutura partilhável, estável e organizada com requisitos de informação para o contexto do domínio [7]. O modelo de informação era antigamente

definido com base em diferentes metodologias e atender a diferentes níveis de detalhe geométrico (LoD - *Level of Detail*) que define a sofisticação do modelo BIM, assim como de informação (LOI – *Level of Information*). Estes dois conceitos constituem o LOD – *Level Of Development* (Figura 3.11), notando que os modelos deveriam ser definidos de acordo com os requisitos estabelecidos de forma contratual e que o esforço de modelação aumenta de forma significativa com aumento do LOD.

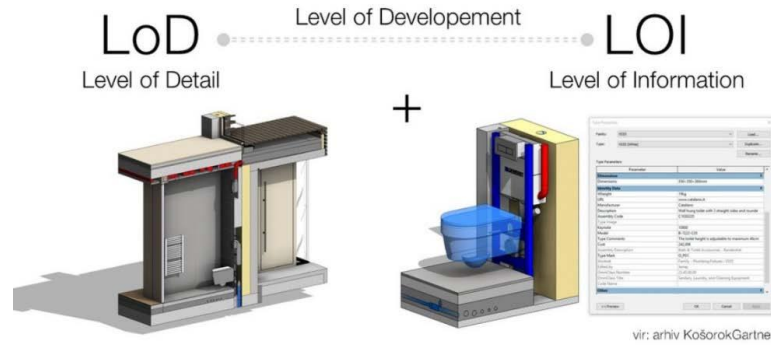


Figura 3.11 – Constituintes do LOD [43].

Contudo, a ISO 19650:2018 introduz um novo conceito, que substitui este anterior, denominado de *Level of Information Need*. O *Level of Information Need* de cada informação entregue deve ser determinado de acordo com sua finalidade, devendo incluir a determinação apropriada da qualidade, quantidade e granularidade das informações, podendo variara de entrega para entrega [49].

Existem vários formatos de medida para determinar o *Level of Information Need*. Por exemplo, duas formas complementares, mas independentes, podem definir o conteúdo geométrico e alfanumérico em termos de qualidade, quantidade e granularidade. Assim que estes formatos de medida tenham sido definidos, devem ser utilizados para determinar os restantes níveis de informações em todo o projeto [49].

Os níveis de informações devem ser determinados pela quantidade mínima de informações necessária para atender a cada requisito relevante, incluindo informações exigidas por terceiros [49].

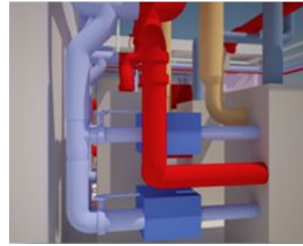
A granularidade da informação alfanumérica deve ser considerada pelo menos tão importante quanto a da informação geométrica [49].

Tabela 3.3 – Ilustração do nível de detalhe (LOD) [36, 44].

DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÃO
<p><b>LOD 100:</b> o elemento do modelo pode ser representado graficamente no modelo comum como símbolo ou outra representação genérica. Informações relativas a volumetria geral, área, altura, volume, localização e orientação.</p>	

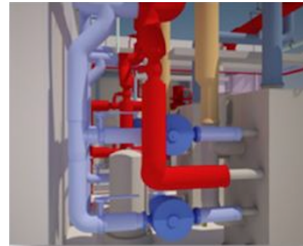
---

**LOD 200:** elementos do modelo são modelados como sistemas generalizados ou conjuntos com quantidades, tamanho, forma, localização e orientação aproximadas. Informações não geométricas também podem ser anexadas aos elementos do modelo.



---

**LOD 300:** elementos do modelo são modelados como conjuntos específicos que são precisos em termos de quantidade, tamanho, forma, localização e orientação. Informações não geométricas também podem ser anexadas aos elementos do modelo.



---

**LOD 400:** elementos do modelo são modelados como conjuntos específicos que são precisos em termos de tamanho, forma, localização, quantidade e orientação com fabricação completa, a montagem, e informação detalhada. Informações não geométricas também podem ser ligadas a elementos do modelo.



---

**LOD 500:** elementos do modelo são modelados como construídos na realidade (modelo *as-built*) e precisos em termos de tamanho, forma, localização, quantidade e orientação. Informações não geométricas também podem ser ligadas aos elementos modelados.

---



### 3.9. NORMALIZAÇÃO

A *International Organization for Standardization*, ISO, separa os documentos em diferentes categorias, definindo-os da seguinte forma [17], podendo ser esquematizados como apresentado na Figura 3.12.

- Uma **Norma Nacional ou Internacional** fornece regras, diretrizes ou características para atividades ou para os seus resultados, por fim a atingir o ponto ótimo de ordem num determinado contexto;
- Uma **Especificação Técnica** é dedicada a trabalhos em desenvolvimento técnico ou no caso de existir a possibilidade futura, mas não imediata, de acordo sobre uma norma internacional. Este documento é publicado para consulta imediata ou como meio para se receber um feedback, tendo por objeto tornar-se numa norma internacional;
- Um **Relatório Técnico** contempla informações diferentes das duas acima descritas, procurando incluir dados obtidos de investigações e estudos, ou de relatórios informativos;
- Os **Guias** auxiliam os leitores a melhor compreenderem as principais áreas em as Normas se inserem, nomeadamente de que forma uma Norma ISO pode melhorar e tornar mais eficiente e seguro um dado processo.

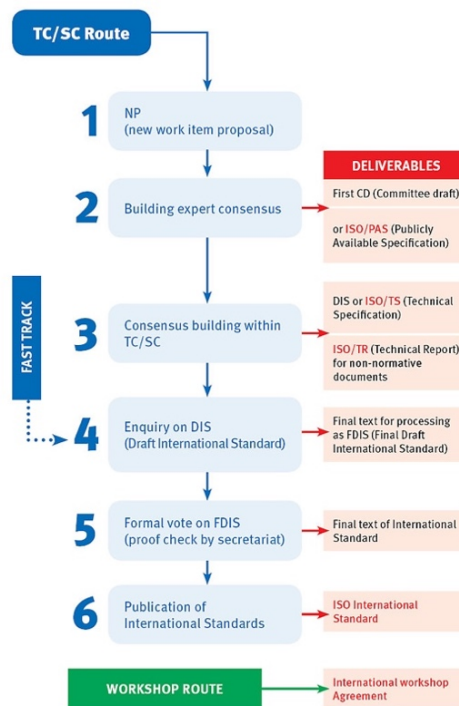


Figura 3.12 – ISO Deliverables [17].

Com a iniciativa de desenvolver soluções para alguns dos obstáculos e desafios do BIM, algumas entidades criaram documentação técnica para diversos fins.

### 3.9.1. NORMAS BIM

- Modelo de dados, IFC – *Industry Foundation Class* (ISO 16739:2013);
- Gestão da informação de todo o ciclo de vida de um edifício com uso do BIM (ISO 19650:2018);
- Manuais de processo, IDM – *Information Delivery Manuals* (ISO 29481-1:2016);
- Dicionário de dados, IFD – *International Framework Dictionary* (ISO 12006-3:2007);
- *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling* (ISO 19650:2018).

A ISO 19650-1:2018 introduz alguns novos conceitos de devem ser tidos em conta, entre eles [49]:

#### - Trabalho colaborativo baseado em *information containers*:

A produção colaborativa de informação deve ser definida em termos gerais de informação estruturada para permitir que os princípios fundamentais do trabalho colaborativo baseado em *information containers* sejam alcançados. Esses princípios fundamentais são os seguintes:

- os autores produzem informações, sujeitas a acordos de propriedade intelectual, que eles controlam e verificam, apenas obtendo informações aprovadas de terceiros quando exigido por meio de referência, federação ou troca direta de informações;
- fornecimento de requisitos de informação claramente definidos em alto nível, pelas partes interessadas associadas ao projeto ou ativo, e em nível detalhado pela parte que nomeia;

- c) consideração da abordagem proposta, capacidade de cada equipa de entrega antes da nomeação por uma parte designada em relação aos requisitos;
- d) fornecimento de um CDE para gerir e armazenar informações partilhadas, com disponibilidade adequada e segura para todos os indivíduos ou outras partes, para usar e manter essas informações;
- e) modelos de informação a serem desenvolvidos utilizando tecnologias que estejam em conformidade com este documento;
- f) convém que processos relacionados com segurança da informação sejam implementados durante toda a vida útil do ativo para tratar questões como acessos não autorizado, perda ou corrupção de informações, degradação e, na medida do possível, obsolescência.

**- Definição da estratégia de federação e estrutura analítica para *information containers*:**

O objetivo da estratégia de federação e da estrutura analítica do *information container* é ajudar a planear a produção de informações por equipas de tarefas separadas para o nível apropriado *Level of Information Need*.

A estratégia da federação deve ser desenvolvida durante as atividades de planeamento de informações, devendo explicar como o modelo de informação deve ser dividido em um ou mais conjuntos de *information containers*. A alocação pode ser feita visualizando o modelo de informação em diferentes perspetivas, como funcional, espacial ou geométrica. O conceito de alocação funcional é suportado por uma visão do modelo semântico. A visualização do modelo geométrico é usualmente utilizada durante a fase de entrega.

A estratégia de federação deve ser desenvolvida em uma ou mais estruturas de divisão de *information containers* durante o planeamento detalhado para explicar mais detalhadamente como os *information containers* se relacionam entre si. A estratégia de federação e a estrutura analítica do *information container* explicam a metodologia para gerir as interfaces associadas ao ativo durante a sua fase de entrega ou a fase operacional.

A estratégia de federação e a estrutura analítica do *information container* devem ser atualizadas à medida que novas equipas de tarefas sejam nomeadas. As atualizações também podem ser necessárias, pois a natureza do trabalho que está a ser executado altera-se.

A definição da estratégia de federação e a estrutura analítica do *information container* são atividades estratégicas relacionadas ao projeto ou ativo e devem ser acordadas de forma colaborativa devendo, por isso, pertencer e ser gerido por funções que entendam a abordagem estratégica para entrega de projetos e gestão de ativos.

A estratégia de federação e a estrutura analítica do *information container* devem ser comunicadas a todas as organizações envolvidas nas atividades do projeto.

A ISO 19650-2:2018 propõe um esquema de interface entre as várias partes e as equipas de trabalho para fins de gestão de informações, conforme se apresenta na Figura 3.13.

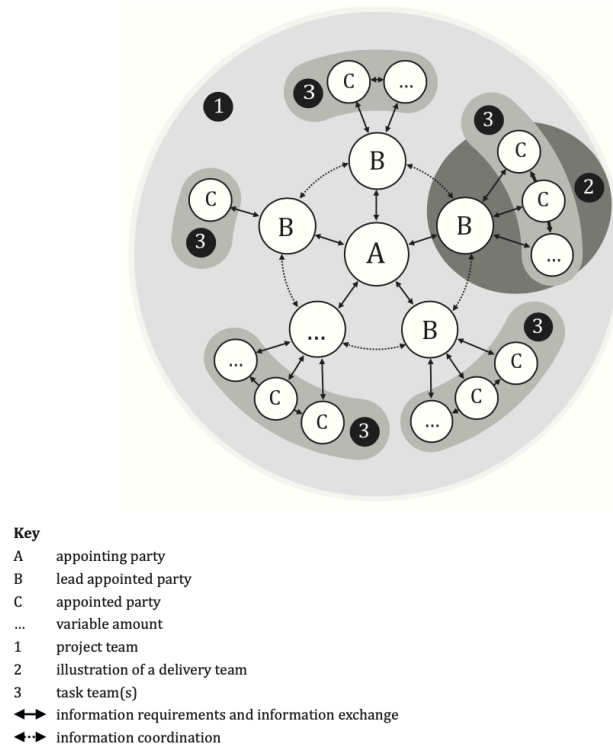


Figura 3.13 - Interface entre as várias partes para fins de gestão de informações [50].

### 3.9.2. GUIAS BIM

- COBIM (revisto por *The Building Information Foundation* RTS, Finlândia, 2012);
- NBIMS – *US version 2* (US National Institute of Building Sciences, 2012);
- *Penn State BIM Project Execution Planning Guide version 2.1* (The Pennsylvania State University, CIC Research Group, 2010);
- *Australian National Guidelines for Digital Modeling* (CRC Construction Innovation, 2009);
- *The VA BIM Guide* (U.S. Department of Veterans Affairs, 2010);
- AEC (UK) *BIM protocol* (Cabinet Office Britânico, 2016);
- Guia de Contratação BIM (CT 197 – BIM, Portugal, 2017).

### 3.9.3. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO

Os sistemas de classificação estabelecem terminologias padronizadas para o setor da AEC, que facilitam a organização e estruturação da informação. Trata-se de um aspeto importante na metodologia BIM, onde se classifica os modelos de produtos de construção de forma universal e organizada, fornecendo códigos de classificação adequados. Destacam-se, de seguida, as vantagens associadas [18]:

- Normalização da informação na indústria da AEC;
- Partilha de informação mais eficiente e organizada;
- Maior celeridade e organização na preparação de documentação;
- Consulta futura da informação;
- Rastreabilidade da informação;
- Acompanhamento do ciclo de vida do edifício;
- Padronização de processos;
- Boa gestão de tempo e custos.

### 3.9.4. NORMALIZAÇÃO BIM EM PORTUGAL

Em Portugal, a normalização ainda só agora começa a dar os primeiros passos. O Instituto Português da Qualidade (IPQ) está representado no grupo de trabalho da Comissão da Normalização Europeia para o desenvolvimento da norma BIM europeia, garantindo, desta forma, uma convergência entre os esforços nacionais e europeus. Algumas iniciativas estão, também, a ser dinamizadas para gerar o conhecimento de base necessário ao desenvolvimento de um documento de âmbito nacional de valor indiscutível [36].

Foram organizadas diversas iniciativas de disseminação e apoio à implementação BIM, donde se destacam a Comissão Técnica de Normalização BIM, a CT 197, que faz a ponte com o CEN/TC 442 e o *EU BIM Task Group*. O trabalho desta CT está a ser desenvolvido com o apoio de todas as entidades envolvidas e com base em quatro subcomissões principais: 1- Plano de Ação e Maturidade; 2- Metodologias BIM; 3- Trocas de Informação e Requisitos; e 4- Modelação e Objetos BIM [37].

Como fatores fundamentais do plano estratégico identificam-se na Figura 3.13 cinco destes aspetos.



Figura 3.14 – Fatores fundamentais do plano estratégico da CT179 [38].

A par disto, outras iniciativas como o grupo de trabalho BIM da Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção (PTPC) e o BIM fórum desempenham um papel valioso para as dinâmicas de normalização, gerando uma visão integrada. Outras iniciativas, como a Comissão BIM da Associação Portuguesa dos Mercados Públicos (APMEP), estão também a contribuir ativamente no respeito à participação numa rede BIM europeia de entidades públicas e ao trabalho de integração do BIM nos processos de contratação pública que, aliás, recebe especial atenção nas novas diretivas europeias da contratação pública [36].

A normalização BIM em Portugal deve ser encarada como uma oportunidade de reorganização da indústria e otimização dos processos e fluxos de informação que lhe estão inerentes. A sua correta implementação permitirá, de forma inequívoca, potenciar sinergias entre os diversos agentes e abrir espaços de inovação importantes para o aumento da competitividade no mercado global [36].

# 4

## REALIDADE AUMENTADA

### 4.1. INTRODUÇÃO

A Realidade Aumentada (RA) é uma metodologia que tem vindo a crescer e a marcar presença, juntamente com a Realidade Virtual (RV). A RA reflete-se como um aumento de *feedback* natural para o utilizador, apresentando elementos virtuais sobrepostos ao mundo real, enquanto a RV transporta o utilizador para um mundo imersivo e totalmente virtual. Também existem diferenças no que respeita ao tipo de ecrã que os mecanismos possuem, sendo o da RA tipicamente transparente, e o da RV opaco. A Realidade Mista (RM) surge mais tarde como uma experiência que mistura parte da realidade com a virtualidade, isto é, assume-se como um termo coletivo, manifestando-se em ambientes de RV ou RA [26]. Desta forma, quando se pretende referir o conceito em geral, fala-se de Realidade Virtual *Continuum* (RVC), conforme se apresenta na Figura 4.1.

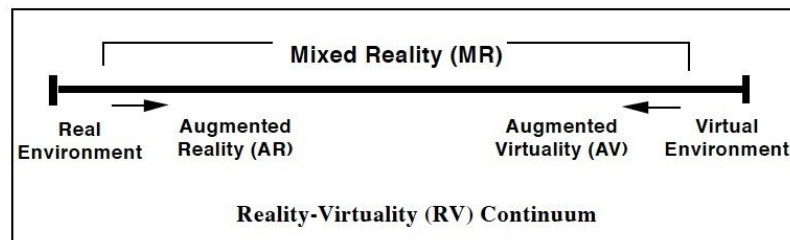


Figura 4.1 – Realidade Virtual Continuum [27].

Neste capítulo serão apresentadas algumas noções de base do conceito geral de Realidade Virtual *Continuum* e, em particular, da Realidade Aumentada, nomeadamente o seu surgimento, os benefícios e os riscos que acarretam, assim como o *hardware* e *software* requeridos pelo sistema.

### 4.2. A RVC E A RA

#### 4.2.1. DEFINIÇÃO DE CONCEITO

Quando se fala de RVC, é importante ter em conta a imersividade e os tipos de componentes utilizados em cada sistema que a integra. Estes podem ser [28]:

- Não Imersivos: permitem uma experiência de RVC muito básica, onde o utilizador interage com o ambiente 3D através de monitores ou de algum tipo de *headsets*, sem qualquer imersão completa no espaço virtual;
- Imersivos: mais avançado e dispendioso sistema de RVC, que permite ao utilizador sentir-se totalmente imerso no ambiente 3D. Requer equipamento como *headsets* e outros acessórios e um nível de sofisticação e qualidade bastante elevados;
- Semi-imersivos: este sistema remete para um conceito de RVC na vertente da RA.

A Realidade Aumentada surge da indústria do entretenimento como um modo de jogo e, devido ao seu elevado potencial, começa a ser utilizado na indústria da AEC. Caracteriza-se como uma imitação do mundo real que integra elementos virtuais, ou seja, isto significa que o utilizador encontra-se envolvido no ambiente real que o rodeia e as componentes virtuais criadas sobrepõem-se a ele. Esta metodologia satisfaz a perceção humana ao ponto de obter informações reais de um modelo virtual integrado no mundo real. Esta vertente é capaz de oferecer uma melhor relação entre o virtual e o real, em comparação com a RV que imerge o utilizador num cenário integralmente virtual.

Ainda que a adoção do sistema BIM permita reduzir grande parte das incompatibilidades e situações inesperadas durante o processo construtivo, é inevitável que surjam questões e que ocorram erros durante a obra, que acarretam custos adicionais. O objetivo das aplicações de RA é proporcionar uma visão mais exata daquilo que será construído, com os pormenores construtivos, materiais e instalações que, muitas vezes, são complexos de se perceberem através de desenhos. Para isso, os modelos 3D e até projeções virtuais são utilizados para melhorar a compreensão do projeto e facilitar a sua execução. Mesmo durante a fase de construção, a possibilidade de visualizar os elementos das várias especialidades facilita o processo e reduz a possibilidade de erros, sendo capaz de auxiliar a construção aquando de geometrias de grande complexidade [32].

#### 4.2.2. CRIAÇÃO DE VALOR

A Realidade Aumentada, por via da sua versatilidade tecnológica, é capaz de criar valor na cadeia de processos do setor da construção. Verificamos que [30]:

- Para aumentar a eficiência e reduzir os custos:
  - É possível reduzir o tempo e os custos de operação através do aumento da eficiência e rapidez em completar as tarefas;
  - É possível melhorar a produtividade através da aceleração e aperfeiçoamento da aprendizagem experimental em comparação com os processos tradicionais em sala de formação. Deste modo, dá-se uma redução de erros, que implica uma poupança de tempo, obtendo procedimentos mais seguros e, por fim, custos de operação mais baixos;
  - É possível uma redução dos custos fixos de objetos físicos, visto que a RA consegue substituí-los por objetos virtuais e, também, devido à formação e inspeção remotas que reduzem tempos dispendidos e custos associados a deslocações e taxas de formação.
- Para melhorar o valor económico, social e ambiental:
  - É possível preparar os trabalhadores para situações de maior stress e para situações de perigo sem os colocar verdadeiramente em risco, reduzindo, desta forma, o número de acidentes de trabalho;
  - É possível aumentar a satisfação dos funcionários através de ações de formação, mentorias e apoio em obra, o que faz com que os trabalhadores possam iniciar o seu trabalho de forma mais célere, devido à redução do tempo de formação e integração.

#### 4.2.3. FERRAMENTAS POLÍTICAS E INCENTIVOS

No que se refere a políticas de incentivos na implementação das tecnologias da RVC, verificamos que:

- **Legislação e Regulamentação:** os governos são responsáveis por estabelecer certificações de informação e operação de RV/RA, mas também de regular uso seguro e apropriado destes sistemas;
- **Instituições efetivas:** as organizações para formação especializada e acreditada serão necessárias para formar equipas na utilização destes dispositivos. Além disso, as certificações deverão ser atribuídas por empresas acreditadas, seguindo padrões e processos de validação;
- **Transição das capacidades de trabalho:** transição dos conhecimentos dos trabalhadores da obra para as operações remotas destas novas tecnologias. Futuramente, os fatores humanos devem ser considerados nas cadeias de processo;
- **Gestão de Projetos e *Procurement*:** desempenho específico e experiência requerida num processo de *procurement* serão necessários de serem revistos por fim a integrar estes novos serviços;
- **Fundos e Financiamento:** o investimento em equipamentos e *software* de RV/RA e os custos com licenças de armazenamento de dados terão de ser incluídos nos custos de investimento e fundos destes serviços para formação e inspeção.

Posto isto, retiram-se algumas conclusões relativas a algumas variáveis relevantes associadas ao processo de implementação de metodologias de RV e RA nas empresas, que se encontram descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Variáveis associadas ao processo de implementação de RV/RA nas empresas [30].

#### PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO

##### FACILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO



Enquanto que estes tipos de tecnologias podem poupar dinheiro a uma organização aquando da sua implementação, as dificuldades de orçamentação podem significar que alguns projetos possam ficar sem fundos. Por exemplo, uma formação com RVC pode levar a uma redução de custos e melhoria de resultados, quando comparado com procedimentos formativos tradicionais, sendo que os custos deste tipo de solução podem ficar associados ao Departamento de RH enquanto que os benefícios podem ficar inerentes aos departamentos operacionais. Os benefícios devem ser monitorizados para garantir o retorno expectável no investimento que foi concretizado.

Para a empresa ter acesso aos benefícios associados ao processamento de uma grande quantidade de informação, a RA e RV devem ser integradas com outros *softwares* da empresa. Na prática, a integração pode exigir vários regulamentos, tornando o processo mais complexo e com alguns obstáculos a ultrapassar.

##### CUSTO



Os custos de investimento em tecnologia de RVC para inspeção e formação são baixos, sendo que a redução de custos operacionais e de tempo podem compensar os custos de investimento iniciais na maioria dos setores.

#### PREPARAÇÃO DOS PAÍSES



Muitos dos países desenvolvidos já estão a utilizar estas soluções para inspeção e formação. Nos países em desenvolvimento, para novos projetos de infraestruturas, existe uma grande oportunidade para a implementação destas soluções. Contudo, muitos destes processos de aquisição e, até mesmo instituições que apoiam a sua implementação, ainda não estão totalmente definidos.

#### MATURIDADE TECNOLÓGICA



Até agora, a adoção de RA e RV tem sido limitada pelo custo, por deficiências tecnológicas, mas também pela morosidade dos processos. Os desenvolvimentos mais recentes, no que respeita à facilidade e acesso na utilização de aplicações e através do melhoramento do *hardware*, tornaram possível ultrapassar grande parte destas dificuldades.

### 4.3. RISCOS E POTENCIALIDADES

A RVC é uma metodologia emergente com forte impacto no futuro da indústria da AEC, podendo ser usada para explorar melhorias nas várias fases de projeto, possibilitando a simulação de algumas atividades da construção, revisões de projeto, comunicação de conteúdos entre os vários intervenientes, deteção de conflitos e, finalmente, como apoio à inspeção de edifícios e estruturas. Estes incrementos, devidamente implementados e usados, podem levar à redução de custos, minimização de riscos e à deteção de erros numa fase precoce [23].

O potencial da RVC para o setor da construção tem sido determinante tanto na fase de conceção do projeto, como na fase de execução. O sistema *walk-through* foi o primeiro conceito a ser aplicado com esta tecnologia e permitiu ao cliente e outros interessados, durante a fase de conceção do projeto, visualizar o resultado final do edifício, ainda antes dos trabalhos darem início, através do recurso a um *headset* [23].

Nesta indústria, a segurança dos trabalhadores é um ponto importante e deve ser envolvida na capacitação tecnológica do setor. Como a RVC é capaz de criar um ambiente totalmente simulado, é possível colocar o utilizador num ambiente imersivo de treino, onde pode experienciar situações do mundo real sem qualquer risco de segurança associado. Além disso, em termos de custos, os equipamentos são geralmente pouco dispendiosos. Posto isto, é possível otimizar a formação dos trabalhadores e prepará-los da melhor forma para situações reais, recorrendo a situações práticas de forma segura e sem riscos associados.

Os treinos de segurança em obra, tradicionalmente, são realizados numa sala onde são apresentados vídeos e slides. Isto é bastante limitativo no que respeita à representação da realidade em obra e das suas condições, o que não é capaz de preparar corretamente os trabalhadores para eventuais acidentes em obra. Como solução, a RVC é capaz de colocar cada trabalhador num cenário de obra e efetivamente familiarizá-lo com os potenciais e existentes perigos [30].

A Figura 4.2 sumariza os principais meios de aplicação da tecnologia da RA no setor da construção.

## SOLUÇÕES DE REALIDADE AUMENTADA NO SETOR DA AEC

<b>PRÉ-VISUALIZAÇÃO E MARKETING</b>
A RA permite a apresentação e visualização de um edifício que esteja a ser planeado de ser construído ou até mesmo que se encontre numa fase de projeto ou execução. O utilizador, através de equipamento de RA, consegue visualizar no espaço o aspeto final do edifício, podendo movimentar-se no seu interior, seja no local de implantação ou no escritório.
<b>CONSTRUÇÃO E PROCESSO</b>
A RA auxilia na pré-visualização de um projeto e de seguida no apoio às equipas em obra aquando da execução de tarefas e na monitorização de processos.
<b>INSPEÇÃO</b>
A inspeção é um dos maiores desafios da RA, em que os utilizadores (equipa de fiscalização), com o devido equipamento de RA, conseguem comparar o que foi executado com o que é previsto no modelo inicial BIM. Além disso, é possível colocar pormenores virtuais sobre o ambiente real e assim detetar eventuais erros.
<b>OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO</b>
Mesmo depois do projeto completo, a RA pode ser incluída nos processos de operação e manutenção das estruturas e edifícios.

Figura 4.2 – Soluções de RA no setor da AEC [31].

### 4.3.1. RISCOS E MITIGAÇÕES

Existem alguns riscos inerentes ao processo de implementação de metodologias de RVC que devem ser tidos em conta, mas mais importante é de que forma é que estes riscos podem ser mitigados [30]:

- Implementação:
  - Risco: Para as empresas usufruírem dos benefícios associados ao processamento de dados, os sistemas de RA e RV, de forma geral, necessitam de ser interligados com outros *softwares* das empresas. Na verdade, isto significa que ao integrar com uma grande quantidade de sistemas, pode-se tornar os processos complexos possibilitando, assim, uma maior pretensão para erros. Além disso, pode ser difícil a criação de simuladores com experiências completas e concisas, sendo que os sistemas podem ser influenciados, de forma intencional, pela tendência humana.
  - Mitigação: garantir que várias operações possam ser simuladas no mesmo espaço virtual, isto é, as empresas devem garantir a continuidade dos seus algoritmos para produzirem cenários e resultados melhorados e desenvolvidos, através da introdução de mais dados e, desta forma, compreender melhor o comportamento humano.
- Segurança e Cibersegurança:
  - Risco: Tal como outras tecnologias, a RA e RV são vulneráveis a ameaças de segurança e acessos não autorizados por *hackers* e *malware*, que podem resultar em baixas de servidor e erros de informação. Qualquer falha na segurança ou cibersegurança que possa colocar os clientes ou trabalhadores em perigo pode causar impactos significativos no negócio, provocando falta de confiança no produto e na marca, mas

- também impactos negativos na reputação e nas perspectivas futuras da empresa. É de realçar que esta tecnologia, por fim ao seu melhoramento, é capaz de aceder a informação corporal do utilizador, tais como movimentos dos olhos, dilatação das pupilas e outras reações, que podem ser acedidas, utilizadas ou divulgadas por *hackers*.
- Mitigação: é importante, em qualquer caso de falha de segurança, manter protegida a informação sensível do utilizador.

#### 4.3.2. POTENCIALIDADES

A RA trata-se de um sistema semi-imersivo e, dessa forma, a sua aplicabilidade oferece soluções bastante versáteis e diversificadas.

Esta tecnologia permite ao utilizador, sem exigir grande experiência da sua parte, detetar erros de projeto no modelo 3D e de forma antecipada num ambiente seguro, sem riscos e em tempo real. É também possível que o utilizador compare o que já foi construído até à data com um modelo da estrutura final, auxiliando as tarefas de acompanhamento de obra, mas também auxilia na verificação do trabalho realizado no local com o mapa de trabalhos previsto [29].

A tecnologia de RM e RA pode também auxiliar em tarefas de fiscalização. Tradicionalmente, este é um processo moroso e necessita de vários recursos humanos para a sua realização de forma detalhada, o que exige a presença de um especialista no local, normalmente por vários dias. Adicionalmente, sabe-se que existe a possibilidade da ocorrência de erros de inspeção e medição devido ao processo de natureza tão manual. Além disto, a documentação e a comunicação são também processos bastante morosos [30].

Como tal, a RA pode ser explorada durante a fase de construção e manutenção dos edifícios para possibilitar à equipa de fiscalização que compare o que foi construído com o modelo BIM original, permitindo tirar medições de forma mais rápida, registar anotações e consultar documentos de forma instantânea. Isto pode ser concretizado bastando à equipa de fiscalização que utilize em obra dispositivos *HMD*, como *Connected Glasses* ou *Hololens*.

Em casos em que o fiscal não consiga aceder à obra, quer por não se encontrar presente no local, quer por impedimento devido ao elevado risco de segurança, é possível executar algumas tarefas da sua competência através do recurso a um *drone*, que se movimenta pela obra e registre a informação e a transmita em tempo real [30].

A informação e a comunicação são também fatores relevantes que contribuem para o sucesso de qualquer projeto, dado que daí advém uma série de decisões que procuram ir ao encontro de uma minimização de custos, evitando despesas adicionais e atrasos no decorrer do processo, mas também uma maior eficiência na gestão de recursos [29]. Com esta tecnologia, é possível consultar informação de uma base de dados, em tempo real, que auxilie uma tarefa em específico, sem provocar grande distração do trabalhador. Em situação de elevada complexidade, é também possível estabelecer o contacto, por via de som e imagem, entre o trabalhador que se encontra em obra e o especialista no gabinete, para que este último o auxilie na realização da sua tarefa [30].

As empresas que implementaram tecnologia como esta, experienciaram reduções no tempo necessário para a realização de tarefas e com a formação do pessoal, o que levou a uma redução dos custos de manutenção. Com a implementação desta tecnologia verificou-se um aumento da satisfação do trabalhador e da sua produtividade. Além disso, a monitorização da informação é mais precisa e bem documentada, o que leva a que as infraestruturas sejam melhor mantidas e utilizadas [30].

#### 4.4. HARDWARE E SOFTWARE

Para o desenvolvimento de um sistema de RA é necessário ter em conta dois grupos, o *hardware* e o *software*, que operam da forma que se representa na Figura 4.3.

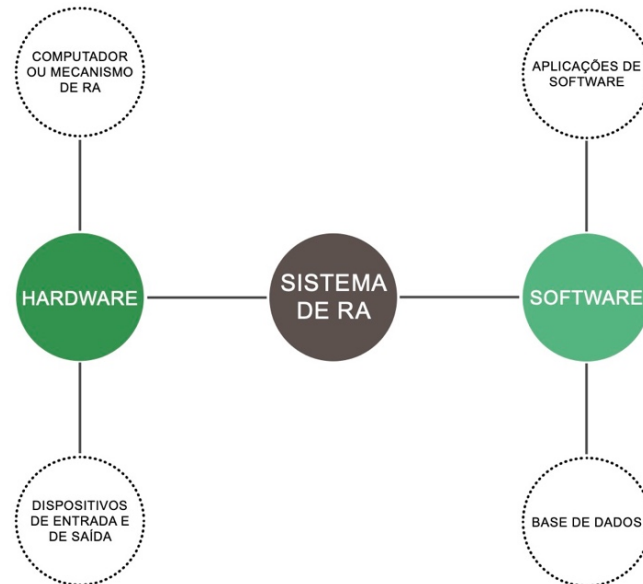


Figura 4.3 – Sistema de operação da RA [29].

##### 4.4.1. HARDWARE

São vários os componentes que integram um *hardware*, entre eles [23, 28]:

- Os dispositivos de entrada possibilitam ao utilizador a interação com o mundo virtual. Estes permitem ler os movimentos, enviando informações recolhidas ao sistema para que forneça ao utilizador as reações devidas, através dos dispositivos de saída em tempo real. Podem ser mecanismos de localização, controladores biológicos, dispositivos áudio, entre outros;
- Os dispositivos de saída despertam os sentidos do utilizador através do *feedback* recebido pelo mecanismo de RVC em utilização. Estes podem ser interligados com os sentidos humanos, que devem ser estimulados para uma maior imersão na experiência. O sentido visual alimenta-se da componente gráfica, a audição é satisfeita com um bom sistema áudio, o háptico através do contacto ou força relativa ao dispositivo em uso e, por último, o olfato e o paladar, que são ainda uma prática pouco comum no desenvolvimento da RVC, em particular na construção. Os dispositivos mais comuns de saída são os monitores digitais, como modo de visualização simples, ou os *HMD's*, que são os responsáveis por uma experiência mais ou menos imersiva, quando interpretada no conceito de *continuum*;
- A seleção de um mecanismo ou motor de RVC adequado deve seguir os requisitos das aplicações que se pretendem criar. O processamento gráfico para a geração de imagens é um fator de grande importância na conceção do realismo que a aplicação final irá apresentar mas, por outro lado, é uma das tarefas de maior consumo num sistema deste tipo. A escolha deve ser feita de acordo com as ambições do utilizador, o local de aplicação, os dispositivos de entrada e saída, o nível de imersão, a renderização de objetos, a iluminação, entre outros.

Além das máquinas físicas, nomeadamente os computadores, entram no processo outro tipo de equipamento essencial para garantir uma experiência virtual. Os *headsets* ou os *Head Mounted Displays* são o agente que permite que o utilizador imerja no cenário criado [26]. Seguem-se alguns modelos [23]:

- HMD de Realidade Mista
  - *Microsoft HoloLens*: A *Microsoft* desenvolveu um HMD de Realidade Mista que combina a Realidade Virtual com a Realidade Aumentada, permitindo que os elementos virtuais criados interajam com a realidade. Este equipamento possibilita a execução de algumas tarefas como a captação de imagens ou vídeo no local da obra, a deteção de interferências do modelo virtual com elementos físicos existentes à escala real *in-situ* e, até mesmo, receber instruções de como determinado serviço deve ser executado, devolvendo uma maior confiança e segurança ao utilizador.
- HMD de Realidade Aumentada
  - *Vuzix Smart Glasses*: trata-se de um sistema de mãos livres de Realidade Aumentada, com o mesmo objetivo de fomentar melhores práticas em várias funções e tarefas. Este dispositivo contém conexões *Bluetooth* e ligação *Wi-Fi* que o integram muito mais rapidamente no fluxo de trabalho, reconhecimento de voz e controlo gestual, o que o torna uma ferramenta adaptável;
  - *Google Glass*: trata-se de um *headset* de RA desenhado para melhorar a metodologia de trabalho das mais variadas indústrias e setores, permitindo aceder a manuais e *guidelines* no local da tarefa. Este dispositivo é equipado com reconhecimento de voz e também com uma câmara que permite partilhar a visão em tempo real através de vídeo e som para, por exemplo, tomadas de decisões conjuntas.

#### 4.4.2. SOFTWARE

O *software* utilizado para a criação e desenvolvimento de RVC, em particular a Realidade Aumentada, na construção integra um conjunto de programas de modelação e motores de jogo, assim como uma base de dados onde toda a informação de um projeto possa estar alojada [28].

- Ferramentas de modelação para RA: as ferramentas mais comuns são *3DSMax*, *Sketchup*, *ArchiCAD*, *Revit*, *Tekla*.
- Motores de jogo :*Unity* e *Unreal Engine*;
- Ferramentas de desenvolvimento para RA: a RA é uma tecnologia com um grau de complexidade relativamente elevado na sua conceção, pois requer a interpretação de várias ferramentas e competências para que a experiência do utilizador se torne possível. Fala-se de computação gráfica 3D em tempo real, dispositivos de localização, processamento áudio e háptico, sendo que o desenvolvimento do seu *software* deve ser flexível para que satisfaça um maior número de necessidades nas mais diversas áreas. A linguagem de programação deve ir ao encontro das especificações de suporte do programa. As ferramentas usadas para a criação de conteúdo em RA incidem em ferramentas de criação de elementos virtuais, *AR toolkits*, SDK (*Software Development Kits*), que remete para o desenvolvimento de *software*, ou ainda as API's (*Application Program Interfaces*) [23].

# 5

## A REALIDADE AUMENTADA E O BIM COMO SUPORTE À INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS EM BETÃO ARMADO

### 5.1. INTRODUÇÃO

A tecnologia é uma componente crítica no setor da engenharia e construção. O atual desenvolvimento tecnológico tem vindo a marcar o setor, fornecendo ferramentas versáteis que apoiam diversos trabalhos e tarefas, e que são capazes de melhorar os resultados, aumentando a produtividade desta indústria. O setor da construção tem se destacado pela demora na adoção de tecnologias modernas e pela resistência que oferece às mudanças e à aceitação de ideias inovadoras [22].

A indústria da AEC depende de uma quantidade significativa de informação e dados que precisam ser geridos e processados diariamente. Além disso, o ciclo de vida da construção é um processo extenso e complexo que contém muitas atividades paralelas. Isto significa que desde a fase de projeto preliminar até à demolição da estrutura, diversas atividades são realizadas, o que leva ao desperdício indesejado de recursos, tempo, dinheiro e provoca impactes no meio ambiente [35].

O BIM não se cinge apenas à criação de modelos 3D e à sua visualização. Esta tecnologia assume diversas outras potencialidades que devem ser exploradas, tais como a criação e utilização de dados digitais de custos e tempo durante todo o projeto, bem como a manutenção e desenvolvimento dos *outputs* do modelo. O BIM permite um ambiente de colaboração entre as várias partes interessadas nas fases de projeto e de construção, como também uma coordenação consistente entre os seus intervenientes. A Realidade Aumentada é vista como uma evolução dos ambientes tradicionais de Realidade Virtual, representando uma ambição na inteligência da criação de ambientes. A RA possui um conceito atraente, que faz com que os usuários fiquem satisfeitos com o conteúdo digital de forma natural, por meio da integração efetiva dos dois ambientes, notando que a RA inclui as sensações humanas com fontes de dados genuínas e virtuais [35].

A integração BIM-RA consiste no uso de modelos BIM, apresentando a sua geometria virtual e outros dados associados, transportando-os para os ambientes reais por fim a obter uma visualização eficaz e eficiente dos componentes do edifício. Isto pode ajudar na redução do tempo, custo e esforço de construção [35].

Este capítulo pretende abordar a tecnologia da RA baseada em modelos BIM que, entre muitas potencialidades, sirva como suporte à inspeção de estruturas em betão armado. Serão também apresentados os principais motores de jogo para criação de ambientes virtuais e, em particular, algumas noções de base do motor de jogo Unity.

## 5.2. O BIM E A REALIDADE AUMENTADA

Com o passar dos anos, o BIM tem sido alvo de análise para ser integrado não só num ambiente 3D, como também para aplicações intrínsecas à engenharia e outras funções implícitas da construção. Independentemente da terminologia adotada, RV ou RA, é essencial olhar para estas metodologias como um todo no que diz respeito ao BIM, pois instigam o desenvolvimento de programas de treino e educativos relativamente semelhantes, alterando apenas o seu modo de visualização final, assim como na criação de diversos outros tipos de ambientes para outros fins [23].

Definida como uma mistura do real com o virtual, a Realidade Aumentada tem sido examinada para várias aplicações na indústria AEC, tais como a manutenção, produção, treino, videoconferências 3D, projetos de construção, entre outros. Com a RA, o utilizador está habilitado a visualizar com detalhe quaisquer que sejam os objetos envolventes e correspondentes animações, sem nunca perder a noção de realidade onde se encontra. A RA atua, deste modo, como uma extensão do modelo BIM para o local da obra [23].

São apresentadas, de seguida, algumas combinações possíveis da RA com o BIM [23]:

- **Walk-through:** esta combinação é uma das possíveis e mais convencionais entre as que têm sido desenvolvidas no mundo da construção. Este conceito permite ao utilizador caminhar dentro do edifício, facilitando a revisão de processos de construção e de projeto diretamente no local da obra e em tempo real, considerando que a RA/RM envolve a perceção humana com fontes de informação real e virtual;
- **Sistemas móveis:** através da tecnologia existente, a RA pode ser experienciada com alguns sistemas móveis utilizados na rotina diária da sociedade, como um *smartphone* ou um *tablet*. Desta forma, a RVC possibilita que através de um destes dispositivos seja possível aceder a informações tipicamente contidas numa base de dados do modelo BIM, oferecendo aos trabalhadores no local da obra uma melhor compreensão das suas tarefas, aumentando consecutivamente a sua produtividade;
- **Montagem na obra:** numa tarefa de montagem, a RA/RM tem o potencial de combinar informações descritivas das atividades a realizar no local da obra com o trabalho direto e implícito, isto é, o trabalhador consegue executar as suas funções ao mesmo tempo que recebe informações externas em tempo real. Esta mudança de paradigma pode ditar a forma como recebemos e atuamos perante instruções. Esta metodologia integra informações de como o processo de montagem e execução de certas componentes de um edifício devem ser realizadas perante um ou mais casos específicos no local;
- **Localização:** outra das formas sob as quais a fusão do BIM com a RA/RM tem influência, é a tecnologia de navegação interna, ou seja, quando um construtor necessita da localização exata de uma determinada componente num armazém ou até mesmo no local da obra.

### 5.3. O BIM E A RA COMO SUPORTE À INSPEÇÃO

O trabalho de fiscalização é uma das partes mais importantes durante a fase de construção de um edifício, por forma a garantir a correta execução do projeto, garantindo a sua qualidade construtiva. Ainda assim, na generalidade das obras, a inspeção de armaduras ocupa uma grande parte do processo de fiscalização entre todos os elementos inspecionados. Deste modo, algumas tarefas de fiscalização irão ser consideradas no tema deste documento, muito devido a certas soluções criadas conseguirem responder, de igual forma, a estas duas temáticas.

A eficiência dos trabalhos de inspeção de armaduras pode ser influenciada por dois grandes fatores. O primeiro é a extração indireta de informações 3D a partir de desenhos 2D, que ainda são frequentemente utilizados na maioria dos projetos de construção. Estes desenhos 2D não são capazes de representar informação 3D de forma clara, o que leva, muitas vezes, a erros de leitura e perceções erradas. O outro refere-se às ferramentas de medição utilizadas. Geralmente, numa tarefa de fiscalização, são utilizadas fitas métricas para verificar se a armadura está montada de acordo com os desenhos 2D. No entanto, as fitas métricas precisam ser alinhadas ao varão específico, que em certos casos pode estar inacessível devido a outros varões [33].

