

MODELAÇÃO PARAMÉTRICA BIM PARA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

MIGUEL COSTA E SILVA

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

Orientador: Professor João Pedro da Silva Poças Martins

JULHO DE 2025

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@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

✉ 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 em Engenharia Civil – 2024/2025 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2025*

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.

Aos meus pais e à minha avó Cândida,

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação representa o culminar de uma etapa marcante da minha vida académica e pessoal, que só foi possível graças ao apoio, orientação e colaboração de várias pessoas e entidades, às quais expresso aqui a minha profunda gratidão.

Aos meus pais, o mais sincero agradecimento por todo o apoio incondicional, incentivo e confiança depositados em mim ao longo de todo o percurso. A vossa presença constante foi essencial para ultrapassar os desafios e alcançar este objetivo.

Ao Professor Doutor João Pedro da Silva Poças Martins, meu orientador, agradeço pela orientação rigorosa, disponibilidade permanente e pelas contribuições científicas que enriqueceram profundamente este trabalho. A sua exigência, aliada à confiança demonstrada, foi determinante para a evolução do projeto.

Ao Engenheiro José Manuel Martins Ferreira dos Santos, orientador na empresa Garcia Garcia, agradeço pela disponibilidade, atenção e pelas sugestões construtivas partilhadas ao longo do estágio, que permitiram estabelecer uma ligação eficaz entre o trabalho académico e o contexto profissional.

Ao Engenheiro Diogo Filipe Ramos Parracho, um agradecimento sincero pelo apoio incansável, pela atenção aos detalhes e pela forma dedicada como acompanhou todo o processo. A sua ajuda ultrapassou largamente o exigido, sendo para mim uma referência de profissionalismo e generosidade.

Agradeço ainda à empresa Garcia Garcia, S.A., pela abertura e apoio prestado durante o estágio curricular, nomeadamente pela disponibilização dos modelos digitais e informação técnica, que foram essenciais para a aplicação prática da metodologia desenvolvida.

A todos os que, de forma direta ou indireta, contribuíram para esta etapa, deixo o meu sincero obrigado.

Resumo

A crescente preocupação com os impactos ambientais da construção civil tem impulsionado a adoção de abordagens sustentáveis, entre as quais se destaca a Análise do Ciclo de Vida (ACV). Neste contexto, a presente dissertação teve como objetivo principal avaliar a aplicabilidade da metodologia ACV em contexto real de projeto, promovendo a integração entre modelos digitais desenvolvidos em ambiente *Building Information Modeling* (BIM) e plataformas especializadas de análise ambiental.

O estudo centrou-se na aplicação prática da ACV a um edifício industrial, com base em modelos digitais desenvolvidos em ambiente Autodesk Revit. A estratégia metodológica adotada foi estruturada em três abordagens distintas: método expedito com base na agregação de materiais genéricos, método detalhado com importação via ficheiro Excel, e método detalhado com importação via formato IFC. Nos dois métodos detalhados, recorreu-se à plataforma One Click LCA para a quantificação da pegada de carbono associada à fase de construção. Já no método expedito, a estimativa foi realizada de forma simplificada, através da atribuição direta de coeficientes médios de emissão de carbono por grupo de materiais, com base em categorias genéricas e sem ligação a bases de dados externas.

A análise comparativa das abordagens permitiu constatar que os métodos detalhados conduzem a estimativas mais elevadas de emissões de carbono, mas também mais fiáveis e próximas da realidade, devido à maior granularidade de dados e integração com Declarações Ambientais de Produto (DAP) específicas. Ainda assim, o método expedito revelou-se eficaz em fases iniciais de projeto, fornecendo estimativas indicativas úteis quando suportado por modelos BIM consistentes. As diferenças entre os resultados obtidos evidenciam o impacto da profundidade da informação modelada na precisão da avaliação ambiental.

A dissertação evidenciou também o papel central da modelação paramétrica BIM na viabilização de fluxos automatizados de ACV. A extração de dados através de rotinas em Dynamo e a parametrização rigorosa dos elementos modelados revelaram-se essenciais para garantir a qualidade e a interoperabilidade da informação. Verificou-se que os materiais estruturais, nomeadamente o betão e o aço, concentram a maioria do impacto ambiental, sobretudo nos módulos A1-A3, correspondentes à fase de produção e transporte de materiais.

No que respeita à interoperabilidade, a análise demonstrou que o formato IFC (*Industry Foundation Classes*) constitui uma alternativa viável à importação por Excel, embora persistam algumas limitações ao nível das unidades de medição e do mapeamento automático de materiais. A integração plena entre ferramentas requer, portanto, não apenas boas práticas de modelação, mas também a padronização de processos e a utilização de classificações uniformizadas como o Uniclass 2015.

Em síntese, conclui-se que a integração entre BIM e ACV é tecnicamente viável e representa uma oportunidade concreta para promover a sustentabilidade no setor da construção. A adoção de metodologias padronizadas, a sensibilização das equipas de projeto e a aposta em ferramentas interoperáveis são passos fundamentais para consolidar esta abordagem em contexto profissional.

PALAVRAS-CHAVE: Análise do Ciclo de Vida, Sustentabilidade, Building Information Modeling, Interoperabilidade, Pegada de Carbono

ABSTRACT

The growing concern about the environmental impacts of the construction industry has driven the adoption of sustainable approaches, among which Life Cycle Assessment (LCA) stands out. In this context, the main objective of this dissertation was to assess the applicability of the LCA methodology in a real-world project, promoting the integration between digital models developed in a Building Information Modeling (BIM) environment and specialized environmental analysis platforms.

The study focused on the practical application of LCA to an industrial building, based on digital models developed using Autodesk Revit. The adopted methodological strategy was structured into three distinct approaches: a simplified method based on the aggregation of generic materials, a detailed method using Excel file import, and a detailed method using IFC file import. For the two detailed methods, the One Click LCA platform was used to quantify the carbon footprint associated with the construction phase. In the simplified method, the estimation was performed manually, through the direct assignment of average carbon emission factors to material groups, based on generic categories and without connection to external databases.

The comparative analysis of the approaches showed that the detailed methods lead to higher carbon emission estimates, but also more reliable and realistic ones, due to the greater data granularity and the integration of specific Environmental Product Declarations (EPDs). Nevertheless, the simplified method proved effective in early design phases, providing indicative estimates when supported by consistent BIM models. The differences in the obtained results highlight the influence of the depth of modeled information on the accuracy of the environmental assessment.

The dissertation also demonstrated the central role of parametric BIM modeling in enabling automated LCA workflows. Data extraction through Dynamo routines and rigorous parameterization of modeled elements proved essential to ensure data quality and interoperability. It was found that structural materials, particularly concrete and steel, accounted for the majority of the environmental impact, especially in modules A1-A3, corresponding to the production and transportation phases.

Regarding interoperability, the analysis showed that the IFC format is a viable alternative to Excel import, although some limitations remain concerning measurement units and the automatic mapping of materials. Full integration between tools therefore requires not only good modeling practices but also standardized processes and the use of uniform classification systems such as Uniclass 2015.

In summary, it is concluded that the integration of BIM and LCA is technically feasible and represents a concrete opportunity to promote sustainability in the construction sector. The adoption of standardized methodologies, the awareness of design teams, and the investment in interoperable tools are fundamental steps towards consolidating this approach in professional practice.

KEYWORDS: Life Cycle Assessment, Sustainability, Building Information Modeling, Interoperability, Carbon Footprint

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice Geral	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Símbolos, Acrónimos e Abreviaturas	xv
1.INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura	2
2.ESTADO DE ARTE	3
2.1. Sustentabilidade	3
2.1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	3
2.1.2. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	5
2.1.3. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL	6
2.2. Análise do Ciclo de Vida	7
2.2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA	7
2.2.2. ABORDAGENS CICLO DE VIDA E MÓDULOS DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA	8
2.2.2.1. Metodologia de Análise de Ciclo de Vida	8
2.2.2.2. Módulos e abordagens de Análise de Ciclo de Vida	9
2.3. Relação entre ACV e Avaliação da Sustentabilidade e Sistemas de Certificação	11
2.3.1. ANÁLISE CICLO DE VIDA PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE	11
2.3.2. SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE	12
2.3.2.1. Sistemas Internacionais de Certificação da Sustentabilidade na Construção	12
2.3.2.2. BREEAM	13
2.4. BIM	15
2.4.1. CONCEITOS E BENEFÍCIOS	15
2.4.2. OPEN BIM	18
2.4.3. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO	19

2.5. BIM para ACV e avaliação da sustentabilidade	20
2.5.1. AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE COM BIM.....	20
2.5.2. FERRAMENTAS BIM PARA ACV	21
2.5.3. RELAÇÃO BIM – ACV.....	24
 3.EMPRESA DE ACOLHIMENTO E CASO DE ESTUDO	 29
3.1. Introdução.....	29
3.2. Empresa de Acolhimento	29
3.3. Obra Caso de Estudo	31
 4.METODOLOGIA	 37
4.1. Introdução.....	37
4.2. Etapa 1 - Extração automática de dados para ACV.....	38
4.2.1. ANÁLISE DOS MODELOS REVIT	39
4.2.2. CRIAÇÃO DE TABELAS POR TIPO DE MATERIAL, CATEGORIA E ESPECIALIDADE.....	40
4.2.3. CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O UNICLASS 2015	41
4.2.4. ELABORAÇÃO DE UMA TABELA EXCEL QUE FAZ LIGAÇÃO ENTRE UNICLASS 2015, <i>BREEAM CLASS – MAT01</i> E <i>BREEAM LOCATION – MAT03</i>	42
4.2.5. CRIAÇÃO DE CÓDIGO DYNAMO: ATRIBUI CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE MATERIAL, RESPETIVO COEFICIENTE DE CARBONO, <i>BREEAM CLASS – MAT01</i> E <i>BREEAM LOCATION – MAT03</i>	45
4.2.6. CONVERSÃO DE UNIDADES PARA QUILOGRAMAS (KG).....	49
4.3. Etapa 2 - Método Expedito	52
4.3.1. CLASSIFICAÇÃO DA QUANTIDADE DE KG CO2 EQ/KG POR TIPO DE MATERIAL	52
4.3.2. ESTIMATIVA DA PEGADA DE CO2 (KG CO2 EQ/KG).....	53
4.3.3. EXPORTAÇÃO DOS DADOS PARA A FERRAMENTA POWER BI.....	54
4.4. Etapa 3 – Método Detalhado: One Click LCA (Excel)	55
4.4.1. EXPORTAÇÃO DOS DADOS PARA O FICHEIRO EXCEL BASE DE IMPORTAÇÃO DO ONE CLICK LCA	57
4.4.2. CLASSIFICAÇÃO DE CADA ITEM MEDIANTE <i>BREEAM CLASS – MAT01</i>	58
4.4.3. DEFINIÇÃO DA CLASS SEGUNDO A <i>BREEAM CLASS – MAT01</i>	58
4.4.4. DEFINIÇÃO DOS QUILOMETROS DE TRANSPORTE REALIZADOS	59
4.4.5. IMPORTAÇÃO PARA A PLATAFORMA ONE CLICK LCA	60
4.5. Etapa 4 – Método Detalhado: One Click LCA (IFC).....	69
4.5.1. EXPORTAÇÃO DE FICHEIRO EM FORMATO IFC DA PLATAFORMA REVIT	69
4.5.2. IMPORTAÇÃO DO FICHEIRO EM FORMATO IFC NA PLATAFORMA ONE CLICK LCA	71

5.RESULTADOS.....	75
5.1. Método Expedito	75
5.2. Método Detalhado: One Click LCA (Excel).....	76
5.3. Método Detalhado: One Click LCA (IFC)	78
5.4. Comparação dos métodos	79
 6.CONCLUSÕES	 83
6.1. Conclusões	83
6.2. Propostas de Melhoria.....	84
6.3. Desenvolvimentos Futuros	86
 7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 87
 8.ANEXOS	 95
A1. Códigos Dynamo.....	97
A1.1. ROTINA EM DYNAMO PARA IDENTIFICAR ELEMENTOS EM BETÃO COM "BET" NO PARÂMETRO TYPE COMMENTS	98
A1.2. ATRIBUIÇÃO DO MATERIAL "CONCRETE OR CEMENTITIOUS" E DO RESPETIVO COEFICIENTE DE CARBONO A ELEMENTOS EM BETÃO.....	99
A1.3. ATRIBUIÇÃO DOS PARÂMETROS <i>BREEAM CLASS - MAT01</i> E <i>BREEAM LOCATION - MAT03</i> , COM BASE NA CORRESPONDÊNCIA ENTRE A CLASSIFICAÇÃO UNICLASS 2015 (EF) E OS DADOS IMPORTADOS DE FICHEIRO EXCEL.....	100
A2. Distribuição da pegada de carbono por materiais	101
A2.1. ESPECIALIDADE DE ESTRUTURAS.....	102
A2.2. ESPECIALIDADE DE HIDRÁULICA.....	103
A2.3. ESPECIALIDADE DE REDES ELÉTRICAS	104
A2.4. ESPECIALIDADE DE MECÂNICA	105
A2.5. ESPECIALIDADE DE ARQUITETURA.....	106
A2.6. ESPECIALIDADE DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação dos três pilares do desenvolvimento sustentável: social, económico e ambiental [32].	5
Figura 2 - Módulos de Análise de Ciclo de Vida [53].	9
Figura 3 - Abordagens de Análise de Ciclo de Vida [56].	10
Figura 4 - Escala de classificação do sistema BREEAM e respetivas pontuações percentuais mínimas associadas a cada nível de desempenho ambiental [73].	14
Figura 5 - Selo oficial BREEAM [73].	15
Figura 6 - Dimensões BIM [80].	16
Figura 7 - Ferramentas compatíveis com o One Click LCA [116].	23
Figura 8 - Dados da empresa de acolhimento atualizados no ano 2022 [120].	30
Figura 9 - Modelo de trabalho da empresa de acolhimento [120].	30
Figura 10 - Alçado Oeste da construção.	31
Figura 11 - Planta de fundações do edifício extraída do modelo de estruturas.	32
Figura 12 - Modelo de estruturas.	32
Figura 13 - Modelo de arquitetura.	33
Figura 14 - Modelo de hidráulica.	33
Figura 15 - Modelo de mecânica.	33
Figura 16 - Modelo de redes elétricas.	34
Figura 17 - Modelo de sistemas de segurança contra incêndios.	34
Figura 18 - Mapa de quantidades das vigas metálicas de fachada (madres), extraído do modelo BIM.	34
Figura 19 - Fluxograma da metodologia utilizada na presente dissertação.	37
Figura 20 - Análise das categorias modeladas no Revit, no projeto de estruturas.	39
Figura 21 - Tabelas material takeoffs referentes à categoria "walls" da especialidade de arquitetura.	40
Figura 22 - Tabelas referentes às categorias da especialidade de estruturas.	41
Figura 23 - Exemplo de classificação de elementos segundo o sistema Uniclass 2015, com identificação do elemento funcional (EF), do sistema (SS) e do produto (PR) aplicados a tubagens do sistema de abastecimento de água.	41
Figura 24 - Visualização da base de dados do sistema Uniclass 2015 no ambiente do add-in Autodesk Interoperability Tools, onde é apresentada a estrutura hierárquica da Tabela EF (Elementos Funcionais).	42
Figura 25 - Excerto da tabela de correspondência entre a classificação Uniclass 2015 (EF) e as categorias ambientais BREEAM: Class – MAT01 e BREEAM Location – MAT03.	45
Figura 26 - Parâmetros partilhados criados no Revit para integração da informação ambiental no modelo.	46
Figura 27 - Representação esquemática da hierarquia de elementos no Revit: categoria, família, tipo e instância, exemplificada com colunas estruturais [122].	46
Figura 28 - Rotina em Dynamo para identificar elementos em betão com "BET" no parâmetro Type Comments.	48
Figura 29 - Atribuição do material "Concrete or cementitious" e do respetivo coeficiente de carbono a elementos em betão.	48
Figura 30 - Atribuição dos parâmetros BREEAM Class - MAT01 e BREEAM Location - MAT03, com base na correspondência entre a classificação Uniclass 2015 (EF) e os dados importados de ficheiro Excel.	49
Figura 31 - Fluxograma explicativo do processo de conversão de unidades.	50
Figura 32 - Exemplo de parâmetro personalizado "MP-EST-M-Weight" no modelo de estruturas, representando a massa por metro linear (kg/m) de um perfil metálico.	50
Figura 33 - Exemplo de uma ficha técnica de uma unidade de recuperação de calor, com informação sobre a conversão para quilogramas.	51
Figura 34 - Definição de um parâmetro calculado no Revit para estimativa da massa (kg), com base no volume do elemento e no peso volúmico do material.	52

Figura 35 - Criação de parâmetro calculado no Revit	53
Figura 36 - Interface do add-in Diroots One - SheetLink, com a seleção de tabelas por categoria na especialidade de estruturas e os respetivos parâmetros configurados para exportação para Excel.	54
Figura 37 - Atribuição manual das DAP aos elementos do modelo Revit no add-in do One Click LCA.....	56
Figura 38 - E-mail de resposta do suporte técnico do One Click LCA	57
Figura 39 - Excerto do ficheiro Excel preparado para importação no One Click LCA	60
Figura 40 - Criação de uma versão do projeto na plataforma One Click LCA.....	61
Figura 41 - Etapa 1 do processo de importação do ficheiro Excel	61
Figura 42 - Etapa 2 do processo de importação do ficheiro Excel	62
Figura 43 - Etapa 3 do processo de importação do ficheiro Excel	62
Figura 44 - Etapa 4 do processo de importação do ficheiro Excel	63
Figura 45 - Etapa 5 do processo de importação do ficheiro Excel	63
Figura 46 - Etapa 6 do processo de importação do ficheiro Excel	64
Figura 47 - Seleção da DAP de betão C30/37 para Portugal.....	65
Figura 48 - Detalhe técnico da DAP escolhida.....	65
Figura 49 - Consumos anuais de energia	66
Figura 50 - Utilização da água considerando usos típicos, de acordo com [126].....	67
Figura 51 - Consumo de água anual.....	67
Figura 52 - Operações no estaleiro de obra.....	68
Figura 53 - Área de construção.....	69
Figura 54 - Período de cálculo	69
Figura 55 - Diferentes versões do formato IFC	70
Figura 56 - Primeira etapa do processo de importação do ficheiro IFC	71
Figura 57 - Segunda etapa do processo de importação do ficheiro IFC	72
Figura 58 - Tentativa de mapeamento de um detetor de movimento na plataforma One Click LCA.....	73
Figura 59 - Especificações da DAP do detetor de movimento	73
Figura 60 - Estimativa da pegada de carbono do caso de estudo	75
Figura 61 - Valor da pegada de carbono.....	77
Figura 62 - Distribuição percentual da pegada de carbono entre os diferentes módulos da ACV	77
Figura 63 - Distribuição percentual do uso de materiais por categoria estrutural.....	78
Figura 64 - Valor da pegada de carbono.....	78
Figura 65 - Distribuição percentual da pegada de carbono entre os diferentes módulos da ACV	79
Figura 66 - Distribuição percentual do uso de materiais por categoria estrutural.....	79
Figura 67 - Comparação entre os dois métodos detalhados utilizados	81
Figura 68 - Vista ampliada da rotina Dynamo para identificação de elementos em betão	98
Figura 69 - Vista ampliada da rotina Dynamo para definição automatizada do material “Concrete or cementitious” e respetivo coeficiente de carbono.....	99
Figura 70 - Vista ampliada da rotina Dynamo para atribuição dos parâmetros BREEAM Class – MAT01 e BREEAM Location - MAT03 com base na correspondência entre a classificação Uniclass 2015 e dados importados do Excel	100
Figura 71 - Estimativa da pegada de carbono do modelo de estruturas	102
Figura 72 - Estimativa da pegada de carbono do modelo de hidráulica.....	103
Figura 73 - Estimativa da pegada de carbono do modelo de redes elétricas.....	104
Figura 74 - Estimativa da pegada de carbono do modelo de mecânica.....	105
Figura 75 - Estimativa da pegada de carbono do modelo de arquitetura	106
Figura 76 - Estimativa da pegada de carbono do modelo de segurança contra incêndios	107

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de ferramentas digitais para integração entre BIM e ACV.....	24
Tabela 2 - Principais problemas e desafios na integração de dados entre BIM e ACV [117].	25
Tabela 3 - Comparação das principais vantagens e limitações identificadas nos estudos analisados sobre a integração entre BIM e ACV.	27
Tabela 4 - BREEAM Class - MAT01	43
Tabela 5 - BREEAM Location - MAT03	44
Tabela 6 - Correspondência entre as classificações BREEAM Class – MAT01 e BREEAM Location – MAT03. ..	44
Tabela 7 - Tabela de correspondência entre tipos de materiais e os respectivos coeficientes de carbono (kg CO ₂ eq/kg) [123].	47
Tabela 8 - Valores de peso volúmico considerados para os materiais principais [123].	51
Tabela 9 Relação entre classificação BREEAM Class - MAT01 e CLASS	59
Tabela 10 - Comparação do número de elementos reconhecidos na importação do modelo de estruturas em diferentes formatos IFC na plataforma One Click LCA	70
Tabela 11 - Análise comparativa dos três métodos considerando o âmbito A1–A3 (produção dos materiais).	80
Tabela 12 - Comparação entre os métodos detalhados considerando o âmbito “cradle to grave” (A1–A4, B4–B5, C1–C4).	81

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

kg - Quilograma

kgCO₂eq - Quilograma de dióxido de carbono equivalente

m - Metro

m² - Metro quadrado

m³ - Metro cúbico

ml - Metro linear

un - Unidade

ACV - Análise do Ciclo de Vida

AEC - Arquitetura, Engenharia e Construção

BEM - *Building Energy Modeling*

BEP - *BIM Execution Plan*

BIM - *Building Information Modeling*

BRE - *Building Research Establishment*

BREEAM - *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*

BCF - *BIM Collaboration Format*

bSDD - *buildingSMART Data Dictionary*

CICS - *Construction Information Classification Systems*

DAP - Declarações Ambientais de Produto

EIR - *Exchange Information Requirements*

EPDs - *Environmental Product Declarations*

ICE - *Inventory of Carbon and Energy*

IBU - *Institut Bauen und Umwelt*

ILCD - International Reference Life Cycle Data System

IDS - *Information Delivery Specification*

IDM - *Information Delivery Manual*

IFC - *Industry Foundation Classes*

ISO - International Organization for Standardization

LCI - *Life Cycle Inventory*

LCIA - *Life Cycle Impact Assessment*

LCA - *Life Cycle Assessment*

LEED - *Leadership in Energy and Environmental Design*

LOD - *Level of Development*

LOIN - *Level of Information Need*

MVDs - *Model View Definitions*

MTQ - Mapa de Trabalhos e Quantidades

NBS - *National Building Specification*

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

PCR - *Product Category Rules*

RCP - Regras para Categoria de Produtos

SBTool. - *Sustainable Building Tool*

S-LCA - *Social Life Cycle Assessment*

SECClasS - Sistema de Estruturação da Classificação na Construção Sustentável

SO-LCA - *Socio-Economic Life Cycle Assessment*

UE – União Europeia

WCED - *World Commission on Environment and Development*

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O setor da construção tem vindo a assumir um papel de destaque no debate sobre a sustentabilidade ambiental, sendo responsável por uma parte significativa do consumo de recursos naturais, produção de resíduos e emissões de gases com efeito de estufa [1, 2]. A crescente consciencialização em torno das alterações climáticas e da escassez de recursos tem vindo a impulsionar a necessidade de práticas mais sustentáveis em todas as fases do ciclo de vida dos edifícios [3].

Neste contexto, a integração de metodologias de Análise do Ciclo de Vida (ACV) na fase de projeto surge como uma abordagem fundamental para quantificar e minimizar os impactos ambientais associados às decisões construtivas. A ACV permite analisar, de forma sistemática, os impactos ambientais de um edifício desde a extração das matérias-primas até ao seu fim de vida, possibilitando uma comparação objetiva entre soluções construtivas e materiais alternativos [4].

Paralelamente, o desenvolvimento e disseminação da metodologia *Building Information Modeling* (BIM) veio introduzir uma nova dimensão no processo de conceção, planeamento e gestão de edifícios, permitindo uma modelação digital paramétrica que agrega informação técnica relevante desde as fases iniciais do projeto. A integração entre BIM e ACV permite automatizar e otimizar os processos de recolha e análise de dados, promovendo uma abordagem mais rigorosa e eficiente à sustentabilidade ambiental na construção [5, 6].

A presente dissertação insere-se nesta convergência entre sustentabilidade e digitalização, procurando avaliar a aplicabilidade da metodologia de ACV suportada por modelos BIM, com base num caso de estudo real. O trabalho desenvolvido explora a extração de dados a partir de modelos digitais, a aplicação de diferentes métodos de ACV, e a análise crítica dos resultados obtidos, contribuindo para uma reflexão sobre os desafios e potencialidades da integração entre estas duas áreas emergentes no setor da construção.

1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo da presente dissertação consiste em avaliar a aplicabilidade da metodologia de ACV suportada por modelos digitais desenvolvidos em BIM, no contexto da análise ambiental de edifícios em fase de projeto. Pretende-se demonstrar como a integração entre BIM e ACV pode contribuir para uma tomada de decisão mais informada e sustentável, através da quantificação dos impactos ambientais associados às soluções construtivas adotadas.

Para concretizar este objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Atualizar e parametrizar a meta-informação da biblioteca existente da empresa Garcia Garcia, S.A., garantindo a compatibilidade com o cálculo da pegada de carbono na plataforma *One Click LCA*;
- Elaborar um mapa de quantidades interoperável com a plataforma de cálculo de pegada de carbono e obter uma estimativa com uma margem de erro inferior a 20%;
- Explorar o potencial do BIM como ferramenta de suporte à extração automática de dados relevantes para a ACV, nomeadamente quantidades, materiais e propriedades associadas;
- Aplicar e comparar diferentes métodos de ACV a um caso de estudo real, incluindo um método expedito e dois métodos detalhados com recurso à plataforma *One Click LCA*;
- Analisar criticamente os resultados obtidos, identificando as principais fontes de variação entre métodos e os desafios associados à interoperabilidade entre modelos BIM e ferramentas de ACV;
- Propor recomendações para a melhoria dos modelos BIM com vista à sua utilização futura em análises ambientais de forma eficiente e fiável;
- Contribuir para o cumprimento do índice de compras responsáveis estabelecido pelos critérios da certificação ambiental BREEAM.

A concretização destes objetivos permitirá contribuir para o avanço do conhecimento na integração entre metodologias digitais e ferramentas de sustentabilidade no setor da construção, alinhando-se com as diretrizes europeias para a descarbonização do ambiente construído e com as exigências crescentes de desempenho ambiental dos edifícios.

1.3. ESTRUTURA

A presente dissertação está organizada em seis capítulos principais, complementados por anexos que reúnem elementos de apoio e resultados detalhados.

O Capítulo 1 apresenta o enquadramento da temática, os objetivos da investigação e a estrutura geral do trabalho.

O Capítulo 2 desenvolve a revisão da literatura, abordando os principais conceitos associados à sustentabilidade na construção, a metodologia de ACV, a modelação em ambiente BIM e a sua integração com ferramentas de análise ambiental.

No Capítulo 3, é apresentada a empresa de acolhimento Garcia Garcia, S.A., bem como o edifício selecionado como caso de estudo, caracterizando a obra e os dados disponíveis para aplicação prática da metodologia.

O Capítulo 4 descreve a metodologia adotada, com especial enfoque na preparação e parametrização do modelo BIM, na extração de dados e na aplicação dos diferentes métodos de ACV considerados.

O Capítulo 5 apresenta os resultados da aplicação prática da metodologia ao caso de estudo, comparando os diferentes métodos de ACV quanto à pegada de carbono, fases do ciclo de vida e tipologias de elementos.

Por fim, o Capítulo 6 sintetiza as principais conclusões obtidas e propõe melhorias para a prática futura.

2

ESTADO DE ARTE

2.1. SUSTENTABILIDADE

2.1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os problemas ambientais tornaram-se um assunto de interesse global, observando-se um crescimento da consciência para com estes problemas. O conceito de sustentabilidade, tal como é entendido hoje, resulta de uma evolução histórica complexa, marcada por mudanças no pensamento ambiental, social e económico ao longo das últimas décadas. A sustentabilidade emergiu como resposta aos impactos ambientais e sociais causados pelo modelo de desenvolvimento industrial, destacando-se como um paradigma alternativo que visa conciliar crescimento económico, equidade social e preservação ambiental [7]. A origem moderna do conceito remonta à década de 1970, quando se intensificaram os debates globais sobre os limites do crescimento e os impactos negativos da exploração desenfreada dos recursos naturais. A publicação do relatório do Clube de Roma, *“The Limits to Growth”* (1972) [8], foi um dos primeiros alertas estruturados sobre a insustentabilidade dos padrões de consumo e produção dominantes. Este relatório analisava as interações entre população, produção agrícola, industrialização e esgotamento dos recursos naturais, prevendo cenários alarmantes caso não fossem adotadas mudanças estruturais [7, 9]. Foi, no entanto, durante a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizada em Estocolmo, em 1972, que o termo "sustentabilidade" ganhou maior visibilidade internacional. Esta conferência representou o primeiro esforço político coordenado para tratar questões ambientais à escala global, culminando na Declaração de Estocolmo, a qual sublinhava a necessidade de equilibrar desenvolvimento e preservação ambiental [10]. O conceito ganhou uma definição mais estruturada em 1987, com a publicação do Relatório Brundtland, intitulado *“Our Common Future”*, elaborado pela *World Commission on Environment and Development* (WCED), conhecida como Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas. Este documento introduziu a definição mais consensual de desenvolvimento sustentável: “aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades” [11]. Esta definição marcou uma viragem paradigmática, introduzindo a ideia de justiça intergeracional como pilar da sustentabilidade.

Entre os pensadores fundamentais para a compreensão do conceito de sustentabilidade, destaca-se Ignacy Sachs, que propôs o termo ecodesenvolvimento nos anos 1980, como uma alternativa ao modelo puramente economicista. Para Sachs, o desenvolvimento sustentável deveria basear-se em cinco dimensões integradas: social, económica, ecológica, espacial e cultural. Este autor defendia que não existiria sustentabilidade ambiental sem justiça social e diversidade cultural, o que tornou sua visão particularmente influente no contexto latino-americano [12]. John Elkington, por sua vez, popularizou o conceito de *“Triple Bottom Line”*, defendendo uma abordagem alternativa à tradicional métrica de desempenho corporativo baseada apenas no lucro. Ele defende que as organizações devem ser avaliadas com base em três pilares fundamentais: *People* (Pessoas), *Planet* (Planeta) e *Profit* (Lucro). Este modelo é amplamente utilizado no setor empresarial para avaliar o impacto global das organizações [13]. Desde então, várias interpretações e surgiram ao longo do tempo. Por exemplo, Van Bellen [14] destacou a importância de indicadores de sustentabilidade para operacionalizar o conceito, enquanto Oliveira et al. [15]

reforçou a necessidade de o integrar na gestão estratégica das organizações. Por sua vez, autores como Pereira e Curi [16] alertam para a diversidade e complexidade das definições, defendendo uma abordagem sistêmica que considere os contextos ecológico, económico, cultural e ético.

Existiram também eventos internacionais que contribuíram para consolidar e expandir o conceito de sustentabilidade. Entre os mais importantes, destacam-se:

- Dia Mundial da Terra (1970) - Comemora-se anualmente a 22 de abril, desde a sua criação em 1970 por iniciativa do Senador norte-americano Gaylord Nelson, tendo sido oficialmente reconhecido pelas Nações Unidas em 2009. Esta data foi estabelecida com o objetivo de promover a consciência ambiental global e incentivar ações concretas de proteção do planeta. Trata-se de um marco simbólico que desempenhou um papel fundamental na mobilização pública e política para as questões ambientais, contribuindo para o surgimento de movimentos ecológicos à escala mundial [17].
- Protocolo de Quioto (1997) - Tratado internacional que estabeleceu, pela primeira vez, metas juridicamente vinculativas para a redução das emissões de gases com efeito de estufa por parte dos países industrializados, representando um avanço significativo na política climática global [18].
- Rio 92 - Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, também conhecida como Cimeira da Terra. Nesta conferência foi estabelecida a Agenda 21, um plano de ação global para promover o desenvolvimento sustentável [19];
- Cimeira Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável de Joanesburgo (2002), que reforçou os compromissos assumidos na Rio 92, integrando os Objetivos de Desenvolvimento do Milénio (ODM) [20];
- Conferência Rio+20 (2012), que resultou no documento “O Futuro que Queremos”, servindo de base para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) adotados em 2015 pela ONU [21];
- Cimeira do Clima de Paris (2015) - Estabeleceu compromissos climáticos vinculativos para limitar o aquecimento global a 1,5–2 °C face aos níveis pré-industriais, reforçando a sustentabilidade climática como um desafio civilizacional [22];
- COP26 - Conferência das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (Glasgow, 2021) – Reforçou a urgência da transição energética e do abandono progressivo do carvão, resultando no Pacto Climático de Glasgow e na intensificação do compromisso global com a neutralidade carbónica [23].
- Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*) - Estratégia adotada pela União Europeia em 2019 com o objetivo de alcançar a neutralidade climática até 2050, promovendo políticas transversais de sustentabilidade, economia circular e eficiência energética em todos os setores da economia [24].

Estes eventos e políticas têm vindo a moldar o panorama global da sustentabilidade, influenciando profundamente as diretrizes legislativas, os mecanismos de financiamento e as práticas operacionais no setor da construção e noutros domínios estratégicos [24].

Hoje, o conceito de sustentabilidade está amplamente difundido e aplicado em múltiplos domínios – desde políticas públicas até práticas empresariais e académicas. É entendido como um processo dinâmico de equilíbrio entre três pilares: ambiental, social e económico. Mais recentemente, têm sido propostas dimensões adicionais, como a cultural, ética e institucional. Apesar de consenso sobre os seus princípios gerais, a sustentabilidade permanece um conceito em disputa, com múltiplas interpretações dependendo do contexto geográfico, político e epistemológico. Esta complexidade também é reflexo da sua força: ao abranger diferentes áreas do conhecimento e setores da sociedade, a sustentabilidade serve de plataforma para repensar o futuro da humanidade no planeta [25].