A Realidade Aumentada é uma técnica que permite ao utilizador sobrepor informação virtual ao ambiente real e, tem demonstrado elevado potencial para ser aplicada na indústria da AEC. Existem referências que a RA pode ser usada para fornecer um guia de inspeção para a equipa responsável sem o uso de esquemas em papel [33]. Isto significa que é possível verificar a existência de não conformidades, comparando o que foi construído ou executado com o modelo previsto em BIM sobreposto aos elementos em causa e, de seguida, fazer o seu reporte com recurso a fotografias e descrições. Esta tecnologia também permite realizar medições sem recurso a ferramentas tradicionais, como a fita métrica. Desta forma, a RA torna-se uma solução promissora para resolver os problemas acima mencionados.

Na vertente da inspeção e manutenção, a RA e a RM permitem ao utilizador que tenha acesso a informação, que de outra forma estaria oculta no mundo real. Isto significa que é possível visualizar elementos estruturais e os seus componentes, infraestruturas das várias especialidades, ou até mesmo soluções construtivas através do recurso a esta tecnologia. Para isso, deve existir um modelo BIM que contenha múltiplos dados e parâmetros característicos de um edifício, para que de seguida seja alocado a umas coordenadas e que auxilie nas várias tarefas de inspeção e manutenção pretendidas.

### 5.4. MOTORES DE JOGO PARA CRIAÇÃO DE AMBIENTES VIRTUAIS

Um motor de jogo é um *software* de desenvolvimento de ambientes concebido, principalmente, para a criação de videojogos. As principais funcionalidades que os motores de jogo, geralmente, incluem são: um motor gráfico para renderização 2D ou 3D, um motor de física para simular propriedades físicas e deteção de colisões, suporte de animação, inteligência artificial, som, *streaming*, suporte de linguagem computacional (*scripts*), entre outros [39].

Alguns dos motores de jogo mais utilizados a nível mundial são [39]: o *Unity*, o *Unreal Engine*, o *Amazon Lumberyard* e o *Gamemaker*.

Por se tratar do motor de jogo adotado para o desenvolvimento do estudo de caso complementar a este documento, apresentam-se, seguidamente, as principais particularidades e considerações do *Unity*.

#### 5.4.1. UNITY

O *Unity* é um motor de jogo que permite a criação de ambientes virtuais e mistos e que integra várias ferramentas que lhe conferem um estatuto relevante, na atualidade, sendo um dos motores de jogo mais usados em todo o mundo. É um *software* de fácil aprendizagem, também pelo suporte que lhe é auferido, permitindo, desta forma, um rápido desenvolvimento de aplicações.

Para compreender melhor o conteúdo desta ferramenta, apresentam-se, seguidamente, alguns conceitos intrínsecos à modelação em 3D e criação de ambientes no *Unity* [23]. Através da Figura 5.1, é possível perceber o aspeto do interface deste programa.



Figura 5.1 – Interface do *Unity*.

- Coordenadas: a posição dos objetos na modelação 3D do *Unity*, bem como as suas dimensões e valores rotacionais, aparecem sobre o formato de X, Y, Z, conhecidas como coordenadas;
- Espaço local e espaço global: estas duas definições são de enorme relevo na conceção de modelos 3D, pois como espaço virtual infinito, é essencial perceber a localização dos objetos. Posto isto, a origem é algo intrínseco ao mundo 3D e representado sob as coordenadas (0,0,0). A posição global de um objeto é sempre relativa à origem, embora o *Unity* também use o espaço local para definir a posição de um objeto em relação a outro;
- Vetores: os vetores permitem ao utilizador calcular distâncias e ângulos entre objetos e a sua direção;
- Câmaras: as câmaras no mundo 3D atuam como janelas de exibição do cenário a ser construído que aparece no ecrã do computador e posteriormente nos dispositivos a serem utilizados. Podem ser colocadas em qualquer ponto do cenário, como uma componente animada ou vinculadas a objetos como parte de um cenário de jogo;
- Polígonos e componentes: os polígonos representam todos os objetos utilizados na modelação 3D, como um conjunto de formas 2D interligadas. Ao importar os modelos para o *Unity*, este converte-os num aglomerado de triângulos poligonais. Quando estes são combinados com outros polígonos denominam-se de *mesh* (malha), sendo possível a criação de formas complexas. Com o conhecimento dos limites do modelo, o motor de jogo está apto a calcular pontos de impacto (*collisions*), aproximando a virtualidade da realidade;
- Materiais e componentes: os materiais são práticas comuns nas aplicações 3D, pois são estes que definem a aparência de determinado modelo;

- Componentes físicas: habilitam o comportamento do mundo real simulado aos objetos constituintes de um modelo, usualmente denominados como *Rigidbody Physics component*. Isto significa que em vez de existirem objetos estáticos no ambiente virtual, podem assumir propriedades físicas como massa, gravidade, velocidade e fricção;
- *GameObject*: como conceito é a possibilidade de controlar os objetos integrantes de um projeto no Unity, os quais possuem uma vasta gama de componentes que lhes conferem um certo comportamento no ambiente virtual. As componentes têm variáveis e propriedades que refinam o comportamento do objeto. Desta forma, o *GameObject* corresponde a qualquer modelo ou objeto ativo no cenário em desenvolvimento;
- *Assets*: é o local onde todos os ativos do projeto se encontram, nomeadamente texturas, materiais, modelos 3D e efeitos sonoros;
- Cenários: os cenários no *Unity* funcionam como áreas de jogo individuais onde o conteúdo será inserido para desenvolver a aplicação final;
- *Scripts*: são considerados como componentes pelo *Unity* e permitem alterar certos comportamentos no conteúdo do cenário. Como linguagem de programação usa-se o *CSharp* (C#) ou o *Javascript*;
- Animações: permite criar um vídeo apenas movendo os objetos em tempo real. Por exemplo, determinam-se as coordenadas de um objeto em dois instantes do tempo e na janela interativa *Animation*, onde o tempo é distribuído por *frames*, posiciona-se o objeto de acordo com esses dois pontos no instante pretendido, e o sistema define um movimento entre eles a uma velocidade previamente definida;
- Interface: a disposição do interface do *Unity* apresenta cinco painéis diferentes:
  - *Scene*: vista do cenário de jogo em desenvolvimento;
  - *Game*: vista que resulta do cenário de jogo construído, ou seja, uma pré-visualização do que o jogador irá receber como produto final;
  - *Hierarchy*: local onde estão listados hierarquicamente os *GameObject* ativos;
  - *Project*: age como uma biblioteca de *Assets* no Unity;
  - *Inspector*: lista de componentes e propriedades de determinado objeto.
- Ferramentas de controlo: existem quatro ferramentas relevantes no controlo de um cenário:
  - *Hand Tool*: permite selecionar objetos no cenário;
  - *Translate Tool*: é o botão ativo por definição e permite selecionar e mover objetos no espaço;
  - *Rotate Tool*: permite rodar objetos no cenário;
  - *Scale Tool*: permite aumentar e diminuir a escala dos objetos.
- *Asset Store*: Funciona como uma loja online de objetos ou modelos criados, por vezes com animações alocadas.

## 5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Realidade Aumentada oferece características únicas que facilitam a sua integração no setor da construção, contudo, existem alguns constrangimentos associados. As principais barreiras relatadas foram a falta de precisão na posição dos objetos virtuais e a localização dos *targets* (alvos), o elevado poder de processamento que é necessário para fornecer uma imagem de qualidade decente e, a falta de conectividade em alguns locais de obra. Embora, aparentemente, mais fáceis de aplicar, os sistemas de RA baseados em *targets* enfrentam algumas limitações, uma vez que os estaleiros tendem a ser ambientes bastante complexos. Em especial, os *targets* devem ser colocados cuidadosamente e devem

permanecer sempre visíveis para fornecer uma aplicação funcional. Assim, as abordagens de RA que não recorrem a *targets* tendem a ser uma alternativa mais viável [34].

A Realidade Aumentada é, maioritariamente, implementada nos estaleiros de construção devido às capacidades de visualização e extração de informação. Além disso, os dispositivos portáteis atuais garantem a capacidade de processamento necessário para suportar aplicações de RA, tornando-os adequados para configurações dinâmicas e complexas, como as dos estaleiros de obra. Verifica-se que a adoção desta tecnologia de aplicações de RA baseadas em BIM, aplicadas à construção, contribuem para a execução de tarefas e redução de erros de construção, redução da carga de trabalho cognitiva, melhora o acesso à informação do projeto e à gestão dos horários e custos de construção, promove a colaboração, permite aumentar o apoio em obra, a formação em segurança dos trabalhadores e a orientação e supervisão das suas tarefas levando, assim, a uma maior produtividade [34].

# 6

## ESTUDO DE CASO

### 6.1. ENQUADRAMENTO

Um estudo de caso foi realizado para investigar os benefícios da abordagem da Realidade Aumentada baseada em BIM, proposta na inspeção de estruturas em betão armado.

A principal motivação para a realização deste estudo de caso prende-se com a ambição de alcançar novos conhecimentos das tecnologias do setor da construção e, de forma prática, demonstrar a importância em adotar novas metodologias colaborativas e a necessidade de informatizar os processos, por fim à sua otimização e à melhoria do produto final.

Tendo em conta a resistência que algumas entidades têm oferecido à implementação das tecnologias abordadas, este estudo também pretende demonstrar os benefícios inerentes e a facilidade de criação de mecanismos tecnológicos próprios, que conseguem ir ao encontro do interesse de cada entidade, sem necessitar de formação de base nesta área.

Como tal, foi criada uma ferramenta baseada em Realidade Aumentada que pretende auxiliar as tarefas de inspeção, mas também permitir a visualização e interação com modelos BIM virtuais.

Neste capítulo, e tendo em consideração as temáticas apresentadas nos capítulos antecedentes, serão apresentados os objetivos da aplicação criada, a sua configuração, os principais *scripts* utilizados e os resultados obtidos.

Por fim, reserva-se o último subcapítulo para a apresentação da mesma ferramenta desenvolvida em Realidade Mista, compatível com os óculos *Microsoft HoloLens2*. Esta ferramenta assume um papel secundário e surge de forma a complementar o estudo da implementação de tecnologias virtuais no setor da construção.

### 6.2. OBJETIVOS

Esta pesquisa propõe uma ferramenta de auxílio de tarefas de inspeção de estruturas de betão armado baseada em BIM e Realidade Aumentada para mitigar alguns dos constrangimentos que se verificam na atualidade. Esta aplicação consiste em três módulos principais: o módulo de visualização, o módulo de inspeção e o módulo de fiscalização, conforme esquematizado na Figura 6.1. O primeiro módulo encontra-se inserido e integrado no módulo da inspeção.

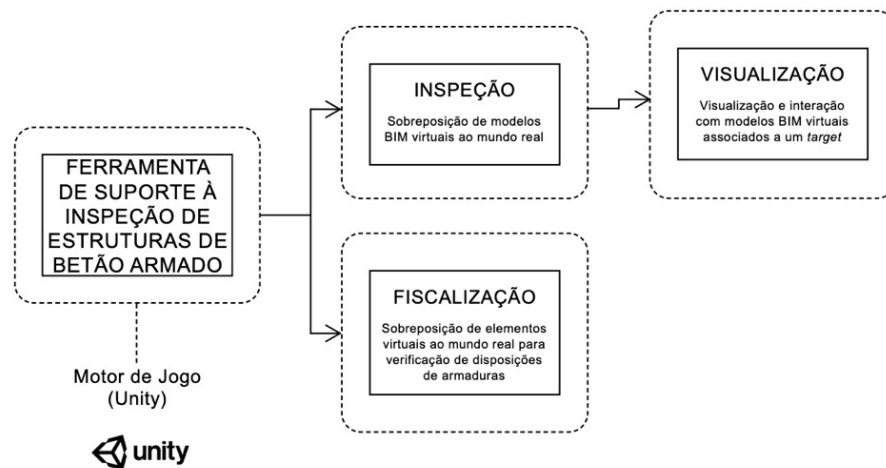


Figura 6.1 – Módulos que consistem na aplicação criada.

Salienta-se que não existe qualquer formação de base nesta área, nomeadamente em programação na linguagem C# e na criação de aplicações de RVC através de motores de jogo, o que levou à necessidade de uma rápida aprendizagem através de tutoriais *online* e pesquisas de informação em fóruns de discussão.

O primeiro objetivo na criação de uma aplicação baseada em RA é permitir a visualização de elementos virtuais sobrepostos ao mundo real e poder interagir com eles, de modo a explorar as várias valências que o *software* confere. Dessa forma, foram criados alguns cenários distintos que permitem interagir com elementos virtuais associados a um *target* (alvo) que lhes atribui uma posição e uma escala a si relativas.

Em seguida, e indo ao encontro do tema proposto, a ferramenta propõe o fornecimento de informação associada a um modelo, nomeadamente a especificação dos tipos e classes de materiais, diâmetros, recobrimentos, entre outros, para que auxilie nas tarefas de inspeção, permitindo comparar os dados fornecidos pelo modelo com o que realmente foi executado.

Por fim a verificar as disposições de armaduras de forma expedita, o que simultaneamente permite auxiliar tarefas de fiscalização, a aplicação possibilita a verificação dos espaçamentos dos varões por via de um modelo virtual de linhas devidamente espaçadas.

### 6.3. CONFIGURAÇÃO DA APLICAÇÃO

#### 6.3.1. METODOLOGIA ADOTADA

Para implementar a estrutura desta aplicação foram utilizados diferentes *softwares* e pacotes de ferramentas. Desta forma, o processo de funcionamento pode ser dividido em 4 partes, conforme se ilustra na Figura 6.2.

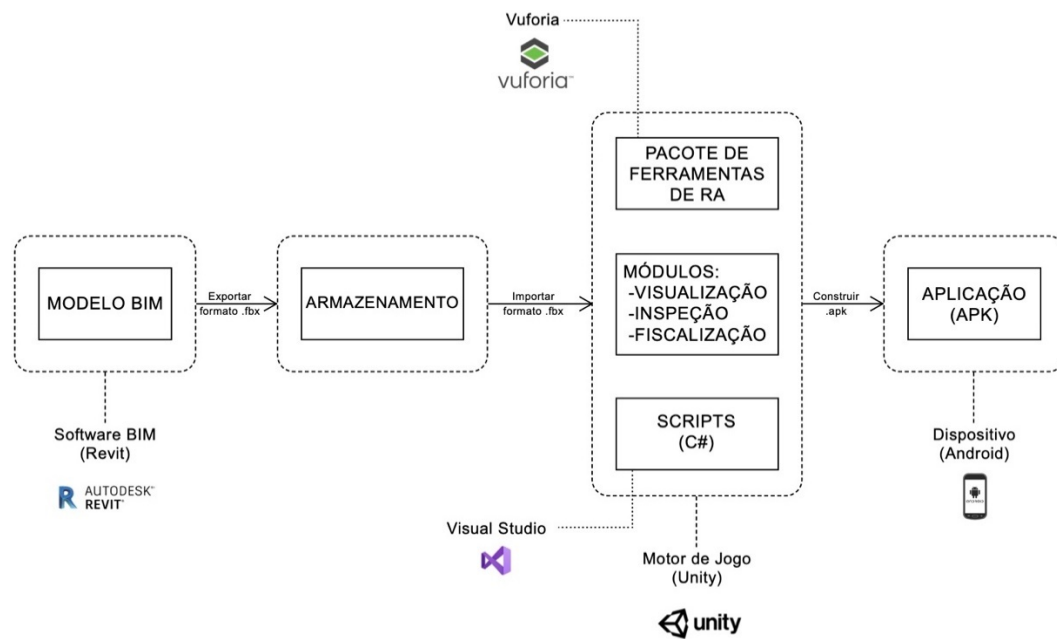


Figura 6.2 – Workflow para a criação da APK.

O *software* utilizado para a criação dos modelos BIM foi o *Autodesk Revit*, não só devido à facilidade de utilização, mas também por ser o *software* disponibilizado pela FEUP e pelo Grupo A400 – Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda.

De seguida, os modelos BIM criados são exportados para o formato de arquivo FBX (.fbx), o qual garante a interoperabilidade entre *softwares* de criação de conteúdo digital. Após isso, os arquivos FBX são carregados para uma pasta de armazenamento.

O motor de jogo utilizado foi o *Unity* por fornecer licença para estudantes sem custos associados e, também, por ser um dos motores de jogo mais requisitados em todo o mundo devido ao seu grande potencial, em termos de criação de ambientes virtuais. Adicionalmente, trata-se de um motor de jogo compatível com diversos pacotes de ferramentas que operam com diferentes tipos de RVC.

Os modelos BIM, em formato FBX, são então importados para o *Unity*, onde são transformados em objetos de jogo que detêm a geometria e as informações dos modelos originais. Apesar disso, é sempre possível realizar algumas edições ao nível da escala e das dimensões em relação aos três eixos, mas também é possível criar propriedades, como texturas de materiais, para tornar os objetos mais realistas.

Esta pesquisa adotou a linguagem de programação C#, tendo sido desenvolvida por via do *Visual Studio*. Além de ser uma linguagem de rápida aprendizagem, a instalação do *Visual Studio* é um requisito necessário do *Unity* para a criação de *scripts*, o qual fornece uma base de código que é possível descarregar para este programa de linguagem computacional.

Como suporte à criação desta aplicação, e para poder criar funcionalidades de Realidade Aumentada, foi necessário importar um pacote de ferramentas compatível com o *Unity*. O pacote escolhido foi o *Vuforia Engine* por se tratar de um *kit* de fácil aprendizagem e que fornece tutoriais e informações *online*. O *Vuforia* é, então, um *kit* de desenvolvimento de *software* (SDK) de RA, para dispositivos móveis, que permite a criação de aplicações de RA, utilizando tecnologia de visão computacional para reconhecer e rastrear imagens planas e objetos 3D em tempo real [40]. Desta forma, algumas imagens

foram carregadas no *Vuforia Developer Portal*, que as analisou e as habilitou para servirem como *target* dos modelos 3D, através da identificação e reconhecimento de certos pontos.

Finalmente, a aplicação é construída no dispositivo com sistema operacional *Android* (APK), tendo em consideração uma série de parâmetros que o *Unity* permite definir.

### 6.3.2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

*Script* é o termo técnico utilizado para o conjunto de instruções em código, escritas em linguagem de computador. No contexto da nossa aplicação, depois de ter uma envolvente visual que dê sensações de realidade ao usuário, é importante que este se mantenha no mundo virtual e que sinta estímulos que lhe transmitam a ideia de que o que acontecer na simulação poderá ser levado, posteriormente, para o mundo real. Para isso, a utilização de *scripts* é essencial.

A linguagem *C#* adotada, com o recurso ao *Visual Studio* que atua como ferramenta externa e complementar do *Unity*, permite escrever linhas de código (*scripts*), de modo a que influencie o comportamento dos elementos presentes no cenário. Dependendo da animação e do realismo pretendido, o processo de aprendizagem poderá ser uma tarefa complexa e morosa, pois prevê alguma formação na área da informática. Como tal, a programação em *C#* criada neste estudo foi maioritariamente baseada em diversos tutoriais de aplicações desenvolvidas neste motor de jogo com suporte do *Vuforia*, de modo a assimilar alguns dos principais conceitos.

## 6.4. CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA DE RA NO UNITY

A ferramenta criada tem por objeto o suporte das tarefas de inspeção, mas também demonstrar o potencial da tecnologia da virtualidade no setor da construção. Como tal, foram criados diferentes modelos BIM, foram idealizadas diversas soluções que auxiliassem estas tarefas e foram também criados vários *scripts* em *C#*, que permitem melhorar a experiência do utilizador, mas também personalizar as funções para que estas executem aquilo que vai de encontro ao pretendido.

Seguidamente serão apresentadas as principais bases de funcionamento criadas aquando do desenvolvimento desta aplicação, e que contemplam os vários cenários criados.

- **Menu Principal**

Este cenário, e de acordo com a Figura 6.3, é o interface de abertura da ferramenta criada, onde é possível identificar o seu nome e, de seguida, selecionar o cenário a transitar. Através desta transição de cenário, é possível seguir para o módulo de inspeção, de fiscalização, obter informações e contactos associados à ferramenta, mas também fechar a aplicação de forma simples e rápida.

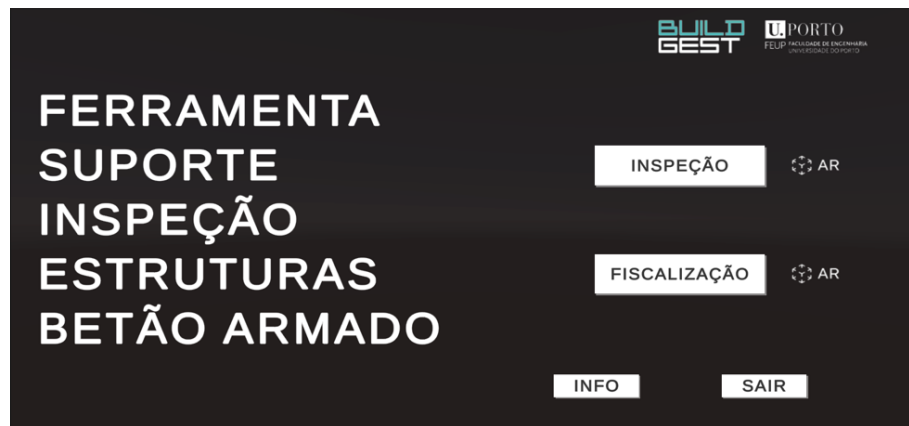


Figura 6.3 – Aspeto do Menu Principal.

O *script* criado que permite a transição entre cenários encontra-se apresentado na Figura 6.4 e, está associado a cada um dos respetivos botões. Como tal, basta mencionar no Unity qual o cenário destino para o qual se pretende transitar.

Devido à utilização recorrente da mudança de cenário para o Menu Principal, criou-se uma função direta para esta transição, representada na Figura 6.4 como “Menu()”.

Para associar o encerramento da aplicação a um botão, deve-se atribuir-lhe a função “Quit()” criada neste *script*.

```
1 using UnityEngine;
2 using UnityEngine.SceneManagement;
3
4 public class ChangeScene : MonoBehaviour
5 {
6     public string nomeDaCena;
7
8     public void ChangeS()
9     {
10         SceneManager.LoadScene(nomeDaCena);
11     }
12
13     public void Quit()
14     {
15         Application.Quit();
16     }
17
18     public void Menu()
19     {
20         SceneManager.LoadScene("Menu");
21     }
22 }
23
```

Figura 6.4 – Script de transição de cenários (ChangeScene).

Através da coluna *Inspector* do *Unity*, o *script* é aplicado ao respetivo botão de transição de cena, onde se deve indicar o cenário destino. De seguida, associa-se este script à função “On Click()” do botão, para que seja chamado e executado sempre que o utilizador ali clicar. Este procedimento encontra-se representado na Figura 6.5.

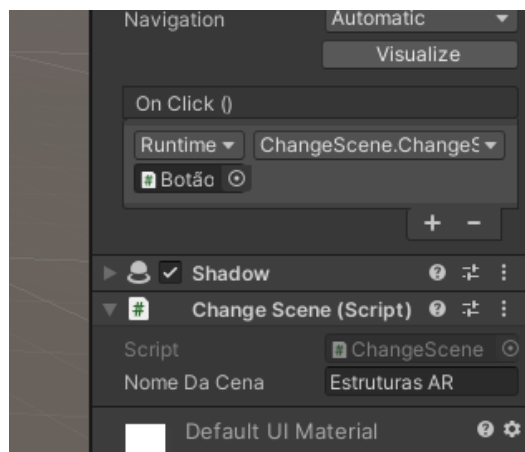


Figura 6.5 – Unity Inspector para o script ChangeScene().

#### ▪ Página Informativa e de Contactos

Este cenário, e de acordo com a Figura 6.6, disponibiliza alguma informação sobre o âmbito da criação desta ferramenta, assim como dos contactos das várias partes envolvidas no estudo.



Figura 6.6 – Aspeto da página informativa.

Este cenário tem apenas associado um *script* para a mudança de cenário, já apresentado na Figura 6.4, e que desta vez retorna para o Menu Principal quando o utilizador pretende sair desta página.

#### ▪ Menu do Módulo de Inspeção

Este cenário, conforme se representa na Figura 6.7, contempla o Menu Secundário associado ao módulo de inspeção. Através dele, é possível transitar para qualquer um dos cenários associados a este módulo, e que assumem diferentes tipos de interação com o utilizador.



Figura 6.7 – Aspeto do Menu do módulo de Inspeção.

Este cenário contempla apenas o *script* da mudança de cenário, que se encontra representado na Figura 6.4, o qual habilita cada um dos botões a executar a transição para o cenário que neles se encontra inscrito. O botão “Back”, através do mesmo *script*, mas por via da função “Menu()”, permite retornar ao Menu Principal, sem que seja necessário referenciar o cenário destino no *Inspector* do *Unity*.

#### ▪ Cenário de Visualização e Interação com o modelo de um Pórtico

Este cenário foi o primeiro a ser criado para o estudo prático e de aplicação desta ferramenta, o qual permitiu adquirir os conhecimentos elementares e necessários sobre a RA, a linguagem C# e o funcionamento deste motor de jogo (*Unity*).

Primeiramente, foi criado um modelo BIM, no Revit, de um pórtico generalizado (Figura 6.8), contendo informação relativa à sua geometria e ao tipos e classe dos materiais que o compõem. Para demonstrar a qualidade de visualização deste tipo de modelos em Realidade Aumentada, modelou-se a armadura deste pórtico com elevado nível de detalhe e pormenor.

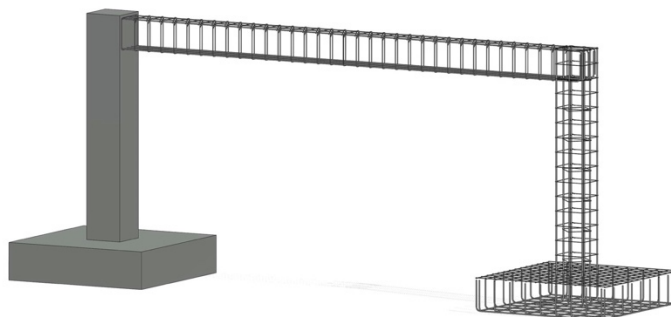


Figura 6.8 – Modelo BIM do pórtico.

Por forma a utilizar estes modelos 3D no *Unity*, o modelo desta estrutura porticada foi exportado para o formato *.fbx* e seguidamente importado para os *Assets* do *Unity*.

Para dar início à criação deste cenário num ambiente virtual, começou-se por associar um *target* a esta estrutura. Para tal, recorreu-se ao *Vuforia*, onde a imagem escolhida foi um Código QR (Anexo A1), por se tratar de uma imagem autêntica, capaz de oferecer grande capacidade de deteção de pontos e, desta forma, ser detetada com maior rigor e facilidade. De seguida, deve-se definir a câmara de Realidade Aumentada no *Unity*, de maneira que o modelo e o respetivo *target* fiquem visíveis, conforme se pretende ilustrar na Figura 6.9.

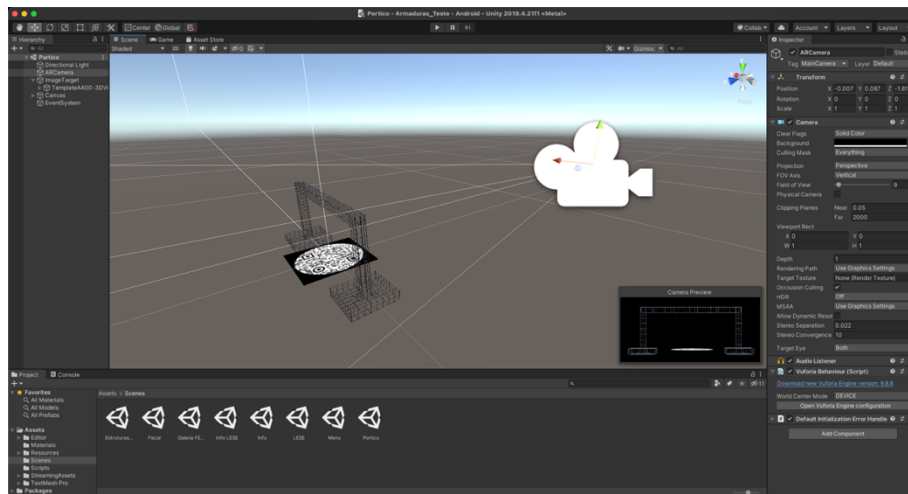


Figura 6.9 – Definição das propriedades da câmara de RA no *Unity* através do *Vuforia Engine*.

Desta forma, e conforme a Figura 6.10, este cenário permite ao utilizador visualizar e interagir com a estrutura de um pórtico, previamente criada em *software* para BIM. Para isso, basta apontar a câmara de RA para o *target* associado ao modelo.



Figura 6.10 – Aspeto do Cenário de Visualização e Interação com o modelo de um pórtico.

Para melhorar a aparência e conceber um aspeto realista a esta estrutura, foram criados dois materiais, um de aspeto metálico e outro que se identifica com o betão, que foram atribuídos a cada um dos respetivos elementos.

A visualização virtual da estrutura em ambiente real é a experiência mais simples desta tecnologia. Como tal, e com o objetivo de melhorar a experiência do utilizador, foram criadas algumas funções que permitem ao utilizador interagir com a estrutura.

Uma das funções permite, então, colocar a estrutura em rotação em relação ao seu eixo vertical, sendo ativada ou desativada ao clicar no botão “*Rotate*”. Para controlar a velocidade de rotação, foi criado um *slider* que permite estabelecer um valor dentro de um intervalo estabelecido.

```
1 using UnityEngine;
2 using UnityEngine.UI;
3
4 public class RotateObj : MonoBehaviour
5 {
6     public GameObject objToRotate;
7     public float rotationSpeed;
8     bool rotateStatus;
9     public Slider mainSlider;
10
11     private void Start()
12     {
13         rotationSpeed = 50f;
14         rotateStatus = false;
15     }
16
17     public void RotSystem()
18     {
19         if (rotateStatus == false)
20         {
21             rotateStatus = true;
22         }
23
24         else
25         {
26             rotateStatus = false;
27         }
28     }
29
30     private void Update()
31     {
32         rotationSpeed = mainSlider.GetComponent<Slider>().value;
33
34         if (rotateStatus == true)
35         {
36             objToRotate.transform.Rotate(Vector3.up * rotationSpeed * Time.deltaTime);
37         }
38     }
39 }
```

Figura 6.11 – *Script* de rotação de objetos e controlo de velocidade de rotação.

Após isso, é necessário atribuir o *script* da rotação ao botão “*Rotate*”, identificar o objeto que irá sofrer a rotação e identificar o *slider* que fornece o valor da velocidade de rotação. Posteriormente, associa-se este *script* à função “*OnClick()*” do botão, para este ser chamado e executado sempre que o utilizador o selecionar. Estas configurações podem ser analisadas na Figura 6.12.

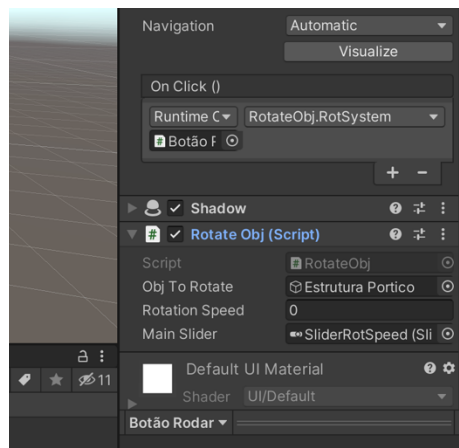


Figura 6.12 – Unity Inspector para o script RotateObj.

Também foi criada outra função que, desta vez, permite controlar a escala a que o modelo é apresentado na câmara de RA, conforme se representa no Figura 6.13. O utilizador tem a capacidade de controlar este parâmetro através de um *slider* que surge do lado esquerdo do ecrã.

```
1 using UnityEngine;
2 using UnityEngine.UI;
3
4 public class ScaleObj : MonoBehaviour
5 {
6     public GameObject objToScale;
7     public float scalePosition;
8     public Slider mainSlider;
9
10    void Start()
11    {
12        scalePosition = 4;
13    }
14
15    void Update()
16    {
17        scalePosition = mainSlider.GetComponent<Slider>().value;
18
19        var n = (float)1.0;
20        var x = new Vector3(n, n, n);
21
22        if (scalePosition == 1)
23        {
24            objToScale.transform.localScale = (float)0.25 * x;
25        }
26
27        else if (scalePosition == 2)
28        {
29            objToScale.transform.localScale = (float)0.5 * x;
30        }
31
32        else if (scalePosition == 3)
33        {
34            objToScale.transform.localScale = (float)0.75 * x;
35        }
36
37        else if (scalePosition == 4)
38        {
39            objToScale.transform.localScale = x;
40        }
41
42        else if (scalePosition == 5)
43        {
44            objToScale.transform.localScale = (float)1.25 * x;
45        }
46
47        else if (scalePosition == 6)
48        {
49            objToScale.transform.localScale = (float)1.5 * x;
50        }
51
52        else //(scalePosition == 7)
53        {
54            objToScale.transform.localScale = (float)1.75 * x;
55        }
56    }
57 }
```

Figura 6.13 – Script para controlo da escala do objeto.

O *script* é posteriormente adicionado ao *slider* de controlo da escala, como se verifica na Figura 6.14, identificando o objeto que sofre esta transformação e identificando o *slider* que fornece os valores de números inteiros que têm um vetor de escala a eles associado.

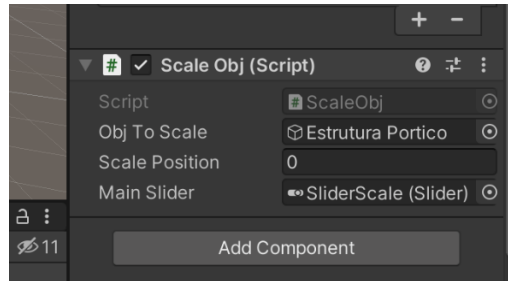


Figura 6.14 – Unity Inspector para o *script* ScaleObj.

Além das funções anteriormente apresentadas, foi também criada uma outra que permite ativar e desativar objetos do cenário, isto é, em termos da sua visibilidade no modelo, conforme se ilustra na Figura 6.15. Na prática, esta função foi criada para que o utilizador consiga visualizar a estrutura porticada como uma peça em betão, mas também que tenha acesso visual a toda a estrutura da armadura que o integra. Com isto, verificamos que é possível ativar e desativar objetos, partes de objetos e *layers* no modo de visualização, conforme a intenção do utilizador.

```
1 using UnityEngine;
2
3 public class HideObj : MonoBehaviour
4 {
5     bool hideStatus;
6     public GameObject objToHide;
7
8     private void Start()
9     {
10         hideStatus = false;
11         objToHide.gameObject.SetActive(hideStatus);
12     }
13
14     public void HideShowSystem()
15     {
16         if (hideStatus == false)
17         {
18             objToHide.gameObject.SetActive(true);
19             hideStatus = true;
20         }
21         else
22         {
23             objToHide.gameObject.SetActive(false);
24             hideStatus = false;
25         }
26     }
27 }
```

Figura 6.15 – *Script* para ativar ou desativar objetos.

Este *script* é posteriormente adicionado ao botão “*Show/Hide Concrete*”, como se verifica na Figura 6.16, bastando identificar o objeto que se pretende mostrar e esconder.

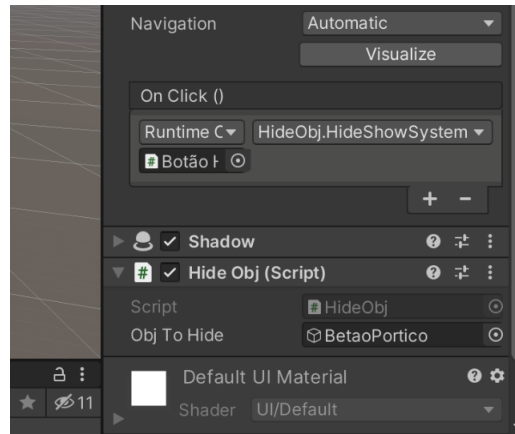


Figura 6.16 – Unity Inspector para o *script* HideObj.

Para terminar, é possível regressar ao Menu Principal e fazer *reset* do cenário recorrendo ao *script* de transição de cenários, já apresentado na Figura 6.4.

#### ▪ Cenário de Visualização do modelo de um pilar do LESE

Foi proposta a criação de um modelo BIM de um pilar de ensaio do LESE (Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural) da FEUP, para que fosse possível visualizar as armaduras deste elemento após a sua betonagem, mas também para comparação da sua disposição inicial registada no modelo 3D com o seu estado após a realização de um ensaio.

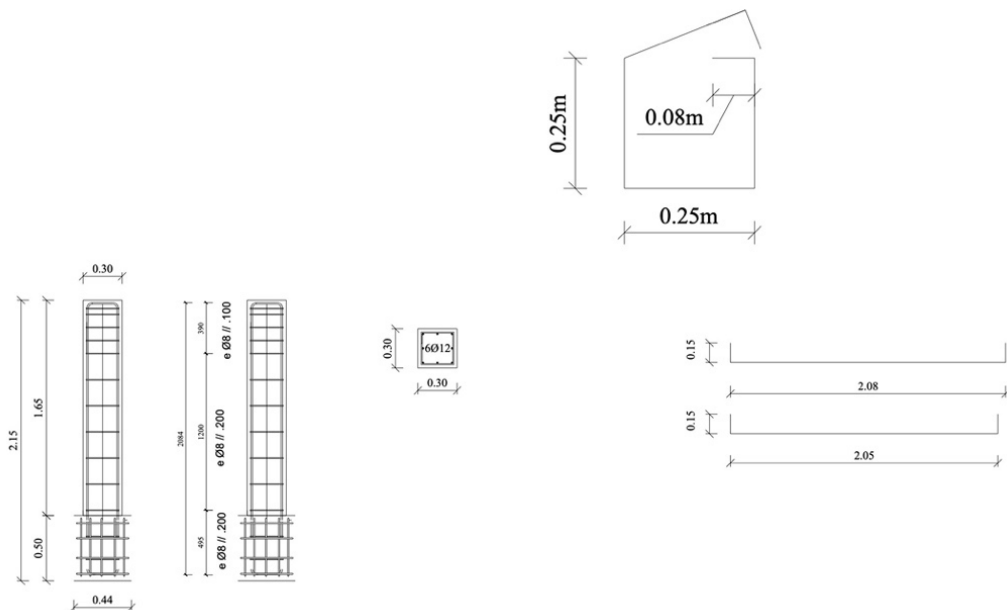


Figura 6.17 – Esquema 2D da proposta de um pilar do LESE.

Em seguimento da proposta recebida, foi elaborado o modelo BIM da estrutura em *Revit*, como se encontra ilustrado na Figura 6.18. A armadura foi modelada de forma aproximada aos desenhos recebidos. Este modelo tem atribuídas diversas informações ao nível dos tipos e classes de materiais e da sua geometria.

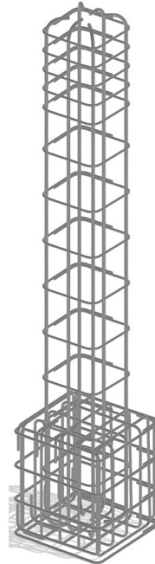


Figura 6.18 – Modelo BIM do pilar.

Este modelo foi exportado no formato de arquivo FBX e, seguidamente, importado para a biblioteca do *Unity*.

Neste cenário, e de acordo com o representado na Figura 6.19, é possível visualizar as armaduras do pilar à escala real bastando, para isso, apontar a câmara de RA para o *target* associado. Para este modelo foi utilizado o mesmo *target*, o código QR do modelo anterior, e que se encontra anexado em A1.

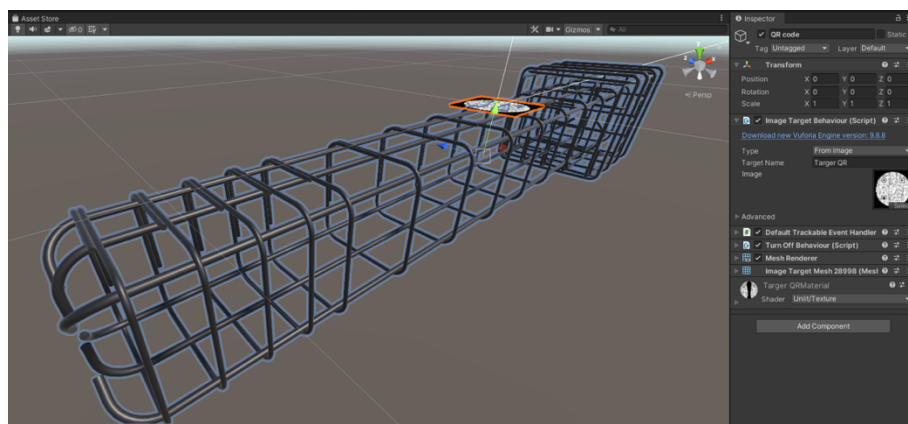


Figura 6.19 – Posicionamento da estrutura em relação ao target.

Este motor de jogo também possibilita a atribuição de características físicas aos objetos e, a partir daí, aplicar-lhes ações, como se exemplifica na Figura 6.20. Nesse sentido, concebeu-se massa e gravidade a um objeto 2D de texto, assumindo, desta forma, um comportamento de corpo rígido 2D. De seguida, foi aplicada uma força constante ao mesmo objeto para que este surja no início da cena, mas que vá sendo arrastado para fora dela.



Figura 6.20 – Atribuição de características físicas e ações aos objetos.

O cenário da estrutura do pilar, para o modo de visualização, é apresentado com o aspeto que se apresenta na Figura 6.21.

À semelhança da estrutura anterior, foi atribuído a cada elemento um material de aspeto metálico, que confere à estrutura metálica um aspeto mais realista.

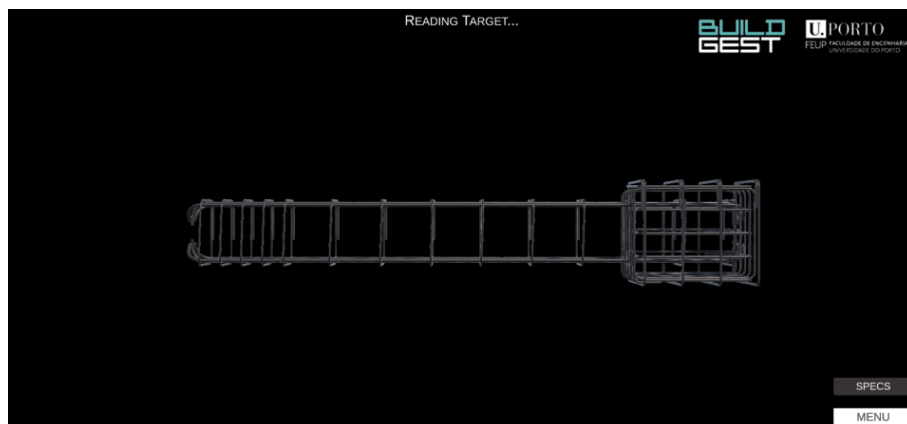


Figura 6.21 – Aspeto do Cenário de Visualização do modelo de um pilar do LESE.

O último *script* associado a este cenário permite regressar ao Menu Principal, mas também transitar para um cenário interativo, que está associado a este modelo e que fornece especificações construtivas do elemento. Este *script* encontra-se já descrito na Figura 6.4.

#### ▪ Cenário Interativo de Especificações do Pilar do LESE

Este cenário pretende complementar o cenário de visualização anteriormente apresentado, podendo ser acedido através da função de transição de cenários (Figura 6.4) que é ativada ao clicar no botão “Specs”.