2.1.2. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O tema do desenvolvimento sustentável é abordado com o intuito de compreender os motivos que têm conduzido à crescente valorização do conceito de sustentabilidade, nomeadamente o esgotamento dos recursos naturais, o aumento populacional, os impactos das atividades humanas e, inclusive, o papel do setor da construção. Esta abordagem visa entender a consciência ecológica e social que emerge a diversos níveis da sociedade, influenciando decisões políticas, económicas e tecnológicas [26]. A definição de desenvolvimento sustentável não se restringe à ideia de preservação da natureza, mas refere-se, sobretudo, à incorporação de estratégias internacionais que visem agregar novos recursos, fomentar o crescimento económico e promover uma prosperidade partilhada entre os povos. Segundo Barter e Sally [27], este conceito deve ser compreendido como um esforço estruturado para repensar os modelos de desenvolvimento e os sistemas produtivos de forma integrada, sem dissociar o progresso económico das responsabilidades sociais e ambientais. Deste modo, para se alcançar o desenvolvimento sustentável, torna-se fundamental associar o crescimento económico, a inclusão social e a proteção ambiental. Esta tríade de pilares, consagrada no Relatório Brundtland [11], visa assegurar a harmonia entre a economia, a sociedade e a natureza. De acordo com Goodland [28], esta integração é essencial para garantir a sustentabilidade dos sistemas ecológicos e humanos, sendo imperativo respeitar os limites biofísicos do planeta.

Cada país deve, assim, construir o seu próprio percurso em direção à sustentabilidade, adaptando os princípios orientadores às suas realidades sociais, económicas, ecológicas e culturais [29]. Neste sentido, é importante sublinhar que os impactos negativos provocados pelas atividades humanas no ambiente como a poluição, a perda da biodiversidade, a escassez de recursos hídricos e o aquecimento global são incompatíveis com uma forma de vida sustentável. Como referem Schutte [30] e Ruggerio [7], tais impactos devem ser mitigados por meio de políticas públicas eficazes, educação ambiental, inovação tecnológica e mudança de comportamento a nível individual e coletivo.

A Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) constituem hoje um referencial global para a implementação de práticas sustentáveis, reconhecendo a complexidade dos desafios atuais e a necessidade de ação conjunta entre governos, empresas, instituições e cidadãos [31].

A compreensão do desenvolvimento sustentável como uma articulação equilibrada entre os pilares ambiental, social e económico é fundamental para estruturar estratégias eficazes de transição ecológica, especialmente no setor da construção. A Figura 1, representa o tradicional modelo triangular de sustentabilidade, que sintetiza a interação interdependente entre esses três domínios. Esta representação gráfica reforça a ideia de que o desenvolvimento sustentável só é alcançado quando há equilíbrio simultâneo entre a viabilidade económica, a equidade social e a integridade ambiental.

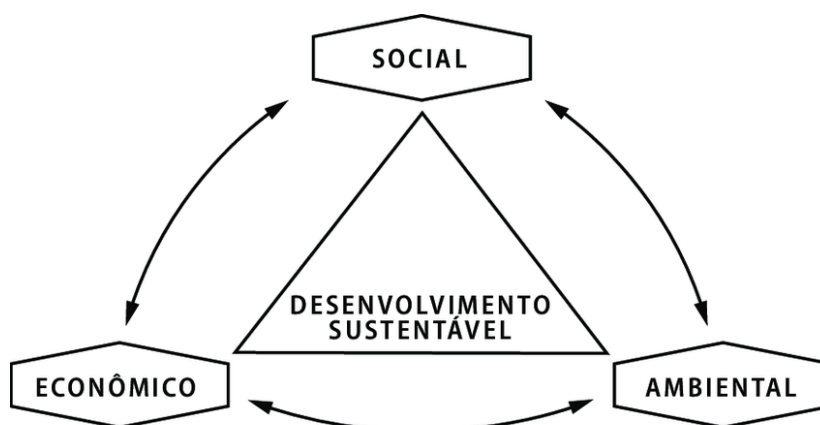


Figura 1 - Representação dos três pilares do desenvolvimento sustentável: social, económico e ambiental [32].

2.1.3. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

A indústria da construção civil desempenha um papel central no desenvolvimento das sociedades contemporâneas. Este setor exerce uma influência significativa sobre a atividade económica, o emprego e as taxas de crescimento. Contudo, apresenta igualmente um dos maiores impactos ambientais, devido ao elevado consumo de energia e de recursos naturais, resultando em efeitos diretos e indiretos ao longo de todo o ciclo de vida dos edifícios [1, 2]. Estima-se que o setor da construção consuma aproximadamente 40% da energia global e é seja responsável por cerca de 36% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) a nível mundial. Em termos de recursos naturais, esta indústria absorve cerca de 50% de tudo o que é extraído da crosta terrestre e origina volumes expressivos de resíduos, muitos dos quais não são adequadamente reaproveitados. Assim sendo, estes números evidenciam a necessidade urgente de reestruturar os modelos construtivos atuais [33]. No contexto europeu, os edifícios representam igualmente cerca de 40% do consumo de energia e 36% das emissões de gases com efeito de estufa associadas à energia. Face a este panorama, e tendo em vista a meta de neutralidade carbónica até 2050, a União Europeia tem vindo a promover mudanças estruturais no setor, incentivando práticas de construção sustentável, digitalização dos edifícios e integração de fontes renováveis [34]

No setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), o consumo energético distribui-se por diferentes fases do ciclo de vida das construções, com especial relevância no caso dos edifícios, onde esse impacto tende a ser mais expressivo ao longo do tempo. Durante a extração e o processamento de matérias-primas, verifica-se uma elevada energia incorporada nos materiais, especialmente naqueles cuja produção envolve processos industriais intensivos, como o cimento, o aço e o vidro. Durante a fase de construção, o transporte de materiais, o uso de maquinaria pesada e o funcionamento de sistemas auxiliares, como betoneiras e gruas, continuam a aumentar significativamente os consumos energéticos. Todavia, é na fase de utilização e operação dos edifícios que se observa o maior impacto energético. Esta fase inclui o consumo contínuo de eletricidade e combustíveis fósseis para climatização, iluminação e funcionamento de equipamentos eletrónicos, sendo responsável por cerca de 70% do consumo total de energia ao longo da vida útil de um edifício. Finalmente, nas fases de demolição e gestão de resíduos, destaca-se o desperdício de materiais e a necessidade de transporte e deposição em aterro, contribuindo para um impacto ambiental adicional [2]. Neste contexto, tem vindo a ganhar relevância o conceito de desconstrução, uma prática que procura desmontar seletivamente os edifícios com o intuito de reaproveitar, reciclar ou reintroduzir os materiais e componentes em novos ciclos produtivos, promovendo uma lógica de economia circular e reduzindo significativamente a pegada ambiental global do ciclo de vida da construção [35].

Como resposta a estes desafios, emerge o conceito de construção sustentável, que visa promover a eficiência no uso de recursos, a redução do impacto ambiental e o desempenho energético eficiente dos edifícios. Uma das abordagens mais promissoras nesta área tem sido a integração do BIM com metodologias de ACV, permitindo simular cenários construtivos alternativos e escolher soluções mais sustentáveis desde a fase de projeto. O uso do BIM integrado com ACV permite quantificar os impactos ambientais de cada componente da construção ao longo de todo o seu ciclo de vida, favorecendo decisões mais informadas quanto à escolha de materiais, tecnologias e sistemas construtivos. Estudos recentes demonstram que estas ferramentas digitais podem reduzir significativamente o impacto ambiental e os custos operacionais dos edifícios [3, 36]. Para além disso, práticas como a reutilização de materiais, o desenho passivo, o uso de fontes renováveis e a prefabricação são cada vez mais integradas como estratégias complementares que contribuem para a sustentabilidade do setor [34, 37].

Conclui-se que, para atingir uma construção verdadeiramente sustentável, é indispensável adotar uma abordagem integrada que envolva:

- a seleção criteriosa de materiais com baixo impacto ambiental [36];
- a incorporação de tecnologias inovadoras [34];
- e a implementação de normas ambientais rigorosas [38] .

Estas medidas são fundamentais para reduzir o consumo energético e os desperdícios ao longo de todas as fases do ciclo de vida dos edifícios, promovendo um equilíbrio entre crescimento económico, responsabilidade ambiental e bem-estar social no setor da construção [36].

2.2. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

2.2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

A Análise do Ciclo de Vida (ACV), conhecida internacionalmente como *Life Cycle Assessment* (LCA), é uma metodologia que visa avaliar os impactos ambientais associados a todas as etapas do ciclo de vida de um produto, processo ou serviço desde a extração de matérias-primas até à disposição final. A aplicação da ACV ao setor da construção surgiu como uma resposta às crescentes preocupações com os impactos ambientais do setor, particularmente devido ao seu elevado consumo de energia e recursos, e à sua contribuição significativa para as emissões de gases com efeito de estufa [39].

A origem do conceito remonta às décadas de 1960 e 1970, nos Estados Unidos e na Europa, respetivamente, quando se começaram a realizar estudos sobre os fluxos de energia e materiais associados a produtos industriais [39]. Um dos marcos iniciais foi o estudo da *Coca-Cola Company* em 1969, que visava comparar o impacto ambiental de diferentes tipos de embalagens. A metodologia evoluiu rapidamente com a publicação dos primeiros estudos comparativos entre produtos, culminando na necessidade de um enquadramento normativo [39]. Na década de 1990, a ACV passou a integrar agendas internacionais de sustentabilidade, especialmente com a publicação das normas ISO 14040 e ISO 14044, promovidas pela International Organization for Standardization (ISO), que estabeleceram os princípios, a estrutura e os requisitos metodológicos da análise do ciclo de vida. Estas normas continuam a ser o principal referencial normativo para a realização de estudos de ACV [40].

No setor da construção, a ACV começou a ganhar relevância com a crescente procura por edifícios mais sustentáveis e eficientes. As primeiras aplicações formais da ACV na construção civil ocorreram no norte da Europa, nomeadamente em países como a Suécia, Alemanha e Países Baixos, que procuravam integrar critérios ambientais no projeto e gestão de edifícios. A partir dos anos 2000, a sua aplicação expandiu-se devido ao avanço das ferramentas computacionais e à maior disponibilidade de bases de dados ambientais específicas para materiais e sistemas construtivos [41]. Com a evolução da sustentabilidade como conceito multidimensional, surgiu a necessidade de abordar outros tipos de impacto para além dos ambientais. Foi neste contexto que se desenvolveram abordagens complementares à ACV tradicional, como a Análise Social do Ciclo de Vida (S-LCA) e a Análise Socioeconómica do Ciclo de Vida (SO-LCA).

A S-LCA (*Social Life Cycle Assessment*) surgiu como resposta à necessidade de avaliar os impactos sociais e socioeconómicos ao longo do ciclo de vida de produtos e processos. Esta abordagem analisa aspetos como as condições de trabalho, a equidade de género, os direitos humanos, a saúde e segurança dos trabalhadores, e os efeitos sobre comunidades locais. A metodologia foi formalmente estruturada pelas diretrizes publicadas pelo *UNEP/SETAC Life Cycle Initiative* em 2009, e tem vindo a ser atualizada, destacando-se o desenvolvimento do *S-LCA Guidelines 2020*. Esta abordagem permite uma avaliação mais holística da sustentabilidade, especialmente em setores como o da construção, onde o impacto social dos projetos pode ser elevado [42].

A SO-LCA (*Socio-Economic Life Cycle Assessment*) representa uma evolução natural da S-LCA, com o objetivo de integrar de forma mais robusta os impactos económicos e sociais associados ao ciclo de vida de produtos, serviços ou sistemas construtivos. Enquanto a S-LCA foca predominantemente as dimensões sociais, como direitos humanos, igualdade, condições de trabalho e envolvimento comunitário, a SO-LCA vai mais além, incorporando também indicadores económicos qualitativos e quantitativos, como a distribuição de benefícios económicos, acessibilidade a recursos, criação de emprego, desenvolvimento económico regional e equidade na geração de valor [43]. Esta abordagem alinha-se com os princípios de uma avaliação holística da sustentabilidade, onde o desempenho ambiental, social e económico deve ser analisado de forma integrada. A SO-LCA é particularmente relevante para o setor

da construção, pois permite avaliar não apenas o impacto ambiental dos materiais ou processos, mas também o modo como os investimentos, políticas públicas e projetos arquitetónicos influenciam a justiça social, o crescimento económico local e a inclusão socioeconómica [44]. Em conjunto, estas metodologias LCA, S-LCA e SO-LCA contribuem para a avaliação completa da sustentabilidade de sistemas construtivos, indo ao encontro dos princípios dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, particularmente aqueles relacionados com a ação climática, trabalho digno, inovação e consumo responsável [42, 44].

Atualmente, a ACV é amplamente utilizada como ferramenta estratégica para o desenho ecológico de edifícios, seleção de materiais com baixa pegada carbónica, comparação entre soluções construtivas e apoio à certificação ambiental (como LEED, BREEAM ou HQE). O seu uso é reforçado por tecnologias digitais como o BIM, que permitem integrar dados de ACV desde as fases iniciais de projeto [6, 45]. Apesar da evolução metodológica, ainda persistem desafios, como a harmonização dos dados, a comparabilidade entre estudos, e a integração eficaz com os processos de decisão no setor da construção. No entanto, a tendência é de crescente aceitação institucional e profissional da ACV como ferramenta fundamental na transição para uma economia mais circular e sustentável [46].

2.2.2. ABORDAGENS CICLO DE VIDA E MÓDULOS DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

2.2.2.1. Metodologia de Análise de Ciclo de Vida

A Análise do Ciclo de Vida, conforme estruturada pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, assenta em quatro etapas fundamentais que orientam o desenvolvimento de qualquer estudo nesta área. A primeira fase corresponde à definição de objetivos e do âmbito do estudo. Nesta etapa, determina-se a finalidade da análise, o público-alvo, a unidade funcional, os limites do sistema e as hipóteses metodológicas adotadas. A clareza e a coerência nesta fase são essenciais para assegurar a relevância dos resultados obtidos e a possibilidade de comparação com outros estudos [39].

A segunda fase consiste na análise do inventário do ciclo de vida (*Life Cycle Inventory* – LCI), na qual são identificados e quantificados todos os fluxos de entrada (materiais, energia) e saída (emissões, resíduos) associados às etapas do ciclo de vida do produto ou sistema estudado. Esta fase exige bases de dados fiáveis e contextualizadas, sendo considerada a mais intensiva em termos de recolha de informação [40].

A terceira fase é a avaliação dos impactos do ciclo de vida (*Life Cycle Impact Assessment* – LCIA), onde os dados do inventário são convertidos em categorias de impacto ambiental. Estas incluem, por exemplo, alterações climáticas, acidificação do solo e da água, eutrofização, toxicidade humana e ecotoxicidade. A metodologia LCIA visa agregar os efeitos ambientais de forma compreensível e cientificamente fundamentada, convertendo os dados do inventário em categorias de impacto ambiental. Para isso, recorre-se a métodos como ReCiPe, CML ou ILCD, que diferem entre si nos fatores de caracterização, nas categorias consideradas e na forma como interpretam os impactos. [47, 48]. O método CML (*Centrum voor Milieukunde Leiden*), desenvolvido pela Universidade de Leiden, adota uma abordagem *midpoint*, focando-se em categorias de impacto intermediárias como a acidificação, a eutrofização, a toxicidade humana e o potencial de aquecimento global, permitindo análises mais estáveis e menos incertas [49]. Já o método ReCiPe permite análises tanto em *midpoint* como em *endpoint*, ligando os impactos ambientais diretos a danos finais na saúde humana, nos ecossistemas e na disponibilidade de recursos, oferecendo uma visão mais abrangente, embora com maior complexidade e incerteza [50]. Por sua vez, o ILCD (*International Reference Life Cycle Data System*) foi proposto pela Comissão Europeia como uma recomendação metodológica para harmonizar os estudos de ACV na Europa. Este método incorpora elementos dos anteriores, padronizando categorias e fatores de caracterização com base em consensos científicos e políticas públicas da União Europeia [51]. A escolha entre estes métodos deve considerar o nível de detalhe desejado, a finalidade do estudo e o público-alvo, uma vez que cada abordagem fornece diferentes graus de robustez, comunicabilidade e utilidade para apoiar a tomada de decisão.

Por fim, a quarta fase corresponde à interpretação dos resultados. Esta etapa é transversal a todo o processo e envolve a análise crítica dos dados obtidos, identificação de incertezas e a formulação de recomendações para apoiar a tomada de decisão. A interpretação deve ser coerente com os objetivos definidos inicialmente, assegurando a transparência e a robustez do estudo [4].

2.2.2.2. Módulos e abordagens de Análise de Ciclo de Vida

No domínio da construção, a norma europeia EN 15978:2011 propõe um enquadramento modular para a aplicação da ACV em edifícios, dividindo o ciclo de vida em fases e módulos, como ilustrado na Figura 2 [52]:

- Fase de Produto (A1–A3): produção de materiais e componentes;
- Fase de Construção (A4–A5): transporte e montagem no local;
- Fase de Utilização (B1–B7): uso, manutenção, reparações, substituições, consumo de energia e água;
- Fase de Fim de Vida (C1–C4): demolição, transporte, processamento e eliminação de resíduos;
- Módulo D: contabiliza benefícios além do sistema, como reutilização, reciclagem ou recuperação energética após o fim de vida.

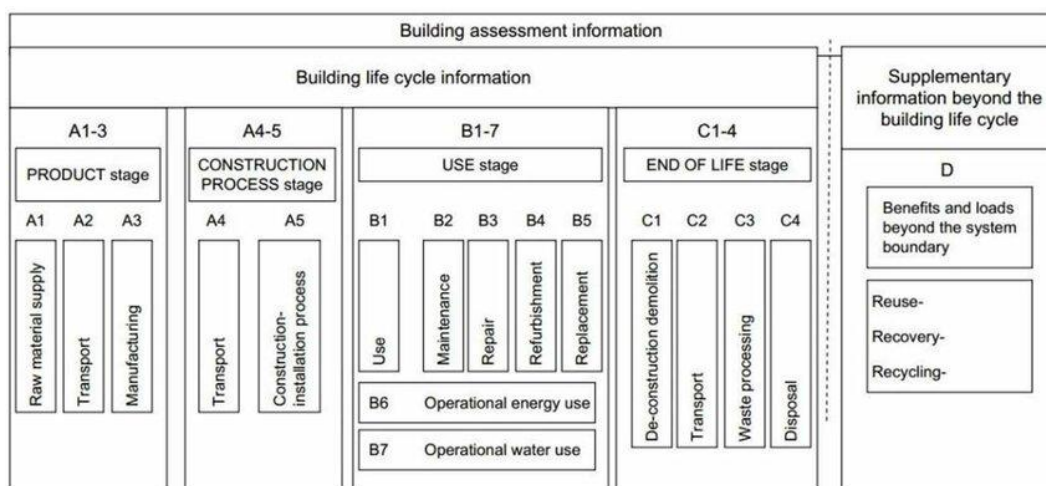


Figura 2 - Módulos de Análise de Ciclo de Vida [53].

Com base nestes módulos, a ACV pode assumir diferentes abordagens consoante os limites do sistema definidos. Estas abordagens condicionam o grau de profundidade da análise e as suas aplicações práticas:

- *Cradle-to-gate* (do berço ao portão): esta variante considera as fases desde a extração de matérias-primas até à saída do produto da fábrica. É muito comum na indústria de materiais de construção e serve de base para a elaboração das Declarações Ambientais de Produto (DAPs). Esta abordagem fornece dados úteis para decisões de projeto e para comparação entre fornecedores, apesar de não considerar o uso ou fim de vida do produto [54];
- *Cradle-to-site* (do berço ao local): inclui as fases anteriores mais o transporte e entrega no local de instalação. Esta abordagem é relevante para estudos de logística e de impactos durante a fase de obra, permitindo contabilizar emissões de transporte e processos preliminares no estaleiro [41];

- *Cradle-to-grave* (do berço ao túmulo): esta abordagem considera todas as fases do ciclo de vida de um produto ou sistema, desde a extração das matérias-primas e fabrico, passando pela fase de uso e manutenção, até à demolição e gestão dos resíduos. É amplamente utilizada na análise de edifícios ou sistemas construtivos complexos, por permitir uma visão abrangente dos impactes ambientais ao longo da sua vida útil [38];
- *Cradle-to-cradle* (do berço ao berço): representa uma filosofia regenerativa baseada na economia circular, onde o fim de vida não implica eliminação, mas sim reintegração dos materiais como entrada em novos ciclos produtivos. Esta abordagem foca-se na reutilização contínua e eliminação de resíduos, contribuindo para sistemas construtivos com pegada ambiental quase nula [55].

A escolha da abordagem de análise de ciclo de vida depende dos objetivos do estudo e do nível de detalhe pretendido. A Figura 3 ilustra as principais abordagens utilizadas em ACV, nomeadamente *Cradle-to-Gate*, *Cradle-to-Site*, *Cradle-to-Grave* e *Cradle-to-Cradle*, evidenciando as etapas consideradas em cada uma e a possibilidade de reintegração de materiais na lógica de economia circular.

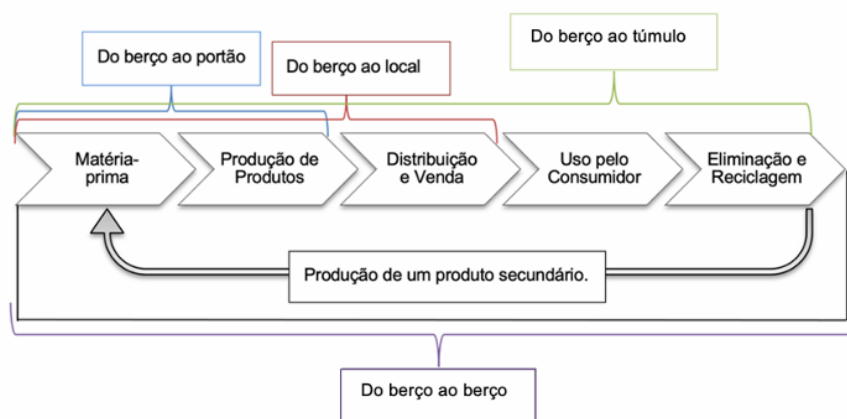


Figura 3 - Abordagens de Análise de Ciclo de Vida [56].

Em paralelo, a norma EN 15804 estabelece as Regras de Categoria de Produto (PCR) para a elaboração de Declarações Ambientais de Produto (DAPs), também conhecidas por *Environmental Product Declarations* (EPDs). As DAPs são documentos técnicos normalizados que comunicam, com base num estudo de ACV verificado, os impactes ambientais de um produto de construção. A utilização da metodologia de ACV é fundamental no desenvolvimento destas declarações, que permitem aos fabricantes ter a perceção dos aspetos mais negativos ao longo do ciclo de vida do produto, podendo assim, intervir de forma a diminuir estes impactes mais negativos [57]. Tipicamente, cobrem os módulos A1 a A3 (*cradle-to-gate*), mas podem estender-se até ao módulo D se solicitado.

Cada DAP deve incluir categorias de impacto como potencial de aquecimento global, consumo de recursos (energia, água, materiais), formação de ozono troposférico, entre outras. A credibilidade das DAPs é assegurada por verificação externa e conformidade com as normas ISO 14025 e EN 15804 [4].

O modo como a DAP é desenvolvida e as características de desempenho ambiental são apresentadas, é baseado em regras previamente estabelecidas, denominadas de RCP ou PCR (Regras para Categoria de Produtos e *Product Category Rules*, respetivamente). As RCP definem, detalhadamente, os parâmetros de recolha de dados (como os obter e como os apresentar), segundo os quais deve ser efetuada a análise de ciclo de vida do produto [57].

Em termos gerais, as DAP permitem aos seus utilizadores usufruírem de diversas vantagens relevantes. Estas fornecem informações detalhadas acerca do desempenho ambiental de um produto, permitindo uma escolha mais rigorosa dos materiais a utilizar. Podem igualmente servir de suporte aos projetistas na seleção de materiais e soluções construtivas, favorecendo a adoção de opções com menor impacto ambiental. As DAP contribuem também para a avaliação da sustentabilidade dos edifícios e de outras obras, ao disponibilizarem uma base de dados abrangente de materiais, sendo que, quando generalizado pelas empresas, facilita significativamente a aplicação da metodologia da ACV, mesmo em fases iniciais dos projetos, ou através de métodos menos detalhados. Adicionalmente, permitem às empresas identificar os aspetos que, ao longo do ciclo de vida do produto, geram maiores impactos ambientais, orientando assim intervenções de melhoria futura. Finalmente, constituem um fator de diferenciação comercial, conferindo vantagem competitiva às empresas que optam por publicar o desempenho ambiental dos seus produtos face àquelas que não o fazem [58, 59].

No contexto da crescente implementação de bases de dados de DAP, destaca-se em Portugal o sistema nacional DAPHabitat, que disponibiliza declarações ambientais de produto devidamente validadas e acessíveis ao público [59]. A nível internacional, destacam-se plataformas como a IBU (*Institut Bauen und Umwelt*, Alemanha) [60] e a EPD International System (Suécia) [61], que funcionam como sistemas reconhecidos de verificação e disseminação de DAPs, promovendo a harmonização metodológica e a transparência na comunicação do desempenho ambiental dos produtos de construção.

Estas declarações são ferramentas essenciais para a transparência ambiental no setor da construção, sendo exigidas em diversos sistemas de certificação ambiental de edifícios, como o LEED ou BREEAM. Além disso, são utilizadas por arquitetos, engenheiros e gestores de projeto na seleção criteriosa de materiais, promovendo práticas construtivas mais sustentáveis e alinhadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A sua crescente adoção reflete a maturação do setor da construção no que respeita à gestão do impacto ambiental, favorecendo decisões baseadas em dados objetivos e comparáveis, com benefícios tanto para o desempenho ambiental dos edifícios como para a reputação ambiental das empresas [57, 59].

2.3. RELAÇÃO ENTRE ACV E AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE E SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO

2.3.1. ANÁLISE CICLO DE VIDA PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

A Avaliação da Sustentabilidade na construção tem vindo a evoluir no sentido de integrar métricas objetivas e padronizadas que permitam medir com rigor os impactos ambientais dos edifícios ao longo do tempo. Neste contexto, a ACV assume um papel central, permitindo avaliar de forma holística o desempenho ambiental de produtos, materiais e sistemas construtivos ao longo de todas as fases do seu ciclo de vida - desde a extração das matérias-primas até ao fim de vida [4]. A principal mais-valia da ACV na avaliação da sustentabilidade reside na sua capacidade de quantificar impactos em múltiplas categorias ambientais, como o potencial de aquecimento global, a acidificação, a eutrofização ou o consumo de recursos. Esta abordagem possibilita comparações objetivas entre diferentes soluções construtivas, identificando aquelas que promovem uma menor pegada ecológica [38].

Contudo, para que a ACV tenha utilidade prática na avaliação da sustentabilidade, é essencial que os resultados obtidos sejam comparáveis e contextualizados. É aqui que entra a importância dos *benchmarks* ambientais, que funcionam como valores de referência ou limiares de desempenho com os quais os resultados de ACV podem ser confrontados. Estes *benchmarks* podem assumir várias formas: valores médios do setor, metas regulamentares, intervalos de desempenho aceitáveis ou valores definidos por normas técnicas, como a EN 15978. Ao fornecer uma base comum para comparação, os *benchmarks* permitem identificar se determinado edifício ou material apresenta um desempenho ambiental abaixo, dentro ou acima da média do mercado. Isto não só facilita o processo de tomada de decisão por parte de projetistas e engenheiros, como também permite definir objetivos de melhoria contínua, orientados por dados quantitativos. Para além disso, a integração de *benchmarks* na leitura dos resultados da ACV permite a identificar as fases do ciclo de vida, componentes ou processos com contributo desproporcional para o impacto total, ou seja, as áreas com maior relevância ambiental. [62]. Esta informação

é fundamental para guiar intervenções mais eficazes e estratégicas, seja na seleção de materiais, na otimização energética ou na escolha de soluções construtivas com menor impacto ambiental. Outro aspeto relevante é que os *benchmarks* possibilitam a definição de parâmetros de referência em sustentabilidade. Ao alinhar os resultados da ACV com valores de referência previamente estabelecidos, torna-se possível transformar dados técnicos em indicadores operacionais, facilitando a comunicação entre diferentes agentes do setor e promovendo maior transparência e rastreabilidade na cadeia de valor da construção. Assim, a conjugação entre a ACV e os *benchmarks* ambientais não só reforça a utilidade prática da análise, como contribui para a definição de políticas e estratégias mais eficazes rumo à construção sustentável, apoiadas em evidência científica e comparabilidade setorial [62].

2.3.2. SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE

2.3.2.1. Sistemas Internacionais de Certificação da Sustentabilidade na Construção

A crescente preocupação com os impactos ambientais do setor da construção motivou o desenvolvimento de sistemas de certificação de sustentabilidade que avaliam o desempenho ambiental, social e económico dos edifícios. Estes sistemas surgem como mecanismos voluntários que visam promover práticas construtivas mais responsáveis, baseadas em critérios objetivos e transparentes. Tal como destacado por estudos recentes, estas certificações não apenas incentivam a eficiência energética, como também fomentam a utilização racional de recursos, a melhoria da qualidade ambiental interior, a durabilidade dos edifícios e o bem-estar dos utilizadores. Adicionalmente, funcionam como instrumentos de mercado e política pública, contribuindo para a valorização dos ativos imobiliários, para o cumprimento de metas climáticas e para a transição do setor da construção rumo à redução das emissões de carbono [63, 64]. Entre os sistemas de certificação mais reconhecidos a nível internacional destacam-se o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), Green Star, WELL Building Standard, o Level(s) e o SBTool. (*Sustainable Building Tool*) Cada um destes sistemas apresenta critérios próprios de avaliação e pontuação, refletindo diferentes contextos geográficos, sociais e normativos [65].

O LEED, desenvolvido nos Estados Unidos pelo U.S. Green Building Council, é amplamente utilizado em projetos internacionais e classifica os edifícios com base em categorias como eficiência energética, materiais e recursos, qualidade ambiental interior, inovação, e localização e transporte. O sistema funciona por acumulação de pontos, que determinam o nível de certificação: Certificado, Prata, Ouro e Platina [66].

O Green Star, desenvolvido na Austrália, segue um modelo semelhante, mas adapta-se ao contexto climático e regulatório local. A sua abordagem é multidisciplinar, avaliando impactos ambientais, económicos e sociais dos edifícios e infraestruturas [67].

O WELL Building Standard, por sua vez, é um sistema de certificação centrado na promoção da saúde e bem-estar dos ocupantes dos edifícios, baseado em evidência científica. Ao contrário de outros sistemas predominantemente orientados para o desempenho ambiental, como o LEED ou o BREEAM, o WELL Building Standard foca-se nos impactos diretos que o ambiente construído exerce sobre a saúde física e psicológica dos utilizadores. Este sistema avalia critérios distribuídos por dez conceitos-chave: qualidade do ar interior, qualidade da água, nutrição, luz natural e artificial, conforto térmico, acústica, promoção da mobilidade, materiais, saúde mental e integração comunitária. Entre estes, destacam-se parâmetros como a qualidade do ar, o acesso à luz natural, o conforto térmico, o ambiente sonoro e a disponibilidade de alimentos saudáveis, todos eles considerados fundamentais para o bem-estar global dos ocupantes [68].

O SBTool é um sistema de avaliação da sustentabilidade dos edifícios concebido para ser altamente flexível e adaptável a diferentes contextos regionais e tipologias construtivas. A sua estrutura modular permite ajustar critérios e ponderações consoante as prioridades locais, sendo frequentemente utilizado como ferramenta académica, normativa e profissional em países como o Canadá, Itália, Portugal e Japão. O sistema teve origem em Portugal, com o desenvolvimento da sua versão nacional, o SBTool PT,

coordenado pela iiSBE Portugal (capítulo português da *International Initiative for a Sustainable Built Environment*), em colaboração com o Laboratório de Física e Tecnologia da Construção da Universidade do Minho (LFTC-UM) e a empresa Ecochoice. Esta versão adaptada resulta da aplicação da metodologia internacional SBTool à realidade portuguesa, no âmbito de um consórcio que envolveu equipas de mais de 20 países. O SBTool avalia de forma integrada as dimensões ambiental, social e económica da sustentabilidade, promovendo uma abordagem sistémica, participativa e baseada em critérios ajustáveis. A ferramenta foi concebida para apoiar decisões em fases de projeto, construção e operação, e tem vindo a afirmar-se como uma referência sólida no panorama europeu de certificação da sustentabilidade em edifícios [69].

Por outro lado, o Level(s) é uma estrutura voluntária de avaliação criada pela Comissão Europeia, com o objetivo de harmonizar indicadores de sustentabilidade na construção de edifícios. Foca-se em seis principais temas, incluindo desempenho energético, emissões de carbono ao longo do ciclo de vida, utilização eficiente de recursos hídricos e materiais, e saúde e conforto dos utilizadores. A sua grande mais-valia reside na compatibilidade com normas europeias (como a EN 15978) e na facilidade de integração com políticas públicas e processos de licenciamento, funcionando como uma ferramenta orientadora na transição para uma economia de baixo carbono [70].

Contudo, destaca-se no contexto europeu o sistema BREEAM, desenvolvido pelo Building Research Establishment (BRE) no Reino Unido. Dado que o sistema de classificação ambiental BREEAM será adotado no desenvolvimento desta dissertação, e por ser também a metodologia atualmente utilizada pela empresa Garcia Garcia, será atribuída especial atenção a este referencial no subcapítulo seguinte.

2.3.2.2. BREEAM

Criado em 1990, o BREEAM, é considerado o sistema de avaliação de sustentabilidade mais antigo e um dos mais adotados globalmente. A certificação BREEAM é aplicada em mais de 80 países, com adaptações locais que respondem a diferentes climas, regulamentações e práticas construtivas [71]. O BREEAM estrutura-se em diversos esquemas de certificação, cada um destinado a uma fase do ciclo de vida ou a um tipo específico de edificação ou infraestrutura:

- BREEAM New Construction - É um esquema de avaliação baseado no desempenho de novos edifícios. Este esquema visa promover o desenvolvimento de edifícios resilientes e sustentáveis, tendo em conta o contexto local, seja ele natural ou construído. Destina-se à maioria dos tipos de edifícios novos, incluindo novas habitações e extensões de novas construções para edifícios existentes. Este esquema tem vários benefícios, nomeadamente a mitigação do impacto ambiental, a redução dos custos operacionais e o aumento do valor económico e social [72];
- BREEAM In-Use - Avaliação da sustentabilidade de edifícios existentes em operação [72];
- BREEAM Refurbishment and Fit-Out - Este esquema foi criado para permitir a avaliação de sustentabilidade de reabilitações e ajustes de edifícios existentes que têm como intenção reduzir o impacto no ambiente no seu ciclo de vida e o impacto causado durante as obras de reabilitação [72];
- BREEAM Communities - Este esquema fornece uma estrutura para apoiar planeadores, autoridades locais e investidores para integrar e avaliar o design sustentável no planeamento mestre de novas comunidades [72];
- BREEAM Infrastructure - Avaliação de obras de engenharia civil como pontes, estradas, túneis [72];
- BREEAM International - Versão adaptável para projetos fora do Reino Unido [72].