De acordo com a Figura 6.22, este cenário pretende, de forma interativa, fornecer informação sobre as especificações construtivas do pilar, nomeadamente características dos materiais e disposições construtivas. A informação é disponibilizada assim que o utilizador seleciona uma das várias partes que compõem este elemento. Além disso, e por fim a destacar os elementos seleccionados, estes sofrem uma translação horizontal assim que o sistema deteta uma colisão.

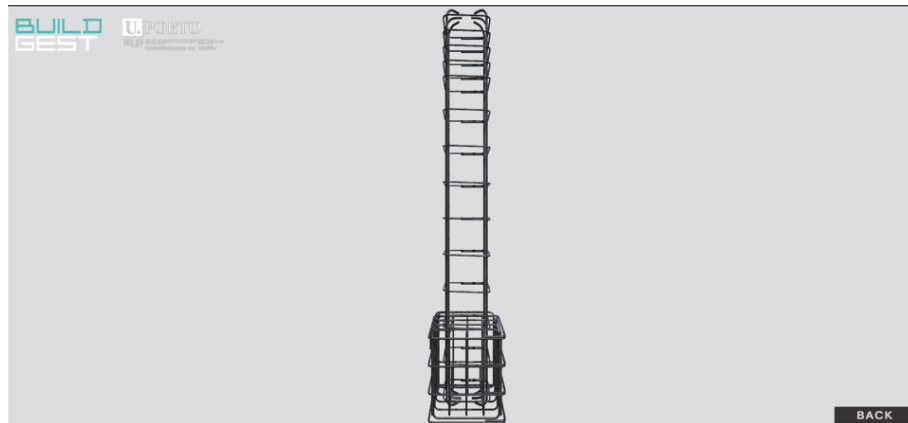


Figura 6.22 – Aspeto do Cenário de Informação de um pilar do LESE.

Foi criado um *script*, que se encontra representado na Figura 6.23, que permite aplicar uma translação horizontal, associada a um vetor, a cada um dos conjuntos de elementos que integram o modelo da estrutura, assim que o utilizador seleciona uma certa área de influência previamente definida. Além disso, logo que selecionado, um texto de formatação pré-definida neste *script* surge com a informação das especificações construtivas inseridas no Unity.

```
1 using UnityEngine;
2 using UnityEngine.UI;
3
4 public class ObjInfo : MonoBehaviour
5 {
6     bool objetoSelecionado;
7     public GameObject obj;
8     bool objArrastado;
9     public string steel;
10    public string diam;
11    public string spacing;
12    public GameObject textDisplay;
13
14    void Start()
15    {
16        objetoSelecionado = false;
17        objArrastado = false;
18    }
19
20    void Update()
21    {
22        void StoreInfo()
23        {
24            textDisplay.GetComponent<Text>().text = "Aço " + steel + ";  $\phi$  = " + diam + "; s = " + spacing;
25        }
26
27        if (objetoSelecionado == true)
28        {
29            if (Input.GetMouseButtonDown(0))
30            {
31                objArrastado = !objArrastado;
32            }
33        }
34
35        if (objArrastado == true)
36        {
37            var translacao = new Vector3(1, 0, 0);
38            obj.transform.localPosition = Vector3.Lerp(obj.transform.localPosition, translacao, Time.deltaTime * 5f);
39            StoreInfo();
40        }
41
42        else
43        {
44            obj.transform.localPosition = Vector3.Lerp(obj.transform.localPosition, Vector3.zero, Time.deltaTime);
45            textDisplay.GetComponent<Text>().text = "CLICK TO SHOW INFO";
46        }
47    }
48
49    private void OnMouseDown()
50    {
51        objetoSelecionado = true;
52    }
53
54    private void OnMouseUp()
55    {
56        objetoSelecionado = false;
57    }
58 }
```

Figura 6.23 – Script de translação de um objeto com surgimento de informação (ObjInfo).

Existem algumas ferramentas inerentes ao *Unity* que se revelaram bastante importantes ao longo da criação desta aplicação, em particular neste cenário. A maior parte dos objetos obtidos e criados chegam ao programa sem qualquer solidez a nível da interação com o utilizador. Para se obter essa solidez, atribui-se uma *Box Collider* ou uma *Mesh Collider*. A *Mesh Collider* utiliza-se em casos específicos, como elementos complexos ou que variam em geometria, onde se pretende que a solidez cubra o objeto exatamente como ele é, sendo que é necessário ter em atenção que esta ferramenta irá sobrecarregar muito mais o programa. A *Box Collider* utiliza-se nos casos em que não é necessário tanto rigor poligonal, mas sim de cobrir uma certa área retangular.

Nesse sentido, e por forma a que seja possível ao utilizador interagir com o modelo, criaram-se três *box colliders* distribuídas pelos vários conjuntos de elementos do modelo da estrutura, conforme se verifica na Figura 6.24.

Por via desta figura, também é possível observar a atribuição do *script* “ObjInfo” ao conjunto de elementos. Para tal, é necessário identificar o objeto principal a sofrer a translação, identificar o objeto que irá servir com *display* para o texto e, por fim, inserir a informação solicitada no que respeita ao tipo de materiais que constituem o pilar.

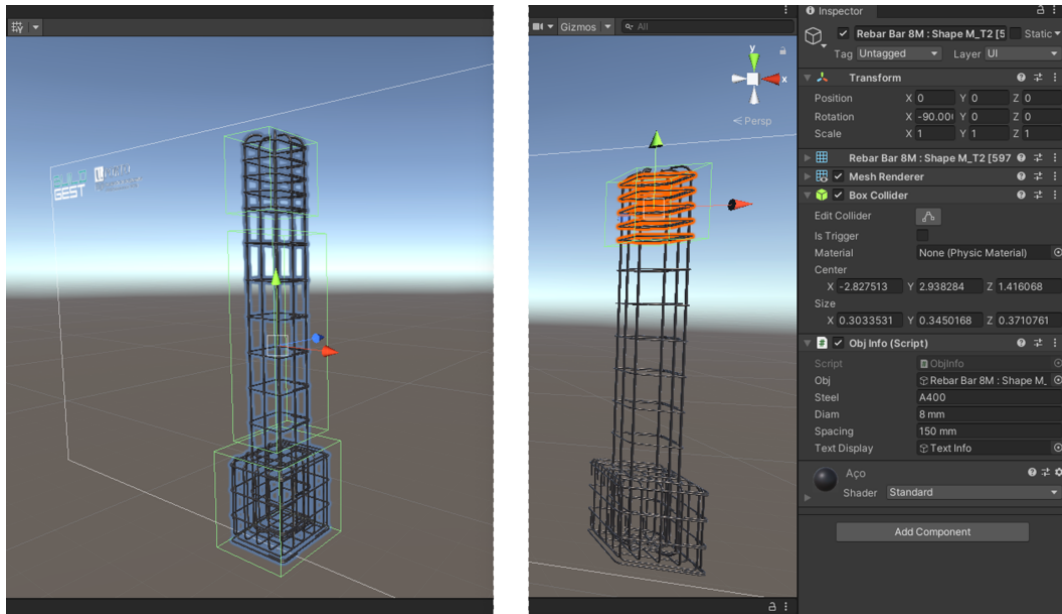


Figura 6.24 – *Box Collider* e aplicação do *script* “ObjInfo”.

De seguida, foi desenvolvido outro *script* bastante semelhante a este, mas que desta vez permite trabalhar com mais do que um objeto ou conjunto de elementos, e encontra-se representado na Figura 6.25. Como tal, foi necessário definir diferentes vetores, fazendo com que as translações não coincidisse na posição final dos objetos, e que o texto que surge fosse apresentado de forma organizada e estruturada.

```
using UnityEngine;
using UnityEngine.UI;

1 public class ObjInfo2 : MonoBehaviour
2 {
3     bool objetoSelecionado;
4     public GameObject obj1;
5     public GameObject obj2;
6     bool objArrastado;
7     public string vRsteel;
8     public string vRnum;
9     public string vRdiam;
10    public string fSteel;
11    public string fDiam;
12    public GameObject textDisplay;
13
14    void Start()
15    {
16        objetoSelecionado = false;
17        objArrastado = false;
18    }
19
20    void Update()
21    {
22        void StoreInfo()
23        {
24            textDisplay.GetComponent<Text>().text = "Arm. Vertical\nAço " + vRsteel + " " + vRnum + " ¢ " + vRdiam + "\nFundação\nAço " + fSteel + " ¢ " + fDiam;
25        }
26
27        if (objetoSelecionado == true)
28        {
29            if (Input.GetMouseButtonDown(0))
30            {
31                objArrastado = !objArrastado;
32            }
33        }
34
35        if (objArrastado == true)
36        {
37            var translacao1 = new Vector3(-1, 0, 0);
38            var translacao2 = new Vector3(-2, 0, 0);
39            obj1.transform.localPosition = Vector3.Lerp(obj1.transform.localPosition, translacao1, Time.deltaTime * 5f);
40            obj2.transform.localPosition = Vector3.Lerp(obj2.transform.localPosition, translacao2, Time.deltaTime * 5f);
41            StoreInfo();
42        }
43        else
44        {
45            obj1.transform.localPosition = Vector3.Lerp(obj1.transform.localPosition, Vector3.zero, Time.deltaTime);
46            obj2.transform.localPosition = Vector3.Lerp(obj2.transform.localPosition, Vector3.zero, Time.deltaTime);
47            textDisplay.GetComponent<Text>().text = "CLICK TO SHOW INFO";
48        }
49    }
50
51 }
52
53 private void OnMouseDown()
54 {
55     objetoSelecionado = true;
56 }
57 private void OnMouseUp()
58 {
59     objetoSelecionado = false;
60 }
61 }
```

Figura 6.25 – Script de translação de vários objetos com surgimento de informação (ObjInfo2).

Através da Figura 6.26, observa-se a atribuição do script “ObjInfo2” ao conjunto de elementos. Neste caso, é necessário identificar os dois objetos principais que irão sofrer diferentes translações, identificar o objeto que irá servir com *display* para o texto informativo e, por fim, inserir a informação solicitada no que respeita ao tipo de materiais que constituem o pilar e a sua fundação.

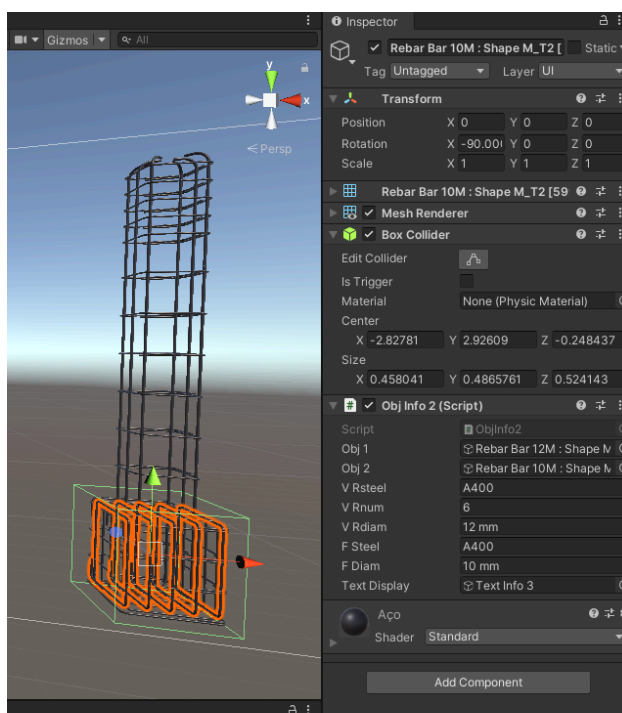


Figura 6.26 – Box Collider e aplicação do script “ObjInfo2”.

Por fim, e à semelhança de todos os cenários apresentados, para retornar ao cenário anterior basta clicar no botão “Back” que ativa a função de transição de cenários através do script apresentado na Figura 6.4.

#### ▪ Cenário de Visualização da estrutura da Galeria da FEUP

Para finalizar o módulo da inspeção, foi criado um modelo BIM, de maior complexidade, da galeria da FEUP entres os edifícios F e G, com base em pormenores construtivos solicitados ao Serviço de Arquivo da mesma Faculdade. Estes documentos encontram-se presentes no Anexo A2 desta dissertação.

Devido à carência de certos pormenores estruturais dos elementos recebidos desta galeria, alguns deles foram modelados de forma assumida, mas concordante com o tipo de estrutura em causa. Como tal, o modelo BIM executado resulta no modelo que a seguir se encontra representado na Figura 6.27. Este modelo contempla informação relativa à geometria dos vários componentes, mas também dos tipos e classes dos materiais que a constituem.

Na Figura 6.28, é possível observar uma fotografia do estado real e atual desta galeria entre os Edifícios F e G da FEUP.

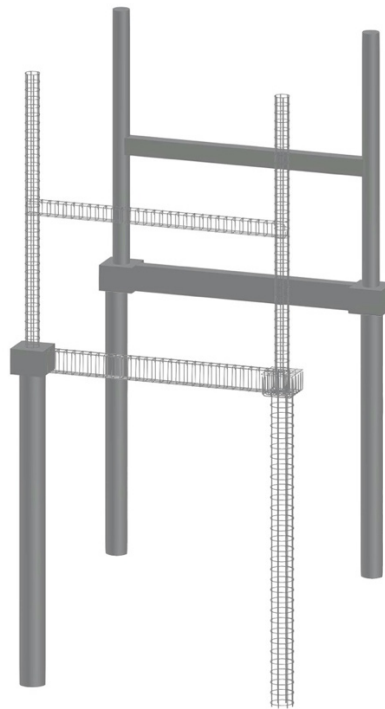


Figura 6.27 – Modelo BIM da Galeria da FEUP.



Figura 6.28 – Fotografia do aspeto real da Galeria da FEUP.

O modelo BIM foi exportado para o formato de arquivo FBX, para de seguida ser importado para a biblioteca do *Unity*.

Este cenário, e conforme se apresenta na Figura 6.29, permite visualizar a estrutura de uma galeria da FEUP, onde a escala do modelo teve de ser devidamente trabalhada e ajustada, por forma a que coincidissem com a geometria e dimensão dos elementos reais. Para tal, basta apontar a câmara de RA para o *target* associado à estrutura (Figura 6.30), que é representado pelo mesmo código QR dos modelos anteriores, e se encontra presente no Anexo A1.



Figura 6.29 – Aspetto do Cenário de Visualização do modelo da estrutura da Galeria da FEUP.

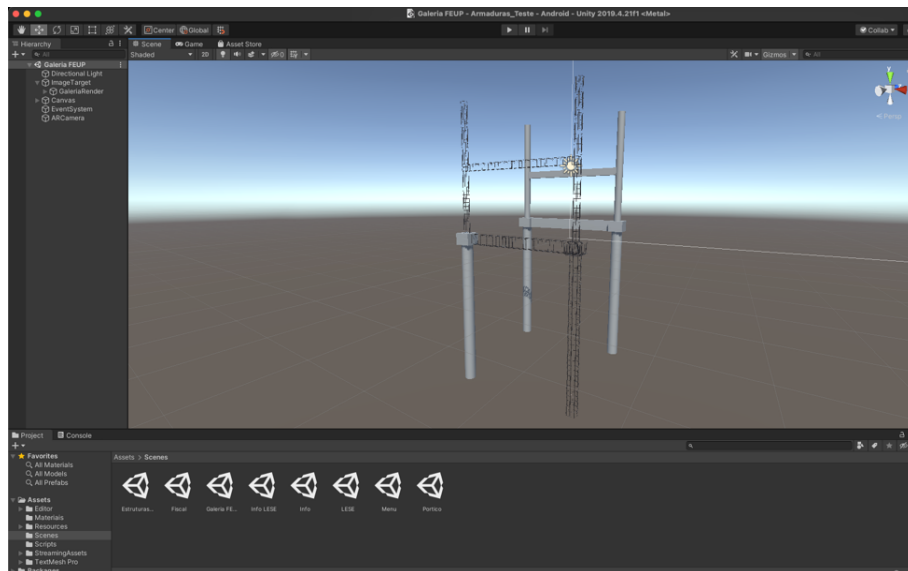


Figura 6.30 – Posicionamento da estrutura no Unity.

A este cenário está apenas associado um *script*, o qual pretende transitar para o Menu Principal, quando o utilizador pretender fechar esta visualização, executado através da função `ChangeS()` representada na Figura 6.4.

#### ▪ Cenário do Módulo de Fiscalização

Tendo em vista a demonstração da versatilidade e do potencial desta tecnologia criou-se uma ferramenta capaz de auxiliar maioritariamente tarefas de fiscalização, o que acabou por dar nome ao módulo, mas também colaborar em tarefas de inspeção.

Nesse sentido, e de acordo com a Figura 6.31, este cenário fornece a possibilidade de verificar disposições de armaduras, em termos de espaçamento de varões, através da sobreposição de linhas virtuais devidamente espaçadas que se fazem sobrepor aos varões do ambiente real. O espaçamento das linhas virtuais pode ser adaptado entre dez, quinze e vinte centímetros, através da seleção do valor pretendido por via de um *slider*.

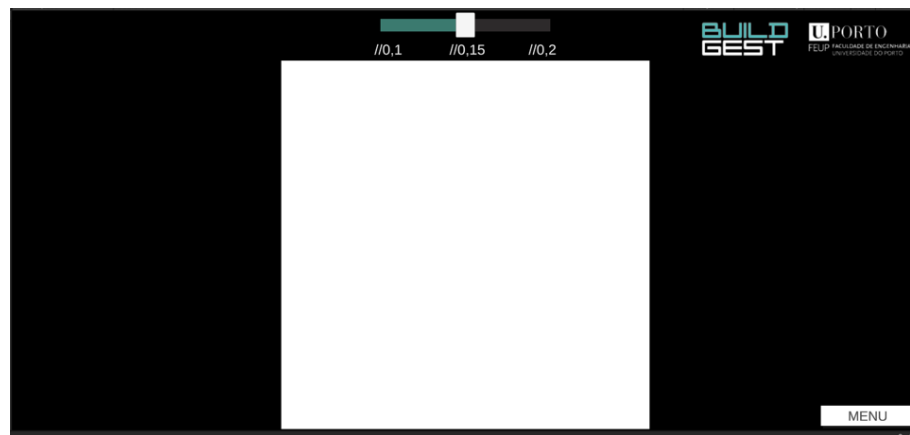


Figura 6.31 – Aspeto do Cenário do Módulo de Fiscalização.

Para possibilitar a transição de espaçamentos das linhas através de um *slider*, criou-se um *script* que se baseia na atribuição de uma textura específica a uma imagem vazia, que serve como *display*, conforme um valor que é fornecido pelo *slider*. O *script* encontra-se descrito na Figura 6.32.

```
1 using UnityEngine;
2 using UnityEngine.UI;
3
4 public class TextureSlider : MonoBehaviour
5 {
6     public float sliderPosition;
7     public GameObject imgDisplay;
8     public Texture2D texture1;
9     public Texture2D texture2;
10    public Texture2D texture3;
11    public Slider mainSlider;
12
13    void Start()
14    {
15        sliderPosition = 2;
16    }
17
18    void Update()
19    {
20        sliderPosition = mainSlider.GetComponent<Slider>().value;
21
22        if (sliderPosition == 1)
23        {
24            imgDisplay.GetComponent<RawImage>().texture = texture1;
25        }
26
27        else if (sliderPosition == 2)
28        {
29            imgDisplay.GetComponent<RawImage>().texture = texture2;
30        }
31
32        else //(sliderPosition == 3)
33        {
34            imgDisplay.GetComponent<RawImage>().texture = texture3;
35        }
36    }
37 }
```

Figura 6.32 – *Script* de alteração de textura por via de um *slider* TextureSlider.

Devido a algumas limitações do pacote de ferramentas, não foi possível associar as linhas de espaçamento a um objeto real, ou até mesmo a um plano, através da sua deteção. Por esse motivo, as linhas surgem no ecrã sem nenhuma relação de escala e posição relativa. Contudo, o principal objetivo foi concretizado, sendo capaz de demonstrar a aplicabilidade desta tecnologia em diversas tarefas do setor da construção.

## 6.5. EXPERIMENTAÇÃO

Neste subcapítulo pretende-se apresentar, de forma sucinta, a aplicação em funcionamento nos vários cenários desenvolvidos.

### ▪ Menu Principal

O primeiro cenário que surge quando o utilizador abre a ferramenta é o do Menu Principal e, encontra-se representado na Figura 6.33. A partir daqui o utilizador encontra-se apto para seleccionar, através dos botões do menu, o cenário para o qual pretende transitar.

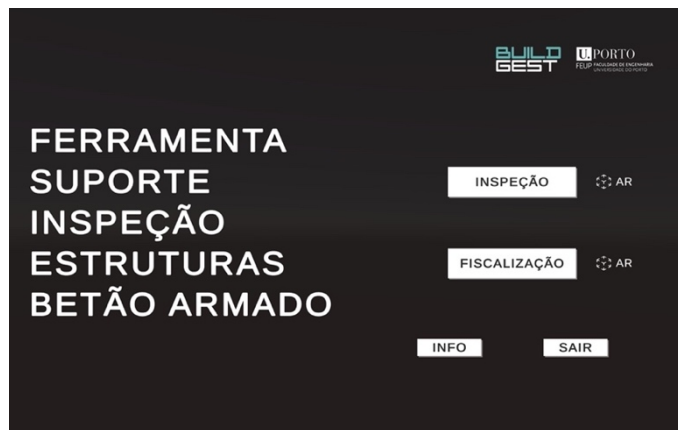


Figura 6.33 – Funcionamento da aplicação: Menu Principal.

### ▪ Página de Informação

No caso em que o utilizador seleccionar o botão “Info” do Menu, irá transitar para a página de informação, que se encontra representada na Figura 6.34. Nesta página, são apresentadas alguns dados do âmbito da criação desta aplicação, assim como os contactos das várias partes envolvidas no seu processo.