Cada esquema possui um conjunto específico de requisitos, adaptado ao tipo de edifício, à sua função e localização geográfica. Isto permite ao sistema ser utilizado de forma flexível em contextos internacionais, sendo amplamente compatível com outras ferramentas e metodologias, como o BIM e a ACV.

A sua metodologia avalia o desempenho dos edifícios em categorias ambientais, cada uma composta por diversos créditos:

1. Gestão (*Management*)
2. Saúde e Bem-estar (*Health & Wellbeing*)
3. Energia (*Energy*)
4. Transporte (*Transport*)
5. Água (*Water*)
6. Materiais (*Materials*)
7. Resíduos (*Waste*)
8. Uso do solo e ecologia (*Land Use and Ecology*)
9. Poluição (*Pollution*)
10. Inovação (*Innovation*)

Cada crédito atribui uma pontuação que é ponderada segundo um sistema de pesos percentuais, ajustados conforme o esquema e o tipo de projeto. A soma dos créditos ponderados gera a pontuação final do projeto.

O processo de certificação BREEAM é baseado num sistema de pontos, convertidos numa pontuação global que determina a classificação final: *Unclassified*, *Pass*, *Good*, *Very Good*, *Excellent* e *Outstanding*. A obtenção de uma classificação "*Outstanding*" implica que o edifício cumpre com elevados padrões de desempenho ambiental em praticamente todas as categorias, o que exige uma abordagem altamente integrada e sustentável desde as fases iniciais de projeto. Já um "*Unclassified*" é aquele que representa um desempenho que não está em conformidade com o BREEAM, sendo que não alcançou os padrões mínimos de desempenho para questões ambientais importantes ou a pontuação geral limite necessária. A obtenção de certificação BREEAM pode conferir vantagens competitivas significativas, como valorização do ativo imobiliário, melhoria da imagem institucional, acesso a incentivos financeiros e adequação a políticas públicas de sustentabilidade [65]. A Figura 4 apresenta as diferentes classificações possíveis atribuídas pelo BREEAM, bem como as pontuações percentuais correspondentes, permitindo compreender os níveis de desempenho ambiental exigidos para cada categoria.

BREEAM rating		% score
Outstanding	★★★★★	≥85
Excellent	☆★★★★	≥70
Very good	☆☆★★★	≥55
Good	☆☆☆★★	≥45
Pass	☆☆☆☆★	≥30
Unclassified	☆☆☆☆☆	<30

Figura 4 - Escala de classificação do sistema BREEAM e respetivas pontuações percentuais mínimas associadas a cada nível de desempenho ambiental [73].

Um dos principais méritos do BREEAM reside na sua flexibilidade metodológica, permitindo adaptações a contextos nacionais específicos através da versão "BREEAM International". Além disso, a estrutura modular do sistema facilita a sua integração com metodologias de Análise de Ciclo de Vida (ACV), o que é particularmente relevante para aplicações conjuntas com ferramentas BIM, como demonstrado por estudos recentes [74]. No entanto, vários autores têm destacado desafios na interoperabilidade entre os sistemas de certificação e as ferramentas digitais de projeto, sobretudo no que respeita à consistência dos dados ao longo do ciclo de vida do edifício. A integração eficiente entre sistemas como o BREEAM e plataformas BIM requer normalização de dados, estruturas semânticas compatíveis e metodologias robustas para garantir a rastreabilidade e validade das avaliações ambientais [75].

Em suma, os sistemas de certificação de sustentabilidade desempenham um papel crucial na transição do setor da construção para práticas mais conscientes e responsáveis. A escolha do sistema adequado deve considerar o contexto local, os objetivos do projeto e a compatibilidade com outras metodologias, como BIM e ACV, de modo a maximizar o impacto positivo das construções ao longo do seu ciclo de vida. As construções que sejam validadas pelo sistema de certificação BREEAM, obtêm o selo oficial, como o da Figura 5, que assegura que a construção foi submetida a uma avaliação completa e satisfatória. Acresce ainda que a avaliação deve ser realizada por um avaliador certificado pelo *Building Research Establishment* (BRE).



Figura 5 - Selo oficial BREEAM [73].

2.4. BIM

2.4.1. CONCEITOS E BENEFÍCIOS

Building Information Modeling (BIM) é uma metodologia baseada na criação e gestão de modelos digitais tridimensionais e paramétricos que integram informações técnicas, espaciais, temporais e operacionais sobre um edifício ao longo do seu ciclo de vida. O BIM vai além da simples modelação geométrica, incorporando dados que possibilitam uma análise integrada das fases de conceção, construção, operação, manutenção e eventual demolição ou reutilização da infraestrutura [76]. A sua aplicação tem vindo a transformar o setor AEC, promovendo maior colaboração entre os diferentes intervenientes, melhorando a qualidade da informação disponível para tomada de decisão e reduzindo erros e desperdícios ao longo do projeto. Entre os principais benefícios destaca-se a deteção precoce de conflitos (*clash detection*), a visualização 3D realista, o controlo de custos (5D), a simulação de desempenho energético e, mais recentemente, a avaliação da sustentabilidade através da dimensão 6D [77, 78]. O BIM tem revelado um enorme potencial na integração com metodologias de ACV, possibilitando a quantificação dos impactos ambientais dos edifícios desde as fases iniciais do projeto. A integração entre BIM e ACV permite simular e comparar diferentes soluções construtivas, considerando indicadores ambientais como emissões de CO₂, consumo energético, uso de materiais e produção de resíduos. Esta integração facilita o

desenvolvimento de edifícios mais sustentáveis e eficientes, alinhados com as exigências dos sistemas de certificação ambiental como o BREEAM ou LEED [6, 45].

A estrutura do BIM é frequentemente descrita em termos de dimensões associadas a diferentes tipos de informação incorporada no modelo [79]:

- 3D – Representação geométrica e espacial;
- 4D – Planeamento temporal (cronograma);
- 5D – Orçamentação e controlo de custos;
- 6D – Sustentabilidade e análise ambiental;
- 7D – Gestão da manutenção e operação;
- 8D – Segurança na construção;
- 9D – Desconstrução e economia circular;
- 10D – Construção industrializada.

A dimensão 6D, em particular, está diretamente associada à avaliação do desempenho ambiental dos edifícios, sendo essencial para integrar ferramentas como a ACV no ambiente BIM. Esta dimensão permite prever impactos ambientais futuros e tomar decisões informadas durante a fase de projeto, reduzindo o impacto ecológico ao longo do ciclo de vida do edifício [45]. A Figura 6 apresenta uma representação gráfica das diferentes dimensões do BIM, sintetizando as suas aplicações ao longo do ciclo de vida do edifício.

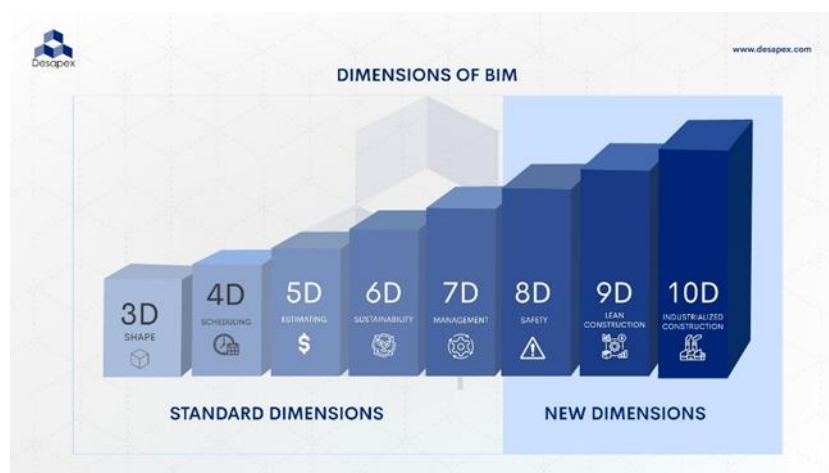


Figura 6 - Dimensões BIM [80].

No contexto da informação contida nos modelos BIM, surge o conceito de LOIN (*Level of Information Need*), introduzido pela norma ISO 19650-1 e pela EN 17412-1:2020, como uma evolução ao tradicional LOD (*Level of Development*). O LOIN define com maior precisão a quantidade, qualidade e granularidade da informação que deve estar presente num modelo BIM em função do seu uso específico. Este conceito visa evitar tanto a sobrecarga informacional como a ausência de dados essenciais, garantindo que apenas a informação necessária é incluída em cada fase do projeto. A aplicação prática do LOIN é essencial para viabilizar a interoperabilidade entre BIM e ferramentas externas, como *software* de simulação energética ou plataformas de ACV. Isto torna-se particularmente relevante em projetos que visam obter certificações ambientais ou otimizar soluções com base em métricas de desempenho sustentável [81, 82]. Assim, a integração entre BIM, ACV e o conceito de LOIN representa uma evolução significativa rumo à digitalização inteligente e sustentável da construção civil. Essa integração possibilita a tomada de decisões fundamentadas em dados ambientais, económicos e técnicos sejam tomadas desde

os primeiros esboços até à gestão pós-ocupação do edifício, promovendo uma abordagem verdadeiramente sustentável e eficiente no setor AEC [82].

Para implementar eficazmente a metodologia BIM, é essencial recorrer a ferramentas digitais capazes de modelar, organizar e comunicar a informação do projeto de forma estruturada. Entre os principais programas de modelação disponíveis no mercado, destacam-se:

- Autodesk Revit;
- Graphisoft ArchiCAD;
- Bentley OpenBuildings;
- Trimble Tekla Structures;
- Vectorworks Architect;
- Allplan;

O Autodesk Revit é, atualmente, uma das ferramentas BIM mais amplamente utilizados em todo o mundo. A sua popularidade deve-se à integração completa entre modelação 3D, documentação, e análise de desempenho, bem como à sua compatibilidade com uma ampla gama de plugins e extensões (por exemplo, Insight, Green Building Studio, ou One Click LCA) que facilitam a avaliação de sustentabilidade, o cálculo energético e a exportação de dados para ACV [83]. Além disso, o Revit possui uma interface que favorece a coordenação multidisciplinar entre arquitetos, engenheiros civis, engenheiros eletromecânicos e gestores de projeto, permitindo a criação de modelos colaborativos centralizados através de plataformas como o Autodesk Construction Cloud ou BIM 360 [84]. A sua compatibilidade com formatos abertos, como IFC, também torna o Revit um elemento estratégico em ambientes Open BIM [85].

O Autodesk Revit integra também uma ferramenta visual de programação chamada Dynamo, que tem vindo a ganhar destaque na modelação paramétrica e na automação de tarefas repetitivas. O Dynamo apresenta um ambiente de programação visual baseada em nós, que permite aos utilizadores criar algoritmos personalizados para gerar geometria, extrair dados, realizar análises e controlar elementos do modelo BIM sem necessidade de codificação tradicional [86]. Esta capacidade torna-se especialmente útil em contextos onde é necessária a automação de processos complexos ou a ligação entre parâmetros geométricos e informações de desempenho ambiental, como acontece nas aplicações de Análise do Ciclo de Vida. O uso do Dynamo facilita, por exemplo, a extração automatizada de quantidades, a organização de dados para exportação para ferramentas de ACV e a parametrização de variantes construtivas com vista à otimização sustentável [5]. Adicionalmente, o Dynamo reforça a personalização e flexibilidade do Revit, permitindo adaptar o modelo a requisitos específicos definidos nos documentos de EIR - *Exchange Information Requirements* (Requisitos de Troca de Informação) [86, 87]. A combinação de Revit com Dynamo constitui, assim, uma solução poderosa para fluxos de trabalho orientados à sustentabilidade, integrando modelação digital, gestão da informação e avaliação ambiental de forma contínua e eficiente.

No contexto da implementação de processos BIM, especialmente em grandes empreendimentos, ganha destaque o conceito de EIR. De acordo com a norma ISO 19650-1, o EIR é um documento fundamental que define que informação deve ser entregue, por quem, quando e em que formato, ao longo das várias fases do ciclo de vida do projeto [87]. No entanto, o EIR não atua de forma isolada: a sua operacionalização e resposta prática são garantidas através do BEP - *BIM Execution Plan* (Plano de Execução BIM), elaborado pela equipa projetista com base nos requisitos definidos pelo cliente. O BEP detalha como a informação será gerida, modelada e entregue, assegurando conformidade com os objetivos estabelecidos [88]. No *software* Autodesk Revit, os requisitos definidos no EIR podem ser implementados por meio da definição prévia de *Model View Definitions* (MVDs), *templates* de projeto, parâmetros partilhados e filtros de vista. Estas ferramentas garantem que o modelo é desenvolvido em conformidade com as exigências específicas do dono de obra [89]. O uso de EIRs bem estruturados, articulados com um BEP robusto, permite alinhar os objetivos do projeto com a entrega digital, assegurando consistência e

qualidade da informação modelada. Esta prática é essencial para garantir a rastreabilidade da informação, o controlo de qualidade digital e a interoperabilidade com ferramentas de simulação ambiental, como *software* de ACV ou sistemas de certificação como o BREEAM. A adoção conjunta do EIR e BEP é particularmente recomendada em projetos que envolvem múltiplas disciplinas e partes interessadas, promovendo uma gestão integrada da informação e maior eficácia na entrega de resultados sustentáveis [88].

2.4.2. OPEN BIM

O conceito de Open BIM refere-se a uma abordagem colaborativa e interoperável para a gestão da informação na construção, baseada em padrões abertos e formatos neutros de dados. Ao contrário dos sistemas fechados, dependentes de plataformas proprietárias, o Open BIM promove a transparência, a acessibilidade e a continuidade da informação ao longo de todo o ciclo de vida do edifício, independentemente do *software* utilizado [90]. Esta filosofia é fundamental para garantir a interoperabilidade entre diferentes atores e ferramentas, assegurando que a informação contida nos modelos BIM possa ser reutilizada, enriquecida e partilhada sem perda de significado. A adoção de Open BIM é, por isso, essencial em projetos de grande complexidade ou que envolvam múltiplas entidades, permitindo a uniformização de dados e a rastreabilidade das decisões técnicas [91].

A operacionalização do Open BIM é sustentada por um conjunto de normas internacionais desenvolvidas e promovidas pela organização buildingSMART International. Entre os mais relevantes destacam-se:

- **IFC (*Industry Foundation Classes*):** É o principal formato de troca de dados abertos em BIM. Normalizado pela ISO 16739, o IFC estrutura a informação de forma semântica, permitindo a representação de elementos construtivos, propriedades, relações espaciais e temporais, e características de desempenho. É a base da interoperabilidade entre ferramentas digitais e a principal estrutura utilizada para integrar modelos com ferramentas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) [85, 92].
- **IDS (*Information Delivery Specification*):** Define os requisitos específicos de informação a serem entregues num modelo BIM. Esta norma permite formalizar expectativas entre cliente e fornecedores sobre o que deve estar contido num determinado modelo, em que formato e em que fase [93]. O IDS pode ser fundamental para assegurar que os modelos respondem a objetivos de análise específicos, como simulações de desempenho ou exportações para ferramentas ACV.
- **BCF (*BIM Collaboration Format*):** É um padrão que facilita a comunicação entre equipas durante a coordenação de modelos BIM. O BCF permite registar comentários, anomalias e pedidos de alteração num modelo, mantendo a ligação entre a visualização 3D e a discussão técnica. Embora não contenha geometrias, o BCF aumenta a eficiência dos processos de revisão colaborativa [94].
- **bSDD (*buildingSMART Data Dictionary*):** Trata-se de uma base de dados semântica que padroniza os termos utilizados na modelação. O bSDD assegura que os atributos dos elementos BIM estão descritos com terminologia comum e internacionalmente reconhecida, promovendo a consistência na codificação e permitindo a interoperabilidade com sistemas externos, como bases de dados ambientais para ACV [95].

No âmbito da implementação de processos BIM, especialmente em projetos complexos e colaborativos, destaca-se a importância do IDM (*Information Delivery Manual*). De acordo com a norma ISO 29481-1, o IDM define de forma estruturada os processos, as trocas de informação, os intervenientes envolvidos e os requisitos de dados necessários em cada fase do ciclo de vida do projeto. Vai além da simples definição de *Model View Definitions* (MVDs), organizando o fluxo de trabalho colaborativo e especificando como, quando, por quem e com que detalhe a informação deve ser gerada, partilhada e utilizada. Um IDM é composto por várias fases, incluindo a definição do caso de uso, a modelação do mapa de processos e a identificação dos requisitos para a troca de informação, os quais são posteriormente formalizados em estruturas como *templates* e esquemas [96]. A definição de MVDs é apenas a última etapa deste processo, servindo como tradução dos requisitos informacionais para formatos interoperáveis,

como o IFC, garantindo que os dados podem ser compreendidos e reutilizados entre diferentes plataformas e agentes do setor da construção [96]. A relevância dos IDMs é particularmente notória em contextos que exigem interoperabilidade e rigor informacional, como nos estudos de ACV. A correta estruturação dos dados como densidade, composição, localização e outras propriedades, permite a integração com ferramentas como One Click LCA ou SimaPro, otimizando a qualidade e a precisão dos resultados [92, 97]. Além disso, o IDM apoia a aplicação do conceito de LOIN, adaptando os requisitos de informação ao longo das diferentes fases do projeto, evitando tanto a sobrecarga informativa como lacunas críticas de dados. Assim, o IDM assegura a consistência e interoperabilidade da informação em projetos BIM, sendo um pilar essencial na digitalização inteligente e sustentável do setor AEC.

A escolha de uma abordagem Open BIM na presente investigação justifica-se pela sua compatibilidade com metodologias de ACV e com os objetivos de interoperabilidade estabelecidos pela empresa Garcia Garcia. A utilização de formatos como o IFC e de estruturas como o bSDD e os IDM assegura a coerência semântica dos dados modelados e a sua integração com ferramentas externas, o que é essencial para uma análise sustentável e rigorosa dos impactos ambientais dos edifícios. Desta forma, o Open BIM torna-se não apenas uma filosofia de trabalho, mas um requisito metodológico crítico para garantir a qualidade, a rastreabilidade e a eficiência dos processos de modelação e avaliação ambiental desenvolvidos no âmbito desta dissertação.

2.4.3. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

A crescente complexidade dos projetos de construção, aliada à digitalização do setor AEC, tem tornado indispensável o uso de sistemas de classificação normalizados no ambiente BIM. Estes sistemas visam organizar, categorizar e uniformizar a informação associada aos elementos construtivos, garantindo a interoperabilidade entre diferentes plataformas, disciplinas e fases do ciclo de vida do edifício. Os sistemas de classificação de informação da construção, conhecidos por CICS (*Construction Information Classification Systems*), atuam como ontologias estruturadas que permitem que todos os intervenientes no projeto comuniquem através de uma linguagem comum e padronizada [98]. Isto é particularmente relevante em ambientes colaborativos, onde a troca eficiente e não ambígua de dados entre arquitetos, engenheiros, empreiteiros e gestores é vital para evitar erros e perdas de informação. Para além disso, estes sistemas facilitam a integração com ferramentas de análise ambiental e de custo, bem como a obtenção de certificações de sustentabilidade, como LEED ou BREEAM [99].

Vários sistemas de classificação têm sido desenvolvidos a nível internacional para responder às diferentes necessidades do setor da construção. Entre os mais relevantes destacam-se:

- OmniClass (EUA): estruturado em múltiplas tabelas, é amplamente utilizado para gestão da informação nos Estados Unidos.
- MasterFormat e UniFormat (EUA/Canadá): focados na organização da documentação técnica e na estimativa de custos, respetivamente.
- CoClass (Suécia): sistema sueco orientado para aplicações digitais e centrado na semântica dos objetos.
- Uniclass 2015 (Reino Unido): sistema modular e flexível, desenvolvido pelo NBS, com forte foco na interoperabilidade em ambientes digitais

Após a apresentação dos principais sistemas internacionais de classificação utilizados em ambiente BIM, importa destacar a realidade portuguesa, onde a adoção destes sistemas ainda se encontra em fase de consolidação. Neste contexto, surge o SECCLasS (Sistema de Estruturação da Classificação na Construção Sustentável), como resposta à necessidade de um referencial nacional alinhado com os princípios do Open BIM e adaptado às especificidades do setor da construção em Portugal. Esta iniciativa, promovida pela Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção (PTPC), foi financiada pelos EEA Grants no âmbito do programa “Crescimento Azul, Inovação e PME” [100]. O SECCLasS representa uma adaptação e contextualização portuguesa do Uniclass 2015, incorporando a estrutura modular deste último,

mas ajustando a nomenclatura e os códigos às práticas, terminologias e requisitos técnicos do mercado nacional. O SECClasS adota a lógica de tabelas interligadas do Uniclass 2015 (como Complexos, Entidades, Sistemas, Elementos, Produtos, Atividades, entre outras), promovendo a interoperabilidade com plataformas internacionais e assegurando simultaneamente a adequação ao contexto português. Esta adaptação torna o sistema particularmente útil em projetos que visam a conformidade com a estratégia nacional para a digitalização da construção e com os princípios do Open BIM [101, 102].

O Uniclass 2015 (*Unified Classification for the Construction Industry*) é um sistema desenvolvido pelo NBS (*National Building Specification*) no Reino Unido, e encontra-se alinhado com a estratégia governamental britânica para a digitalização do setor da construção. Este sistema é composto por múltiplas tabelas interligadas que permitem classificar desde projetos, locais e sistemas até produtos, tarefas e propriedades. A estrutura do Uniclass 2015 baseia-se em múltiplas hierarquias, facilitando a navegação entre níveis de detalhe e promovendo a escalabilidade do sistema. Cada elemento é identificado por um código alfanumérico e por uma descrição normalizada, permitindo a sua utilização em aplicações BIM como o Autodesk Revit ou o ArchiCAD. Esta abordagem modular possibilita a classificação coerente de objetos e processos em diferentes fases do ciclo de vida do edifício, apoiando não só o projeto e a construção, mas também a manutenção e a desconstrução [103].

Um dos principais diferenciais do Uniclass 2015 é a sua capacidade de integrar-se com modelos de dados abertos (Open BIM), especialmente através do formato IFC, garantindo a interoperabilidade entre plataformas e *stakeholders*. Esta característica é crucial para processos colaborativos e para a integração com ferramentas de ACV, permitindo rastrear com precisão os materiais, sistemas e tarefas envolvidas no desempenho ambiental do edifício [104, 105].

No contexto desta dissertação, a adoção do sistema Uniclass 2015 justifica-se por dois fatores centrais. Em primeiro lugar, trata-se do sistema atualmente adotado pela empresa Garcia Garcia, que o exige como referência na estruturação de modelos e na troca de informação com empresas parceiras. Esta exigência decorre da maturidade e escalabilidade do sistema, que permite uniformizar a codificação e garantir rastreabilidade ao longo do ciclo de vida da construção. Em segundo lugar, o Uniclass 2015, ao permitir a associação inequívoca de elementos modelados a categorias específicas, facilita a exportação estruturada de dados para plataformas de ACV, otimizando os fluxos de trabalho de sustentabilidade. A integração com ferramentas como o One Click LCA ou Tally é significativamente mais eficiente quando se utilizam classificações robustas e internacionais, permitindo associar de forma padronizada cada elemento do modelo a categorias de impacto ambiental [102]. A estrutura lógica, o suporte contínuo do NBS e a sua adaptabilidade através do SECClasS em Portugal, tornam o Uniclass 2015 a escolha mais apropriada para garantir uma abordagem padronizada, interoperável e orientada à sustentabilidade no contexto da presente investigação. A utilização deste sistema facilitará assim a estruturação do modelo BIM paramétrico que servirá de base à aplicação prática desta dissertação, assegurando a coerência semântica e a compatibilidade com ferramentas de simulação ambiental e de avaliação de desempenho sustentável. A sua ampla aceitação no mercado internacional e alinhamento com os princípios do Open BIM tornam-no a escolha mais indicada para garantir qualidade, rastreabilidade e interoperabilidade num ambiente colaborativo e orientado à sustentabilidade.

2.5. BIM PARA ACV E AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

2.5.1. AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE COM BIM

A crescente complexidade dos desafios ambientais no setor da construção tem impulsionado a procura por abordagens digitais que possibilitem a integração da sustentabilidade desde as fases iniciais de projeto. Neste contexto, o BIM tem-se afirmado como uma ferramenta essencial para a avaliação da sustentabilidade ao longo do ciclo de vida dos edifícios, permitindo decisões mais informadas, eficientes e fundamentadas em dados reais. O BIM, ao proporcionar uma representação digital tridimensional, paramétrica e integrada dos edifícios, permite a incorporação de dados ambientais, materiais e energéticos que são fundamentais para a análise do desempenho sustentável das construções [6]. Através da dimensão 6D do BIM dedicada à sustentabilidade é possível simular, prever e otimizar os impactos ambientais

associados a diferentes cenários de projeto e construção [45]. Um dos principais contributos do BIM para a sustentabilidade prende-se com a sua capacidade de apoiar a ACV. A integração entre BIM e ACV permite automatizar a recolha de quantidades e propriedades de materiais, facilitando a extração de dados diretamente do modelo digital e a sua exportação para plataformas especializadas de avaliação ambiental, como o One Click LCA, SimaPro ou Tally [75]. Esta interoperabilidade é possível graças ao uso de classificações padronizadas e formatos abertos, que asseguram a consistência e a rastreabilidade dos dados. A utilização de modelos BIM paramétricos permite ainda comparar alternativas construtivas com diferentes impactos ambientais e custos, promovendo uma abordagem multicritério que integra sustentabilidade, economia e desempenho técnico [5, 91].

Além disso, o BIM permite a integração de diversas análises sustentáveis fundamentais para a tomada de decisão informada ao longo do ciclo de vida das construções, como:

- Simulação energética operacional - Metodologia BEM (*Building Energy Modeling*) que permite avaliar o desempenho térmico e energético do edifício durante a fase de utilização, otimizando soluções passivas e sistemas ativos de climatização [106];
- Cálculo do carbono incorporado - Estima a pegada de carbono associada à produção, transporte e instalação de materiais através de plataformas como o One Click LCA, contribuindo para estratégias de descarbonização [107];
- Avaliação do custo do ciclo de vida (LCC) - Analisa os custos económicos associados a cada fase do edifício, desde a construção até à operação e manutenção, permitindo comparações entre alternativas mais sustentáveis e economicamente viáveis [108]

Estudos demonstram que a aplicação integrada de BIM e ACV pode reduzir até 20% das emissões de carbono e otimizar em 15% os custos operacionais dos edifícios [2]. Esta abordagem contribui não só para a eficiência ambiental, mas também para a valorização económica dos ativos imobiliários, reforçando a competitividade das empresas e o cumprimento das metas estabelecidas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) [44]. Outro aspeto relevante diz respeito à capacidade do BIM em apoiar a certificação ambiental de edifícios, como o LEED, BREEAM ou WELL. Ao permitir a extração automática de indicadores de desempenho, o BIM facilita a compilação da documentação exigida por estes sistemas, reduzindo o tempo e o custo de obtenção da certificação [64]. Por fim, importa destacar o potencial do BIM na gestão sustentável pós-ocupação, através da dimensão 7D (*Facility Management*). Esta permite monitorizar o desempenho real do edifício, promover a manutenção preventiva e ajustar as operações de acordo com os dados recolhidos em tempo real, contribuindo para a eficiência contínua do edifício ao longo da sua vida útil [3].

Em síntese, o BIM constitui uma ferramenta estratégica para a avaliação da sustentabilidade na construção civil, permitindo uma abordagem integrada, colaborativa e baseada em dados. A sua integração com metodologias como a ACV, aliada ao uso de classificações estruturadas e formatos abertos, representa um avanço significativo na digitalização sustentável do setor, alinhando-se com as exigências contemporâneas de qualidade ambiental, eficiência energética e responsabilidade social.

2.5.2. FERRAMENTAS BIM PARA ACV

A integração entre BIM-ACV tem vindo a assumir um papel central na investigação e prática profissional, permitindo uma avaliação ambiental mais detalhada, automatizada e adaptada às várias fases do ciclo de vida da construção. Esta sinergia possibilita decisões fundamentadas com base em dados reais, reduzindo ineficiências e a subjetividade associada à introdução manual de dados. Para operacionalizar esta integração, diversas ferramentas digitais foram desenvolvidas, as quais leem e interpretam os dados contidos nos modelos BIM com o objetivo de calcular os impactos ambientais associados. Contudo, estas ferramentas apresentam diferentes graus de maturidade quanto à metodologia de cálculo, à profundidade da integração, à compatibilidade com formatos abertos como o IFC e à sua capacidade de se integrarem com bases de dados ambientais e normas como as ISO 14040, ISO 14044 ou EN 15978 [5]. Conforme identificado por Chen et al. [5], a interoperabilidade e a normalização de processos ainda

representam barreiras significativas. A revisão de literatura evidencia cinco métodos principais de integração BIM-ACV: (1) importação de quantidades (BOQ), (2) uso de formatos IFC, (3) visualizadores BIM interativos, (4) cálculo direto com plugins LCA em ambiente BIM, e (5) cálculo via plugins LCA externos com leitura do modelo. Cada método apresenta vantagens e limitações, sendo a escolha dependente do objetivo do projeto, da estrutura do modelo BIM e da base de dados ambiental utilizada. O estudo destaca ainda ferramentas como o SimaPro, Tally, GaBi, Athena, e One Click LCA, detalhando a sua adequação a diferentes fluxos de trabalho e a sua compatibilidade com programas de modelação como Revit ou Archicad [5]. Este panorama reforça a importância de desenvolver estruturas de integração mais robustas, bem como a necessidade de um maior alinhamento entre as ferramentas digitais, os formatos de dados e os requisitos normativos. A melhoria destas interfaces será crucial para consolidar a aplicação da metodologia ACV em ambiente BIM, promovendo uma construção mais sustentável, eficiente e digitalizada.

Entre as principais ferramentas BIM-ACV disponíveis atualmente, destacam-se:

- One Click LCA;
- Tally;
- SimaPro;
- OpenLCA;
- eToolLCD;
- Athena Impact Estimator.

Tally, por exemplo, é um *plugin* desenvolvido para Autodesk Revit que permite realizar avaliações de ACV diretamente no ambiente BIM. A sua principal vantagem é a integração nativa com Revit, dispensando a exportação do modelo. Contudo, apresenta limitações no que diz respeito à flexibilidade de bases de dados e à compatibilidade com normas europeias, estando mais alinhado com contextos norte-americanos [109, 110].

SimaPro é uma das ferramentas mais antigas e reconhecidas para ACV, amplamente utilizada em contextos industriais e académicos. Embora ofereça uma análise extremamente detalhada, a sua integração com modelos BIM é limitada, exigindo a exportação manual de dados e um tratamento prévio significativo. A sua curva de aprendizagem é elevada, o que pode restringir a sua aplicabilidade em projetos com prazos reduzidos [5, 111].

OpenLCA é uma ferramenta *open-source* altamente flexível, utilizada sobretudo em ambientes académicos. No entanto, a sua integração com BIM é indireta e requer conhecimentos técnicos elevados, além de exigir que os dados sejam formatados manualmente, o que reduz a eficiência em fluxos de trabalho BIM colaborativos [112].

eToolLCD é uma plataforma baseada na *cloud* que suporta múltiplas normas internacionais, incluindo EN 15978, ISO 14040 e ISO14044. Tem vindo a ganhar aceitação em projetos europeus e australianos, apresentando um bom equilíbrio entre usabilidade e profundidade analítica. Permite importações de IFC, mas exige configuração adicional dos dados [113].

Athena Impact Estimator é uma ferramenta robusta e adaptada ao mercado canadiano e americano, mas com pouca aplicabilidade direta em contextos europeus devido à natureza das suas bases de dados e critérios normativos [114].

One Click LCA destaca-se atualmente como uma das ferramentas mais completas e amplamente utilizadas para a integração entre BIM e ACV, especialmente no contexto europeu. Trata-se de uma plataforma *cloud-based* que permite realizar análises de ciclo de vida, emissões de carbono, custo do ciclo de vida (LCC) e apoio à certificação ambiental com elevada compatibilidade com normas como a EN 15978, a ISO 14040 e a ISO14044 [115]. A principal mais-valia do One Click LCA reside na sua capacidade de importar diretamente modelos em formato IFC, Revit, Excel ou gbXML, reconhecendo

automaticamente elementos construtivos, materiais e sistemas com base em classificações como o Uniclass 2015. Esta funcionalidade reduz significativamente o tempo necessário para a configuração da análise e aumenta a fiabilidade dos dados [75, 107]. A Figura 7 ilustra algumas das principais ferramentas compatíveis com o One Click LCA, evidenciando a sua versatilidade na integração com diferentes plataformas de modelação e simulação



Figura 7 - Ferramentas compatíveis com o One Click LCA [116].

Além disso, o One Click LCA inclui uma vasta base de dados ambiental com mais de 100.000 DAPs (Declarações Ambientais de Produto) provenientes de bases como a INIES, IBU, EPD Noruega e outras. Isto permite que as análises se baseiem em dados reais e verificados, reforçando a robustez dos resultados. A ferramenta também permite a criação de relatórios automáticos compatíveis com certificações como BREEAM e LEED [116]. [5, 116]. Este recurso é particularmente útil em contextos de modelação paramétrica, como o que se pretende desenvolver nesta dissertação, facilitando a comparação de alternativas e a avaliação de cenários construtivos com diferentes impactos ambientais.

Por fim, importa destacar a sua interface acessível, a existência de tutoriais interativos e atualizações regulares da base de dados [107]. Estas características tornam o One Click LCA uma ferramenta robusta, acessível e altamente adaptável às exigências de projetos reais. A Tabela 1 apresenta uma comparação detalhada entre as principais ferramentas digitais utilizadas na integração entre BIM e ACV, destacando os seus níveis de compatibilidade com modelos BIM, cobertura de bases de dados ambientais, conformidade com normas internacionais e aplicabilidade em sistemas de certificação de sustentabilidade. Esta análise permite compreender as vantagens e limitações de cada solução no apoio à tomada de decisões sustentáveis em projetos de construção.

Tabela 1 - Comparação de ferramentas digitais para integração entre BIM e ACV.

Ferramenta	Integração BIM	Base de dados	Normas suportadas	Certificações	Licenças Custos
One Click LCA	Direta via Revit, IFC, Excel	+130.000 DAPs reais de mais de 70 bases certificadas (INIES, IBU, EPD Norge, etc.)	EN 15978, ISO 14040, ISO 14044, Level(s)	LEED, BREEAM, DGNB, WELL, HQE	Versão gratuita para estudantes (12 meses). Descontos até 50 % para investigação. Licenças comerciais sob consulta
Tally	Plugin exclusivo para Autodesk Revit	Dados GWP (GaBi database + EPDs NRMCA); limitado a EUA/Canadá	LEED	LEED	Licença Comercial sob consulta. Licença académica disponível mediante pedido.
SimaPro	Sem integração nativa; input manual/export IFC simplificado	Ecoinvent 3.9, Agri-footprint, ELCD, Industry Data 2.0 (licenças separadas)	ISO 14040, ISO 14044	Pode gerar dados para LEED, GHG Protocol, etc.	Comercial: 6100-7 800 €/ano Académica: 2 000 €/ano Institucional: 3 000 €/ano.
OpenLCA	Sem integração nativa; Permite importação IFC manual	Ecoinvent, GaBi, USLCI, ELCD, Agribalyse, Social Hotspots, OEF, ProBas (depende de configuração)	Flexível (métodos LCIA personalizados e externos)	Adaptável (com configuração e verificação)	Gratuito Custos apenas dos bases de dados (Ecoinvent)
eToolLCD	Exportação IFC + compatibilidade BIM nativa com modelos federados	+15.000 materiais com EPDs, genéricos e específicos por região (UK, EU, AUS)	EN 15978, ISO 14040, ISO 14044	BREEAM, LEED, Green Star	Comercial: 4 500-6135 £/ano Licenças académicas disponíveis por pedido
Athena Impact Estimator	Integração parcial com Revit via exportação de quantidades; Limitado a Canadá/EUA	Dados regionais do Canadá + dados padrão Americanos (Athena database)	CSA S478, ISO 14040 (adaptado), regionais	LEED (opcional para ACV), Não reconhecido por BREEAM	Gratuito Aplicável apenas ao contexto norte-americano (EUA/Canadá)

Com base nesta análise, a escolha do One Click LCA justifica-se pela sua elevada interoperabilidade com modelos BIM, extensa base de dados de DAPs, aderência às normas europeias e facilidade de utilização. O facto de a empresa Garcia Garcia adotar processos baseados em BIM com classificações Uniclass 2015 e formato IFC torna o One Click LCA a ferramenta mais adequada para garantir coerência, rastreabilidade e eficácia no desenvolvimento da ACV integrada nesta dissertação.

2.5.3. RELAÇÃO BIM – ACV

A introdução da ACV ainda na fase de conceção dos edifícios permite identificar pontos críticos ambientais e avaliar diferentes soluções construtivas de forma quantitativa. Quando associada ao BIM, essa análise torna-se mais eficiente, uma vez que os dados geométricos e materiais extraídos diretamente do modelo permitem alimentar as ferramentas de ACV com menor esforço e maior fiabilidade. Esta sinergia promove um processo iterativo e paramétrico, em que é possível testar rapidamente variantes de materiais, sistemas e tecnologias, observando em tempo real o impacto ambiental de cada escolha [45, 75].

Além disso, o modelo paramétrico BIM possibilita a definição de regras e parâmetros dinâmicos, o que facilita a automatização de processos de extração de quantidades e a exportação estruturada de dados

para ferramentas como o One Click LCA. A análise ambiental, quando conduzida com apoio de um modelo paramétrico, pode ser continuamente ajustada à medida que o projeto evolui, garantindo alinhamento entre desempenho ambiental, requisitos normativos e objetivos de sustentabilidade.

Estudos recentes têm demonstrado os benefícios da integração BIM–ACV. Najjar et al. [2] evidenciaram que a combinação das metodologias permite uma redução de até 25% nas emissões de carbono incorporado e uma melhoria de 15% na eficiência energética, quando comparado com abordagens convencionais. Jin et al. [6], realça que o uso conjunto de BIM e ACV contribui para decisões mais sustentáveis durante o design conceptual, nomeadamente na escolha de materiais com menor impacto e na otimização do desempenho térmico dos espaços. Wang et al. [3] reforçam ainda a aplicação desta metodologia na manutenção e gestão pós-ocupação (7D BIM), onde a ACV pode ser utilizada para planear substituições de materiais e prever impactos futuros. Este ciclo contínuo de análise torna o modelo BIM um verdadeiro suporte, que acompanha o edifício desde a sua conceção até ao desmantelamento, otimizando decisões em todas as fases do ciclo de vida.

Apesar dos avanços significativos, a integração entre BIM e ACV ainda enfrenta diversos desafios, especialmente em contextos empresariais e académicos. A Tabela 2, que sistematiza esses problemas, pode ser traduzida e analisada da seguinte forma:

Tabela 2 - Principais problemas e desafios na integração de dados entre BIM e ACV [117].

Problemas/dificuldades e desafios
Falta de padronização de informação estruturada
Falta de parametrização e LOD do modelo
Falta de propriedades qualitativas dos materiais de construção
Nomenclatura imprecisa e não atualizada dos materiais de construção
Diferentes fontes de bases de dados utilizadas para as fases de produção e de construção
Inexistência de bases de dados locais
Interoperabilidade entre ferramentas e plataformas BIM

Estes entraves, decorrem sobretudo da ausência de normalização na estrutura da informação, da baixa interoperabilidade entre os formatos (como IFC, gbXML ou COBie) e da diversidade de metodologias e bases de dados ambientais utilizadas pelas ferramentas de ACV [5]. Em muitos casos, os modelos BIM não contêm informações cruciais, como densidade, composição ou origem dos materiais, o que compromete a qualidade das análises ambientais. A ausência de bases de dados locais, nomeadamente Declarações Ambientais de Produto (DAP) de fabricantes nacionais, dificulta a aplicação contextualizada da ACV em países como Portugal. Neste sentido, torna-se urgente investir na construção de bases de dados nacionais, compatíveis com ferramentas como o One Click LCA, que utilizem normas europeias (EN 15804, EN 15978) para assegurar consistência e comparabilidade dos resultados [56]. Outro fator crítico é a falta de parametrização e LOD (*Level of Development*) adequado nos modelos BIM. Muitos modelos são desenvolvidos com foco na geometria e documentação gráfica, negligenciando os dados não-visuais, como propriedades materiais, origens e dados ambientais [117]. A adoção de *frameworks* como o LOIN (*Level of Information Need*), conforme definido pela EN 17412-1, surge como solução para garantir a informação mínima necessária à análise ambiental. Adicionalmente, a buildingSMART International encontra-se atualmente a desenvolver um modelo de *Information Delivery Specification* (IDS) dedicado à integração entre metodologias BIM e ACV, com o objetivo de assegurar a definição e verificação automatizada dos requisitos de informação aplicáveis à avaliação ambiental.

Diversos estudos recentes em Portugal têm explorado a relação entre o BIM e a ACV de edifícios, fornecendo contribuições relevantes para a presente investigação. Seguidamente apresentam-se alguns trabalhos com foco na metodologia adotada, resultados alcançados e abordagem específica à integração BIM-ACV em cada caso.

Parece et al. [118] apresenta uma metodologia BIM que agiliza a quantificação do carbono incorporado em edifícios, utilizando o sistema SECCLasS para automatizar a ligação entre modelos BIM e bases de

dados ambientais. O método calcula o Potencial de Aquecimento Global (PAG) dos elementos construtivos nas fases iniciais do projeto (módulos A1–A3 e B4 da norma EN 15978), permitindo avaliações rápidas e contínuas sem necessidade de remodelação. Contudo, destaca-se que o nível de detalhe do modelo influencia significativamente a fiabilidade dos resultados, exigindo estratégias específicas de modelação para garantir uma análise precisa.

Machado [119] desenvolveu uma abordagem prática para a avaliação do ciclo de vida num projeto real certificado pelo BREEAM, combinando métodos expedito e detalhado, com recurso ao *software* One Click LCA. Destaca-se pela incorporação direta de classificações normalizadas (IFC e categorias BREEAM) no Mapa de Trabalhos e Quantidades (MTQ), permitindo uma estimativa preliminar automática da pegada de carbono e reduzindo erros de transcrição. Apesar das vantagens operacionais desta metodologia, manteve-se uma integração indireta com o modelo BIM, dependente de processamento manual intermédio, sublinhando a importância da organização rigorosa dos dados na ausência de uma interoperabilidade completa.

Alecrim [117] desenvolveu uma abordagem integrada que combina BIM, ACV e avaliação de sustentabilidade num único fluxo de trabalho. Utilizando o Revit com o plug-in Tally, a simulação energética com o GBS e a exportação de custos via Cype, foi possível calcular automaticamente os impactos ambientais e energéticos de um edifício habitacional, alinhando os resultados com o sistema SBToolPT. A metodologia permitiu análises rápidas e detalhadas, destacando o potencial do BIM como plataforma multidisciplinar. Contudo, a necessidade de adaptar dados nacionais à base de dados do Tally evidenciou limitações na compatibilidade com o contexto português. Ainda assim, o estudo representa um exemplo eficaz de aplicação prática de BIM 6D para ACV em Portugal.

Para sintetizar as principais vantagens e desvantagens de cada estudo analisado, apresenta-se a Tabela 3:

Tabela 3 - Comparação das principais vantagens e limitações identificadas nos estudos analisados sobre a integração entre BIM e ACV.

Estudos	Principais vantagens	Limitações
Uma ferramenta baseada em BIM para a avaliação expedita do carbono incorporado utilizando o sistema de classificação SECClasS [118]	- Automatização BIM-ACV via classificação padronizada (SECClasS), evitando retrabalho manual; - Avaliação rápida e contínua desde as fases iniciais do projeto, sem necessidade de remodelar alternativas;	- Requer adoção de um sistema de classificação específico (curva de aprendizagem para equipas de projeto); - Sensibilidade à qualidade do modelo BIM: resultados dependentes do nível de detalhe e informação do modelo;
Análise de Ciclo de Vida na Perspetiva da Certificação BREEAM [119]	- Aplicação prática em contexto empresarial, demonstrando viabilidade da ACV em projeto real; - Integração de classificações BIM (IFC) e categorias BREEAM no MTQ, facilitando o mapeamento para a ferramenta ACV e reduzindo retrabalho;	- Preparação de dados trabalhosa: exigiu reorganizar extensivamente o MTQ e compilar informação adicional (consumos, resíduos) manualmente - Dependência de <i>software</i> externo (One Click LCA) e formato específico: requer acesso à ferramenta e conhecimento para correta importação/interpretação dos resultados
Aplicação da Metodologia BIM em Análises de Ciclo da Vida (LCA) [117]	- Avaliação ágil de alternativas: modelos BIM paramétricos permitem gerar e analisar cenários de projeto múltiplos com rapidez, integrando sustentabilidade desde o conceito; - Automatização do <i>workflow</i>: extração de quantidades e associação a dados ambientais diretamente do modelo reduz erros humanos e aumenta a eficiência (colmatando lacunas de interoperabilidade);	Desafio de implementação: requer desenvolvimento de <i>scripts</i>/ferramentas personalizadas e rigor na normalização dos dados do modelo (nem todas as equipas dispõem de experiência em modelação paramétrica); - Adoção setorial: para impacto amplo, depende de capacitação técnica e eventual padronização desta abordagem em práticas correntes (falta de referências normativas específicas pode limitar uso imediato);

Em termos globais, os estudos analisados indicam que a integração de BIM e ACV no contexto nacional é viável e promissora, mas ainda enfrenta obstáculos técnicos e operacionais significativos. Do ponto de vista técnico, destaca-se a falta de interoperabilidade direta entre modelos BIM e as ferramentas de ACV, apesar de BIM facilitar a extração de quantidades, a ausência de formatos de dados ambientais padronizados dificulta o mapeamento automático entre objetos do modelo e inventários de ACV. Em termos operacionais, a preparação manual de ficheiros ou a necessidade de ajustar bases de dados estrangeiras à realidade local, ilustram o esforço adicional requerido para aplicar ACV com precisão. Além

disso, a qualidade e nível de detalhe do modelo BIM emergem como fatores críticos – modelos incompletos ou sem informação ambiental atribuída podem comprometer os resultados, ao passo que modelos muito detalhados aumentam o trabalho de inserção e verificação de dados.

Este contexto molda o enquadramento e serve de motivação direta para os objetivos específicos desta dissertação. Pretende-se aproveitar as soluções e também os obstáculos identificados nestes trabalhos para desenvolver uma abordagem aprimorada que torne a ACV suportada em BIM mais acessível, rigorosa e integrada no processo de projeto em Portugal. Em particular, a estratégia de modelação paramétrica BIM proposta visa superar constrangimentos técnicos (automatizando trocas de informação com bases de dados ambientais), simplificar a aplicação operacional da ACV desde as fases conceptuais (reduzindo a necessidade de retrabalho manual e acelerando a comparação de alternativas) e, assim, antecipar as futuras exigências de sustentabilidade no setor da construção, contribuindo para a sua implementação eficaz nas práticas de projeto nacionais.

3

EMPRESA DE ACOLHIMENTO E CASO DE ESTUDO

3.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo enquadrar a entidade de acolhimento e o caso de estudo que serviram de base à aplicação prática da metodologia desenvolvida ao longo da dissertação. Numa primeira fase, será apresentada a empresa Garcia Garcia, S.A., destacando-se a sua atividade e relevância no setor da construção nacional e de seguida, será introduzido o caso de estudo selecionado. A articulação entre a entidade de acolhimento e o caso de estudo permitiu a validação prática dos conceitos teóricos explorados nos capítulos anteriores, viabilizando a implementação e teste das ferramentas e procedimentos propostos com base em dados reais. Este capítulo serve, assim, de ponte entre o enquadramento conceptual da dissertação e a sua aplicação prática, estruturando as condições de base que sustentam os capítulos metodológicos e analíticos subsequentes.

3.2. EMPRESA DE ACOLHIMENTO

A empresa de acolhimento deste trabalho é a Garcia Garcia, S.A., uma construtora nacional com mais de um século de atividade no setor da construção. A ligação da família Garcia à construção civil remonta ao final do século XIX, com a construção de chaminés para a indústria têxtil. Atualmente, a empresa desenvolve projetos em diversas áreas da construção, mantendo uma presença consolidada no panorama nacional [120].

Com sede em Santo Tirso, a Garcia Garcia posiciona-se no mercado como empresa especializada na prestação de serviços integrados de engenharia e construção, distinguindo-se pelo modelo Design & Build, no qual a empresa assume simultaneamente as fases de conceção e construção dos projetos. Este modelo oferece vantagens significativas ao nível da coordenação de equipas, do controlo de custos e prazos, da redução de riscos e da obtenção de soluções mais ajustadas às necessidades funcionais dos clientes. Em 2022, a empresa contava com 310 colaboradores, um volume de negócios de 116 milhões de euros e mais de 200 000 m² de área construída, conforme ilustrado na Figura 8 [120].



Figura 8 - Dados da empresa de acolhimento atualizados no ano 2022 [120]

A empresa organiza a sua atividade de forma estruturada e sequencial, seguindo a metodologia interna *Step by Step* ilustrada na Figura 9, que permite acompanhar todas as fases do projeto, desde a análise preliminar do terreno e conceção arquitetónica, até à execução e entrega final da obra [120]. Esta abordagem sequencial permite acompanhar as diferentes fases dos projetos de forma sistemática.



Figura 9 - Modelo de trabalho da empresa de acolhimento [120]

A atuação da Garcia Garcia estende-se a um conjunto diversificado de áreas, com destaque para os setores industrial, logístico, comercial, residencial e da saúde e hospitalidade, abrangendo tanto construção nova como projetos de reabilitação. A empresa investe também no desenvolvimento de parques industriais e na gestão de projetos sob o modelo *design to rent*, colaborando com promotores e investidores na criação de imóveis adaptados ao arrendamento empresarial.

No domínio da inovação tecnológica, a empresa tem apostado na integração do BIM como ferramenta central de suporte à conceção, coordenação e execução dos projetos. Com o recurso ao BIM, potencia-se a eficácia e a eficiência, favorecendo a redução dos prazos de conceção e construção, a diminuição dos custos, e assegurando o desenvolvimento de projetos com um grau de confiança superior [120].

Paralelamente, a Garcia Garcia adota a sustentabilidade como um compromisso central, transversal a todas as fases dos projetos em que intervém, desde a conceção inicial até à execução final da obra. A sua estratégia ambiental assenta em três pilares fundamentais: a gestão eficiente dos recursos naturais, a redução dos impactos ambientais associados à construção, e a implementação sistemática de práticas mais responsáveis e sustentáveis. Este posicionamento traduz-se numa abordagem orientada para a melhoria contínua do desempenho ambiental, promovendo soluções construtivas inovadoras e alinhadas

com as melhores práticas internacionais. A empresa procura incorporar princípios da economia circular, privilegiando a reutilização de materiais, a redução de resíduos e o uso de energias renováveis sempre que possível. Adicionalmente, a Garcia Garcia encontra-se certificada segundo a norma ISO 14001, o que reforça a sua orientação para a gestão ambiental eficaz e integrada. No plano prático, e sempre que o enquadramento do projeto o permite, a empresa alinha os seus desenvolvimentos com sistemas internacionais de certificação ambiental, como o BREEAM e o LEED, e com os princípios da taxonomia europeia para atividades sustentáveis, contribuindo para a descarbonização do setor da construção. Esta atuação é frequentemente complementada pela colaboração com entidades locais, promovendo sinergias que potenciam a redução do impacto ambiental das intervenções e favorecem a integração territorial dos projetos [120].

Neste contexto, a colaboração com a Garcia Garcia revelou-se determinante para a realização do presente trabalho, disponibilizando recursos técnicos e operacionais fundamentais para o seu desenvolvimento. A colaboração com a empresa permitiu o acesso a modelos digitais, documentação técnica detalhada e apoio especializado, proporcionando condições favoráveis para a aplicação prática de metodologias de modelação paramétrica BIM e Análise de Ciclo de Vida, em contexto real e com dados representativos da prática profissional atual.

3.3. OBRA CASO DE ESTUDO

O caso de estudo selecionado para a presente dissertação foi cedido pela empresa Garcia Garcia, S.A., no âmbito da colaboração estabelecida no contexto do estágio curricular. Trata-se da construção de um armazém logístico localizado em Canelas, concelho de Vila Nova de Gaia, com uma área bruta de construção de aproximadamente 22 000 m². O edifício em questão insere-se numa tipologia de uso industrial/logístico, sendo projetado para responder às exigências funcionais e operacionais de armazenagem e distribuição. A solução construtiva adotada baseia-se numa estrutura de betão armado com elementos pré-fabricados e fundações diretas, sendo a envolvente exterior constituída por painéis sandwich e por chapas perfiladas aplicadas em cobertura, configurando um sistema leve e adequado à função logística do edifício. A configuração do edifício privilegia a modularidade e a flexibilidade de utilização, características essenciais neste tipo de instalações. A Figura 10 apresenta o alçado Oeste do edifício, onde é possível identificar a repetição modular dos vãos e a organização estrutural da fachada. Esta representação permite ainda evidenciar a regularidade construtiva e a solução de apoio adotada, aspetos característicos da lógica modular do projeto. A Figura 11 ilustra a planta de fundações extraída do modelo de estruturas, permitindo visualizar a organização modular dos apoios e a aplicação de elementos estruturais pré-fabricados, fundamentais na solução construtiva adotada.

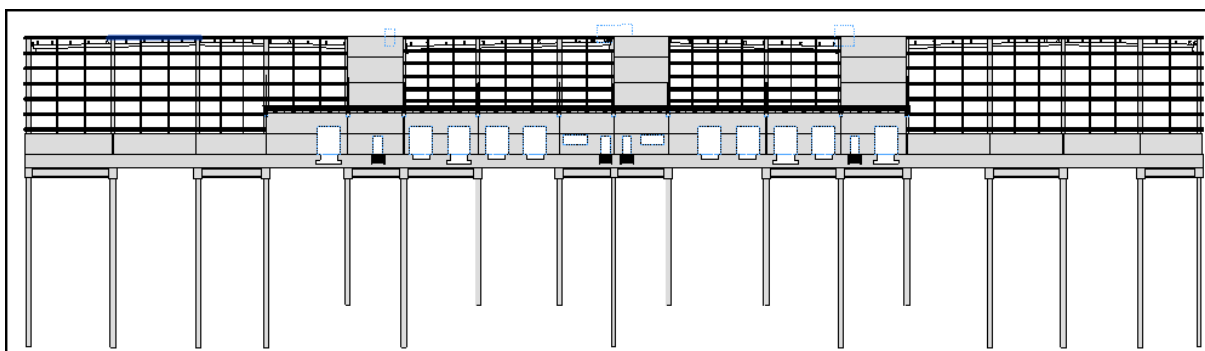


Figura 10 - Alçado Oeste da construção

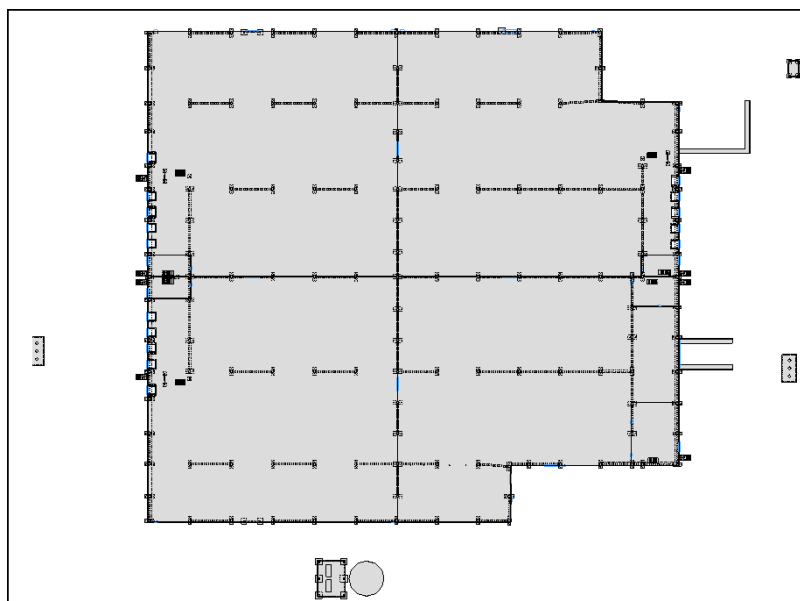


Figura 11 - Planta de fundações do edifício extraída do modelo de estruturas

O projeto integra as especialidades de estruturas, arquitetura, redes elétricas, mecânica e hidráulica, bem como os sistemas de segurança contra incêndios. Todos os elementos foram desenvolvidos com recurso à metodologia BIM, utilizando o *software* Revit, o que permitiu a obtenção de um modelo digital paramétrico completo e coerente. Foram desenvolvidos seis modelos distintos correspondentes a cada especialidade, conforme ilustrado nas Figuras 12 a 17. Estes modelos foram utilizados para coordenação, extração de quantidades e suporte às análises desenvolvidas nos capítulos seguintes.

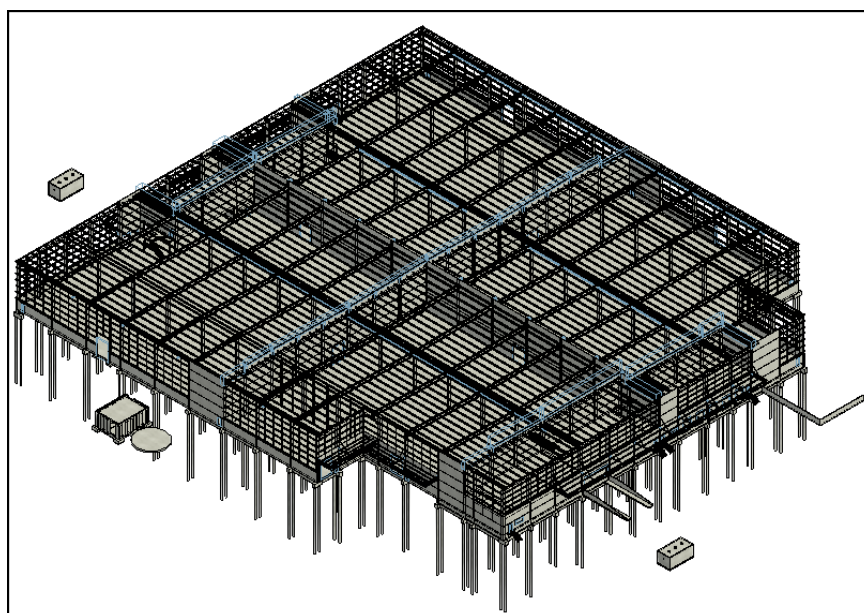


Figura 12 - Modelo de estruturas

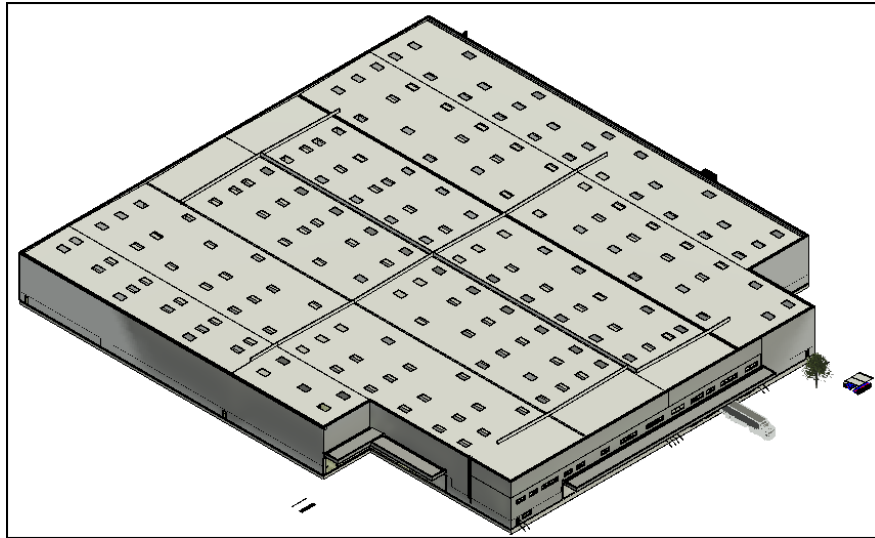


Figura 13 - Modelo de arquitetura

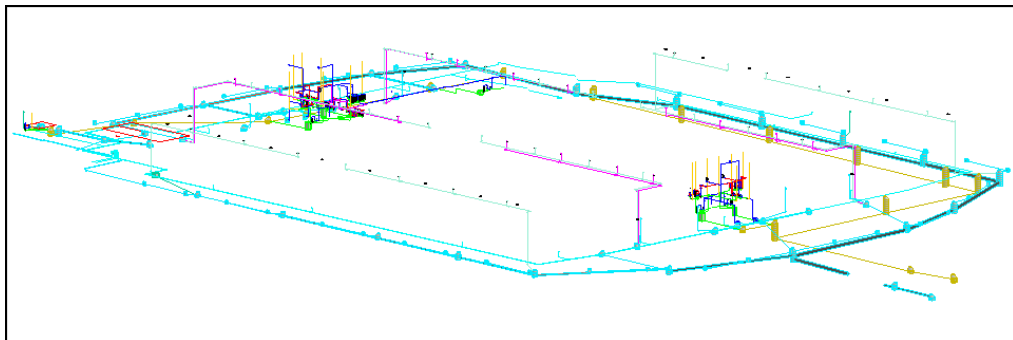


Figura 14 - Modelo de hidráulica

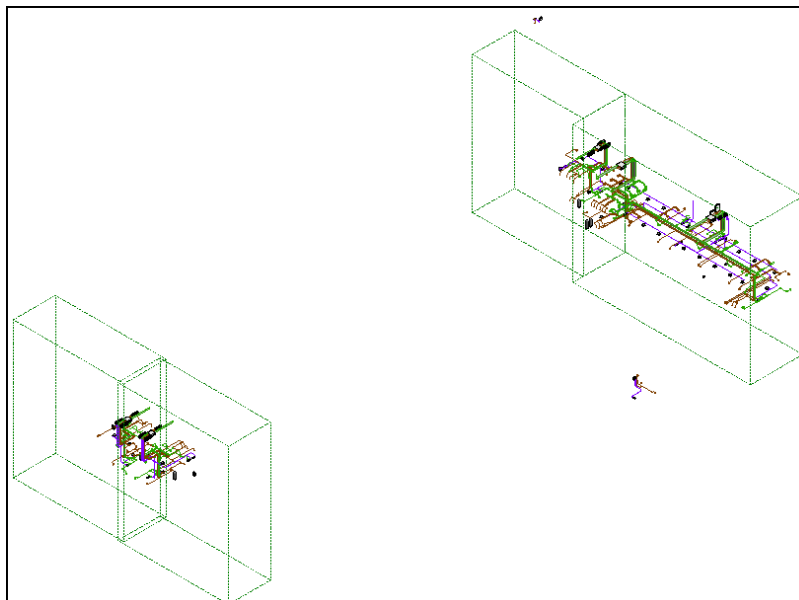


Figura 15 - Modelo de mecânica

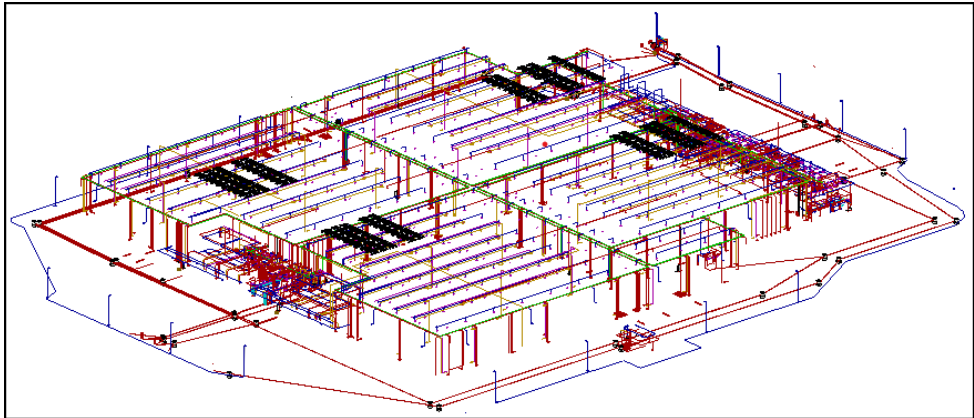


Figura 16 - Modelo de redes elétricas

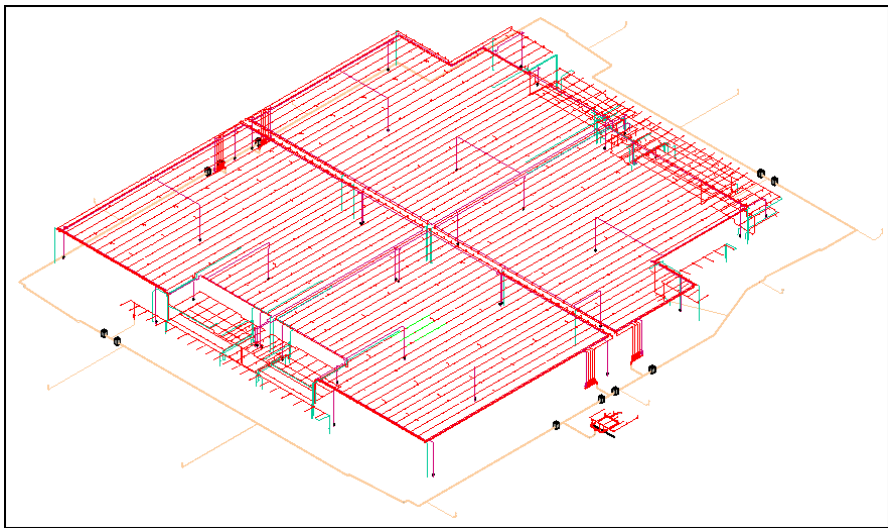


Figura 17 - Modelo de sistemas de segurança contra incêndios

A informação paramétrica dos elementos modelados permitiu extrair automaticamente mapas de quantidades com elevado nível de detalhe. A Figura 18 exemplifica o mapa de quantidades associado às vigas metálicas de fachada (madres), extraído diretamente do modelo BIM. Esta informação evidencia o potencial da modelação paramétrica na geração de métricas quantitativas detalhadas, fundamentais para análises de desempenho ambiental e para a orçamentação em fases iniciais do projeto.

Zona	Espaço	Perfil	Material	Quant.	Comp. Unitário (m)	Comp. (m)
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 50x1.5	S350 GD+Z (EN 10147)	1	0.04	0.04
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 50x1.5	S350 GD+Z (EN 10147)	3	7.45	22.35
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 50x1.5	S350 GD+Z (EN 10147)	15	8.50	127.50
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 50x1.5	S350 GD+Z (EN 10147)	23	9.00	207.00
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 50x1.5	S350 GD+Z (EN 10147)	71	11.50	816.50
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 300x2.5	S350 GD+Z (EN 10147)	14	3.00	42.00
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 300x2.5	S350 GD+Z (EN 10147)	4	3.02	12.10
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 300x2.5	S350 GD+Z (EN 10147)	5	3.56	17.80
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 300x2.5	S350 GD+Z (EN 10147)	4	3.91	15.65
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 300x2.5	S350 GD+Z (EN 10147)	2	4.50	9.00
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 300x2.5	S350 GD+Z (EN 10147)	2	4.52	9.03
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 300x2.5	S350 GD+Z (EN 10147)	2	4.54	9.07
ARMAZÉM	MADRES FACHADA	MadreMax 300x2.5	S350 GD+Z (EN 10147)	2	4.55	9.10

Figura 18 - Mapa de quantidades das vigas metálicas de fachada (madres), extraído do modelo BIM.

Estes modelos serviram de base para a aplicação da metodologia de ACV com diferentes abordagens descrita nos capítulos seguintes. A seleção desta obra como caso de estudo revelou-se pertinente não só pela disponibilidade e qualidade da informação técnica fornecida, mas também pela representatividade que este tipo de edifício possui no setor da construção em Portugal. A articulação entre os diferentes modelos BIM, a qualidade da informação geométrica e não geométrica disponível e a possibilidade de extrair métricas diretamente do modelo consolidaram a relevância desta obra como caso de estudo, proporcionando uma base técnica robusta para a aplicação prática das metodologias exploradas ao longo da dissertação.

4

METODOLOGIA

4.1. INTRODUÇÃO

Tendo por base o objetivo de analisar o caso de estudo através da Análise do Ciclo de Vida, desenvolveu-se uma metodologia de trabalho dividida em quatro etapas principais, representadas na Figura 19.