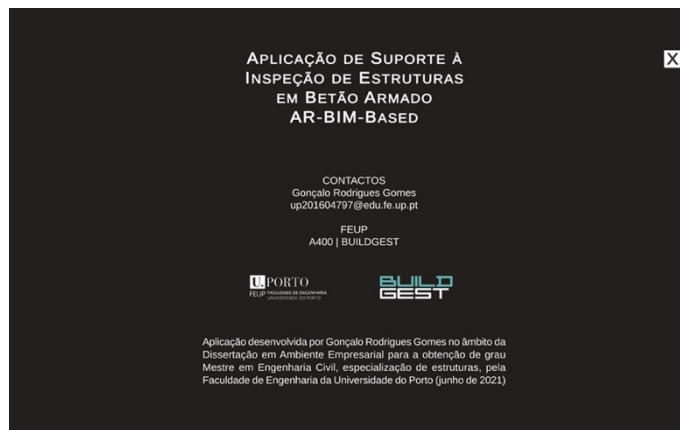


Figura 6.34 – Funcionamento da aplicação: Janela de Informação.

#### ▪ Menu do Módulo de Inspeção

Este módulo integra cenários de visualização e interação do utilizador com o modelo das estruturas. Conforme se visualiza na Figura 6.35, o utilizador consegue optar para qual cenário pretende transitar, correspondendo a diferentes modelos virtuais.



Figura 6.35 – Funcionamento da aplicação: Menu do módulo de inspeção.

#### ▪ Cenário do modelo de um Pórtico

O primeiro cenário, em ordem com o menu anterior, permite visualizar o modelo de um pórtico, bastando apontar a câmara de RA para o target do código QR (Anexo A1). Neste cenário, surgem diversos objetos de ferramentas de jogo interativos, com os quais o utilizador fica habilitado a controlar determinadas animações associadas ao modelo do pórtico (Figura 6.36).

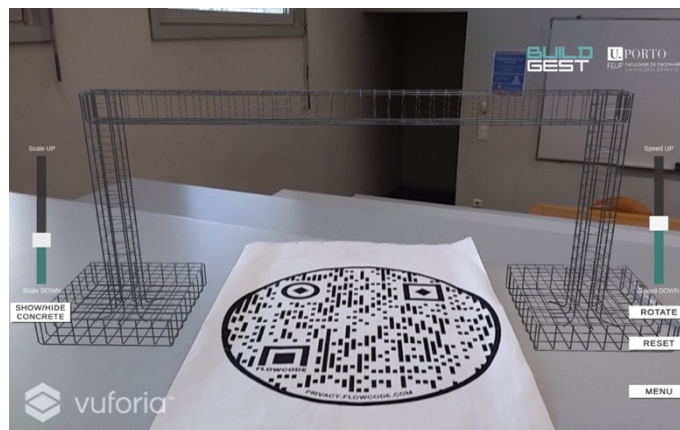


Figura 6.36 – Funcionamento da aplicação: Cenário do modelo de um Pórtico.

Através do botão “*Show / Hide Concrete*”, que surge do lado esquerdo do ecrã, é possível alternar o modo de visualização da estrutura, ou seja, esta pode ser visualizada como modelo de armaduras (Figura 6.36), ou como modelo em betão (Figura 6.37).

Adicionalmente, do lado esquerdo, é possível observar um *slider*, a partir do qual é possível controlar a escala de apresentação do modelo em relação do *target*, variando entre 0.25 e 1.75 vezes a sua escala original.

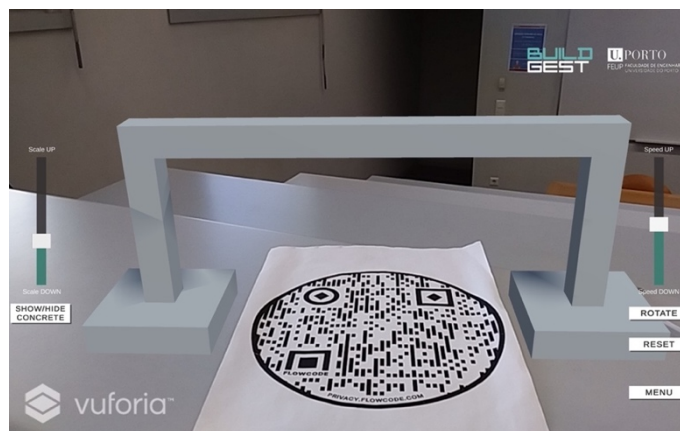


Figura 6.37 – Funcionamento da aplicação: Visualização da estrutura betonada.

Já em relação aos objetos de interação do lado direito, por via da Figura 6.38, é possível visualizar o botão “*Rotate*”, que coloca o modelo em rotação, em relação ao seu eixo vertical, sendo a velocidade de rotação controlada pelo *slider* que surge acima deste botão. Também é possível verificar outros dois botões associados ao mesmo script, que permitem, um regressar ao Menu Principal e outro carregar novamente o cenário para repor as definições iniciais.

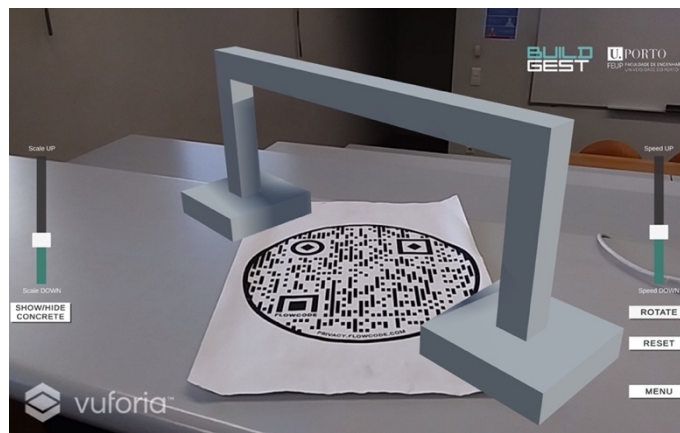


Figura 6.38 – Funcionamento da aplicação: Visualização da estrutura em rotação.

#### ▪ Cenário do modelo de um Pilar do LESE

Outro cenário que integra o Módulo de Inspeção é o supra mencionado onde, apontando a câmara de RA para o target do código QR (Anexo A1), se visualiza o modelo das armaduras de um Pilar do LESE à escala real, como se verifica pela Figura 6.39. Este tipo de interação visual com modelos virtuais permite auxiliar algumas tarefas de inspeção, no que respeita à observação *in-situ* de armaduras em betão executadas, mas também outro tipo de infraestruturas, sem que seja necessário realizar demolições ou desmontar elementos. Além disso, quando se pretende intervir em elementos de betão armado, ou até mesmo executar uma perfuração ou caroteamento, em que se pretende evitar a armadura, esta ferramenta torna-se útil por permitir visualizar os seus elementos.



Figura 6.39 – Funcionamento da aplicação: Cenário do modelo de um Pilar do LESE.

Através da Figura 6.40, verifica-se outra potencialidade deste cenário, pois permite comparar a disposição original das armaduras do modelo, com aquilo que se observa na realidade. Isto pode ser utilizado para comparar o estado das armaduras após a realização de um ensaio de uma peça de betão armado, que leve à sua deformação, mas também para verificar conformidades ou não conformidades na execução de elementos de betão armado de uma estrutura.



Figura 6.40 – Funcionamento da aplicação: comparação de pilares ensaiados com o modelo virtual.

Por fim, este cenário permite transitar para um outro, que atua de forma complementar, através do botão “Specs”. O novo cenário, que se encontra representado na Figura 6.41, permite que o utilizador tenha acesso a dados relacionados com a estrutura, nomeadamente das suas especificações construtivas. Para tal, basta selecionar um dos três conjuntos de elementos do modelo do pilar, tal como se verifica na Figura 6.42.

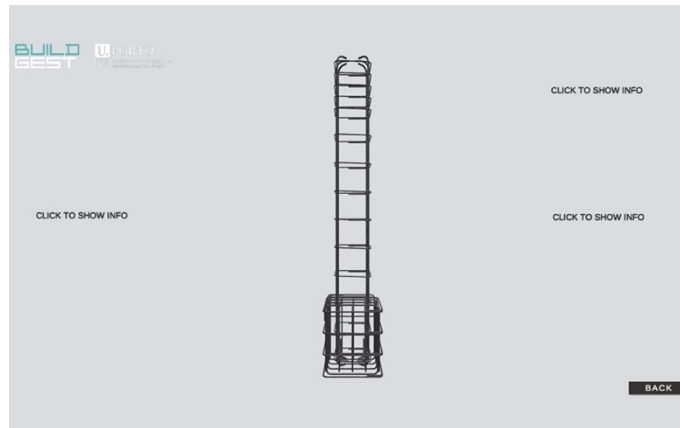


Figura 6.41 – Funcionamento da aplicação: cenário das especificações do Pilar do LESE.

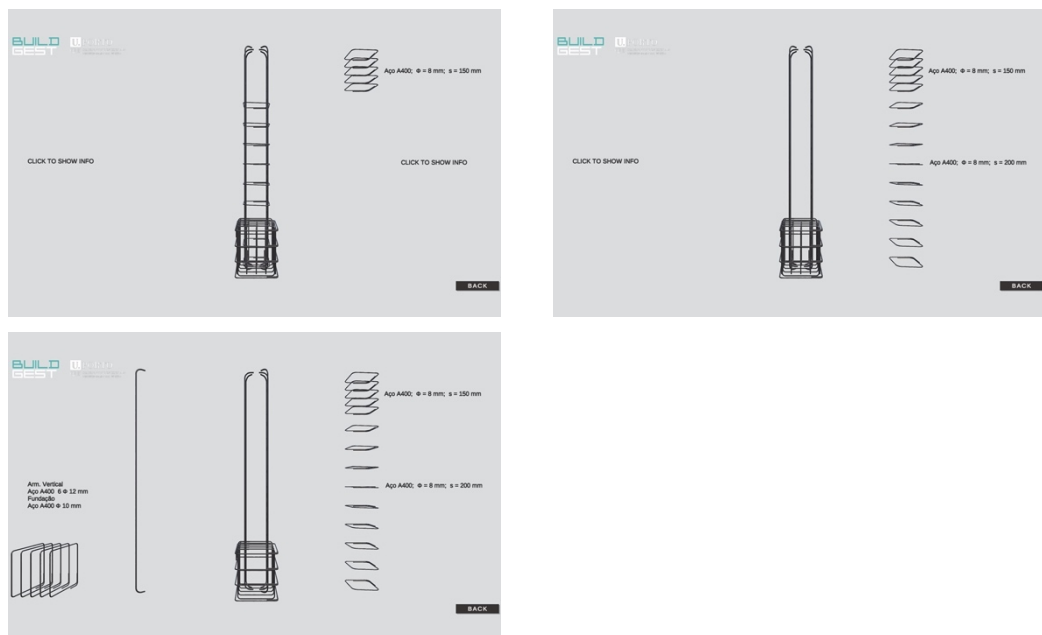


Figura 6.42 – Funcionamento da aplicação: interação do utilizador com cenário.

▪ **Cenário do modelo da Galeria da FEUP**

Por fim, apresenta-se o último cenário que integra o Módulo de Inspeção. Trata-se de um cenário meramente de visualização, também associado ao target do código QR (Anexo A1). Este modelo, além de mais complexo, foi inserido à escala real, tomando dimensões consideráveis. Nesse sentido, a precisão de compatibilidade do modelo virtual com os elementos reais é mais reduzida. O funcionamento desta ferramenta pode ser observado nas Figuras 6.43 e 6.44.



Figura 6.43 – Funcionamento da aplicação: cenário de visualização do modelo da Galeria da FEUP.



Figura 6.44 – Funcionamento da aplicação: cenário de visualização do modelo da Galeria da FEUP.

#### ▪ Cenário do Módulo de Fiscalização

Para finalizar, através do Menu Principal, é possível transitar para o Módulo de Fiscalização. Neste cenário, o utilizador pode verificar o espaçamento entre varões das armaduras de uma peça, conforme se apresenta na Figura 6.45.

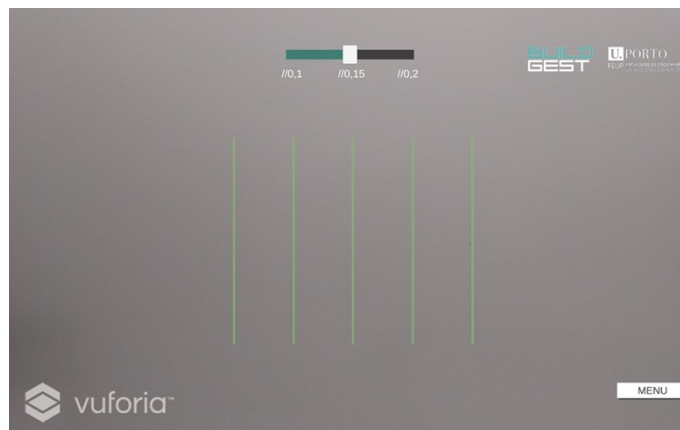


Figura 6.45 – Aspeto do cenário de fiscalização.

Através do *slider* que surge na parte superior do ecrã, o utilizador tem a possibilidade de optar por três diferentes níveis de espaçamento, 10, 15 e 20 centímetros (Figura 6.46).



Figura 6.46 – Definição e verificação do espaçamento entre varões.

## 6.6. FERRAMENTA SECUNDÁRIA DESENVOLVIDA COM REALIDADE MISTA

A tecnologia da RVC é uma área que pode ser fortemente explorada, podendo ser trabalhada no caminho e interesse de cada entidade. Nesse sentido, a par da criação desta ferramenta compatível com dispositivos *Android*, foi desenvolvida uma outra compatível com dispositivos *Windows*, nomeadamente os óculos de Realidade Mista *Microsoft HoloLens2*. Esta nova aplicação permite, então, que o utilizador interaja com o mundo virtual sobreposto ao real de uma forma mais imersiva.

Note-se que esta ferramenta assume um papel secundário, pretendendo complementar a demonstração do potencial e da versatilidade que este tipo de tecnologias detêm. Dessa forma, serão apenas expostas as considerações mais relevantes do seu desenvolvimento.

#### 6.6.1. CONSTRUÇÃO DA APLICAÇÃO

Esta nova ferramenta criada, como já referido, pretende ampliar o estudo e aplicação deste tipo de tecnologia no setor da construção. O seu objetivo mantém-se ao nível do suporte das tarefas de inspeção. Dessa forma, os modelos BIM já criados foram importados para esta nova biblioteca e manteve-se a estruturação dos módulos da aplicação anterior. Contudo, alguns *scripts* em C# tiveram de ser adaptados e recriados para esta nova plataforma, o que permitiu melhorar a experiência do utilizador.

Para perceber o funcionamento desta nova plataforma, foi necessário seguir um tutorial *online* livre e disponibilizado pela *Microsoft* que aborda a temática da Realidade Mista, mas também expõe em passos simples de que forma é possível criar um projeto de RM compatível com os *Hololens2*, criado através do *Unity*.

Adicionalmente, foi instalado um pacote de ferramentas de RM, o *Mixed Reality Toolkit* (MRTK), que fornece uma série de *scripts* de base essenciais para a criação de um projeto de RM, mas também objetos e outros elementos preconizados no tutorial acima mencionado.

Seguidamente, serão apresentadas as principais bases de funcionamento desenvolvidos nesta aplicação e que contemplam os vários cenários criados.

##### ▪ Menu Principal

Neste cenário, conforme se verifica na Figura 6.47, é possível visualizar a página de abertura da aplicação, onde surge o título desta ferramenta e os logótipos das entidades envolvidas. Existe, também, uma caixa de menu que permite ao utilizador transitar para os vários cenários construídos, bastando selecionar o botão pretendido.

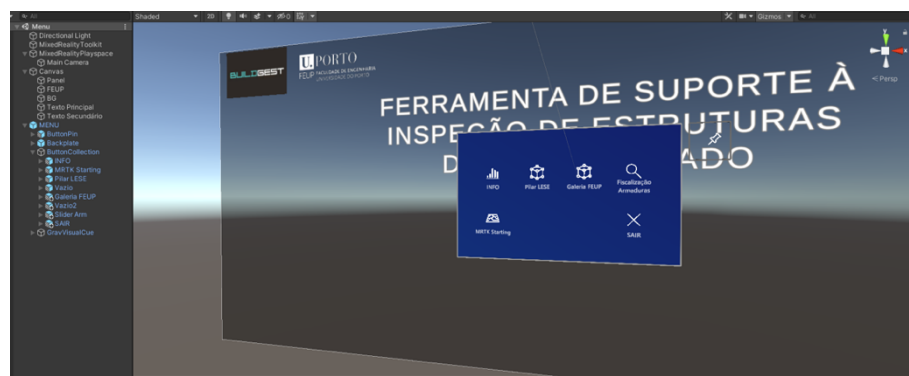


Figura 6.47 – Construção do Menu Principal.

À semelhança da aplicação anterior, o mesmo *script* foi utilizado para permitir a transição entre os cenários desta aplicação e que, a seguir, se apresenta na Figura 6.48. Seguidamente, este *script* deve ser associado a cada um dos botões, mencionando o cenário destino da transição, conforme se demonstra na Figura 6.49.

```
1 using UnityEngine;
2 using UnityEngine.SceneManagement;
3
4 public class ChangeScene : MonoBehaviour
5 {
6     public string nomeDaCena;
7
8     public void ChangeS()
9     {
10         SceneManager.LoadScene(nomeDaCena);
11     }
12
13     public void Quit()
14     {
15         Application.Quit();
16     }
17
18     public void Menu()
19     {
20         SceneManager.LoadScene("Menu");
21     }
22 }
```

Figura 6.48 – Script de transição de cenários.



Figura 6.49 – Atribuição da função *ChangeScene* a um botão.

De forma a que a caixa de menu se mantenha sempre visível e acessível ao utilizador, foi associado um *script* que faz com que esta caixa acompanhe a movimentação da cabeça do utilizador (Figura 6.50). A função “*RadialView*” está integrada no MRTK e permite definir a sensibilidade e a velocidade com que o objeto acompanha o utilizador, mas também a posição relativa onde se fixa. Além disso, de forma que o utilizador consiga interagir com os botões de transição de cenário, é necessário atribuir-lhes solidez por via de uma *BoxCollider*, que deve ser definida de forma apropriada.



Figura 6.50 – Configuração da função *RadialView* e das *BoxCollider*.

### ▪ Página de Informação

Esta página contempla informação do âmbito da criação desta aplicação, assim como dos contactos das várias partes envolvidas (Figura 6.51). O principal objeto interativo deste cenário é o botão que permite retornar ao Menu Principal da aplicação, através do *script* apresentado na Figura 6.48.



Figura 6.51 – Configuração da página de informação.

### ▪ Pilar do LESE e Galeria da FEUP

Estes cenários, apesar de distintos, apresentam-se de forma conjunta por terem sido desenvolvidos de forma idêntica em termos de *scripts* e interação com o utilizador.

Estes cenários foram, então, criados com os modelos BIM de um pilar do LESE e da Galeria da FEUP entre os Edifícios F e G, os quais o utilizador está habilitado a interagir de forma bastante simples e interativa. Como tal, e de acordo com a Figura 6.52 e 6.53, estes modelos têm associado uma série de *scripts* do MRTK que lhes concebem as propriedades interativas necessárias.

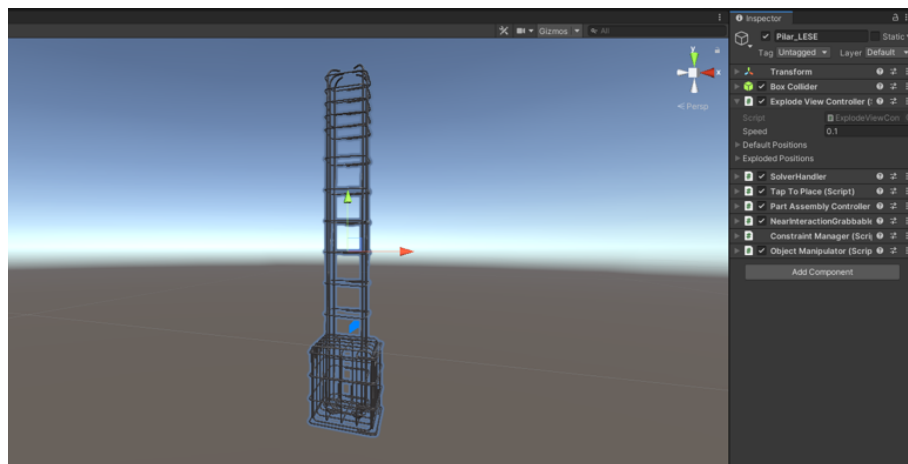


Figura 6.52 – Configuração do cenário do modelo de um pilar do LESE.

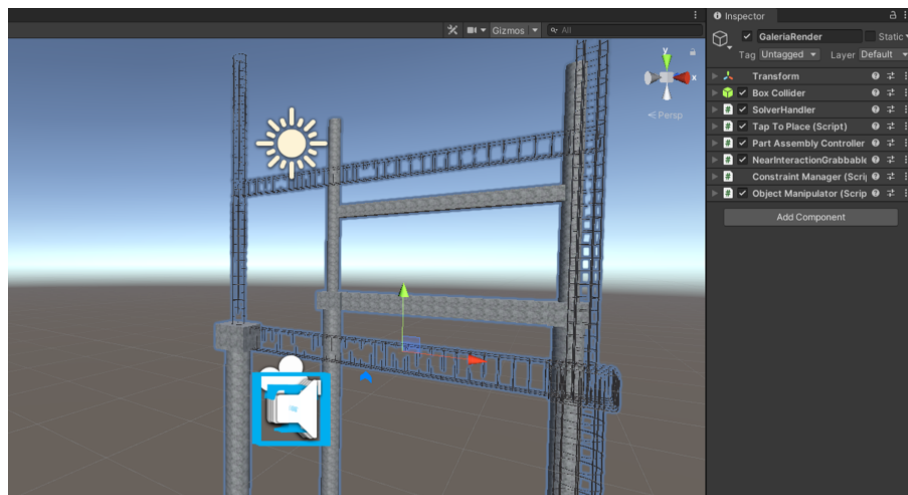


Figura 6.53 – Configuração do cenário do modelo da Galeria da FEUP.