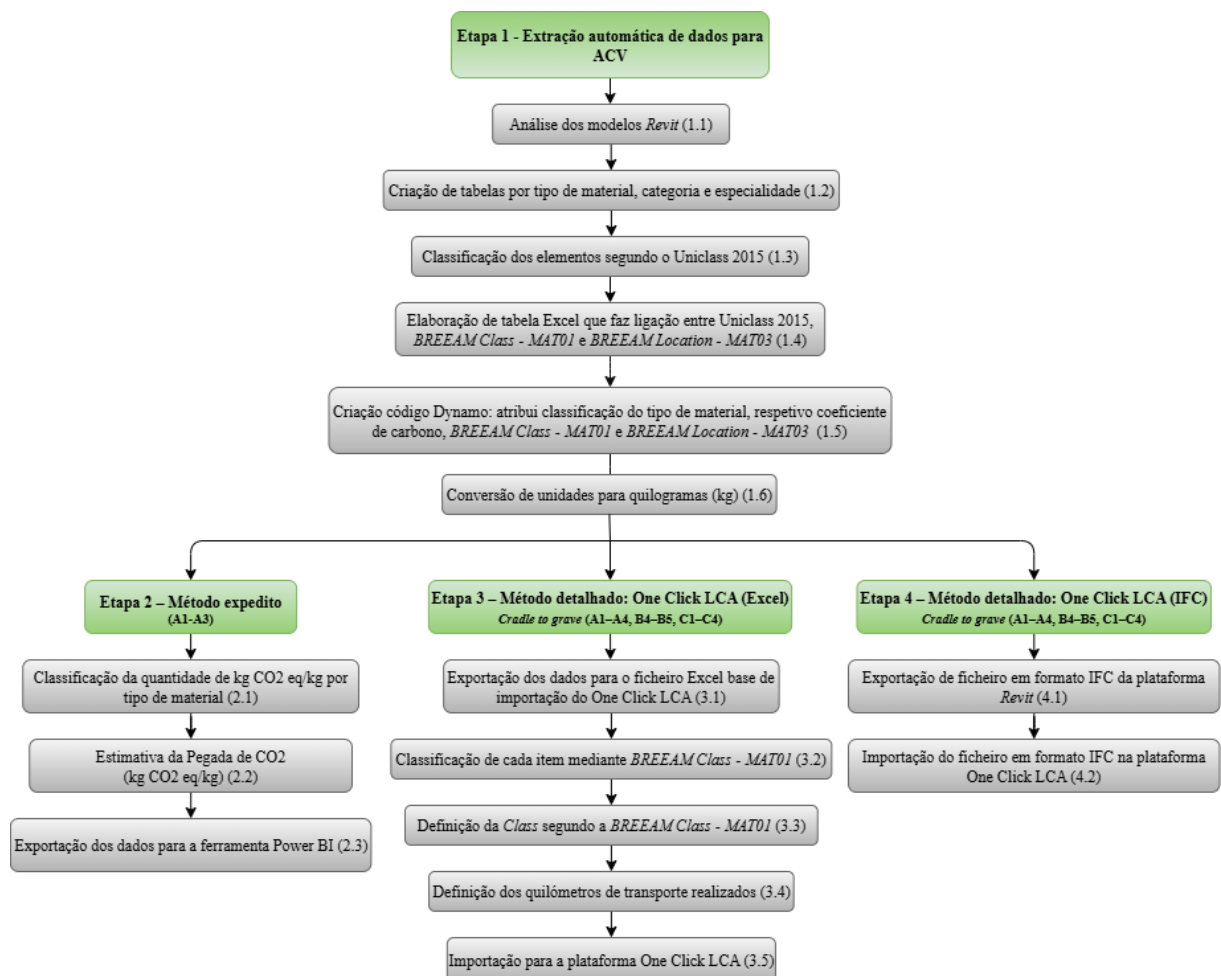


Figura 19 - Fluxograma da metodologia utilizada na presente dissertação.

A etapa 1, comum aos três métodos de cálculo aplicados, corresponde ao tratamento prévio dos modelos 3D do projeto, com o objetivo de estruturar a informação necessária à exportação automática de dados para a ACV. As três etapas seguintes correspondem às abordagens adotadas: o Método Expedito, o Método Detalhado: One Click LCA através da importação de um ficheiro Excel normalizado e o Método Detalhado: One Click LCA baseado na importação direta de modelos em formato IFC, permitindo a transferência automatizada de informação modelada para análise ambiental.

O tratamento prévio do modelo digital, correspondente à Etapa 1 da metodologia, visa a análise e estruturação de toda a informação disponível no modelo Revit do caso de estudo. Esta fase inclui a extração de tabelas organizadas por tipo de material, tipo de elemento construtivo e por especialidade técnica, assegurando uma leitura transversal do modelo. Cada elemento é classificado de acordo com o sistema Uniclass 2015, sendo-lhe igualmente atribuída uma tipologia de material, um coeficiente de emissão de carbono, e uma correspondência com os critérios do sistema BREEAM, nomeadamente os campos *Class - MAT01* (relativos ao tipo de material) e *Location - MAT03* (relativos à origem geográfica). Posteriormente, todas as unidades são convertidas para quilogramas, de forma a garantir a compatibilidade com os fatores de emissão utilizados na avaliação ambiental. Concluída esta etapa, torna-se possível aplicar qualquer uma das abordagens de ACV previstas. Contudo, dada a sua simplicidade e função de pré-avaliação, recomenda-se o início pela Etapa 2, correspondente ao Método Expedito. Esta abordagem permite estimar, com base nas tabelas previamente criadas em Revit, a pegada de carbono incorporado por tipo de material. A análise é realizada através da exportação dos dados para um ficheiro Excel e posterior importação para o *software* Power BI, onde se procede à visualização e interpretação gráfica dos resultados de ACV de forma expedita.

Relativamente às abordagens detalhadas de ACV, as etapas 3 e 4 da metodologia correspondem à aplicação da ferramenta comercial One Click LCA, reconhecida internacionalmente pela sua compatibilidade com normas como a ISO 14040, ISO 14044 e EN 15978. Na Etapa 3, os dados previamente extraídos do modelo Revit são organizados e estruturados num ficheiro Excel de importação fornecido pela própria plataforma. Neste ficheiro, cada item é identificado segundo a sua classificação *BREEAM - Class MAT01*, à qual posteriormente é associada uma *IFC Class*. Adicionalmente, é atribuída uma distância estimada de transporte, em quilómetros, para cada material incorporado, de forma a contabilizar os impactos associados à logística na fase de construção. Após a preparação completa do ficheiro Excel, os dados são importados para o One Click LCA, onde são processados e analisados segundo categorias de impacto ambiental, permitindo uma avaliação rigorosa da pegada de carbono e de outros indicadores ambientais relevantes. A Etapa 4 corresponde também a uma aplicação do método detalhado de ACV, recorrendo igualmente à plataforma One Click LCA, mas desta vez através da importação direta de ficheiros em formato IFC. Para tal, procedeu-se à exportação dos modelos desenvolvidos em Revit para ficheiros em formato IFC.

4.2. ETAPA 1 - EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS PARA ACV

A aplicação da ACV a projetos de construção requer, como condição essencial, o cálculo rigoroso das quantidades de materiais utilizados em todas as disciplinas do projeto. Para garantir a fiabilidade da informação, foi desenvolvida uma metodologia sistemática de análise e extração de dados a partir do modelo BIM, com o objetivo de assegurar a coerência e a integridade dos elementos contabilizados.

A primeira etapa deste processo consistiu na análise crítica dos modelos desenvolvidos no *software* Revit, com especial atenção à identificação de elementos modelados em duplicado entre disciplinas (como estrutura e arquitetura), ou de componentes auxiliares que, não sendo fisicamente construídos, possam ter sido incluídos para fins de representação gráfica ou coordenação. A sua exclusão é essencial para evitar distorções nos resultados da ACV. Para além disso, foram igualmente analisados os elementos com múltiplas camadas materiais, exigindo uma decisão metodológica quanto ao nível de desagregação e contabilização dos materiais constituintes, tal como será abordado nas subsecções seguintes.

Paralelamente, procedeu-se à classificação de todos os elementos modelados segundo o sistema Uniclass 2015, em conformidade com as práticas adotadas pela empresa Garcia Garcia. Para efeitos de posterior integração com os métodos de ACV, foi ainda necessário agrupar os materiais em categorias simplificadas, de modo a garantir a sua utilização coerente tanto no Método Expedito como no Método Detalhado. Neste contexto, foram antecipadamente atribuídas as classificações *BREEAM Class – MAT01* e *BREEAM Location – MAT03*, essenciais para a correta interpretação dos dados no *software* One Click LCA. A atribuição destes parâmetros revelou algumas limitações no ambiente nativo do Revit, especialmente pela inexistência de campos predefinidos para este tipo de informação ambiental. Para colmatar esta lacuna, foram criados *shared parameters* específicos, cuja implementação e estruturação serão detalhadas mais à frente. Por fim, e de forma a permitir a avaliação da pegada de carbono, todas as quantidades de materiais foram convertidas para massa (kg), recorrendo às propriedades físicas de densidade sempre que disponíveis, ou a valores de referência consolidados. A extração final da informação foi realizada através da criação de tabelas paramétricas no Revit, posteriormente exportadas com o auxílio de *add-ins* especializados, com o intuito de automatizar o processo e garantir a integridade dos dados. Tal como descrito no fluxograma metodológico, este processo constitui a base comum para a aplicação dos dois métodos de ACV considerados, sendo determinante para o cálculo fiável da pegada de carbono (kg CO₂ eq.) dos elementos modelados.

4.2.1. ANÁLISE DOS MODELOS REVIT

O projeto do caso de estudo encontra-se modelado tridimensionalmente no *software* Revit, sendo constituído por seis modelos distintos, correspondentes às diferentes especialidades técnicas envolvidas: arquitetura, estruturas, AVAC, redes hidráulicas, redes elétricas e segurança contra incêndios. Esta fragmentação, habitual em projetos colaborativos, exige uma análise prévia cuidada de todos os modelos, com o intuito de determinar com precisão quais os elementos efetivamente relevantes para a ACV e quais os elementos auxiliares que, embora presentes nos modelos, não devem ser considerados no apuramento de quantidades. Importa ainda referir que, para a realização desta análise, foi essencial o apoio de elementos da empresa Garcia Garcia com experiência nas respetivas especialidades, que esclareceram aspetos técnicos fundamentais do modelo e forneceram noções básicas sobre disciplinas com as quais o autor não tinha tanta familiaridade prévia, permitindo uma interpretação mais precisa e informada da informação contida nos modelos.

Esta análise implica, numa primeira fase, a identificação e exclusão de elementos auxiliares de modelação, como grelhas (*grids*), níveis (*levels*), linhas de referência ou elementos genéricos sem representação física, cuja presença visa apenas facilitar a coordenação e organização do projeto. A Figura 20 apresenta um exemplo desta filtragem, evidenciando a distinção entre elementos construtivos reais e elementos auxiliares que devem ser desconsiderados para efeitos de ACV.

Category:	Count:
☒ Floors	44
☐ Generic Models	588
☐ Grids	44
☐ Levels	7
☒ Stairs	94
☒ Structural Columns	204
☐ Structural Connections	168
☒ Structural Foundations	177
☒ Structural Framing (Girder)	127
☒ Structural Framing (Joist)	6
☒ Structural Framing (Other)	2505
☒ Walls	15
Total Selected Items:	3172

Figura 20 - Análise das categorias modeladas no Revit, no projeto de estruturas

4.2.2. CRIAÇÃO DE TABELAS POR TIPO DE MATERIAL, CATEGORIA E ESPECIALIDADE

Entre os elementos que se pretendem incluir na análise, é necessário distinguir entre os que permitem extração direta de quantidades e os que exigem uma abordagem específica devido à forma como foram modelados. Para a maioria das categorias, a extração de quantidades é realizada de forma direta através da criação de *schedules* no Revit, que permitem listar parâmetros como área, volume ou comprimento, consoante o tipo de elemento. No entanto, em situações particulares como pavimentos (*floors*), paredes (*walls*), coberturas (*roofs*) e tetos (*ceilings*), a modelação pode envolver múltiplas camadas de materiais, o que impossibilita a obtenção direta da composição material e respetivas quantidades através de *schedules* convencionais.

Nestes casos, recorreu-se à criação de *material takeoffs*, uma funcionalidade específica do Revit que permite desagregar um elemento composto nas suas camadas constituintes, identificando os materiais associados e respetivas quantidades. Esta abordagem permite realizar a análise de ACV a um nível mais detalhado, incluindo a massa de cada material individual. Em alternativa, optou-se em alguns casos pela divisão dos elementos em “*parts*”, processo que segmenta graficamente o elemento base em componentes correspondentes às suas camadas materiais. Apesar das vantagens desta abordagem, a criação de *material takeoffs* tem uma limitação relevante associada aos parâmetros do elemento original, sendo que qualquer parâmetro atribuído ao elemento base (como classificação por tipo de material ou respetivo coeficiente de carbono) apenas pode ter um valor único, o que se torna problemático quando o elemento contém múltiplos materiais distintos. Esta limitação foi contornada e será detalhada mais à frente, no âmbito da parametrização adotada para garantir a correta atribuição da informação necessária à avaliação ambiental. Como exemplo, a Figura 21 apresenta as tabelas de *material takeoffs* geradas para a categoria “*walls*” da especialidade de arquitetura, discriminando os diversos materiais constituintes das soluções construtivas adotadas.

☐	Wall Material Takeoff Aluminio
☐	Wall Material Takeoff Alvenaria bloco betão
☐	Wall Material Takeoff Betão in situ
☐	Wall Material Takeoff Betão pré-fabricado
☐	Wall Material Takeoff G08-cola vinil
☐	Wall Material Takeoff Gesso cartonado hidro
☐	Wall Material Takeoff Gesso cartonado ignifugo
☐	Wall Material Takeoff Gesso cartonado standard
☐	Wall Material Takeoff G008-vinil blue concrete
☐	Wall Material Takeoff Iso lã de rocha
☐	Wall Material Takeoff Iso lã de rocha 2
☐	Wall Material Takeoff RAL 9010

Figura 21 - Tabelas *material takeoffs* referentes à categoria “*walls*” da especialidade de arquitetura

De forma a garantir uma estrutura organizada e coerente da informação, foram criadas tabelas separadas por especialidade, por categoria de elemento e por tipo de material, assegurando uma gestão eficaz dos dados extraídos. Por exemplo, no modelo de estruturas, foram elaboradas tabelas específicas para os elementos em betão armado (vigas, pilares, lajes) e para os elementos metálicos, permitindo isolar e quantificar separadamente os diferentes sistemas construtivos. Esta lógica foi replicada nas restantes especialidades, ajustando os critérios de organização consoante a natureza dos elementos modelados. Esta estrutura de tabelas facilitou não só a exportação segmentada da informação para posterior análise, como também o controlo da coerência dos dados ao longo do processo de modelação e validação. A Figura 22 apresenta a organização dessas tabelas, discriminando as diferentes categorias estruturais consideradas no modelo.

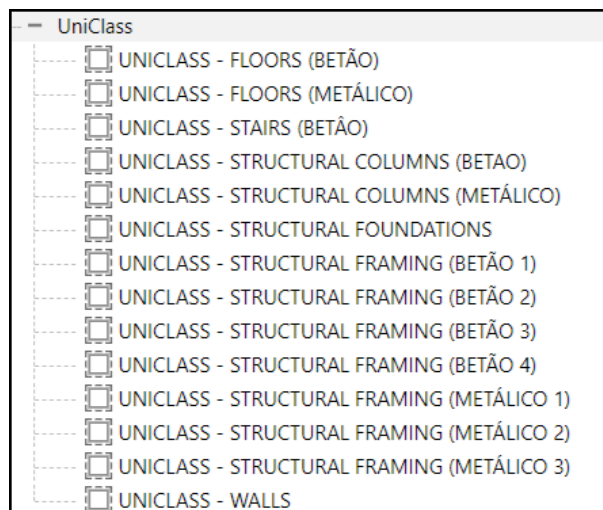


Figura 22 - Tabelas referentes às categorias da especialidade de estruturas.

4.2.3. CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O UNICLASS 2015

Com o intuito de cumprir as exigências da empresa Garcia Garcia no que respeita à organização dos modelos e a troca estruturada de informação com os parceiros externos, foi atribuída uma classificação segundo o sistema Uniclass 2015 a todos os elementos relevantes para análise presentes nos modelos das diferentes especialidades do projeto. Esta etapa revelou-se essencial para garantir a normalização da informação, assegurando a sua rastreabilidade e facilitando a sua posterior exportação e utilização nos métodos de ACV. O sistema Uniclass 2015 é uma estrutura de classificação hierárquica, amplamente adotada em processos de modelação BIM, e particularmente adequada a ambientes colaborativos e interoperáveis. A sua organização assenta em múltiplas tabelas interligadas, que permitem identificar cada elemento sob diferentes perspetivas, podendo este ser classificado enquanto elemento ou componente individual, como parte integrante de um sistema construtivo, ou ainda como produto específico utilizado no projeto [103]. A tabela apresentada na Figura 23 ilustra um exemplo prático da aplicação do sistema Uniclass 2015.

A	B	C	D	E	F	G
Classification.	Classification.	Classification.	Classification.Uniclass.Ss.Description	Classification.Uniclass.Pr.Desc	Classification.Unicl	Family and Type
EF_55_70	Water supply	Ss_55_70	Water distribution and supply systems	Pipe, tube and fitting products	Pr_65_52	Pipe Types: PEAD PN10 SDR13,6 (PE80)
EF_55_70	Water supply	Ss_55_70	Water distribution and supply systems	Pipe, tube and fitting products	Pr_65_52	Pipe Types: PEAD PN10 SDR13,6 (PE80)
EF_55_70	Water supply	Ss_55_70	Water distribution and supply systems	Pipe, tube and fitting products	Pr_65_52	Pipe Types: PEAD PN10 SDR13,6 (PE80)
EF_55_70	Water supply	Ss_55_70	Water distribution and supply systems	Pipe, tube and fitting products	Pr_65_52	Pipe Types: PEAD PN10 SDR13,6 (PE80)
EF_55_70	Water supply	Ss_55_70	Water distribution and supply systems	Pipe, tube and fitting products	Pr_65_52	Pipe Types: PEAD PN10 SDR13,6 (PE80)

Figura 23 - Exemplo de classificação de elementos segundo o sistema Uniclass 2015, com identificação do elemento funcional (EF), do sistema (SS) e do produto (PR) aplicados a tubagens do sistema de abastecimento de água.

Apesar de ter sido realizada a classificação dos elementos em múltiplas dimensões do sistema Uniclass 2015, nomeadamente ao nível dos sistemas e produtos, optou-se por manter nas tabelas finais apenas a classificação relativa aos elementos funcionais, uma vez que esta se revelou suficiente para identificar com clareza o tipo e função de cada componente. É esta classificação funcional que será utilizada no capítulo seguinte para a organização e análise da informação extraída.

Esta flexibilidade permite uma leitura mais precisa e contextualizada da informação, adequada aos diferentes níveis de detalhe exigidos em cada fase do projeto e do processo de avaliação ambiental. A atribuição da classificação foi realizada diretamente no ambiente Revit, através da utilização do *add-in Interoperability Tools*, que inclui uma base de dados integrada com os códigos e descrições do sistema

Uniclass 2015. Esta ferramenta permitiu associar de forma sistemática os códigos correspondentes a cada elemento modelado, garantindo uniformidade entre especialidades e facilitando a posterior análise dos dados. O processo foi aplicado transversalmente a todos os modelos desenvolvidos no âmbito do caso de estudo, abrangendo todas as especialidades. A Figura 24 apresenta a base de dados do sistema UniClass 2015 no ambiente do *add-in* Autodesk Interoperability Tools, onde é visível a estrutura hierárquica da Tabela EF (Elementos Funcionais) utilizada na parametrização dos elementos modelados.

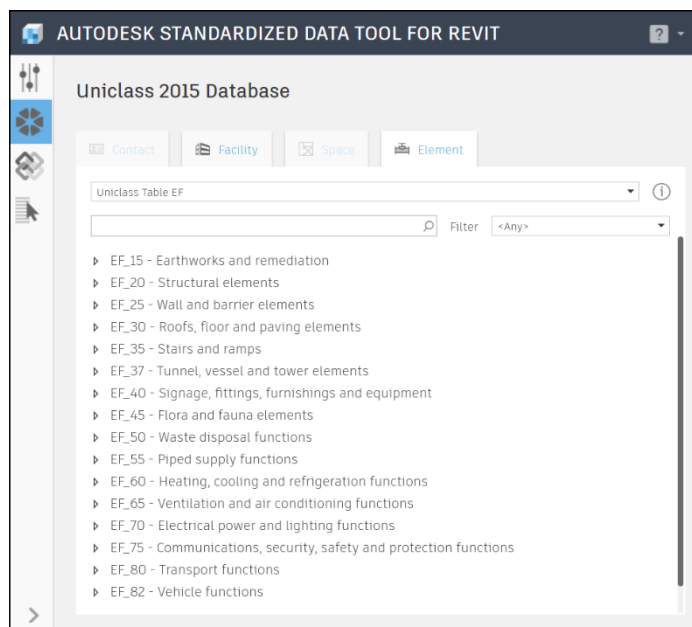


Figura 24 - Visualização da base de dados do sistema Uniclass 2015 no ambiente do *add-in* Autodesk Interoperability Tools, onde é apresentada a estrutura hierárquica da Tabela EF (Elementos Funcionais).

A adoção do Uniclass 2015 representou uma mais-valia na organização semântica dos modelos, permitindo estruturar a informação de forma clara e coerente.

4.2.4. ELABORAÇÃO DE UMA TABELA EXCEL QUE FAZ LIGAÇÃO ENTRE UNICLASS 2015, *BREEAM CLASS – MAT01* E *BREEAM LOCATION – MAT03*

Com o objetivo de preparar a integração da informação extraída do modelo BIM nos métodos detalhados de ACV, foi necessário atribuir uma classificação ambiental compatível com o sistema *BREEAM*, nomeadamente através dos campos *BREEAM Class – MAT01* e *BREEAM Location – MAT03*. Estas categorias são utilizadas pela plataforma One Click LCA para associar cada elemento modelado aos impactos ambientais correspondentes, em conformidade com os critérios de certificação *BREEAM*. De seguida, apresentam-se as Tabelas 4 e 5, relativas à classificação *BREEAM Class – MAT01* e à *BREEAM Location – MAT03*, respetivamente.

Tabela 4 - BREEAM Class - MAT01

BREEAM Class – MAT01	BREEAM Class – MAT01 (tradução para português)
<i>Balustrades and handrails</i>	Balaustradas e corrimãos
<i>Basements/retaining walls (including excavation)</i>	Caves/muros de contenção (incluindo escavação)
<i>Communication, security and control systems</i>	Sistemas de comunicação, segurança e controlo
<i>Electrical installations</i>	Instalações elétricas
<i>External solar shading devices, access structures etc.</i>	Dispositivos exteriores de proteção solar, estruturas de acesso, etc.
<i>External walls (envelope, structure and finishes)</i>	Paredes exteriores (envolvente, estrutura e acabamentos)
<i>External windows and rooflights</i>	Janelas exteriores e clarabóias
<i>Fire and lightning protection</i>	Proteção contra incêndios e para-raios
<i>Foundations (including excavation)</i>	Fundações (incluindo escavação)
<i>Ground/lowest floor</i>	Piso térreo/inferior
<i>Hard landscaping, fencing, railings and walls</i>	Espaços verdes, vedações, gradeamentos e muros
<i>Hard landscaping, roads, paths and pavings</i>	Espaços verdes, estradas, caminhos e pavimentos
<i>Heat source, space heating, air conditioning, ventilation</i>	Fonte de calor, aquecimento de espaços, ar condicionado, ventilação
<i>Internal ceiling finishes (incl. suspended/access ceilings)</i>	Acabamentos de tetos interiores (incluindo tetos suspensos/acesso)
<i>Internal doors</i>	Portas interiores
<i>Internal floor finishes (incl. access floors)</i>	Acabamentos de pavimentos interiores (incluindo pisos de acesso)
<i>Internal wall finishes</i>	Acabamentos de paredes interiores
<i>Internal walls and partitions</i>	Paredes e divisórias interiores
<i>Internal windows</i>	Janelas interiores
<i>Lift and conveyor installations / systems</i>	Instalações/sistemas de elevação
<i>Not defined</i>	Não definido
<i>Roof (including coverings)</i>	Coberturas (incluindo revestimentos)
<i>Sanitary installations</i>	Instalações sanitárias
<i>Stairs and ramps</i>	Escadas e rampas
<i>Structural frame (vertical)</i>	Estrutura (vertical)
<i>Upper floors (including horizontal structure)</i>	Pisos superiores (incluindo estrutura horizontal)
<i>Water and waste installations</i>	Instalações de água e resíduos

Tabela 5 - BREEAM Location - MAT03

BREEAM Location – MAT03	BREEAM Location – MAT03 (tradução para português)
<i>Other</i>	<i>Outro</i>
<i>External Wall (incl. finishes e.g cladding, lining, render)</i>	<i>Parede exterior (incl. acabamentos, p. ex. revestimentos, forros, reboco)</i>
<i>Door or window</i>	<i>Porta ou janela</i>
<i>Structure primary & secondary</i>	<i>Estrutura primária e secundária</i>
<i>Floor (incl floor finishes)</i>	<i>Pavimento (incl. acabamentos de pavimento)</i>
<i>Roof (incl roof finishes)</i>	<i>Cobertura (incl. acabamentos da cobertura)</i>
<i>Ceiling (including ceiling finishes)</i>	<i>Teto (incluindo acabamentos de teto)</i>
<i>Internal partition or internal walls (incl finishes)</i>	<i>Divisórias internas ou paredes internas (incl. acabamentos)</i>
<i>Building services</i>	<i>Instalações técnicas do edifício</i>
<i>Hard landscaping</i>	<i>Pavimentos exteriores</i>

A correspondência entre estas classificações foi baseada numa tabela como a Tabela 6, a qual indica, para cada tipo de elemento, a sua classe de material e localização funcional no edifício, conforme exigido pelos critérios de avaliação ambiental.

Tabela 6 - Correspondência entre as classificações BREEAM Class – MAT01 e BREEAM Location – MAT03.

BREEAM Class – MAT01	BREEAM Location – MAT03
<i>Not defined</i>	<i>Other</i>
<i>External walls (envelope, structure and finishes)</i>	<i>External Wall (incl. finishes e.g cladding, lining, render)</i>
<i>External windows and rooflights</i>	<i>Door or window</i>
<i>Foundations (including excavation)</i>	<i>Structure primary & secondary</i>
<i>Internal floor finishes (incl. access floors)</i>	<i>Floor (incl floor finishes)</i>
<i>Structural frame (vertical)</i>	<i>Structure primary & secondary</i>
<i>Upper floors (including horizontal structure)</i>	<i>Structure primary & secondary</i>
<i>Basements/retaining walls (including excavation)</i>	<i>Structure primary & secondary</i>
<i>External solar shading devices, access structures etc</i>	<i>Roof (incl roof finishes)</i>
<i>Ground/lowest floor</i>	<i>Structure primary & secondary</i>
<i>Internal ceiling finishes (incl. suspended/access ceilings)</i>	<i>Ceiling (including ceiling finishes)</i>
<i>Internal walls and partitions</i>	<i>Internal partition or internal walls (incl finishes)</i>
<i>Roof (including coverings)</i>	<i>Roof (incl roof finishes)</i>
<i>Stairs and ramps</i>	<i>Structure primary & secondary</i>
<i>Balustrades and handrails</i>	<i>Structure primary & secondary</i>
<i>Internal doors</i>	<i>Door or window</i>
<i>Internal wall finishes</i>	<i>Internal partition or internal walls (incl finishes)</i>
<i>Internal Windows</i>	<i>Door or window</i>
<i>Heat Source, Space Heating, Air Conditioning, Ventilation</i>	<i>Building services</i>
<i>Communication, Security and Control Systems</i>	<i>Building services</i>
<i>Electrical Installations</i>	<i>Building services</i>
<i>Fire and Lightning Protection</i>	<i>Building services</i>
<i>Lift and Conveyor Installations / Systems</i>	<i>Building services</i>
<i>Water and waste installations</i>	<i>Building services</i>
<i>Sanitary Installations</i>	<i>Building services</i>
<i>Hard Landscaping, Roads, Paths and Pavings</i>	<i>Hard landscaping</i>
<i>Hard Landscaping, Fencing, Railings and Walls</i>	<i>Hard landscaping</i>

Para operacionalizar esta associação, foi desenvolvido um ficheiro Excel de correspondência, que estabelece uma ligação direta entre a tabela de elementos funcionais (EF) do sistema Uniclass 2015 e as respetivas categorias *MAT01* e *MAT03* definidas pelo *BREEAM*. Este ficheiro, serviu de base à construção de um código Dynamo, desenvolvido especificamente para atribuir automaticamente as categorias ambientais *MAT01* e *MAT03* a cada elemento modelado no Revit, com base na sua classificação funcional Uniclass 2015. Esta automatização permitiu acelerar o processo de preenchimento da informação ambiental nos parâmetros personalizados do modelo, garantindo simultaneamente consistência na atribuição das classificações e minimizando o risco de erro manual. A Figura 25 apresenta um excerto da tabela de correspondência entre a classificação Uniclass 2015 e as categorias ambientais do sistema *BREEAM*, evidenciando a estrutura utilizada no processo de automatização.

Classification.Uniclass.EF.Description	Class – MAT01	BREEAM Location – MAT03
Earthworks and remediation	Not defined	Other
Groundworks and earthworks	Not defined	Other
Remediation, repair and renovation	Not defined	Other
Structural elements	Structural frame (vertical)	Structure primary & secondary
Substructure	Foundations (including excavation)	Structure primary & secondary
Foundations	Foundations (including excavation)	Structure primary & secondary
Superstructure	Structural frame (vertical)	Structure primary & secondary
Composite structures	Structural frame (vertical)	Structure primary & secondary
Framed structures	Structural frame (vertical)	Structure primary & secondary
Membrane structures	Structural frame (vertical)	Structure primary & secondary
Shell structures	Structural frame (vertical)	Structure primary & secondary
Solid structures	Structural frame (vertical)	Structure primary & secondary
Bridge structures	Structural frame (vertical)	Structure primary & secondary
Abutments	Structural frame (vertical)	Structure primary & secondary
Bearings	Not defined	Other
Bridge decks	Not defined	Other
Piers	Foundations (including excavation)	Structure primary & secondary
Spans	Not defined	Other
Wall and barrier elements	External walls (envelope, structure and finishes)/Internal walls and partitions	External Wall (incl. finishes e.g cladding, lining, render)/Internal partition or internal walls (incl finishes)
Walls	External walls (envelope, structure and finishes)/Internal walls and partitions	External Wall (incl. finishes e.g cladding, lining, render)/Internal partition or internal walls (incl finishes)
External walls	External walls (envelope, structure and finishes)	External Wall (incl. finishes e.g cladding, lining, render)
External walls below DPC	External walls (envelope, structure and finishes)	External Wall (incl. finishes e.g cladding, lining, render)

Figura 25 - Excerto da tabela de correspondência entre a classificação Uniclass 2015 (EF) e as categorias ambientais *BREEAM*: *Class – MAT01* e *BREEAM Location – MAT03*.

4.2.5. CRIAÇÃO DE CÓDIGO DYNAMO: ATRIBUI CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE MATERIAL, RESPECTIVO COEFICIENTE DE CARBONO, *BREEAM CLASS – MAT01* E *BREEAM LOCATION – MAT03*

Com o objetivo de automatizar o processo de enriquecimento informacional dos elementos modelados no Revit, foi desenvolvido um código Dynamo especificamente orientado para a atribuição sistemática de parâmetros essenciais a todos os elementos relevantes para a análise de ACV. A automatização deste processo revelou-se fundamental para garantir consistência, rastreabilidade e eficiência na preparação do modelo para exportação de dados. Para viabilizar esta atribuição, procedeu-se previamente à criação de parâmetros partilhados (*shared parameters*) no ambiente Revit. Os parâmetros criados incluíram: a classificação por tipo de material, o respetivo coeficiente de carbono, a *BREEAM Class – MAT01* e a *BREEAM Location – MAT03*. Estes campos foram definidos como parâmetros não geométricos e adicionados às categorias relevantes do modelo, permitindo a sua leitura, edição e exportação.

Estes parâmetros foram organizados no grupo designado “BREEAM”. A Figura 26 apresenta os parâmetros definidos, com a respetiva correspondência funcional: o campo “*BREEAM_MATERIAL*” corresponde à classificação por tipo de material atribuída a cada elemento; o parâmetro “*BREEAM_COEF*” representa o coeficiente de carbono associado ao material em questão; o campo “*BREEAM_CLASS*” corresponde à *BREEAM Class – MAT01*, conforme exigido para a análise detalhada; por fim, o parâmetro “*BREEAM_LOCATION–MAT03*” identifica a localização funcional do elemento no edifício, em conformidade com os critérios da *BREEAM Location – MAT03*.

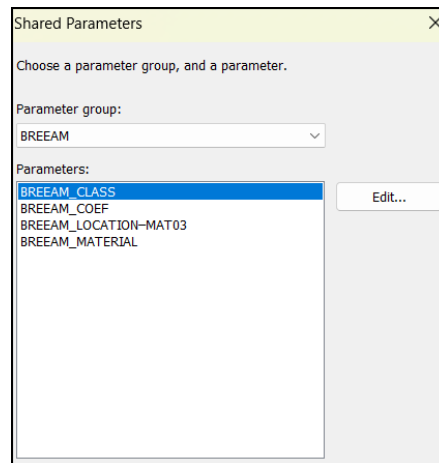


Figura 26 - Parâmetros partilhados criados no Revit para integração da informação ambiental no modelo.

Um *shared parameter* é um tipo de parâmetro que, ao contrário dos parâmetros de projeto ou de família, pode ser associado a múltiplos projetos, modelos e categorias, assegurando uma utilização transversal e normalizada. Este tipo de parâmetro pode corresponder tanto a dados geométricos (como área ou volume), como a dados não geométricos (como classificações textuais), sendo particularmente útil quando se pretende garantir uniformidade na estrutura da informação entre diferentes equipas, disciplinas ou fases do projeto [121].

Para a correta definição destes parâmetros, foi também necessário compreender a estrutura hierárquica do ambiente Revit, onde todos os elementos são organizados por categoria, família, tipo e instância. Um mesmo elemento (como um pilar, uma porta ou um tubo) pertence a uma determinada categoria, podendo integrar diferentes famílias que agrupam elementos com características comuns. Cada família, por sua vez, pode incluir vários tipos, que correspondem a variações dimensionais ou construtivas, sendo finalmente modeladas no projeto através de instâncias específicas [122]. A atribuição dos parâmetros foi feita ao nível da instância, uma vez que se pretendeu garantir que cada elemento individual do modelo possuisse os seus próprios dados ambientais. A Figura 27 apresenta um exemplo esquemático da estrutura hierárquica utilizada no Revit para organizar os elementos do modelo, com o caso dos pilares estruturais.

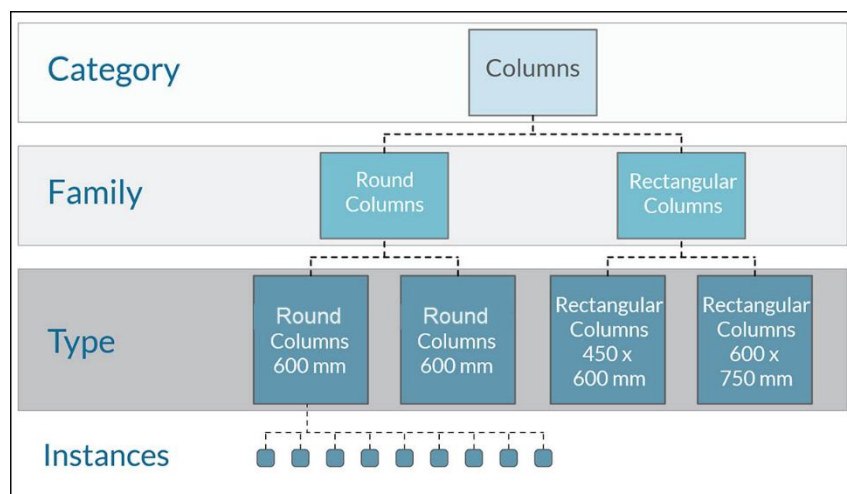


Figura 27 - Representação esquemática da hierarquia de elementos no Revit: categoria, família, tipo e instância, exemplificada com colunas estruturais [122].

Esta abordagem, além de mais flexível, permite uma discriminação precisa de cada componente, essencial quando existem variações de material, localização ou função entre elementos do mesmo tipo.

Para concretizar a atribuição automatizada dos parâmetros ambientais definidos, foram desenvolvidas rotinas específicas em Dynamo para cada uma das categorias existentes nos modelos das diferentes especialidades do projeto. Cada rotina foi concebida para percorrer os elementos de uma determinada categoria, identificar os objetos presentes e proceder à atribuição do tipo de material e do respetivo coeficiente de carbono, com base na Tabela 7. Os valores considerados para os coeficientes de carbono, bem como a sua origem e justificação metodológica, serão detalhados no subcapítulo 4.3.1. Os valores considerados para os coeficientes de carbono, bem como a sua origem e justificação metodológica, serão detalhados no subcapítulo 4.3.1. Importa ainda esclarecer que os coeficientes de carbono utilizados correspondem a valores médios de emissões expressos em kgCO₂ equivalente (kgCO₂eq), unidade que representa a quantidade total de gases com efeito de estufa emitidos, convertidos para o seu potencial de aquecimento global equivalente ao dióxido de carbono. Esta métrica permite comparar de forma normalizada os impactes ambientais associados a diferentes materiais de construção ao longo do seu ciclo de vida [123].

Tabela 7 - Tabela de correspondência entre tipos de materiais e os respetivos coeficientes de carbono (kg CO₂eq/kg) [123].

Material Category	Tipo de Material (tradução para português)	Coeficientes de Carbono (kg CO₂ eq/kg)
Timber or timber based	Madeira ou à base de madeira	0,31
Concrete or cementitious	Betão ou argamassas cimentícias	0,198
Metal	Metal	2,03
Stone or aggregate	Pedra ou agregado	0,0052
Clay based	À base de argila	0,78
Gypsum	Gesso	0,39
Glass	Vidro	1,35
Plastic, polymer, resin, paint, chemicals & bituminous	Plástico, polímero, resina, tinta, produtos químicos & betuminosos	1,86
Animal fibre or skin, cellulose fibre	Fibra ou pele de origem animal, fibra de celulose	3,9
Other	Outro	7

No caso da especialidade de estruturas, foi possível introduzir um nível adicional de filtragem através do parâmetro “*Type Comments*”, onde, em muitos elementos, se encontravam indicações textuais relativas ao material. Através da utilização de um nó condicional em Dynamo que verificava se o conteúdo desse campo incluía as expressões “BET” (betão) ou “MET” (metálico), foi possível distinguir automaticamente os elementos estruturais em betão dos metálicos e aplicar-lhes os materiais e coeficientes correspondentes. A Figura 28 apresenta a rotina desenvolvida para identificar os elementos em betão com base na presença da expressão “BET” no parâmetro “*Type Comments*”. Na sequência, a Figura 29 mostra a atribuição automática do material “*Concrete or cementitious*” e do respetivo coeficiente de carbono aos elementos filtrados como sendo em betão. Esta estratégia revelou-se eficaz nesta especialidade, dada a sistematização existente na codificação dos tipos de elementos.

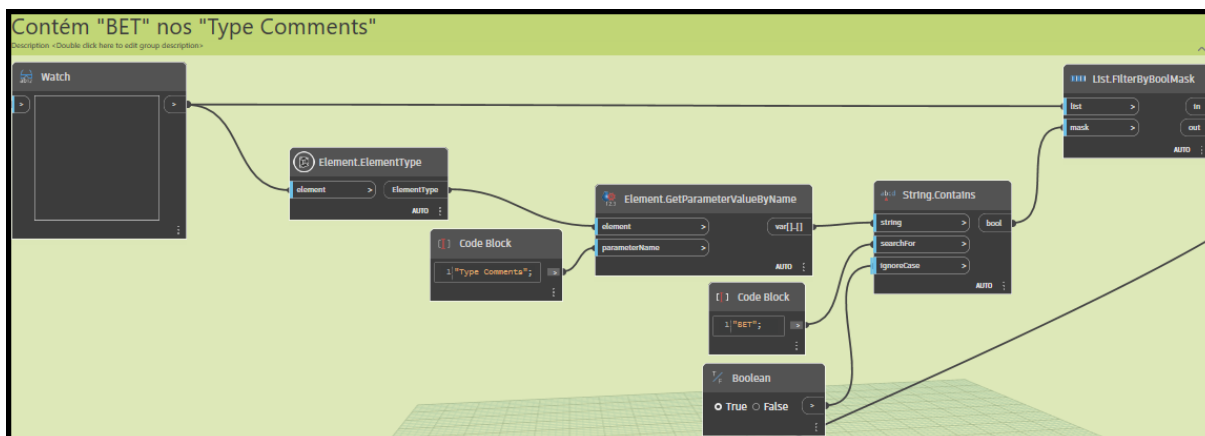


Figura 28 - Rotina em Dynamo para identificar elementos em betão com "BET" no parâmetro *Type Comments*.

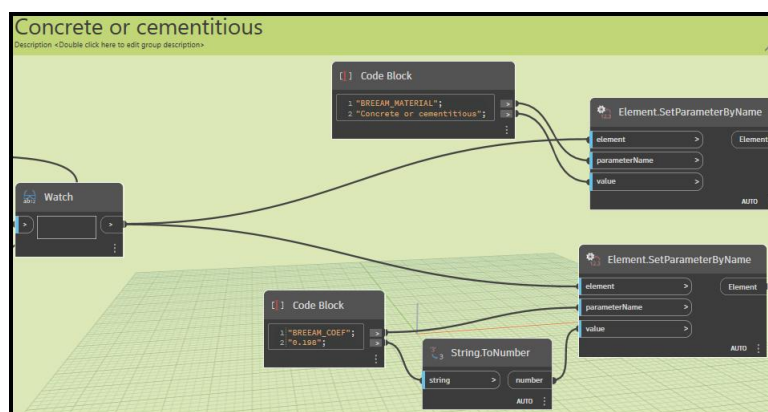


Figura 29 - Atribuição do material "Concrete or cementitious" e do respetivo coeficiente de carbono a elementos em betão.

Nas restantes especialidades, como AVAC, redes hidráulicas e elétricas, não foi possível recorrer ao campo "*Type Comments*" para distinguir os materiais, dado que este se encontrava frequentemente em branco ou sem informação relevante. Assim, a filtragem foi realizada com base nos parâmetros "*Family and Type*" ou "*Family Name*", que permitiram, através da leitura do nome da família atribuída aos elementos, identificar o material predominante. Após uma breve pesquisa sobre o componente modelado e as suas características físicas reais, foi possível determinar qual o material dominante de cada elemento, ao qual se atribuía o tipo de material e o coeficiente de carbono correspondente.

Como exemplo desta abordagem, podem referir-se elementos como chuveiros, torneiras ou acessórios sanitários, frequentemente constituídos por uma combinação de materiais (como metais, plásticos e borrachas), mas cujo corpo principal é geralmente metálico. Deste modo, procedeu-se à filtragem automática no Dynamo, permitindo aplicar a classificação adequada com base na mesma lógica utilizada na especialidade de estruturas.

Importa ainda referir que, no caso de elementos compostos por múltiplos materiais, como os elementos multicamada modelados em "*Material Takeoff*" (por exemplo, os tetos), os parâmetros definidos encontram-se associados à categoria principal do elemento, e não às suas camadas constituintes. Assim, por exemplo, num teto composto por placas de gesso cartonado sobre estrutura metálica, optou-se por atribuir a classificação de gesso cartonado ao tipo de material, por corresponder ao material com maior representatividade no conjunto.

Contudo, numa fase posterior, aquando da exportação das tabelas para Excel, procedeu-se à revisão manual desses campos. Por exemplo, nas tabelas correspondentes aos perfis metálicos existentes nos tetos, foi feita a substituição do tipo de material de gesso para metal, assim como do respetivo coeficiente de carbono, de forma a assegurar uma análise mais precisa no Power BI sobre a influência individual de cada material na pegada de carbono total do modelo em análise.

Paralelamente, como se poder observar na Figura 30, a rotina Dynamo acede também ao parâmetro da classificação funcional (EF) do sistema Uniclass 2015, atribuída previamente aos elementos, e consulta a tabela criada anteriormente de correspondência entre a classificação Uniclass 2015 e os parâmetros *BREEAM*. Com base nessa correspondência, é feita a atribuição automática dos parâmetros *BREEAM Class – MAT01* e *BREEAM Location – MAT03*, de forma coerente e precisa, assegurando assim a compatibilidade e completude da informação necessária à avaliação ambiental detalhada.

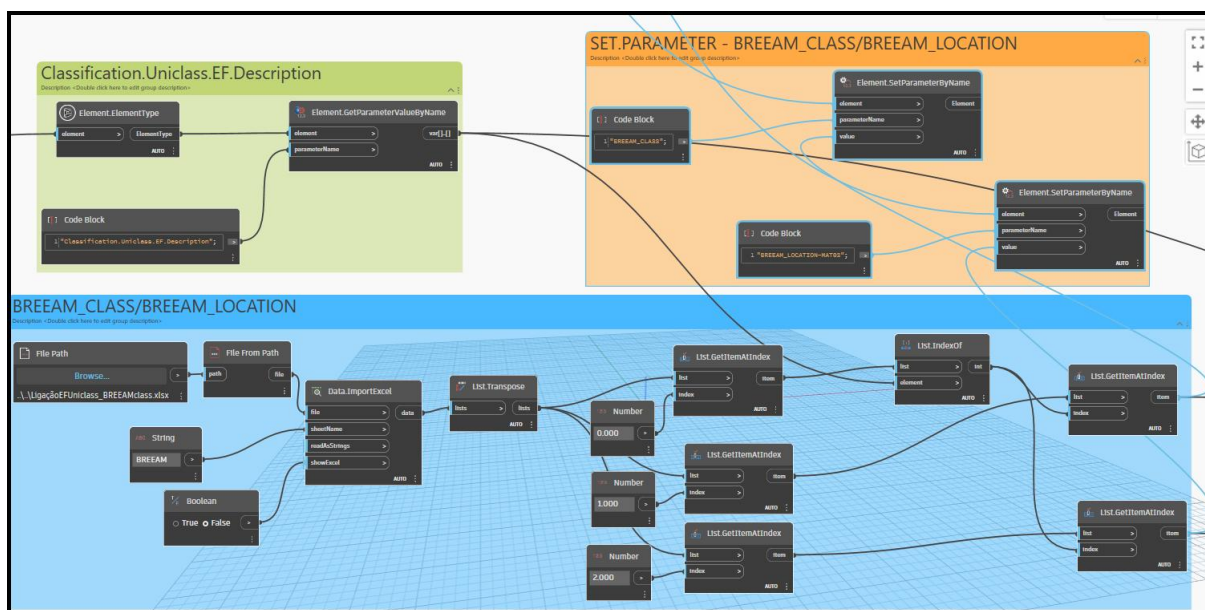


Figura 30 - Atribuição dos parâmetros *BREEAM Class - MAT01* e *BREEAM Location - MAT03*, com base na correspondência entre a classificação Uniclass 2015 (EF) e os dados importados de ficheiro Excel.

Por fim, a rotina Dynamo foi também configurada para gerar automaticamente um ficheiro Excel, contendo as colunas correspondentes aos parâmetros atribuídos a cada elemento, nomeadamente o tipo de material, o coeficiente de carbono, a *BREEAM Class – MAT01* e a *BREEAM Location – MAT03*. Para uma visualização mais precisa e detalhada das figuras anteriormente apresentadas, recomenda-se a sua consulta no Anexo A1.

4.2.6. CONVERSÃO DE UNIDADES PARA QUILOGRAMAS (KG)

Após a criação e consolidação das tabelas de quantidades no Revit, bem como a atribuição dos parâmetros ambientais abordados nos pontos anteriores, tornou-se possível proceder à conversão das unidades dos elementos modelados para massa (quilogramas). Esta etapa é essencial para permitir o cálculo da pegada de carbono associada a cada elemento, dado que os coeficientes de emissão se encontram expressos em kg CO₂eq por quilograma de material.

As quantidades extraídas do Revit podem apresentar-se sob diferentes formas, dependendo da natureza do elemento: unidade (un), comprimento (m), área (m²) ou volume (m³), sendo necessário implementar uma estratégia de conversão coerente. O método de conversão adotado é apresentado esquematicamente na Figura 31 e descrito em detalhe na secção seguinte.

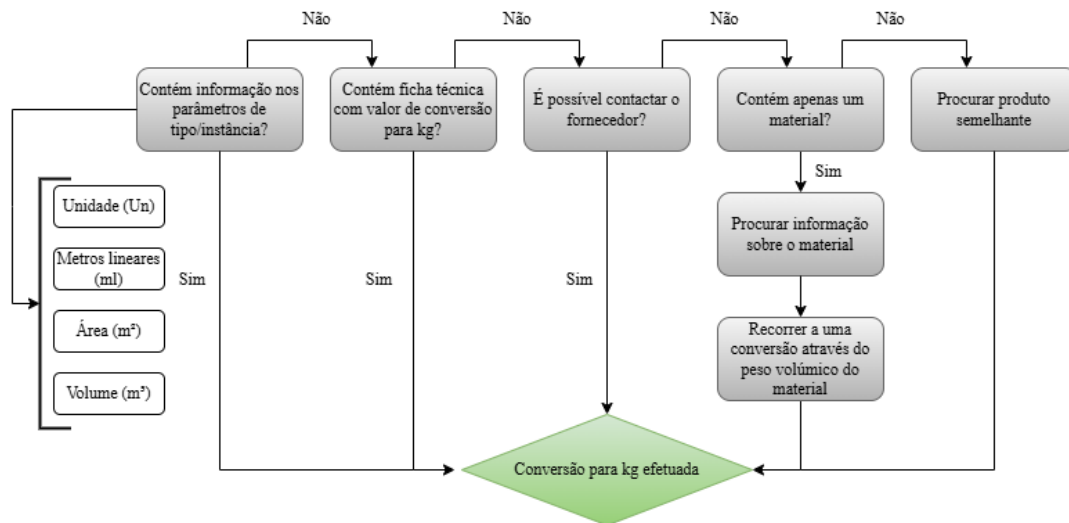


Figura 31 - Fluxograma explicativo do processo de conversão de unidades

O fluxograma apresentado na Figura 30 sintetiza o processo de conversão das quantidades para massa (kg), adaptando-se às diferentes situações de modelação e níveis de informação disponíveis. O ponto de partida consiste na identificação da unidade de medição associada ao elemento (unidade (un), comprimento (m), área (m²) ou volume (m³)) e na verificação da existência de parâmetros associados à instância ou ao tipo do elemento, que possam já conter diretamente o valor de massa ou uma relação de conversão (por exemplo, kg/m). Esta abordagem é particularmente eficaz para elementos com informação técnica integrada no modelo. Na Figura 32 apresenta-se um exemplo da parametrização aplicada ao modelo da especialidade de estruturas, onde é possível observar o campo “MP-EST-M-Weight”, criado pela empresa responsável, o qual contém a informação relativa à massa por metro linear (kg/m) do elemento. Este parâmetro permitiu automatizar a conversão para massa total, a partir do comprimento dos elementos estruturais metálicos.

Type Properties		
Family:	MP-SC-Steel SHS CF	Load...
Type:	SHS90x6.3	Duplicate...
		Rename...
Type Parameters		
Parameter	Value	
Text		
MP-EST-MTQExport		
Materials and Finishes		
Structural		
MP-EST-M-Area	0.002	
MP-EST-M-Weight	15.490000	
Section Shape	Not Defined	

Figura 32 - Exemplo de parâmetro personalizado “MP-EST-M-Weight” no modelo de estruturas, representando a massa por metro linear (kg/m) de um perfil metálico.

Caso tal informação não esteja disponível no modelo, a etapa seguinte consiste em consultar a ficha técnica do produto, como a da Figura 33, onde frequentemente se encontram o peso do elemento, valores de densidade ou massa unitária expressa em kg/m ou kg/m². Quando a ficha técnica não fornece esses dados, pondera-se a possibilidade de contacto com o fornecedor, que poderá disponibilizar a informação necessária à conversão.

arfit Unidades de Recuperação - ECOEVO 2 EC 45

PROJECTO : Logisor - Canelas
REFERÊNCIA : UVR1
DATA : 16 de dezembro de 2024

Ponto de funcionamento solicitado :

Caudal Insuflação : 3560 [m³/h]
Caudal Extracção : 3755 [m³/h]
Pressão Estática Disponível : 250 [Pa]

Selecionar Unidade de Recuperação: ECOEVO 2 EC 45
Selecionar Tipo de Controlo: SMART

Dimensões e Peso :

Modelo	A (mm)	L (mm)	P (mm)	D (mm)	Peso (kg)
EEOEVO 2 EC 45	700	1600	1600	355	268

Unidade de recuperação de calor da marca ARFIT, modelo ECOEVO 2 EC. Estrutura de elevada resistência mecânica. Construção com painéis duplos 25 mm (face exterior do painel em Magnésio com classe de corrosão C5) de excelentes características termoacústicas, com bloqueio de 1/4 que garante elevada estanquicidade. Recuperador de calor estático de fluxos paralelos contra-corrente com certificação EUROVENT, com bypass interno, filtros de ar M5, F7 e/ou F9. Tabuleiro de condensados em inox e ventiladores centrífugos de dupla aspiração com motor EC diretamente acoplado de velocidade variável. Módulos adicionais de aquecimento por água quente e resistências elétricas, e módulos de climatização por água ou de refrigeração. Esta gama de unidades cumpre com o regulamento 1253/2014 - Ecodesign 2018. Unidade com controlo integrado, com comunicação por protocolo Modbus e display digital integrado.

Figura 33 - Exemplo de uma ficha técnica de uma unidade de recuperação de calor, com informação sobre a conversão para quilogramas.

Se nenhuma das opções anteriores for viável, e o elemento em análise for composto apenas por um único material, procede-se à pesquisa de valores de referência para o peso volúmico do material em fontes técnicas credíveis. Na Tabela 8 apresentam-se os valores adotados para os principais grupos de materiais identificados no modelo, os quais serviram de base às estimativas de massa utilizadas nesta dissertação.

Tabela 8 - Valores de peso volúmico considerados para os materiais principais [123].

Material	Peso volúmico (kg/m³)
Madeira ou à base de madeira	600
Betão ou argamassas cimentícias	2500
Metal	7850
Pedra ou agregados	1600
Gesso	700
Vidro	2500
Alumínio	2700
Plástico, polímero, resina, tinta, produtos químicos & betuminosos	900 - 950

A partir destes valores de referência, é possível calcular a massa com base no volume extraído do modelo. Esta metodologia foi aplicada de forma sistemática nas tabelas de quantidades extraídas do Revit, recorrendo à definição de parâmetros calculados, como exemplificado na Figura 34.

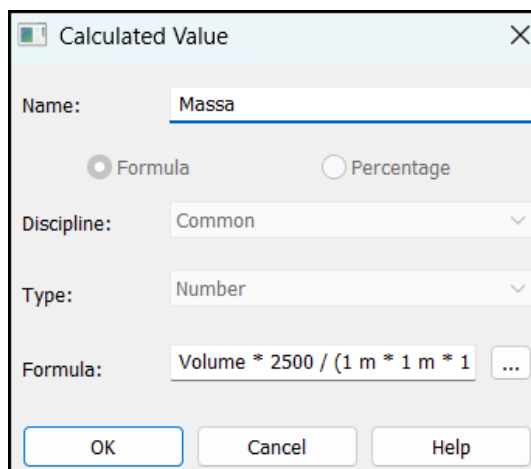


Figura 34 - Definição de um parâmetro calculado no Revit para estimativa da massa (kg), com base no volume do elemento e no peso volúmico do material.

Por fim, nos casos mais complexos ou menos documentados, em que o produto modelado não possui qualquer tipo de informação específica, recorre-se à substituição por um produto tecnicamente equivalente, com características semelhantes em termos de constituição e função. Esta medida permitiu garantir que todos os elementos do modelo pudessem ser integrados na análise de ACV, assegurando uma quantificação coerente e completa.

4.3. ETAPA 2 - MÉTODO EXPEDITO

4.3.1. CLASSIFICAÇÃO DA QUANTIDADE DE KG CO₂ EQ/KG POR TIPO DE MATERIAL

O método expedito, como o nome indica, tem como objetivo realizar um cálculo aproximado da pegada de carbono incorporado associada ao edifício em fase de projeto, de forma expedita e orientada para uma primeira avaliação dos impactos ambientais. Este método contempla os módulos A1 a A3 da ACV, correspondentes às fases de produção dos materiais (extração de matérias-primas, transporte e processos de fabrico). Para a realização dos cálculos (etapa 2.1), são atribuídos coeficientes de carbono (fatores de emissão) a cada tipo de material, expressos em kg CO₂eq por kg de material. Estes valores representam a quantidade estimada de gases com efeito de estufa emitidos durante os módulos A1-A3 por unidade de massa do material em causa. Os coeficientes adotados neste estudo foram extraídos do guia *Embodied Carbon - The Inventory of Carbon and Energy* (ICE), desenvolvido por Hammond and Jones [123], que compila valores médios baseados em estudos de referência internacional.

Importa referir que esta etapa foi antecipada e operacionalizada no capítulo 4.2.5, onde se procedeu à atribuição do parâmetro partilhado “*BREEAM_COEF*” a todos os elementos relevantes do modelo digital. Esta atribuição foi efetuada de forma automatizada, através da rotina Dynamo desenvolvida, com base na tabela de correspondência por tipo de material apresentada na Tabela 7, onde cada material identificado foi associado ao respetivo coeficiente de carbono equivalente.

De salientar que, uma vez que neste método se aglomeram diversos materiais sob categorias genéricas, a precisão do valor final da pegada de carbono poderá ser afetada por um grau de incerteza superior, como é expectável num método de carácter expedito. Ainda assim, esta abordagem permite obter uma

ordem de grandeza fiável e identificar os materiais com maior impacto relativo, constituindo uma ferramenta útil de apoio à decisão em fases preliminares de projeto.

4.3.2. ESTIMATIVA DA PEGADA DE CO₂ (KG CO₂ EQ/KG)

Após o tratamento de todas as instâncias do modelo, e concluída a atribuição dos parâmetros relativos à massa (kg) dos materiais e aos respetivos coeficientes de emissão de carbono (kgCO₂eq/kg), torna-se possível calcular a pegada de carbono associada a cada elemento. Este cálculo é realizado diretamente no *software* Revit, através da criação de um parâmetro calculado (*calculated parameter*).

A equação utilizada segue uma formulação simplificada, que consiste na multiplicação da massa do elemento (em quilogramas) pelo coeficiente de carbono correspondente ao tipo de material atribuído. A expressão é a seguinte:

$$P = \sum_{i=m}^n M_i * C_i \quad (1)$$

Legenda:

P = estimativa da Pegada de CO₂ do edifício (kgCO₂eq);

M = Massa (kg) do material;

C = Coeficiente de carbono (kgCO₂eq/kg).

Esta operação foi implementada no Revit como um campo adicional nas tabelas de quantidades, permitindo o cálculo automático da pegada de carbono de cada linha de medição. A Figura 35 apresenta a configuração do parâmetro calculado aplicado no modelo, demonstrando o funcionamento da equação dentro do ambiente BIM.

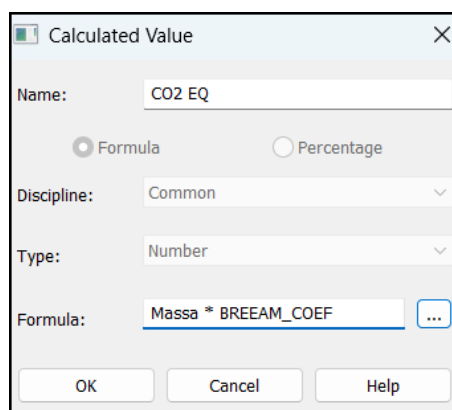


Figura 35 - Criação de parâmetro calculado no Revit

Este procedimento permitiu obter, de forma sistematizada, os valores de emissões de CO₂ equivalente por elemento, os quais foram posteriormente utilizados para análise agregada por material e especialidade no Power BI, conforme será detalhado na próxima secção.

4.3.3. EXPORTAÇÃO DOS DADOS PARA A FERRAMENTA POWER BI

Após o cálculo da pegada de carbono de cada elemento no ambiente Revit, através da multiplicação da massa pelo respetivo coeficiente de carbono, procedeu-se à exportação das tabelas resultantes para formato Excel, com o intuito de realizar a análise e visualização dos dados na ferramenta Power BI. As tabelas de elementos pertencentes à mesma especialidade foram construídas com a mesma estrutura de colunas, independentemente de apresentarem ou não valores nulos, com o objetivo de facilitar a análise e o cruzamento dos dados após a exportação e em fases posteriores.

A exportação foi realizada com recurso ao *add-in* comercial Diroots One (Figura 36), uma ferramenta instalada no Revit e disponibilizada pela empresa Garcia Garcia, com o objetivo de agilizar o processo de extração de dados do modelo. No âmbito deste *add-in*, foi utilizada a funcionalidade *SheetLink*, que permite sincronizar diretamente os dados do modelo Revit com ficheiros Excel, assegurando a fidelidade da informação e facilitando atualizações posteriores. Esta abordagem revelou-se mais eficiente do que outras alternativas possíveis, como a criação de rotinas personalizadas em Dynamo, tendo sido escolhida com o propósito de tornar o processo mais simples, direto e rápido. Deste modo, foram exportadas tabelas individuais para cada categoria de elemento em cada uma das seis especialidades técnicas, originando ficheiros Excel organizados por especialidade e por tipo de categoria. Esta estruturação permitiu, numa fase posterior, realizar tanto uma análise segmentada por especialidade, como uma avaliação global conjunta de todas as especialidades, facilitando a leitura integrada da pegada de carbono estimada.

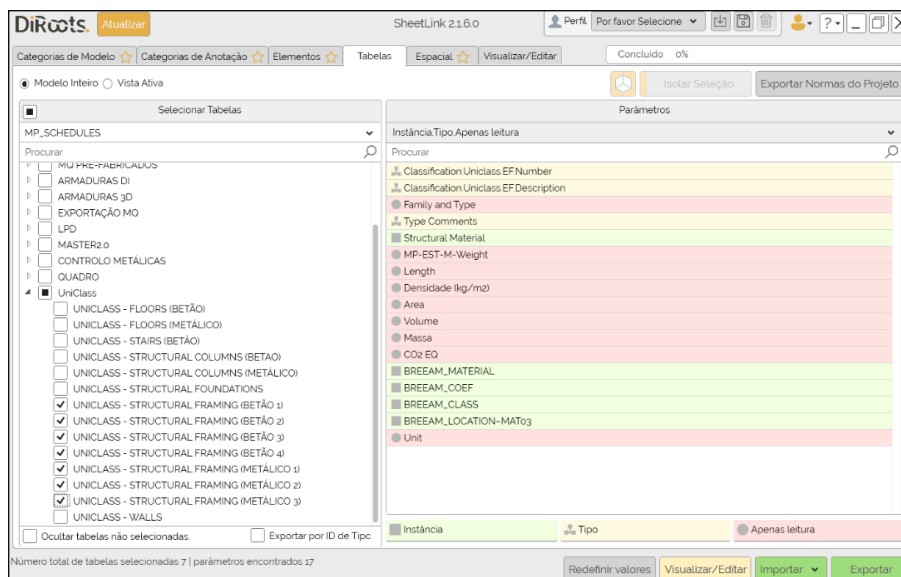


Figura 36 - Interface do *add-in* Diroots One - *SheetLink*, com a seleção de tabelas por categoria na especialidade de estruturas e os respetivos parâmetros configurados para exportação para Excel.

Na plataforma Power BI, os dados foram tratados, estruturados e agregados com base nos parâmetros previamente definidos no modelo. No entanto, optou-se por estruturar a análise com base no tipo de material, uma vez que este parâmetro permite uma leitura mais direta do contributo de cada grupo de materiais para a pegada de carbono total estimada. Foram ainda desenvolvidas visualizações gráficas interativas, como diagramas circulares, que evidenciam a distribuição relativa das emissões e facilitam a interpretação dos resultados, podendo estas ser consultadas no Capítulo 5.1, referente à apresentação dos resultados do método expedito.

Esta ferramenta permite, com relativa facilidade, tratar uma elevada quantidade de dados e apresentá-los de forma personalizada, ajustada aos objetivos da análise pretendida. A sua utilização contribui para uma visualização clara e direta dos impactos ambientais estimados, mesmo a partir de grandes volumes de informação extraída do modelo BIM. Nesta etapa, com todos os resultados necessários ao método expedito já calculados, o objetivo passou por consolidar e apresentar esses dados no Power BI, exigindo

um tratamento prévio na ferramenta *Power Query*. Esta transformação consistiu na eliminação de cabeçalhos redundantes gerados automaticamente pelo *software* de exportação, bem como na agregação de todas as folhas exportadas numa única tabela de base, contendo apenas as colunas relevantes para a análise da pegada de carbono. Para possibilitar uma análise global da pegada de carbono dos modelos das diferentes especialidades, recorreu-se à funcionalidade “Combinar consultas” do *Power Query*, a qual permite unir múltiplas tabelas num único conjunto de dados. Neste processo, foram selecionadas todas as tabelas exportadas de cada especialidade e agregadas automaticamente, assegurando a correspondência entre colunas de igual nome. Após a combinação, procedeu-se à remoção de colunas não relevantes para a análise final, mantendo apenas os campos essenciais como tipo de material e a pegada de carbono (kg CO₂ eq.).

Esta etapa revelou-se essencial para transformar os dados extraídos do modelo Revit em informação útil e inteligível, permitindo comunicar os resultados de forma clara, validar a consistência da parametrização aplicada no modelo e identificar eventuais anomalias ou lacunas na modelação. Este método demonstra ainda a interoperabilidade desta metodologia, ao integrar o *software* Revit, extensões como o DiRoots, e plataformas complementares como o Excel e o Power BI, promovendo uma articulação eficaz entre modelação, tratamento e visualização de dados. Constitui, assim, um instrumento de apoio à decisão técnica e ambiental, mesmo em fases preliminares de projeto, reforçando a utilidade do método expedito no contexto da avaliação de impacto de soluções construtivas.

4.4. ETAPA 3 – MÉTODO DETALHADO: ONE CLICK LCA (EXCEL)

A etapa 3 do método detalhado baseia-se na utilização da plataforma One Click LCA, uma ferramenta amplamente reconhecida para a realização de ACV no setor da construção. Neste método, o cálculo da pegada de carbono é efetuado com base na seleção de Declarações Ambientais de Produto disponíveis na biblioteca interna da plataforma, associadas a cada tipologia de elemento modelado. Esta abordagem permite obter valores de emissões com maior exatidão do que o método expedito, ao contemplar uma base de dados certificada e com dados específicos por produto ou categoria de produto.

A análise considera um conjunto alargado de módulos do ciclo de vida, nomeadamente os módulos A1 a A4 (produção e transporte até ao local), B4 a B5 (substituição e reabilitação) e C1 a C4 (fim de vida). A plataforma permite ainda, opcionalmente, integrar os módulos B6 e B7, correspondentes ao uso operacional de energia e água, o que reforça a abrangência da análise ambiental realizada.

Uma das vantagens do One Click LCA é a sua interoperabilidade com diversas plataformas, incluindo Revit, Excel e IFC, facilitando a integração de dados provenientes de modelos BIM. Esta ferramenta permite utilizar a classificação BREEAM como estrutura base de organização e análise dos elementos importados. Para facilitar o tratamento de dados nas fases posteriores de modelação e integração com a plataforma, torna-se recomendável a criação, no modelo Revit, de parâmetros partilhados por famílias, que permitam classificar os elementos segundo a estrutura BREEAM. No âmbito da Etapa 1, esta tarefa foi já concretizada, tendo-se procedido à definição dos parâmetros *BREEAM Class - MAT01* e *BREEAM Location - MAT03*, conforme apresentado nas Tabelas 4 e 5. Estes campos revelam-se particularmente úteis no contexto da plataforma One Click LCA, uma vez que permitem filtrar, agrupar e analisar os elementos de forma coerente com os critérios do sistema de avaliação ambiental, assegurando assim uma estrutura de dados compatível e robusta para a análise detalhada.

Sendo o acesso a esta plataforma baseado em licenciamento pago, recorreu-se para esta dissertação à versão de estudante, que possibilita a utilização da extensão do One Click LCA no Revit. Este *add-in* permite a leitura automática de todos os elementos modelados, atribuindo-lhes uma classificação inicial e permitindo ao utilizador selecionar manualmente a DAP que melhor se ajusta a cada tipo de elemento, conforme ilustrado na Figura 37.