Por vezes, quando estamos perante modelos complexos em que a sua correta visualização possa ficar comprometida, é interessante poder separar todos os elementos que compõem esse mesmo modelo, fazendo com que seja possível visualizar alguns pormenores. Dessa forma, e conforme a Figura 6.54, foi criado um botão “*Explode*”, no cenário do Pilar, que decompõe o modelo nos seus vários elementos. Esta função fica associada ao modelo, onde se devem configurar as posições inicial e final de cada um dos elementos, conforme se verifica no *Inspector* da Figura 6.52. O botão “*Reset*” foi criado para que o utilizador consiga repor a configuração inicial do modelo.

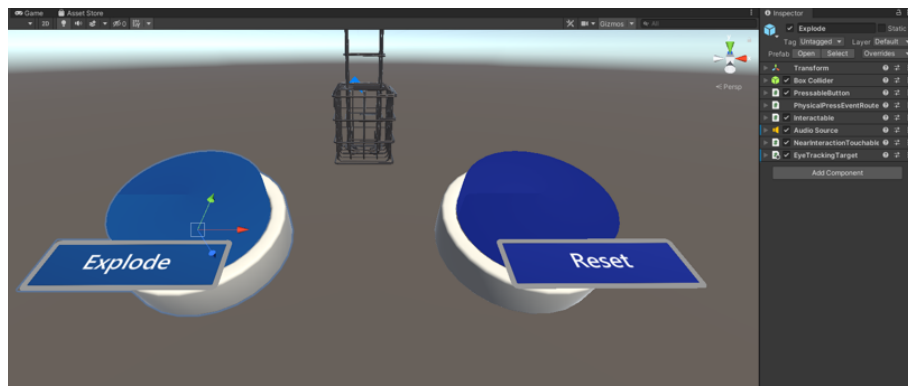


Figura 6.54 – Configuração dos botões interativos.

O Menu interativo destes cenários permite ao utilizador retornar ao Menu Principal através do *script* descrito na Figura 6.48, mas também permite que o modelo seja redimensionado e transformado para outra posição de coordenadas (Figura 6.55 e Figura 6.56). Como tal, o utilizador ao seleccionar o botão “*Tap to Place*” fica habilitado a transportar o modelo para a localização que desejar, bastando “pegar” no modelo com a mão em forma de pinça. Para deixar o modelo na nova posição, basta libertar a mão. Os botões “*Enable*” e “*Disable*” ativam e desativam, respetivamente, o redimensionamento do modelo. Ou seja, sempre que o botão “*Enable*” for seleccionado, surge uma caixa envolta do modelo, a qual o utilizador interage com as mãos em forma de pinça, libertando as mesmas assim que o redimensionamento estiver finalizado. Por fim, deve seleccionar o botão “*Disable*” para desativar esta função.

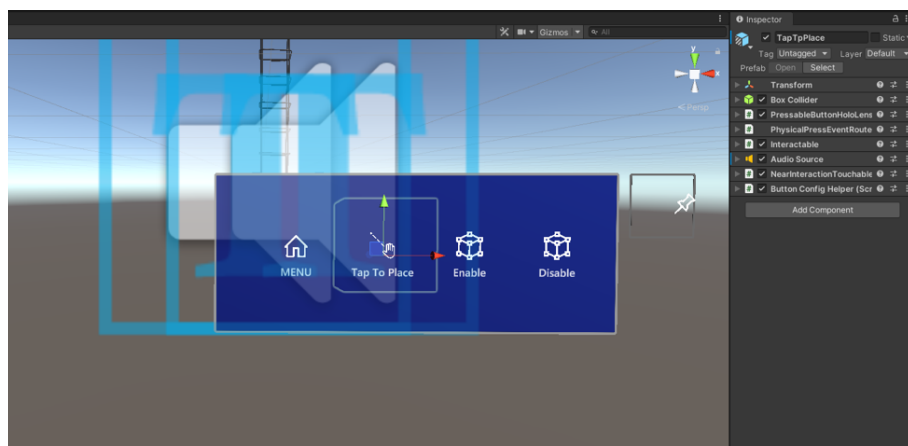


Figura 6.55 – Configuração do Menu interativo do cenário do Pilar do LESE.



Figura 6.56 – Configuração do Menu interativo do cenário da Galeria da FEUP.

Em certos casos, pode ser necessário fornecer ao utilizador a localização de um dado objeto no espaço. Nesse sentido, o MRTK fornece um *script*, “*DirectionalIndicator*”, que permite associar um objeto o qual sempre que for perdido de vista, surge uma seta indicativa da direção que o utilizador deve seguir para o encontrar (Figura 6.57).

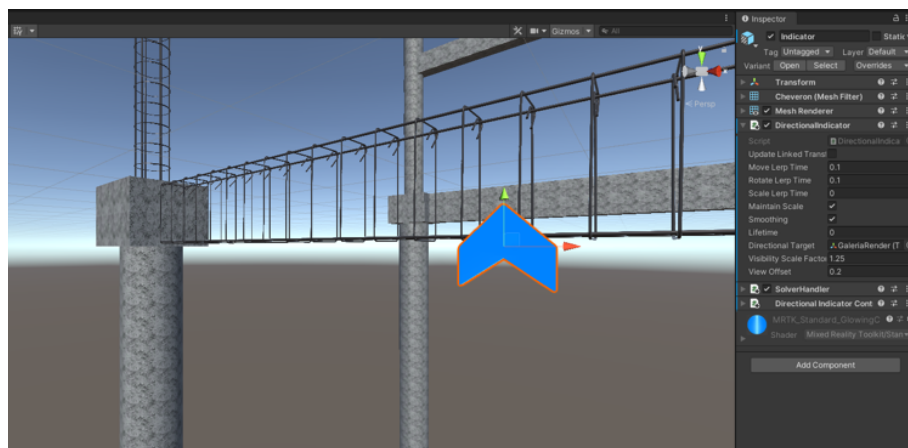


Figura 6.57 – Configuração da seta de indicação de direção.

#### ▪ Módulo de Fiscalização

À semelhança da aplicação APK, também foi criado um cenário do módulo de fiscalização que permite verificar disposições de armaduras e, em particular, o espaçamento entre os varões.

Conforme o representado na Figura 6.58, foi criada uma imagem vazia que irá servir de *display* para as linhas que definem o espaçamento expectado das armaduras e, também, foram criados dois *sliders* que permitem ao utilizador controlar algumas particularidades essenciais, tais como a distância entre linhas e a sua direção.

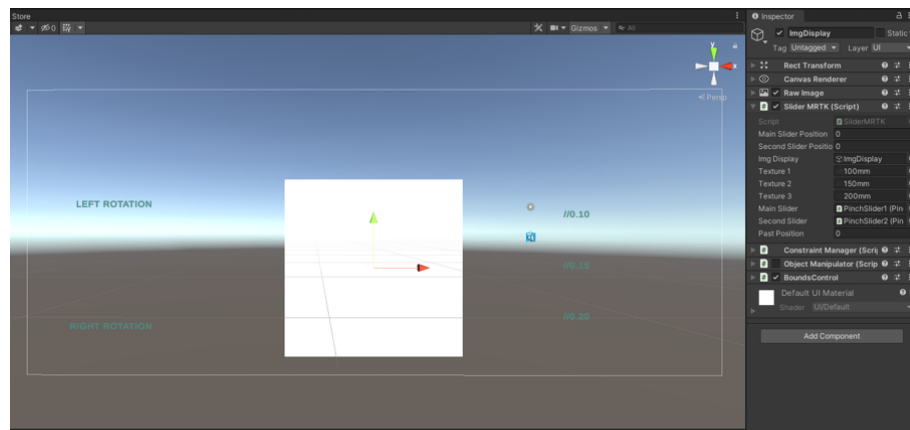


Figura 6.58 – Configuração do cenário de fiscalização de armaduras.

O *script* criado encontra-se representado na Figura 6.59 e permite não só definir a textura do display que representa os espaçamentos expectados das armaduras, por via de um *slider*, mas também orientar as linhas em termos de direção, através de um segundo *slider*.

```
1 using UnityEngine;
2 using UnityEngine.UI;
3 using Microsoft.MixedReality.Toolkit.UI;
4
5 public class SliderMRTK : MonoBehaviour
6 {
7     public float mainSliderPosition;
8     public float secondSliderPosition;
9     public GameObject imgDisplay;
10    public Texture2D texture1;
11    public Texture2D texture2;
12    public Texture2D texture3;
13    public PinchSlider mainSlider;
14    public PinchSlider secondSlider;
15    public float pastPosition;
16
17    void Start()
18    {
19        mainSliderPosition = 0.5f;
20        secondSliderPosition = 0.5f;
21    }
22
23    void Update()
24    {
25        mainSliderPosition = mainSlider.GetComponent<PinchSlider>().SliderValue;
26        secondSliderPosition = secondSlider.GetComponent<PinchSlider>().SliderValue;
27        imgDisplay.transform.Rotate(0.0f, 0.0f, 0.0f, Space.Self);
28
29        if (mainSliderPosition >= 0 && mainSliderPosition <= 0.33)
30            imgDisplay.GetComponent<RawImage>().texture = texture1;
31
32        else if (mainSliderPosition >= 0.34 && mainSliderPosition <= 0.66)
33            imgDisplay.GetComponent<RawImage>().texture = texture2;
34
35        else if (mainSliderPosition >= 0.67 && mainSliderPosition <= 1)
36            imgDisplay.GetComponent<RawImage>().texture = texture3;
37
38        if (secondSliderPosition == 0 & pastPosition != secondSliderPosition)
39            imgDisplay.transform.Rotate(0.0f, 0.0f, -90.0f, Space.Self);
40
41        else if (secondSliderPosition == 1 & pastPosition != secondSliderPosition)
42            imgDisplay.transform.Rotate(0.0f, 0.0f, 90, Space.Self);
43
44        pastPosition = secondSliderPosition;
45    }
46 }
```

Figura 6.59 – *Script* de controlo das linhas de espaçamento por via de dois *sliders*.

## 6.6.2. EXPERIMENTAÇÃO

Neste subcapítulo pretende-se demonstrar, de forma expedita, o funcionamento da ferramenta criada. Para a sua apresentação neste documento, a aplicação foi executada através do modo de jogo do Unity, o que implica um fundo virtual ou opaco na sua operação. Neste sentido, serão representados os principais momentos de cada um dos cenários desta aplicação.

### ▪ Menu Principal

Através da Figura 6.60, é possível visualizar o aspeto do Menu Principal que o utilizador irá encontrar quando abrir a aplicação, onde surge um Menu Interativo para que seleccione o cenário que pretende transitar.



Figura 6.60 – Aspeto do Menu Principal.

### ▪ Página de Informação

No cenário de informação, representado na Figura 6.61, o utilizador é capaz de observar alguns dados associados ao âmbito da criação desta ferramenta e, também, consultar os contactos das entidades envolvidas no seu desenvolvimento.

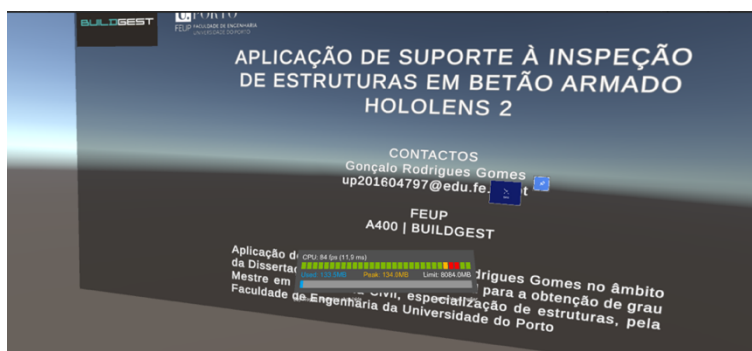


Figura 6.61 – Aspeto do cenário de informação.

▪ **Pilar do LESE e Galeria da FEUP**

Conforme foi referido, estes dois cenários, apesar de distintos, foram desenvolvidos de forma idêntica e daí apresentam-se de forma conjunta.

Através das Figuras 6.62 e 6.63, é possível verificar o aspeto dos cenários do modelo do Pilar do Lese e do modelo da Galeria da FEUP, respetivamente. Nestes cenários, o utilizador é capaz de interagir com os modelos, de forma imersiva, através de botões virtuais que surgem no ecrã.



Figura 6.62 – Aspeto do cenário do Pilar do LESE.

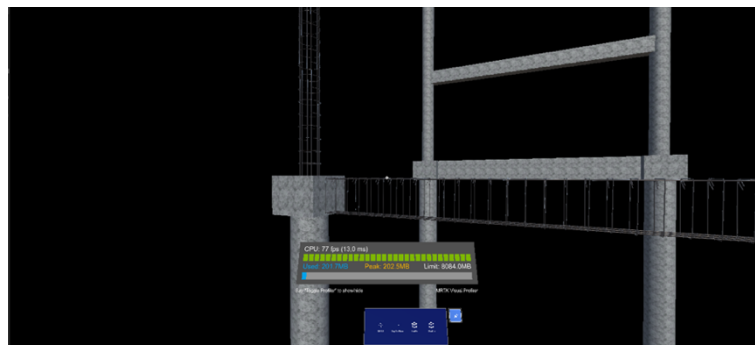


Figura 6.63 – Aspeto do cenário da Galeria da FEUP.

Um dos botões virtuais que surge no cenário do Pilar do LESE, nomeadamente o botão “Explode”, permite separar os vários elementos que compõem o modelo da estrutura. Dessa forma, o utilizador fica habilitado a observar, de forma mais fácil, modelos de geometria complexa e de grande pormenor. O aspeto do modelo separado pode ser verificado na Figura 6.64.

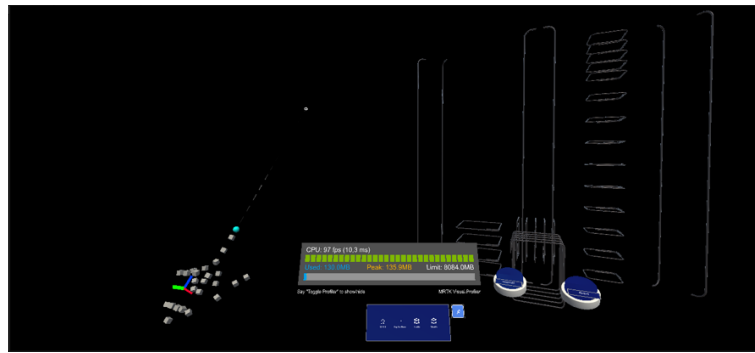


Figura 6.64 – Aspeto do modelo separado após selecionar o botão “Explode”.

Outra das funções apresentadas permite ao utilizador redimensionar o modelo. Para isso, basta selecionar o botão “Enable”, do Menu, onde irá surgir uma caixa de linhas brancas envolta do modelo, a qual o utilizador com as mãos em forma de pinça consegue interagir da forma que pretender. Para terminar esta função, basta selecionar o botão “Disable”, do Menu, fazendo com que a caixa de redimensionamento desapareça e o modelo assuma as novas propriedades estabelecidas pelo utilizador.

O funcionamento desta função pode ser verificada nas Figuras 6.65 e 6.66, correspondente a cada modelo.

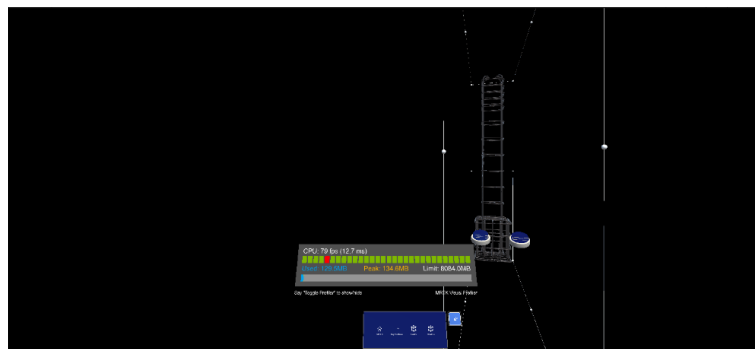


Figura 6.65 – Aspeto da caixa de redimensionamento do modelo do Pilar do LESE.



Figura 6.66 – Aspeto da caixa de redimensionamento do modelo da Galeria da FEUP.

Por fim, sempre que o modelo sair do campo de visão do utilizador, surge um seta orientada para o modelo, conforme se exemplifica na Figura 6.67, que irá direcionar o utilizador para a posição da estrutura no espaço.

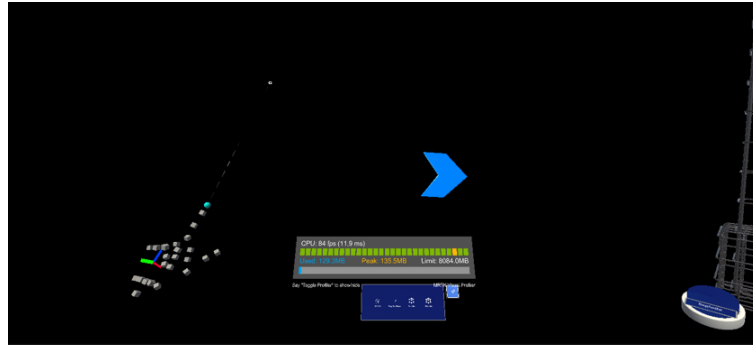


Figura 6.67 – Seta de indicação do modelo no espaço.

#### ▪ Módulo de Fiscalização

Este cenário, que vai ao encontro do desenvolvido na aplicação compatível com sistemas *Android*, permite ao utilizador verificar disposições de armaduras, em particular o espaçamento dos varões. Através da Figura 6.68, apresenta-se o aspeto do cenário criado, que contém as linhas de espaçamento e dois *sliders* de controlo, um para definir a sua direção e outro para definir a distância entre as linhas.

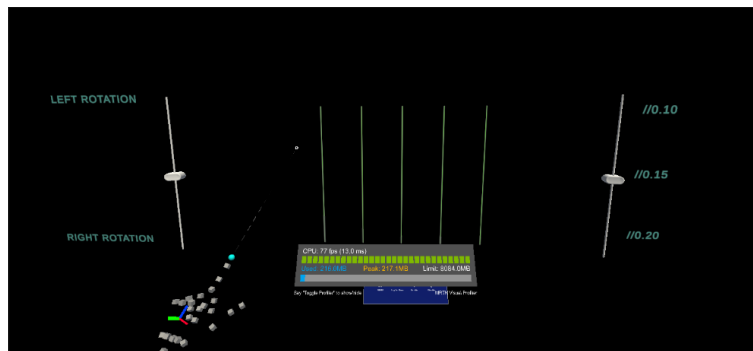


Figura 6.68 – Aspeto do cenário do módulo de fiscalização.

Nas Figuras 6.69 e 6.70, é possível observar que o utilizador ao selecionar a pega de cada um dos *sliders*, com a mão em forma de pinça, consegue arrastá-los e, assim, definir a posição que desejar para controlar as características de apresentação das linhas virtuais de espaçamento.

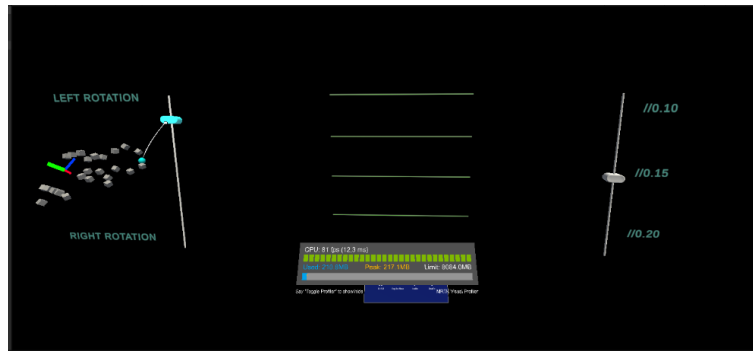


Figura 6.69 – Controlo do *slider* da rotação das linhas.

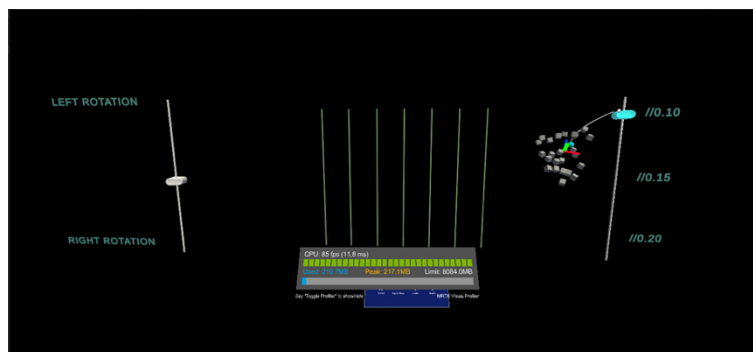


Figura 6.70 – Controlo do *slider* do espaçamento das linhas.

Apesar deste pacote de ferramentas ser bastante mais amplo do que o anterior, a atribuição de uma relação de escala e posição às linhas, à semelhança da aplicação *Android*, também não foi concretizada devido, não só à complexidade do processo, mas também à escassez de tempo. Contudo, o objetivo de demonstrar a aplicabilidade desta tecnologia nas diversas tarefas da construção foi alcançado.



# 7

## CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 7.1. CONCLUSÃO

Ao longo do percurso académico de um estudante de Engenharia Civil, pouco se ouve falar sobre a temática das tecnologias aplicadas ao setor da AEC, pelo que este tudo permitiu alargar bastante os meus conhecimentos teóricos e práticos.

Para este estudo, começou-se por abordar as principais anomalias que ocorrem em estruturas de betão armado e a sua origem, para de seguida analisar as várias técnicas de inspeção. O estudo deste tema tornou-se relevante, no sentido em que permitiu perceber, desde cedo, o tipo de tarefas que estão envolvidas num processo de inspeção e diagnóstico, para assim conseguir definir os objetivos a desenvolver na ferramenta criada no estudo de caso.

De seguida, foi tratada a temática do BIM, desde a sua definição de conceito, abordando o paradigma tecnológico do setor da construção e o surgimento do BIM, passando pelas vantagens e riscos da sua adoção e terminando, dessa forma, na normalização nacional e internacional em vigor. O estudo deste capítulo permitiu, de certa forma, compreender a complexidade desta metodologia mas, acima de tudo, perceber o seu elevado potencial para a indústria da AEC. Contudo, este setor permanece ainda preso a metodologias tradicionais e estratificadas, com pouca incorporação tecnológica, quer em obra, em gabinete e mesmo durante a fase de exploração de um edifício.