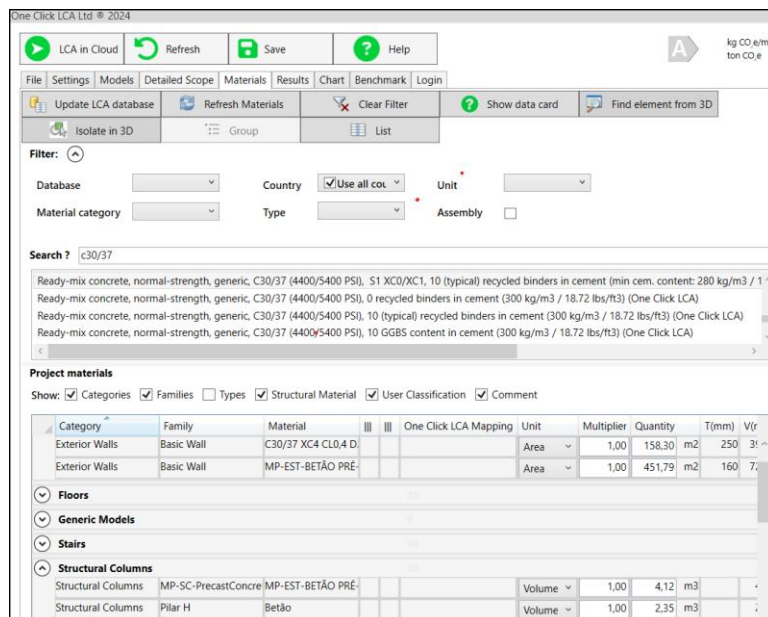


Figura 37 - Atribuição manual das DAP aos elementos do modelo Revit no *add-in* do One Click LCA.

Contudo, durante a tentativa de integração direta através do *add-in*, identificou-se uma limitação relevante. O objetivo definido pela empresa de acolhimento passava por realizar a importação dos elementos com quantidades expressas em massa (kg), uma vez que o cálculo da pegada de carbono se baseava na multiplicação da massa pelo fator de emissão. No entanto, ao utilizar o *plugin* no Revit, verificou-se que na coluna “*Quantity Type*” apenas surgiam unidades de volume (m³), área (m²) ou comprimento (m), não estando disponível a opção de importar por massa. Inicialmente, suspeitou-se que esta limitação pudesse estar relacionada com as restrições da licença académica, mas após contacto com a equipa de suporte técnico do One Click LCA, foi confirmado que a causa se devia à própria estrutura do *Revit*. A resposta obtida (Figura 38) esclareceu que o Revit modela elementos com base em unidades geométricas (comprimento, área, volume ou unidades) e que o *add-in* do One Click LCA não reconhece diretamente valores de massa atribuídos via parâmetros personalizados. Em consequência, o *plugin* não permite o mapeamento automático da quantidade em quilogramas. Face a esta limitação, a equipa técnica do One Click LCA recomendou a importação de dados via ficheiro *Excel*, sendo esta a solução mais adequada quando se pretende realizar a avaliação com base em massa. Esta abordagem foi adotada, permitindo a utilização dos dados previamente preparados no Revit e exportados em Excel com os campos estruturados para a plataforma.

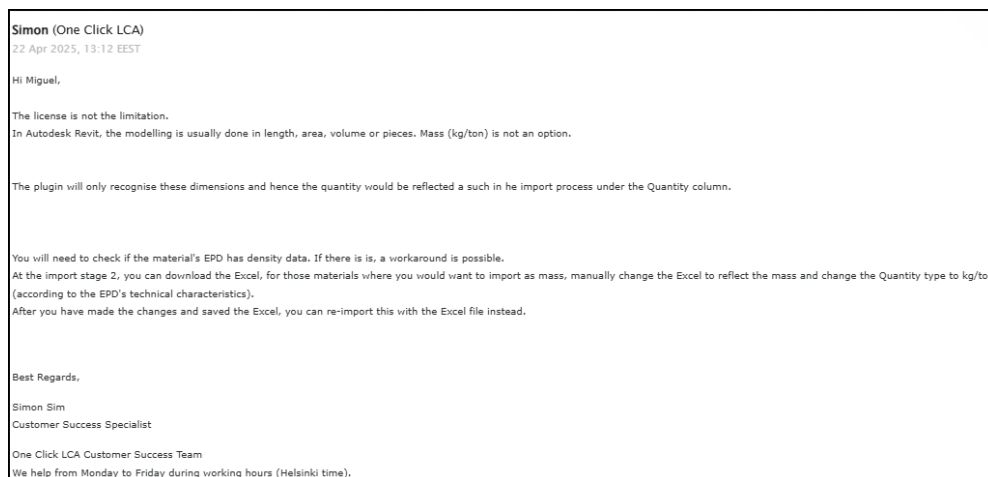


Figura 38 - E-mail de resposta do suporte técnico do One Click LCA

4.4.1. EXPORTAÇÃO DOS DADOS PARA O FICHEIRO EXCEL BASE DE IMPORTAÇÃO DO ONE CLICK LCA

De modo a seguir a abordagem recomendada pela equipa de suporte do One Click LCA e em conformidade com o objetivo definido pela empresa de acolhimento, procedeu-se ao preenchimento de um ficheiro Excel base de importação, disponibilizado pela própria plataforma. Esta metodologia permitiu contornar a limitação identificada na extensão do Revit, garantindo a correta leitura dos dados por massa (kg), tal como pretendido.

O One Click LCA disponibiliza diversas folhas de importação em Excel, ajustadas a diferentes contextos e localizações geográficas. Para este caso de estudo, optou-se pela folha destinada a projetos localizados na União Europeia, de modo a assegurar a compatibilidade com a base de dados e os fatores de emissão específicos da região. Esta folha de Excel apresenta uma estrutura predefinida que exige o preenchimento de determinados campos obrigatórios, como a categoria geral do elemento (*Class*), o nome do material predominante (*IFC Material*), a respetiva quantidade, o tipo de unidade associada (por exemplo, massa em quilogramas), a distância estimada de transporte em quilómetros até ao local de obra, e ainda um campo opcional para eventuais observações adicionais (*Comment*). É igualmente necessário o preenchimento da classificação ambiental segundo a estrutura *BREEAM Class - MAT01*, assegurando assim a consistência dos dados com os critérios da plataforma.

Uma vez que os dados exportados a partir do Revit se encontram dispersos por diversos ficheiros Excel, cada um contendo múltiplas folhas correspondentes às várias categorias e especialidades modeladas, torna-se necessário proceder ao seu tratamento e reorganização. Este processo tem como finalidade a consolidação de toda a informação relevante num único ficheiro Excel, disponibilizado pela plataforma One Click LCA, de forma a garantir a sua compatibilidade com o modelo de importação proposto.

Para tal, foi realizado o somatório das massas de instâncias pertencentes às mesmas famílias, agregando os dados e reduzindo significativamente o número total de linhas a importar. Este procedimento permitiu eliminar entradas repetidas relativas a materiais idênticos, mantendo a integridade da informação referente à massa total (em kg) de cada tipologia de elemento. Por exemplo, no modelo da especialidade de estruturas, foram identificadas diversas vigas metálicas com perfil em C, todas pertencentes à mesma família, mas modeladas como instâncias distintas, cada uma com o seu respetivo peso. Para a estruturação do ficheiro de importação, somou-se a massa total destas vigas, representando-as numa única linha agregada no Excel. Ao transformar os dados em elementos únicos por família e material, não só se simplifica substancialmente o processo de importação, como também se assegura o cumprimento das limitações da plataforma One Click LCA, que impõe um limite de 500 linhas de dados por projeto.

Adicionalmente, a coluna referente ao tipo de unidade foi uniformizada para “kg”, beneficiando do trabalho previamente desenvolvido no Revit, onde todas as massas foram já calculadas e atribuídas a cada

instância. Esta padronização facilita a correspondência com os parâmetros esperados pela plataforma e elimina potenciais erros durante a fase de importação.

4.4.2. CLASSIFICAÇÃO DE CADA ITEM MEDIANTE *BREEAM CLASS – MAT01*

Como já foi anteriormente abordado, a plataforma One Click LCA permite a utilização da classificação ambiental segundo a estrutura BREEAM, sendo um dos campos obrigatórios no ficheiro Excel de importação o preenchimento da coluna *BREEAM Class - MAT01*. Esta classificação assume particular relevância no processo de avaliação ambiental, uma vez que permite uma correta associação dos elementos modelados aos critérios de análise e às bases de dados de DAP da plataforma.

Logo na fase inicial da presente metodologia, mais concretamente na etapa 1, foi antecipada a necessidade de incluir esta informação no modelo digital, com vista a facilitar o processo de interoperabilidade e importação futura no One Click LCA. Para tal, procedeu-se à criação de uma rotina Dynamo que permitisse a atribuição automática do parâmetro *BREEAM_CLASS* a todos os elementos relevantes do modelo, de acordo com os critérios definidos na Tabela 4. Esta rotina baseou-se num ficheiro Excel previamente desenvolvido, que estabelecia a correspondência entre a classificação funcional EF da estrutura Uniclass 2015 e as classes BREEAM, conforme apresentado nos capítulos anteriores.

A existência desta rotina revelou-se particularmente útil nesta fase do processo, permitindo o preenchimento rápido, consistente e fiável da coluna *BREEAM Class - MAT01* no ficheiro de importação do One Click LCA, evitando assim erros de classificação e otimizando o tempo de trabalho.

Este procedimento confirma ainda a importância da interoperabilidade entre ferramentas e da correta parametrização da informação desde as fases iniciais de modelação. A integração entre o Revit, o Dynamo e os critérios de avaliação ambiental da plataforma One Click LCA demonstra o potencial das metodologias BIM para suportar processos robustos de análise do ciclo de vida em contexto de projeto.

4.4.3. DEFINIÇÃO DA CLASS SEGUNDO A *BREEAM CLASS – MAT01*

Uma das colunas de preenchimento obrigatório no ficheiro Excel de importação para a plataforma One Click LCA corresponde ao campo “*Class*”, que diz respeito à categoria geral do elemento a ser analisado. Esta classificação permite organizar os elementos do projeto em categorias funcionais gerais, tais como fundação, parede exterior, cobertura, sistemas técnicos ou elementos de fachada, garantindo uma estrutura coerente e alinhada com os requisitos de importação da plataforma *One Click LCA*.

Para realizar esta atribuição, foi necessário estabelecer no Excel uma correspondência direta entre a coluna já preenchida da classificação *BREEAM Class - MAT01* (atribuída previamente com base na Tabela 4) e o valor a introduzir na coluna “*Class*”. Esta correspondência foi construída com base nos critérios definidos pela plataforma, garantindo que cada código BREEAM fosse associado à categoria geral compatível exigida pelo One Click LCA. A Tabela 8 apresenta a correspondência utilizada entre a *BREEAM Class - MAT01* e os valores da coluna “*Class*”, demonstrando a metodologia adotada para uniformizar a estrutura de dados e assegurar a conformidade do ficheiro de importação.

Tabela 9 Relação entre classificação *BREEAM Class - MAT01* e *CLASS*

<i>BREEAM Class – MAT01</i>	<i>Class</i>
<i>Not defined</i>	<i>OTHER</i>
<i>External walls (envelope, structure and finishes)</i>	<i>EXTERNAL WALL</i>
<i>External windows and rooflights</i>	<i>WINDOW</i>
<i>Foundations (including excavation)</i>	<i>FOUNDATION</i>
<i>Internal floor finishes (incl. access floors)</i>	<i>HORIZONTAL FINISH</i>
<i>Structural frame (vertical)</i>	<i>COLUMN</i>
<i>Upper floors (including horizontal structure)</i>	<i>BEAM</i>
<i>Basements/retaining walls (including excavation)</i>	<i>FOUNDATION</i>
<i>External solar shading devices, access structures etc.</i>	<i>ROOF</i>
<i>Ground/lowest floor</i>	<i>SLAB</i>
<i>Internal ceiling finishes (incl. suspended/access ceilings)</i>	<i>COVERING</i>
<i>Internal walls and partitions</i>	<i>INTERNAL WALL</i>
<i>Roof (including coverings)</i>	<i>ROOF</i>
<i>Stairs and ramps</i>	<i>STAIRS</i>
<i>Balustrades and handrails</i>	<i>STAIRS</i>
<i>Internal doors</i>	<i>DOOR</i>
<i>Internal wall finishes</i>	<i>VERTICAL FINISH</i>
<i>Internal windows</i>	<i>WINDOW</i>
<i>Heat Source, Space Heating, Air Conditioning, Ventilation</i>	<i>SYSTEMS</i>
<i>Communication, Security and Control Systems</i>	<i>SYSTEMS</i>
<i>Electrical Installations</i>	<i>SYSTEMS</i>
<i>Fire and Lightning Protection</i>	<i>SYSTEMS</i>
<i>Lift and Conveyor Installations / Systems</i>	<i>BUILDINGTECH</i>
<i>Water and waste installations</i>	<i>SYSTEMS</i>
<i>Sanitary Installations</i>	<i>SYSTEMS</i>
<i>Hard Landscaping, Roads, Paths and Pavings</i>	<i>SITE</i>
<i>Hard Landscaping, Fencing, Railings and Walls</i>	<i>SITE</i>

4.4.4. DEFINIÇÃO DOS QUILÔMETROS DE TRANSPORTE REALIZADOS

Para completar o preenchimento do ficheiro Excel de importação para a plataforma One Click LCA, restava apenas o preenchimento do campo obrigatório relativo à distância de transporte dos materiais, expressa em quilómetros. Este parâmetro é essencial para contabilizar os impactos ambientais associados ao transporte desde o local de produção até ao local da obra, sendo um dos fatores considerados no cálculo dos módulos A4 da análise do ciclo de vida.

Dada a ausência de dados precisos sobre as origens dos materiais utilizados no projeto, optou-se por atribuir uma distância média padrão, baseada em valores de referência tipicamente considerados em estudos de ACV e com base na experiência adquirida em obras anteriores da empresa Garcia Garcia, para as quais se registaram distâncias médias semelhantes entre os fornecedores e os estaleiros de construção. Esta decisão foi também tomada em consonância com as práticas sugeridas pela plataforma One Click LCA, que admite a utilização de estimativas razoáveis na ausência de dados específicos. Assim, foi atribuída a distância de 100 km a todos os elementos incluídos no ficheiro Excel. Este valor reflete uma estimativa média de transporte rodoviário nacional entre unidades de produção e o estaleiro de obra, situado no concelho de Vila Nova de Gaia. Apesar de se tratar de uma aproximação, este valor permite manter a coerência e a comparabilidade entre os diferentes elementos analisados, não comprometendo a robustez dos resultados obtidos com a metodologia. A introdução deste valor foi efetuada de forma automatizada na folha Excel, garantindo a uniformidade e facilitando a posterior importação dos dados na plataforma One Click LCA.

4.4.5. IMPORTAÇÃO PARA A PLATAFORMA ONE CLICK LCA

Concluído o preenchimento de todos os campos obrigatórios no ficheiro Excel, o ficheiro encontra-se pronto para ser importado para a plataforma One Click LCA. A Figura 39 apresenta um excerto do ficheiro Excel devidamente preenchido, já preparado para o processo de importação. Esta estrutura assegura a conformidade com os requisitos da plataforma, permitindo o correto reconhecimento e processamento dos dados ambientais de cada item.

CLASS	IFCMATERIAL	QUANTITY	QTY	TYPE	TRANSPORT_KM	COMMENT	BREEAM Int'l Mat 01 classification
STAIRS	Concrete C30/37	85208,4638	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Stairs and ramps	13
STAIRS	Steel Rebar	3650,394325	KG			100 METALUESCADAS DE BETÃO Stairs and ramps	
STAIRS	Concrete C30/37	6827,95008	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Stairs and ramps	13
STAIRS	Steel Rebar	284,49792	KG			100 METALUENCHIMENTO Stairs and ramps	
ROOF	CONCRETE C25/30 X C1 CL0,4 D22 S3	47298,14548	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Roof (including coverings)	12
ROOF	Steel Rebar	1970,756062	KG			100 METALUFLOOR - LAJE ALVEI Roof (including coverings)	
BEAM	CONCRETE C25/30 X C1 CL0,4 D22 S3	1381909,571	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Upper floors (including horizontal structure)	6
BEAM	Steel Rebar	57579,56548	KG			100 METALUFLOOR - LAJE ALVEI Upper floors (including horizontal structure)	
STAIRS	CONCRETE C25/30 X C1 CL0,4 D22 S3	7454,639736	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Stairs and ramps	13
STAIRS	Steel Rebar	310,609989	KG			100 METALUFLOOR - LAJE COLAJ Stairs and ramps	
SLAB	CONCRETE C25/30 X C1 CL0,4 D22 S3	24695676,3	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Ground/lowest floor	9
SLAB	Steel Fibres	296348,1156	KG			100 METALUFLOOR - PAVIMENTC Ground/lowest floor	
ROOF	CONCRETE C30/37 X C4 CL0,4 D22 S3	30153,55408	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Roof (including coverings)	12
ROOF	Steel Rebar	1256,398087	KG			100 METALUFLOOR - LAJE MACIÇ Roof (including coverings)	
FOUNDATION	CONCRETE C30/37 X C4 CL0,4 D22 S3	5039,516073	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Foundations (including excavation)	3
FOUNDATION	Steel Rebar	209,9798364	KG			100 METALUFLOOR - MACIÇOS DE Foundations (including excavation)	
STAIRS	FLOOR METAL	5,292088	KG			100 METALUFLOOR - PAVIMENTC Stairs and ramps	13
FOUNDATION	CONCRETE C30/37 X C2 CL0,4 D22 S3	1532,354112	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Foundations (including excavation)	3
FOUNDATION	Steel Rebar	63,848088	KG			100 METALUFLOOR - MACIÇOS DE Foundations (including excavation)	
FOUNDATION	CONCRETE C25/30 X C1 CL0,4 D22 S3	1104	KG			100 METALUFLOOR - MACIÇOS DE Foundations (including excavation)	3
FOUNDATION	Steel Rebar	46	KG			100 METALUFLOOR - MACIÇOS DE Foundations (including excavation)	
COLUMN	CONCRETE C30/37	1328969,058	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Structural frame (vertical)	5
COLUMN	Steel Rebar	55373,71076	KG			100 METALUFLOOR - MACIÇOS DE Foundations (including excavation)	
COLUMN	CONCRETE C40/50	344465,8864	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Structural frame (vertical)	5
COLUMN	Steel Rebar	14352,73693	KG			100 METALUFLOOR - MACIÇOS DE Foundations (including excavation)	
COLUMN	METAL S275 JR (EN 10025-2)	12317,37582	KG			100 METALUFLOOR - MACIÇOS DE Foundations (including excavation)	5
COLUMN	METAL S275 JH (EN 10219-1)	250,516796	KG			100 METALUFLOOR - MACIÇOS DE Foundations (including excavation)	5
FOUNDATION	CONCRETE C12/15 X0 CL1,0 D22 S3	37398,79062	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Foundations (including excavation)	3
FOUNDATION	Steel Rebar	1592,761276	KG			100 METALUFLOOR - MACIÇOS DE Foundations (including excavation)	
FOUNDATION	CONCRETE C30/37 X C2 CL0,4 D16 S5	2702278,164	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Foundations (including excavation)	3
FOUNDATION	Steel Rebar	112594,9243	KG			100 METALUFLOOR - MACIÇOS DE Foundations (including excavation)	
FOUNDATION	CONCRETE C30/37 X C2 CL0,4 D22 S3	1377574,815	KG			100 CONCRETE OR CEMENTITIOUS Foundations (including excavation)	3
FOUNDATION	Steel Rebar	57398,55064	KG			100 METALUFLOOR - MACIÇOS DE Foundations (including excavation)	

Figura 39 - Excerto do ficheiro Excel preparado para importação no One Click LCA

O processo inicia-se com o preenchimento de informações sobre o projeto, tais como o nome do projeto, o tipo de construção, a morada, o tipo de utilização pretendido, a área de construção, o número de pisos, entre outros dados relevantes para a caracterização do empreendimento. De seguida, procede-se à criação de uma nova versão dentro da plataforma One Click LCA, onde é necessário indicar a fase de desenvolvimento do projeto, selecionar as ferramentas a utilizar e definir o tipo e âmbito da análise a realizar. No caso da presente dissertação, e tendo em conta a utilização da licença académica, foram selecionadas as ferramentas de ACV de acordo com a norma EN 15804+A1 e EN15804+A2, tal como ilustrado na Figura 40. A plataforma permite ainda definir o enquadramento do projeto, selecionando a opção “Level(s) EU” como âmbito pré-definido, correspondente ao contexto europeu. Foram também introduzidos os parâmetros correspondentes ao tipo de projeto (“*New construction, whole building*”) e ao tipo de estrutura principal (“*Concrete frame*”), assim como as partes do edifício abrangidas pela análise, designadamente fundações, estrutura e envolvente, acabamentos e materiais diversos, áreas exteriores e sistemas técnicos.

Figura 40 - Criação de uma versão do projeto na plataforma One Click LCA

Segue-se, então, o processo de importação do ficheiro Excel previamente preparado, que permite carregar para a plataforma todos os elementos. A plataforma One Click LCA organiza o processo de importação de dados a partir de ficheiros Excel em seis etapas sequenciais, concebidas para garantir a validação, organização e correta correspondência da informação a importar. Estas fases permitem uma integração controlada e estruturada dos dados ambientais no ambiente do projeto, assegurando a sua compatibilidade com os requisitos da ACV.

A primeira etapa, Figura 41, consiste no carregamento do ficheiro Excel previamente preparado, utilizando o modelo fornecido pela própria plataforma, com a estrutura de colunas obrigatória para projetos localizados na União Europeia.

Figura 41 - Etapa 1 do processo de importação do ficheiro Excel

Na segunda etapa, apresentada na Figura 42, procede-se à definição das configurações de importação, onde se seleciona o projeto e a versão onde os dados serão carregados, bem como o modo de integração da informação: substituição de dados existentes, adição de novos elementos ou atualização apenas das quantidades previamente introduzidas. É também nesta fase que se pode ativar a funcionalidade “AI Mapping”, um sistema inteligente da plataforma que, ao ser ativado, permite ao One Click LCA realizar automaticamente a correspondência entre os materiais listados no ficheiro Excel e as DAP mais apropriadas da sua base de dados. Esta funcionalidade reduz significativamente o tempo necessário para o mapeamento manual e aumenta a eficiência do processo, sendo especialmente útil em projetos com elevado número de elementos.

2. Import settings
Review import settings and proceed to the next step. [Read more](#)

Choose where to import data

Project name: GG2124-WAREHOUSECANELAS

Design name: 03-DESIGN

Tool: Level(s) life-cycle assessment (EN15804 +A 1)

Choose how to import data

Existing data preservation: Add data to the design

AI-powered data mapping: ☒ ?

Data mapping filters (Optional): Filters (0) ?

Download Excel Previous Next

Figura 42 - Etapa 2 do processo de importação do ficheiro Excel

A terceira etapa, Figura 43, refere-se ao mapeamento das colunas do Excel com os campos reconhecidos pela plataforma. Este processo ocorre de forma automática, uma vez que foi utilizado um *template* de importação pré-definido pela própria plataforma, o qual já contém a estrutura e a nomenclatura compatíveis com os campos esperados pelo One Click LCA. Ainda assim, a plataforma permite ao utilizador verificar e ajustar manualmente a correspondência entre colunas, caso se detete alguma discrepância ou necessidade de personalização.

3. Column mapping
Map the columns you want to import or use for data mapping, mark custom columns as extra information, or skip. Name, Quantity and Unit are mandatory. [Read more](#)

Done! Continue to Next. You can also [Save settings](#) to use this column mapping again.

Total columns: 8 Mapped (7) ? Extra information (1) ? Skipped (0) ?

Class	Name	Quantity	Unit	Transport (km)	Comment	BR
FOUNDATION	CONCRETE C30/37 XC4 CL1	5039.51607264	KG	100	CONCRETE OR CIMENTITIOI	Fi
FOUNDATION	METAL	209.97983636	KG	100	METAL/FLOOR - MACIÇOS I	Fi
STAIRS	FLOOR METAL	5.292088	KG	100	METAL/FLOOR - PAVIMENTI	Si
FOUNDATION	CONCRETE C30/37 XC2 CL1	1532.354112	KG	100	CONCRETE OR CIMENTITIC	Fi
FOUNDATION	METAL	63.848088	KG	100	METAL/PLINTOS	Fi
FOUNDATION	CONCRETE C25/30 XC1 CL1	1104	KG	100	CONCRETE OR CIMENTITIC	Fi
FOUNDATION	METAL	46	KG	100	METAL/PLINTOS	Fi
COLUMN	CONCRETE C30/37	1328969.0582400002	KG	100	CONCRETE OR CIMENTITIC	Si

Ativar o Windows
Aceda a Definições para ativar o Windows

Save settings Previous Next

Figura 43 - Etapa 3 do processo de importação do ficheiro Excel

Segue-se a quarta etapa, dedicada à revisão e filtragem dos dados importados, como se apresenta na Figura 44. Nesta fase, o utilizador pode verificar se os valores, unidades e classificações foram corretamente interpretados pela plataforma, garantindo a coerência com os dados introduzidos no ficheiro *Excel*. Além disso, esta etapa permite excluir elementos que, por algum motivo, não se pretende incluir na análise, como por exemplo linhas que correspondam a elementos auxiliares de modelação, entradas duplicadas ou materiais irrelevantes.

4. Review & filter
Review units and classifications, resolve any ambiguities, and filter out unnecessary data. [Read more](#)

Done! Continue to Next

Unit Class BREEAM Int'l Mat 01 classification

Fix or filter out data with ambiguous units (0) ✓
Only corrected items will be imported

Unit in imported data	Count	Applied unit
No Rows To Show		

Data with recognised units (1) ✓

Unit in imported data	Count	Applied unit
KG	299	kg

Figura 44 - Etapa 4 do processo de importação do ficheiro Excel

A quinta etapa, representada pela Figura 45, corresponde à combinação de dados equivalentes, recomendada pela plataforma quando são detetadas várias linhas com os mesmos valores nos campos “Class”, “Name”, “Unit” e “BREEAM Int'l Mat 01 classification”. O One Click LCA sugere a fusão automática destas entradas, agrupando-as numa única linha consolidada com o somatório das respetivas quantidades. Esta funcionalidade permite simplificar a estrutura de dados e facilitar a análise global, sendo especialmente útil em projetos com elevado número de elementos redundantes. No entanto, na presente dissertação optou-se por não agrupar qualquer elemento, mantendo a estrutura individual de cada linha importada. Esta decisão teve como objetivo preservar a rastreabilidade dos dados e garantir uma correspondência direta com os valores inicialmente modelados e tratados no ficheiro *Excel*, assegurando total transparência e controlo sobre a origem de cada material analisado.

5. Combine data
Review automated combining of imported data based on matching values in criteria columns. You can add more criteria or ungroup data. [Read more](#)

No action needed. If you don't want to make changes, you can continue to Next

Select combine criteria (4/6) Total Imported data after combining : 280

Class Name Unit BREEAM Int'l Mat 01 classification

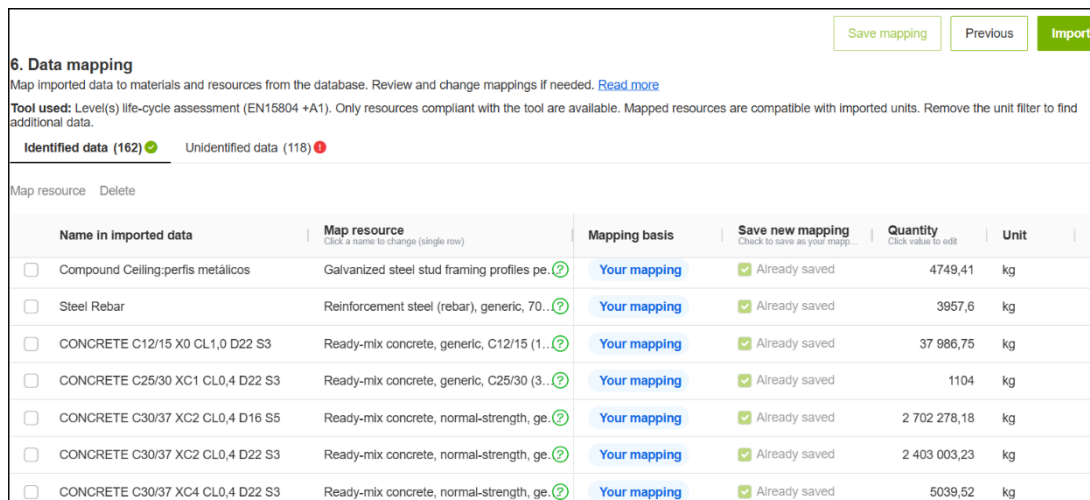
Ungroup (10)

# rows combined	Name	Quantity	Unit	Class	BREEAM Int'l M...	Comment
2	CONCRETE C40/50	3 134 791,97	kg	Beam	Upper floors (Includ...	CONCRETE/MADRE DE BI
4	Steel Rebar	196 792,18	kg	Beam	Not defined	METAL/CALEIRA BETÃO F
2	Steel Rebar	69 726,45	kg	Column	Not defined	METAL/PILAR H METAL/PI
3	CONCRETE C30/37 XC2 CL0,4 D22 S3	2 403 003,23	kg	Foundation	Foundations (Includ...	CONCRETE OR CIMENTIT
7	Steel Rebar	214 558,82	kg	Foundation	Not defined	METAL/BETÃO DE LIMPEZ
2	CL3000IU_W_26_E	106	kg	Other	Heat Source, Spac...	Plastic, polymer, resin, pain
2	NEOSILENT (200-350)_50Hz_v2: NEOS...	33	kg	Other	Heat Source, Spac...	Metal

Figura 45 - Etapa 5 do processo de importação do ficheiro Excel

Por fim, na sexta etapa, é realizado o mapeamento dos recursos (“Map resource”), como se apresenta na Figura 46, em que a plataforma associa automaticamente cada item importado às respetivas Declarações Ambientais de Produto, com base no seu sistema inteligente de correspondência. Este processo é amplamente facilitado pela ativação da funcionalidade *AI Mapping*, uma opção recomendada pela plataforma e ativada automaticamente quando se utiliza um *template* de importação pré-definido, como foi o caso nesta dissertação. O utilizador tem ainda a possibilidade de rever e, se necessário, modificar

manualmente as associações sugeridas, assegurando a correta correspondência entre os dados do modelo e a base de dados ambiental. Preferencialmente, o utilizador deve adotar a DAP do produto em questão quando esta estiver disponível, tendo em conta o material, o país de origem e outros fatores relevantes para a análise de ciclo de vida. No entanto, caso não seja possível, a plataforma disponibiliza uma biblioteca de produtos genéricos, que pode ser utilizada para garantir a continuidade do processo de avaliação, ainda que com um maior grau de incerteza associado.



6. Data mapping
Map imported data to materials and resources from the database. Review and change mappings if needed. [Read more](#)
Tool used: Level(s) life-cycle assessment (EN15804 +A1). Only resources compliant with the tool are available. Mapped resources are compatible with imported units. Remove the unit filter to find additional data.

Identified data (162) Unidentified data (118)

Map resource Delete

Name in imported data	Map resource Click a name to change (single row)	Mapping basis	Save new mapping Check to save as your mapp...	Quantity Click value to edit	Unit	Cl
☐ Compound Ceiling:perfis metálicos	Galvanized steel stud framing profiles pe.?	Your mapping	☒ Already saved	4749,41	kg	
☐ Steel Rebar	Reinforcement steel (rebar), generic, 70.?	Your mapping	☒ Already saved	3957,6	kg	
☐ CONCRETE C12/15 X0 CL1,0 D22 S3	Ready-mix concrete, generic, C12/15 (1.?	Your mapping	☒ Already saved	37 986,75	kg	
☐ CONCRETE C25/30 XC1 CL0,4 D22 S3	Ready-mix concrete, generic, C25/30 (3.?	Your mapping	☒ Already saved	1104	kg	
☐ CONCRETE C30/37 XC2 CL0,4 D16 S5	Ready-mix concrete, normal-strength, ge.?	Your mapping	☒ Already saved	2 702 278,18	kg	
☐ CONCRETE C30/37 XC2 CL0,4 D22 S3	Ready-mix concrete, normal-strength, ge.?	Your mapping	☒ Already saved	2 403 003,23	kg	
☐ CONCRETE C30/37 XC4 CL0,4 D22 S3	Ready-mix concrete, normal-strength, ge.?	Your mapping	☒ Already saved	5039,52	kg	

Figura 46 - Etapa 6 do processo de importação do ficheiro Excel

Tratando-se o presente caso de estudo de uma obra localizada em Portugal, constata-se ainda uma escassez de produtos nacionais na base de dados do One Click LCA. Por conseguinte, a seleção de DAPs foi feita recorrendo a produtos de outros países europeus, o que poderá introduzir alguma variação nos resultados obtidos. Ainda assim, este procedimento revela-se inevitável, uma vez que a plataforma se encontra em fase de adaptação à realidade portuguesa. Deste modo, quando o produto efetivamente utilizado não se encontra disponível na plataforma, a escolha da DAP seguiu uma lógica hierárquica baseada em dois critérios principais: proximidade geográfica e grau de maturidade da indústria da construção. Em primeiro lugar, optou-se por produtos de países geograficamente próximos, nomeadamente Espanha e França, por se tratar de mercados com características semelhantes e cadeias de abastecimento frequentemente interligadas. Em segundo plano, consideraram-se países com reconhecida maturidade tecnológica e industrial no setor da construção, tais como Alemanha, Itália, Bélgica, Luxemburgo, Polónia e Turquia. Por fim, na ausência de alternativas nestes países, recorreram-se a DAPs provenientes de países como a Dinamarca, Finlândia e Reino Unido, reconhecendo-se que, apesar da sua elevada qualidade técnica, estes apresentam contextos industriais e ambientais substancialmente distintos da realidade portuguesa. Assim, a sua utilização foi ponderada apenas como última opção. Este procedimento assegura uma maior coerência e robustez nos dados de entrada da análise, garantindo que as discrepâncias introduzidas pela origem das DAPs sejam minimizadas e devidamente justificadas.

Adicionalmente, e tendo em conta que a estrutura do edifício em estudo é maioritariamente constituída por betão, foi dada especial atenção à seleção das DAPs associadas a este material. Sempre que possível, optou-se por Declarações Ambientais de Produto de fabricantes nacionais, nomeadamente DAPs portuguesas que especificam o uso de cimento do tipo CEM II, por serem mais representativas da realidade construtiva nacional. Esta decisão baseou-se em documentação técnica recolhida junto de fornecedores e parceiros da empresa, como é o caso do relatório da Betão Liz, S.A. [124], relativo a composições reais de betão utilizadas em obras nacionais, onde se confirma a utilização de cimento CEM II/B-L 42,5 R e CEM II/B-M (V-L) 42,5 R. Para além disso, procurou-se selecionar DAPs com reduzida ou nula percentagem de conteúdo reciclado, uma vez que este fator pode influenciar significativamente os valores da pegada de carbono nos módulos iniciais do ciclo de vida (A1-A3). Esta escolha teve como objetivo

manter uma aproximação mais realista às práticas de fornecimento de betão adotadas em Portugal, onde o conteúdo reciclado, especialmente ao nível do ligante (cimento), é ainda relativamente limitado. Para ilustrar o processo de seleção e mapeamento das DAP no One Click LCA, apresentam-se seguidamente duas imagens exemplificativas. A Figura 47 mostra a interface de seleção de materiais na fase de mapeamento, com destaque para a pesquisa do betão C30/37 e as diferentes opções disponíveis para o contexto português. Já a Figura 48 detalha as características técnicas de uma das DAP selecionadas, evidenciando a utilização de cimento do tipo CEM II/A-V e um teor de material reciclado de 10%, critérios que foram determinantes para a escolha, conforme discutido anteriormente.