O tema da Realidade Aumentada foi seguidamente abordado de forma específica, mas também no conceito geral de Realidade Virtual *Continuum* a que pertence. Nesse sentido, iniciou-se com a sua definição de conceito e o valor que é capaz de criar nas várias fases de um processo de construção de um edifício para, a seguir, estudar os riscos e potencialidades a si inerentes. Esta é uma tecnologia recente para este setor, mas demonstra-se capaz de revolucionar a perceção de uma obra para os vários intervenientes, ao longo do processo de construção de um edifício, mas também capaz de mudar metodologias de trabalho através de ferramentas versáteis de auxílio em diversas tarefas.

Para ir ao encontro do tema proposto, elaborou-se um capítulo que incorpora estas duas tecnologias de forma uníssona. Isto significa encontrar uma ponte de interoperabilidade entre o BIM e a Realidade Aumentada para, através da sua tecnologia e de forma conjunta, serem capazes de auxiliar em tarefas de inspeção de estruturas de betão armado. Dessa forma, foram estudadas as potencialidades que podem ser criadas com recurso a esta aliança e, por fim, deter algumas considerações importantes do motor de jogo adotado para a criação da aplicação do estudo de caso, que opera conjuntamente com modelos BIM e Realidade Aumentada.

Como forma de demonstrar e colocar em prática as várias tecnologias estudadas, foi proposta a criação de uma ferramenta baseada em BIM e em RA, que fosse capaz de auxiliar tarefas de inspeção de estruturas de betão armado. A abordagem concebeu uma estrutura que inclui três módulos principais, inspeção, fiscalização e visualização, sendo que este último surge por via do módulo de inspeção.

As aplicações foram desenvolvidas através do motor de jogo *Unity*, que permite criar diferentes cenários e ambientes virtuais, sendo compatível com pacotes de ferramentas de Realidade Aumentada e Mista. Os modelos tridimensionais BIM criados, através do *Revit*, foram transferidos no formato de arquivo FBX, devido à sua interoperabilidade, sendo que o *Unity* não é compatível com o formato de arquivo BIM mais conhecido, o IFC. Dessa forma, não se torna possível transportar informação dos modelos entre os diferentes *softwares*, com exceção da geometria, textura, nome e conjuntos de elementos agrupados. Foram desenvolvidos diversos *scripts* que permitem aplicar funções aos cenários e aos objetos, com o objetivo de tornar as aplicações interativas e de lhes acrescentar valor, em termos de funcionalidade. Para tal, programou-se em linguagem C#, através do *Visual Studio*.

Este programa exige que o criador inicie do zero o desenvolvimento de cada cenário e que implemente uma série de detalhes e pacotes acessórios de ferramentas, não proporcionando uma base de começo sólida para utilizadores inexperientes. Após a construção da aplicação, esta apresenta bons gráficos, tendo-se revelado, de certa forma, limitada em termos de *performance*, muito relacionado com o elevado número de objetos inseridos. Contudo, tem a mais-valia de ser um programa livre e versátil, sendo capaz de construir aplicações compatíveis com diversos sistemas operativos.

Em conclusão, após o estudo realizado, verificamos que o crescimento da tecnologia e a sua integração na indústria da AEC é extremamente importante, no sentido em que ferramentas, como as baseadas em BIM e Realidade Aumentada, poderão marcar o futuro do setor, criando bases de trabalho mais sólidas e eficientes, levando a eventuais reduções de tempo dos processos, mas também de custos.

## **7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Para o desenvolvimento deste estudo, e dado que foram aplicados conceitos que não são abordados no programa de estudos do MIEC, foi necessário recorrer a diversos tutoriais, exigindo tempo, esforço e bastante trabalho autónomo.

No que respeita à ferramenta criada, sugere-se a exploração de outros pacotes de ferramentas de Realidade Aumentada, que permitam, de forma melhorada, a deteção de planos e de objetos de maiores dimensões, que irão servir como alvo de um modelo virtual. Com isso, poderá ser resolvido o problema do Módulo de Fiscalização, que impede a atribuição de uma relação de escala às linhas virtuais de espaçamento de varões. Também se espera uma melhoria da precisão na sobreposição desses objetos virtuais ao mundo real. Um dos pacotes de ferramentas sugerido é o *ARCore*.

Outra solução a investigar, poderá ser a experimentação da ancoragem de objetos a coordenadas reais, anulando, desta forma, a necessidade da utilização de *targets*. Isto permite que o utilizador navegue pelo espaço real e tenha acesso a um maior número de informação de forma contínua. Isto poderá ser concretizado através da modelação por nuvem de pontos georreferenciada. Por outro lado, esta solução poderá ser desenvolvida de forma mais simples na ferramenta de Realidade Mista, compatível com os *Hololens2* da *Microsoft*.

O potencial criativo da RA é bastante amplo e, por esse motivo, podem ser desenvolvidos diversos *interfaces* de ferramentas digitais de auxílio não só à inspeção, mas também à construção e à fiscalização. Como tal, poderá ser desenvolvida uma ferramenta de apoio que permita, em obra, realizar

o registo de uma série de parâmetros de conformidade de execução, através de caixas de texto e *checkboxes*, ou até mesmo de registo de anotações virtuais que se fixem ao modelo. Além disso, a ferramenta poderá alterar aspetos gráficos dos elementos que tenham sido sinalizados, como cor e textura, para que, conjuntamente com as informações adicionadas, se faça encaminhar para quem de direito, de forma simples e intuitiva.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Félix, M. *Inspeção e Diagnóstico de Edifícios de Betão Armado: Estudo e Aplicação a um Caso Prático*. Dissertação de Mestrado, ISEP, 2016.
- [2] <https://www.fib-international.org>.(05/05/2021)
- [3] Sousa, J. *Inspeção e Reabilitação de Estruturas segundo a NP EN 1504 – Caso de Obra*. Dissertação de Mestrado Integrado, FEUP, 2011.
- [4] Appleton, J. *Performance of Concrete Bridges in Portugal*. 1st Workshop DURATINET, LNEC. 19 de fevereiro de 2009, Lisboa.
- [5] Félix, C., Figueiras, J., LABEST. *Património em Betão: A Monitorização das Estruturas na Conservação do Património*. Construção Magazine, julho/agosto 2011, páginas 34 e 35, Publindústria, Porto.
- [6] Santos Silva, A., Monteiro, A., Pereira, E. *Estruturas de Betão: Técnicas de Inspeção e Diagnóstico*. Seminário DURATINET - LNEC, 26/11/2013, Lisboa.
- [7] Sousa, B. *Avaliação do desempenho de ancoragens para reabilitação e desenvolvimento de recomendações para integração em ambiente BIM*. Dissertação de Mestrado Integrado, FEUP, 2018.
- [8] Azhar, S. *Building Information Modeling (BIM): A new paradigm for visual Visual Interactive Modeling and Simulation for Construction Projects*. Construction, 2008.
- [9] The American Institute of Architects. *Integrated Project Delivery: A Guide*. Version 1, 2007.
- [10] Carmona, J., Irwin, K. *BIM: Who, What, How and Why*. FacilitiesNet, 2007.
- [11] Azhar, S. *Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks and Challenges for the AEC Industry*. Leadership and Management in Engineering, Vol. 11, Artgº 3, julho de 2011.
- [12] <https://redshift.autodesk.com/is-bim-increasing-your-roi/>. (11/05/2021)
- [13] Reizgevicus, M., Ustinovicus, L., Cibulskiene, D., Kutut, V., Nazarko, L. *Promoting Sustainability through Investment in Building Information Modeling (BIM) Technologies: A Design Company Perspective*. MDPI Journal - sustainability, 2018.
- [14] Azhar, S., Hein. M., Sketo, B. *Building Information Modeling (BIM): Benefits, Risks and Challenges*, 2007.
- [15] Thomson, D., Miner, R. *Building Information Modeling – BIM: Contractual Risks are Changing with Technology*, 2006.
- [16] Lee, G., Sacks, R., Eastman, CM. *Specifying parametric building object behaviour (BOB) for a building information modeling system*. Automation in Construction, 2006.
- [17] <https://www.iso.org/deliverables-all.html>. (12/05/2021)
- [18] Afsari, K., Eastman, CM. *A Comparison of Construction Classification Systems used for Classifying Building Product Models*, 52<sup>nd</sup> ASC Annual International Conference Proceedings, 2016.
- [19] <https://www.impic.pt/impic/pt-pt/iniciativas-estrategicas/pronic-protocolo-para-a-normalizacao-da-informacao-tecnica-na-construcao>. (12/05/2021)

- [20] European Commission. *Building Information Modelling in the EU construction sector*. European Construction Sector Observatory, março de 2019.
- [21] Pinho, S. *O Modelo IFC como Agente de Interoperabilidade: Aplicação ao domínio das estruturas*. Dissertação de Mestrado Integrado, FEUP, 2013.
- [22] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*, 2011.
- [23] Costa, T. *Aplicação de Metodologias BIM/VR no Betão Pré-fabricado*. Dissertação de Mestrado Integrado, UM - Escola de Engenharia, 2020.
- [24] Ustinovicus, L., Rasiulis, R., Nazarko, L., Vilutiene, T., Reizgevicus, M. *Innovative research projects in the field of building lifecycle management*, 2015.
- [25] Carvalho, P. *Análise Estatística do Estado de Implementação da Tecnologia BIM no Setor da Construção em Portugal*. Dissertação de Mestrado Integrado, FEUP, 2016.
- [26] Li, X., Yi, W., Chi, HL., Wang, X., Chan, APC. *A Critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety*. Automation in Construction, 2008.
- [27] Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., Kishino, F. *Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum*. SPIE, Telemanipulator and Telepresence Technologies, 1994.
- [28] Bamodu, O., Ye, XM. *Virtual Reality and Virtual Reality System Components*. Advanced Materials Research, 2013.
- [29] Behzadi, A. *Using Augmented and Virtual Reality Technology in the Construction Industry*, 2017.
- [30] Global Infrastructure Hub, *Augmented Reality and Virtual Reality for Training and Inspection*, 2020, <https://www.github.org/resources/showcase-projects/augmented-and-virtual-reality-for-training-and-inspection/>. (23/04/2021).
- [31] <https://www.indexarsolutions.com/services/augmented-reality-for-construction/>. (23/04/2021)
- [32] ArchDaily, *9 Tecnologias de Realidade Aumentada para a construção*, 2019, <https://www.archdaily.com.br/br/914441/8-tecnologias-de-realidade-aumentada-para-construcao>. (23/04/2021)
- [33] Hsu, HW., Hseh, SH. *Applying Augmented Reality Technique to Support On-site Rebar Inspection*. 36th ISARC, 2019.
- [34] Sidani, A., Dinis, F., Duarte, J., Sanhudo, L., Calvetti, D., Baptista, J., P. Martins, J., Soeiro, A. *Recent Tools and Techniques of BIM-Based Augmented Reality: A systematic Review*. FEUP, 2021.
- [35] Elshafey, A., Chang, S., Aminudin, B., Gheisari, M., Usmani, A. *Technology acceptance model for Augmented Reality and Building Information Modeling integration in the construction industry*. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), março de 2020, Vol. 25, pg. 161-172, Kumar B.
- [36] Pinho, F. *Norma BIM Portuguesa*. Dissertação de Mestrado Integrado, FCTUC, 2015.
- [37] <http://www.ct197.pt/index.php/bim-e-a-digitalizacao>. (25/05/2021).
- [38] <http://www.ct197.pt/index.php/homepage/visao-ct197>. (25/05/2021).
- [39] <https://fullscale.io/blog/what-is-game-engine/>. (02/06/2021).

- [40] <https://library.vuforia.com/articles/Training/getting-started-with-vuforia-in-unity.html>. (27/05/2021).
- [41] Wilkinson, P. *BIM: Na Overview, 2012*. <https://pt.slideshare.net/EEPaul/cimcig-bim-conference>. (06/06/2021).
- [42] World Economic Forum. *Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology*, Maio 2016.
- [43] <https://spbim.com.br/o-que-e-lod/>. (06/06/2021).
- [44] Elliot, D. *3D BIM Modeling: BIM – Level of Detail and Model Progression Specification*. Trimble Constructible, 2017. <https://constructible.trimble.com/construction-industry/3d-bim-modeling-level-of-detail-and-model-progression-specification>. (06/06/2021).
- [45] Sousa Coutinho, J. *Materiais de Construção 1*, FEUP.
- [46] Rasheeduzzafar, A.S., Al-Saadoun. *Influence of construction practices on concrete durability*, ACI Material Journal.
- [47] Félix, C., Rodrigues, C., Faria, R., Figueiras, J. *Monitorização na Construção e na Conservação de Obras de Arte*, 2012.
- [48] Albergaria, B. *Inspeção e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado*. Dissertação de Mestrado, ISEP, 2013.
- [49] EN ISO 19650-1. *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 1: Concepts and principles*. BSI Standards Publication, 2018.
- [50] EN ISO 19650-2. *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 2: Delivery phase of the assets*. BSI Standards Publication, 2018.

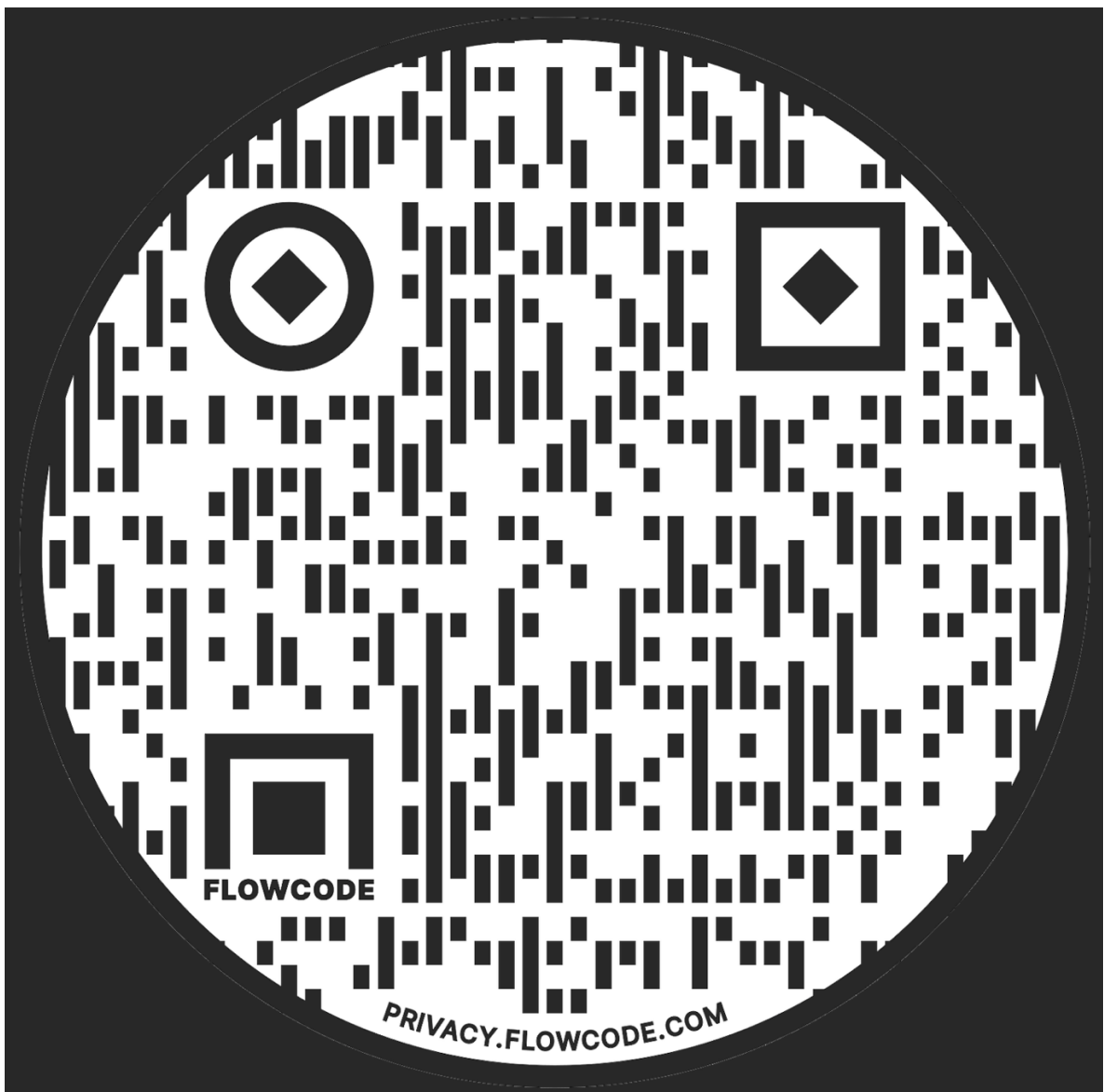


# **ANEXOS**



# A1

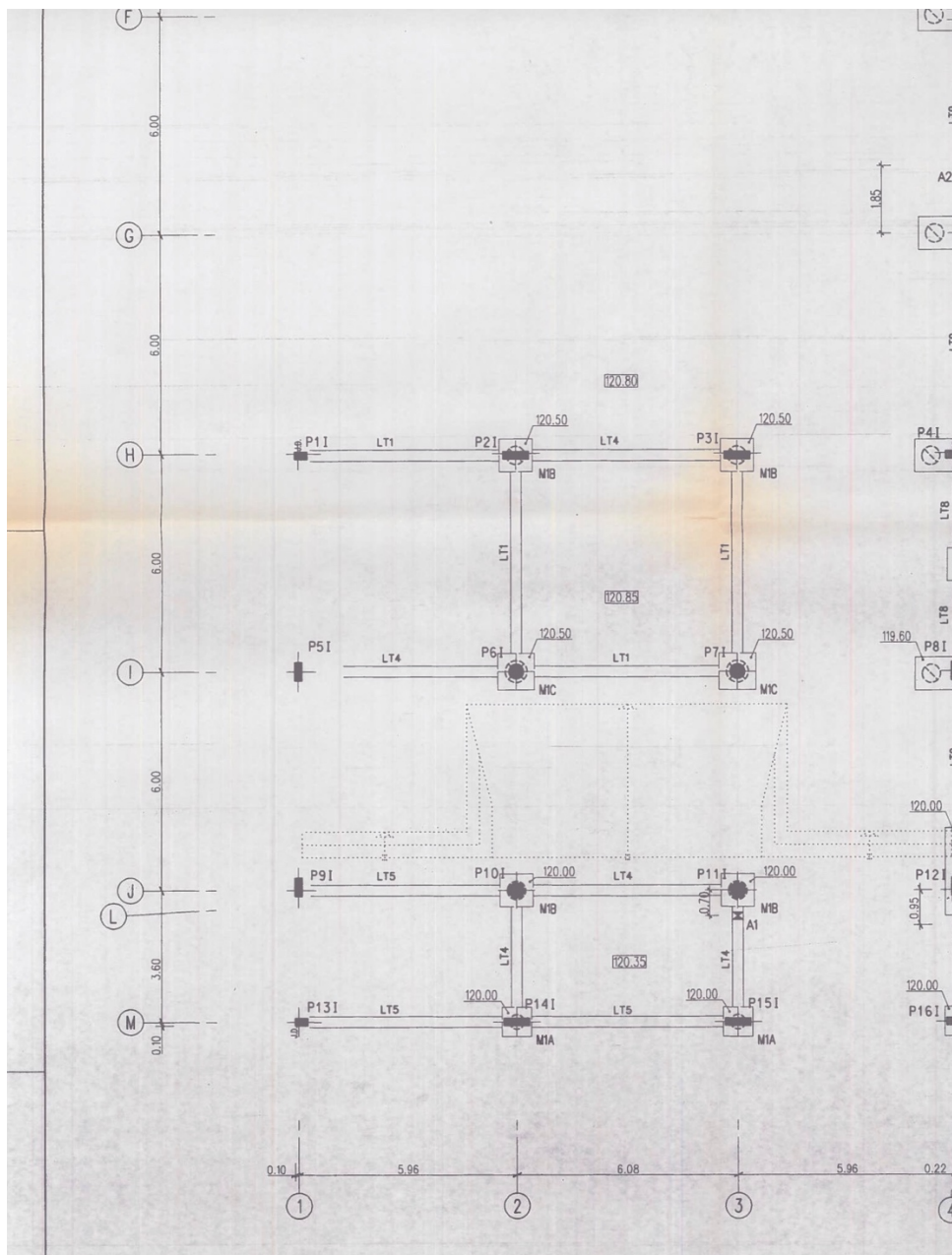
## TARGET DOS MODELOS DE REALIDADE AUMENTADA: CÓDIGO QR

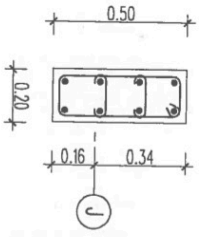
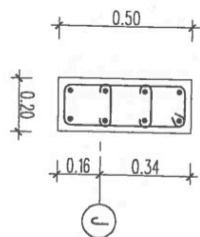
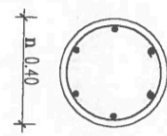
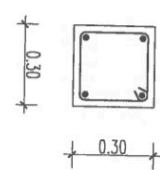
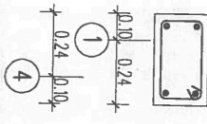





# A2

## DOCUMENTOS DO SERVIÇO DE ARQUIVO DA FEUP: ELEMENTOS ESTRUTURAIS DA GALERIA ENTRE OS EDIFÍCIOS F E G



FUNDAÇÃO AO PISO 2	PISO 2 AO PISO 3	
 <p>8φ16 3xφ6//0.20</p>	 <p>8φ12 3xφ6//0.15</p>	P9I = P12I
 <p>6φ16 φ6//0.20</p>	 <p>4φ16 φ6//0.20</p>	P6I = P7I = P10I = P11I
 <p>4φ16 φ6//0.20</p>		P13I =