Map resource for: CONCRETE C30/37 XC4 CL0,4 D22 S3
Quantity: 5039.52 | Unit: kg | Class: FOUNDATION | Comment: CONCRTE OR CIMENTITIOUS/FLOOR ...

Our suggestions (16) Search

c30/37 Search

Filters (2) Clear all

Resource name	Issues	Type	Region	EPD program	Year	GWP (beta) kg CO ₂ e
Ready-mix concrete, normal-strength...	?	X	PT	One Click LCA	2024	437.33 per m3
Ready-mix concrete, normal-strength...	?	X	PT	One Click LCA	2024	308.08 per m3
Ready-mix concrete, normal-strength...	?	X	PT	One Click LCA	2024	361.14 per m3
Ready-mix concrete, normal-strength...	?	X	PT	One Click LCA	2024	399.23 per m3
Ready-mix concrete, normal-strength...	?	X	PT	One Click LCA	2024	323.04 per m3

Figura 47 - Seleção da DAP de betão C30/37 para Portugal

Ready-mix concrete, normal-strength, generic, C30/37 (4400/5400 PSI), S1 XC0/XC1, 10% (typical) recycled binders in cement (min cem. content: 280 kg/m3 / 18.72 lbs/ft3), Portland-fly ash cement CEM II/A-V 42.5 (One Click LCA (2024))	
General information	▼
Datapoint background information	▼
Description	▼
Technical characteristics	▲
Technical specification:	C30/37 (4400/5400 PSI), S1 XC0/XC1, 10% (typical) recycled binders in cement (min cem. content: 280 kg/m3 / 18.72 lbs/ft3), Portland-fly ash cement CEM II/A-V 42.5
Density:	2386.0 kg/m3
Mass per unit:	2386.0 kg/m3
Default thickness:	200.0 mm
Available units:	m3, kg, ton, m2
Recycled content:	10%(GGBS+FA)

Figura 48 - Detalhe técnico da DAP escolhida

A adoção destas DAPs específicas permite melhorar significativamente a representatividade do modelo e reforçar a fidelidade da análise do ciclo de vida à realidade prática da construção nacional.

Para completar o processo de importação dos dados para o One Click LCA, é ainda necessário o preenchimento dos campos relativos às etapas A5 (fase de construção), B6 e B7 (uso de energia e água durante a operação), bem como a fase de fim de vida. No presente caso de estudo, a fábrica em construção irá empregar cerca de 140 colaboradores.

No que respeita ao consumo anual de energia (etapa B6), apresentado na Figura 49, estimou-se o uso de eletricidade com base no valor médio de 1350 kWh/pessoa, fornecido pela equipa projetista. Assim,

para 90 trabalhadores, obteve-se um consumo total de 121 500 kWh, valor que foi atribuído ao recurso “Electricity, Portugal, residual mix, 2019 (One Click LCA)”. No caso das restantes 50 pessoas, considerou-se que o fornecimento de energia será garantido por um sistema fotovoltaico instalado no edifício, com potência de 70 kW e um tempo médio de exposição solar anual de 1350 horas, resultando numa produção total de 94 500 kWh. Deste valor, apenas parte será consumida diretamente: 50 colaboradores $\times$ 1350 kWh/pessoa = 67 500 kWh de consumo anual. O remanescente (27 000 kWh) corresponde à energia excedente que será exportada para a rede elétrica nacional, dado que o edifício funcionará apenas cinco dias por semana. Para representar o impacto ambiental da energia solar gerada localmente, foi selecionado um recurso proveniente do Luxemburgo, disponível na base de dados do One Click LCA. Esta escolha justificou-se pela ausência de um perfil equivalente para Portugal, sendo o Luxemburgo o país geograficamente mais próximo com dados compatíveis relativos à produção descentralizada de eletricidade fotovoltaica. Além dos consumos elétricos, foi também preenchido o campo Fuel use, onde se considerou um consumo anual de 1000 litros de combustível. Este valor foi estimado com base em dados de consumos típicos em edifícios industriais semelhantes e visa contabilizar o impacto ambiental de fontes energéticas não elétricas utilizadas pontualmente no edifício.

Energy consumption, annual* ▼				
Category ×				
Resource Name	Details	Quantity	Unit	
Exported energy				
☐ Electricity production, solar power, Grand Duchy of Luxembourg	 	27000	kWh	
Electricity use				
☐ Electricity, Portugal, residual mix, 2019 (One Click LCA)	 	121500	kWh	
☐ Electricity production, solar power, Grand Duchy of Luxembourg	 	67500	kWh	
Fuel use				
☐ Diesel combusted in building machine	 	1000	l	

Figura 49 - Consumos anuais de energia

Relativamente ao campo referente ao consumo anual de água (etapa B7), a estimativa do valor a introduzir na plataforma One Click LCA teve como ponto de partida o valor médio de consumo de água por pessoa em Portugal, estabelecido em 134 litros por dia, de acordo com a informação disponibilizada pela EPAL [125]. Considerando um total de 140 colaboradores e assumindo um período de funcionamento anual de 220 dias, obteve-se um volume total de consumo de 4 127 000 litros por ano, equivalente a 4 127 m³/ano. Contudo, reconhecendo que nem todos os usos domésticos típicos se aplicam diretamente a uma unidade industrial como a que se encontra em estudo, foi necessário adaptar esta estimativa. Para tal, recorreu-se aos dados apresentados na Figura 50, que representa a repartição percentual do uso doméstico da água no setor residencial. Apesar de não se referir especificamente ao setor industrial, esta figura permitiu aferir os usos com maior relevância no contexto de uma instalação de natureza industrial e administrativa, como é o caso do presente estudo.

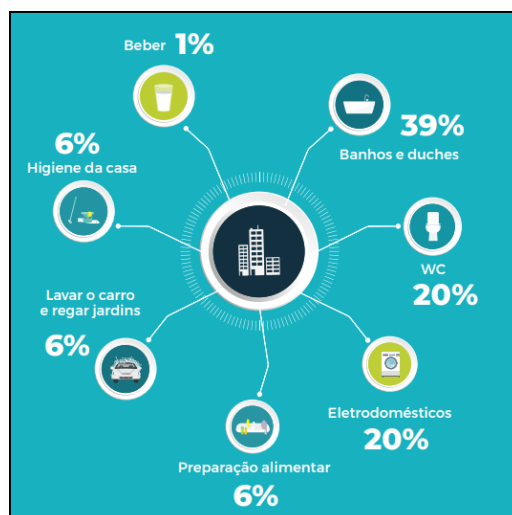


Figura 50 - Utilização da água considerando usos típicos, de acordo com [126]

Deste modo, foram consideradas pertinentes as percentagens relativas aos seguintes usos: consumo para beber (1%), utilização dos WC (20%) e higiene da casa (6%). Adicionalmente, uma vez que parte dos colaboradores desempenha funções de carácter não administrativo, foi considerada ainda metade da percentagem relativa a banhos e duches (39%), resultando numa inclusão adicional de 19,5%. A soma destes valores resulta numa percentagem de utilização da água considerada relevante para o caso de estudo de aproximadamente 50%. Aplicando esta percentagem ao volume total de água previamente estimado, obteve-se um valor de 2 094 m³/ano, valor este que foi introduzido como consumo anual de água do edifício em estudo, como se apresenta na Figura 51. Esta abordagem assegura uma estimativa adequada e adaptada ao tipo de utilização prevista para a instalação.

Water consumption, annual ▾				
⚙ Drag here to set row groups				
Resource Name	Details	Quantity	Unit	
☐ Tap water, conventionally treated (One Click LCA)	?	2094	m3	

Figura 51 - Consumo de água anual

No âmbito da etapa A5 - “*Construction Process*”, foram preenchidos diversos campos na secção *Construction site operations* da plataforma *One Click LCA*, com o objetivo de estimar os impactos ambientais associados à fase de construção do edifício.

No campo *Construction site scenarios*, foi selecionada a opção “*Average site impacts - temperate climate (North)*”, correspondente ao cenário de estaleiro de construção para clima temperado no contexto da União Europeia, e atribuído o valor de 22 000 m², correspondente à área total de construção do edifício em estudo.

Relativamente ao campo *Deconstruction/demolition scenarios*, foi considerado um volume estimado de demolição de 500 m² de estrutura de betão, representativo de operações pontuais de demolição ou reformulação previstas na fase de obra

No campo *Site fuel consumption*, foi adotado um valor de 5,74 l/m², fornecido pela equipa projetista, referente ao consumo médio de gasóleo por metro quadrado de área construída. Multiplicando este valor pela área de construção total (22 000 m²), obteve-se um consumo total de 126 280 L de gasóleo. Este

valor foi posteriormente convertido em energia, assumindo um fator de conversão de 10 kWh/L, resultando numa estimativa de 1 270 000 kWh de consumo energético proveniente de combustíveis líquidos durante a execução da obra.

Para o campo *Site water consumption*, foi também considerado um valor médio de consumo de água de 0,12 m³/m², fornecido pela equipa projetista, o que resultou num volume total de 2 640 m³ de água consumida durante o processo de construção. Como não existia uma opção específica para Portugal na base de dados, optou-se pela seleção de uma DAP associada a Espanha, por ser o país geograficamente mais próximo e com características ambientais semelhantes.

Por fim, no campo *Site electricity consumption*, foi adotado um valor específico de 5,41 kWh/m², o qual, aplicado à área total de construção (22 000 m²), resultou num consumo estimado de 120 000 kWh de eletricidade durante a fase de construção.

A Figura 52 sintetiza os valores considerados na plataforma no que respeita às operações realizadas em estaleiro durante a fase de construção.

Construction site operations						
Category x						
Resource Name		Details		Quantity		Unit
Construction site scenarios						
☐ Average site impacts - temperate climate (North) (per GFA), EU electricity mix, 2024	?	EU	X	22000		m2
Site fuel consumption						
☐ Diesel combusted in building machine	?			1270000		kWh
Deconstruction/demolition scenarios						
☐ Demolition of concrete frame building	?		X	500		m2
Water consumption						
☐ Regenerated water from Catalan urban networks, CO2 only datapoint (L'Oficina Catalana del Ca...	?	ES	X	2640		m3
Site electricity consumption						
☐ Electricity, Portugal (One Click LCA)	?	PT		120000		kWh

Figura 52 - Operações no estaleiro de obra

Relativamente à secção *Emissions and removals*, não foi efetuado o preenchimento de nenhum dos campos disponíveis. Em particular, no campo *Refrigerant leakages*, embora tenha sido transmitido pela equipa projetista que existiriam perdas associadas ao sistema de climatização, não foi possível obter os dados quantitativos necessários para a sua introdução na plataforma. A solicitação foi feita ao departamento responsável pelos sistemas mecânicos, contudo, dada a indisponibilidade de tempo e a fase avançada do projeto, não foi possível fornecer os valores associados à carga de fluido frigorigéneo nem à estimativa das fugas anuais, pelo que se optou por não considerar este contributo na análise

Por fim, torna-se necessário o preenchimento das secções *Building Area* e *Calculation Period*.

Na secção *Building Area*, foi introduzido o valor de 22 000 m² como se apresenta na Figura 53, correspondente à área de construção do edifício em estudo, conforme já anteriormente referido.

Building area* ▾				
Resource Name	Details	Quantity	Unit	
☐ Gross Internal Floor Area (IPMS/RICS)			22000	m2

Figura 53 - Área de construção

Relativamente à secção *Calculation Period*, Figura 54, o período de referência atribuído inicialmente corresponderia ao exigido pela certificação BREEAM, isto é, 60 anos. Contudo, optou-se por seguir as diretrizes da certificação *Level(s)*, promovida pela Comissão Europeia, que define o período de referência como sendo de 50 anos. Esta escolha justifica-se pela adoção crescente do esquema *Level(s)* no contexto da União Europeia (UE) e pelo facto de os resultados da ACV serem normalizados para 1 m² de área útil durante 1 ano, ao longo de um período de estudo de 50 anos [127].

Calculation period* ▾

Calculation period ▾

50

years

Figura 54 - Período de cálculo

4.5. ETAPA 4 – MÉTODO DETALHADO: ONE CLICK LCA (IFC)

Para além dos métodos já consolidados de importação de dados para a plataforma One Click LCA, nomeadamente através de ficheiros Excel estruturados ou da utilização do *add-in* para Revit, foi recentemente introduzido um novo método baseado na importação direta de modelos no formato IFC. Esta funcionalidade, disponibilizada em versão BETA no final de 2023, tem vindo a ser progressivamente aprimorada, com o lançamento contínuo de atualizações que visam melhorar a sua estabilidade, compatibilidade e desempenho na leitura de modelos tridimensionais [128]. A adoção deste método representa um avanço significativo no sentido da interoperabilidade entre plataformas BIM, promovendo uma integração mais aberta, eficiente e padronizada dos dados do modelo digital com ferramentas de análise ambiental. Esta abordagem está intimamente ligada aos princípios do Open BIM, já discutidos no capítulo do estado da arte, nomeadamente no que diz respeito ao uso de formatos abertos e normalizados que facilitam a colaboração entre diferentes intervenientes e sistemas.

Neste contexto, a funcionalidade de importação IFC do One Click LCA surge como uma resposta às crescentes exigências de integração digital nos processos de ACV, permitindo a utilização de modelos provenientes de diferentes programas de modelação, sem perda de informação crítica. A aplicação desta metodologia ao caso de estudo permitirá aferir o seu grau de maturidade, bem como comparar as suas vantagens e limitações face à alternativa já analisada, contribuindo para uma avaliação abrangente da interoperabilidade e aplicabilidade do sistema no contexto da construção sustentável.

4.5.1. EXPORTAÇÃO DE FICHEIRO EM FORMATO IFC DA PLATAFORMA REVIT

Com vista à aplicação da metodologia baseada na importação direta de modelos em formato IFC para a plataforma One Click LCA, foi necessário proceder à exportação dos modelos Revit correspondentes às seis especialidades técnicas do projeto do caso de estudo. O processo de exportação a partir do Revit é realizado através da funcionalidade nativa de exportação IFC, que permite guardar o modelo tridimensional segundo diferentes versões deste formato, de acordo com os requisitos da interoperabilidade

pretendida. Entre as versões disponíveis, destaca-se a mais recente IFC 4x3, bem como as versões anteriores IFC 4 e IFC 2x3, esta última sendo a mais amplamente suportada por diversas plataformas. A Figura 55 apresenta o menu de exportação da plataforma Revit, onde é possível selecionar diferentes versões do formato IFC, nomeadamente as versões 2x3, 4 e 4x3 (experimental), que foram testadas no presente estudo para aferir a sua compatibilidade com a plataforma One Click LCA.

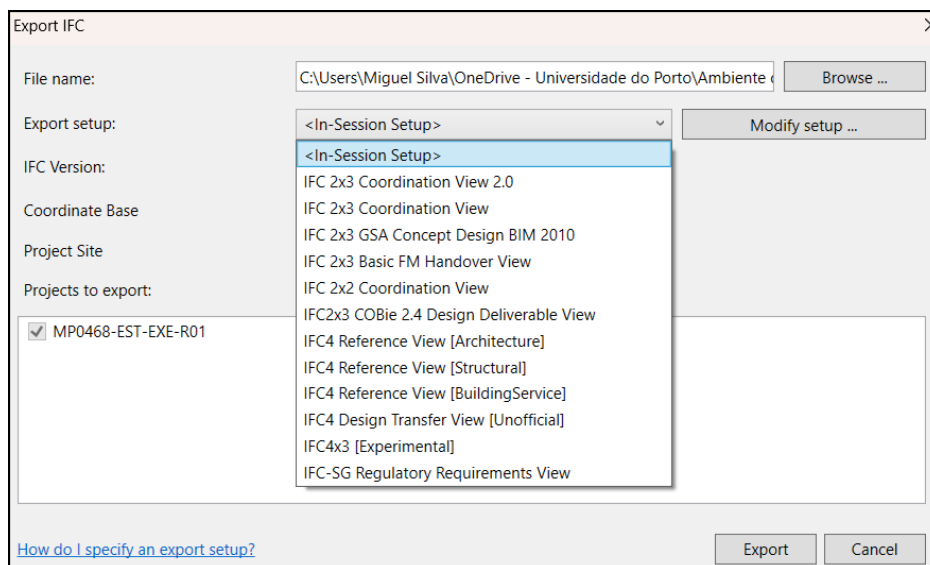


Figura 55 - Diferentes versões do formato IFC

Com o objetivo de aferir quais as versões que garantiriam a melhor representação e compatibilidade com a plataforma One Click LCA, procedeu-se à exportação de cada um dos modelos segundo os três formatos referidos: IFC 4x3, IFC 4 e IFC 2x3. Posteriormente, cada um desses ficheiros foi carregado individualmente na plataforma, onde foi analisada a quantidade de elementos reconhecidos através da funcionalidade *IFC Viewer*, incluída numa das etapas do processo de importação (descrita adiante no próximo capítulo). Verificou-se que os ficheiros no formato IFC 2x3 apresentavam um número superior de elementos modelados corretamente reconhecidos e visualizados no ambiente de importação da plataforma. Por este motivo, optou-se por prosseguir com a exportação final dos seis modelos Revit no formato IFC 2x3, garantindo a máxima compatibilidade com o motor de leitura da plataforma One Click LCA e assegurando a representatividade dos elementos construtivos relevantes para a análise ambiental. A Tabela 9 apresenta os resultados dessa análise comparativa, realizada com base no modelo de estruturas, evidenciando a variação no número de elementos reconhecidos conforme o formato IFC exportado. Por este motivo, optou-se por prosseguir com a exportação final dos seis modelos Revit no formato IFC 2x3, garantindo a máxima compatibilidade com o motor de leitura da plataforma One Click LCA e assegurando a representatividade dos elementos construtivos relevantes para a análise ambiental. Esta tendência foi igualmente observada nos restantes modelos das diferentes especialidades, nos quais o formato IFC 2x3 voltou a apresentar o maior número de elementos corretamente reconhecidos, confirmando a sua adequação para o processo de importação.

Tabela 10 - Comparação do número de elementos reconhecidos na importação do modelo de estruturas em diferentes formatos IFC na plataforma One Click LCA

Formato IFC	Número de elementos reconhecidos
IFC 2x3	4127
IFC 4	4087
IFC 4x3	4113

4.5.2. IMPORTAÇÃO DO FICHEIRO EM FORMATO IFC NA PLATAFORMA ONE CLICK LCA

Tal como ocorre no processo de importação por ficheiro Excel, este novo método de importação por ficheiro IFC inicia-se igualmente com o carregamento do ficheiro previamente exportado do Revit para a plataforma One Click LCA. Esta primeira etapa consiste em selecionar e carregar o ficheiro IFC correspondente ao modelo da especialidade pretendida, conforme ilustrado na Figura 56. No entanto, importa referir que este processo apresenta ainda algumas limitações técnicas associadas ao tamanho dos ficheiros. Ficheiros com tamanho superior a 100 MB podem sofrer atrasos significativos no carregamento, sendo que, em casos onde o tamanho ultrapassa os 300 MB, a plataforma pode apresentar erros ou mesmo impossibilitar a importação. Estas restrições decorrem do facto de o processo ainda se encontrar em versão beta, encontrando-se em constante atualização e otimização por parte da equipa do One Click LCA.

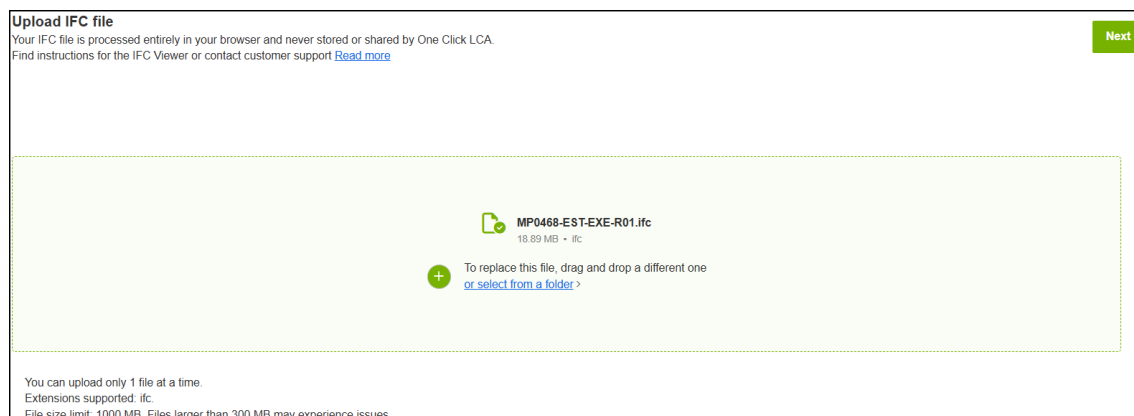


Figura 56 - Primeira etapa do processo de importação do ficheiro IFC

Após o carregamento do ficheiro IFC na plataforma, a etapa seguinte do processo corresponde à secção *Model preview & data filtering*. Esta funcionalidade permite ao utilizador visualizar graficamente o modelo tridimensional importado, recorrendo a um visualizador integrado designado *IFC Viewer*. Esta ferramenta é especialmente útil para verificar a integridade do ficheiro e confirmar se todos os elementos relevantes do modelo foram corretamente interpretados pela plataforma. A interface apresenta uma lista com as diferentes classes IFC detetadas (tais como IFCCOLUMN, IFCBEAM, IFCSTAIR, entre outras), bem como os atributos básicos de cada elemento, incluindo tipo, material, quantidade, unidade, espessura e comentários. Nesta etapa, é ainda possível filtrar e selecionar os elementos que se pretendem incluir na análise, ativando ou desativando a importação de determinadas classes de componentes. A visualização simultânea da tabela e do modelo 3D permite uma análise cruzada eficaz e contribui para a deteção de eventuais inconsistências no processo de mapeamento. Como evidenciado na Figura 57 o modelo da especialidade de estruturas é corretamente representado e 4127 elementos do ficheiro foram reconhecidos, o que justifica a escolha do formato IFC 2x3 utilizada na exportação.

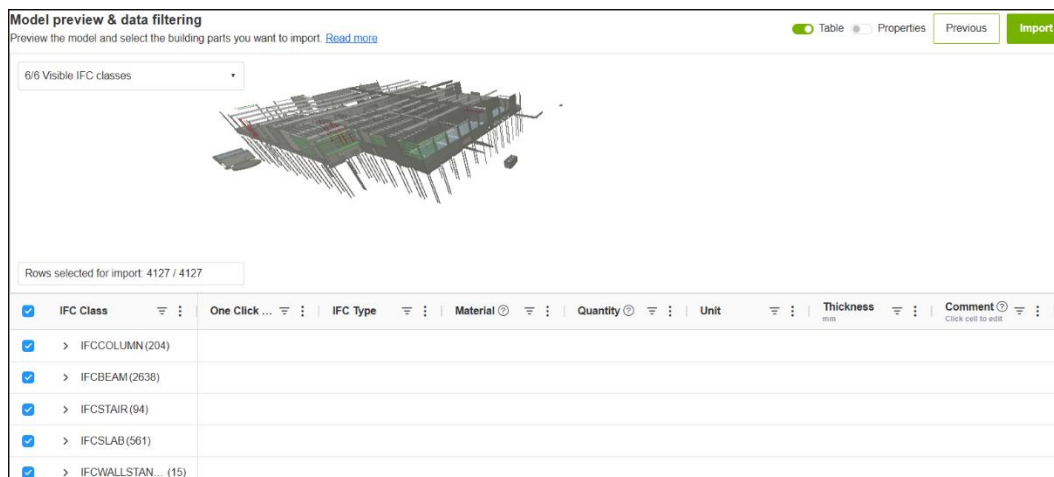


Figura 57 - Segunda etapa do processo de importação do ficheiro IFC

Após esta etapa de visualização e filtragem dos elementos no modelo, e concluída a importação do ficheiro IFC, seguem-se fases muito semelhantes às já descritas no processo de importação através do ficheiro *Excel*, nomeadamente, as etapas correspondentes à verificação e combinação de dados (*Combine data*) e à atribuição de DAPs (*Data mapping*).

No entanto, é precisamente na última etapa, designada por *Data Mapping*, que se verifica uma diferença significativa relativamente ao processo realizado por *Excel*. Enquanto os dados importados através do *Excel* foram previamente estruturados com as unidades em quilogramas (kg), conforme explicado anteriormente, neste novo processo de importação via IFC os elementos são lidos com as suas unidades originais de modelação, ou seja, em metros cúbicos (m³), metros quadrados (m²) ou unidades (un). Esta diferença implica uma limitação relevante no momento de mapear os recursos ambientais, uma vez que nem todas as DAPs atribuídas anteriormente possuem as mesmas unidades disponíveis para associação. Por exemplo, no caso dos elementos em betão, como o da Figura 47, foi possível manter as mesmas DAPs atribuídas na importação por *Excel*, dado que estas especificações incluem como unidades válidas o m³. No entanto, para diversos elementos com maior especificidade técnica, particularmente nos modelos das especialidades de instalações elétricas e AVAC, não foi possível replicar a associação, dado que as respetivas DAPs apenas estavam disponíveis com unidade de massa (kg), unidade essa que não é reconhecida neste processo.

Um exemplo ilustrativo desta limitação foi identificado na tentativa de mapear um detetor de movimento, previamente associado a uma DAP com unidade de massa (kg) no método *Excel*. No processo de importação via IFC, este elemento surge modelado com unidade volumétrica (m³), impossibilitando a correspondência direta. A pesquisa efetuada na base de dados da plataforma não devolveu resultados compatíveis com a unidade importada, como se vê na Figura 58, e a consulta à própria DAP (conforme evidenciado na Figura 59) confirmou que as únicas unidades válidas para associação eram unit, kg e ton. A ausência da unidade m³ nesta especificação inviabilizou o mapeamento automático. Esta situação repetiu-se em diversos outros elementos técnicos, particularmente em equipamentos e componentes específicos das especialidades de AVAC e instalações elétricas, cuja modelação em unidades não compatíveis com as DAPs disponíveis comprometeu a correspondência automática dos dados ambientais, exigindo soluções alternativas ou posterior reformulação do modelo.

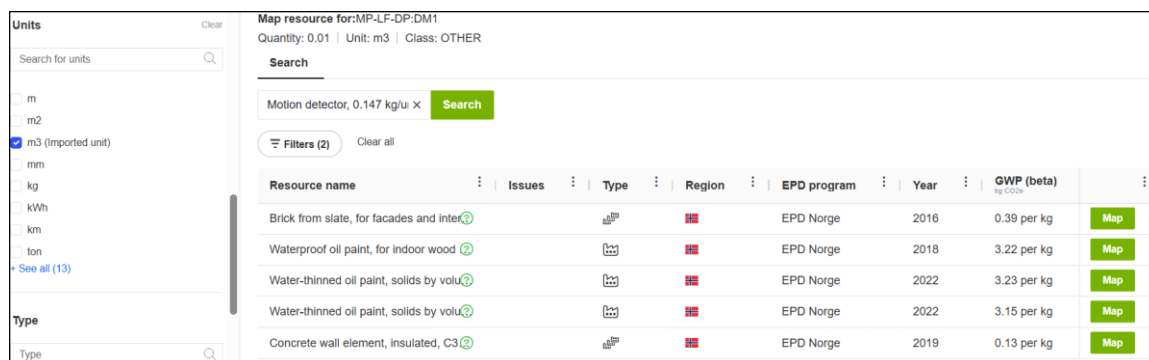


Figura 58 - Tentativa de mapeamento de um detetor de movimento na plataforma One Click LCA

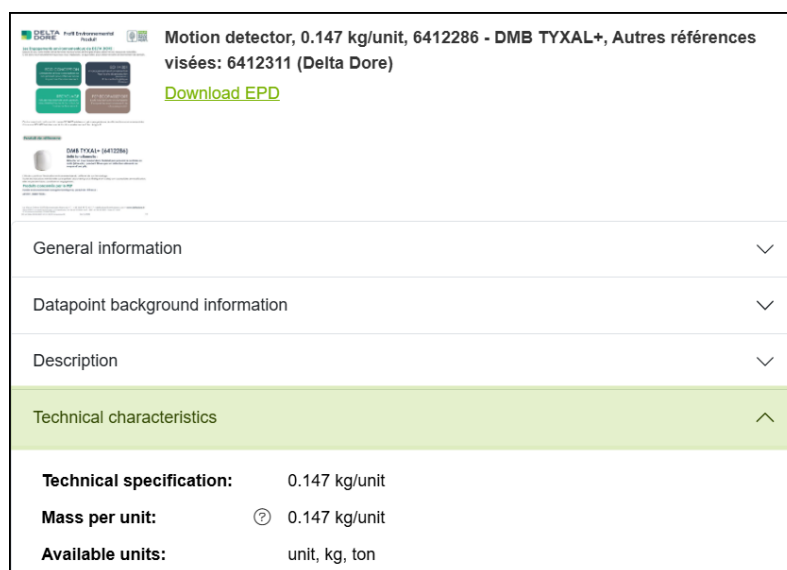


Figura 59 - Especificações da DAP do detetor de movimento

Esta limitação representa uma barreira à coerência dos resultados obtidos pelos dois métodos e realça a importância de uma normalização futura das unidades de medição, caso se pretenda garantir total interoperabilidade entre os diferentes métodos de importação suportados pela plataforma One Click LCA.

Após a conclusão do mapeamento dos recursos ambientais, e avançando para a fase de geração dos resultados, torna-se necessário à semelhança do que ocorreu no processo de importação via Excel, preencher os dados complementares que não estão presentes no ficheiro IFC, mas que são essenciais para uma ACV completa. Estes dados incluem os consumos anuais de energia (etapa B6), os consumos de água (etapa B7), as operações no estaleiro de obra (etapa A5), o período de cálculo (*Calculation Period*) e a área de construção útil (*Building Area*). Para garantir a máxima coerência entre os dois métodos de importação testados, todos estes parâmetros foram preenchidos com os mesmos valores utilizados no processo de importação por Excel. Adicionalmente, foi também necessário aceder manualmente à secção *Building Materials* da plataforma e atribuir o valor de 100 km à distância de transporte para todos os elementos importados, replicando exatamente o procedimento aplicado no método anterior. Esta uniformização de pressupostos permitiu assegurar a consistência dos dados e viabilizar uma comparação direta, precisa e fiável entre os dois métodos de importação, contribuindo para a avaliação crítica da interoperabilidade das diferentes abordagens disponíveis na plataforma One Click LCA.

5

RESULTADOS

5.1. MÉTODO EXPEDITO

Os resultados obtidos para o caso de estudo, através da aplicação do método expedito, são apresentados na Figura 60, sendo possível observar a contribuição de cada tipologia de material para a pegada de carbono global da construção. Esta estimativa foi calculada com base nos valores de massa extraídos dos modelos Revit para as seis especialidades envolvidas e nos coeficientes de emissão previamente atribuídos no capítulo 4.3.2, relativos aos módulos do ciclo de vida A1 a A3.

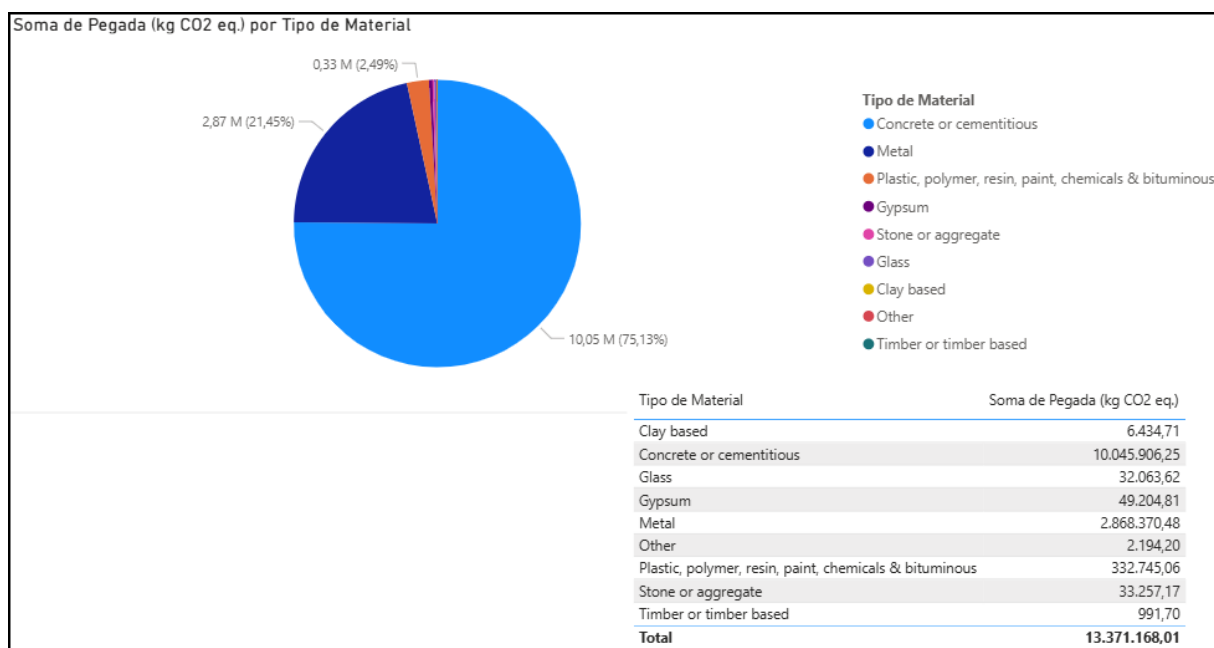


Figura 60 - Estimativa da pegada de carbono do caso de estudo

O valor total da pegada de carbono estimado foi de 13 371 168,01 kg CO₂ eq., o que representa uma referência inicial robusta para a avaliação do impacto ambiental da construção ainda em fase de projeto. Quando este valor é dividido pela área bruta de construção do edifício (22 000 m²), obtém-se um valor específico de 607,78 kg CO₂ eq./m², o que permite uma comparação direta com os métodos detalhados analisados nos capítulos seguintes, expressos na mesma unidade. O grupo de materiais que mais contribui para este valor é o dos “Concrete or cementitious”, com 10 045 906,25 kg CO₂ eq., o que corresponde a cerca de 75,1% do total. Segue-se o grupo dos materiais metálicos, com 2 868 370,48 kg CO₂ eq. (21,5%), refletindo o peso relevante dos elementos estruturais em aço. Estes dois grupos são

responsáveis, em conjunto, por mais de 96% da pegada de carbono total, evidenciando a importância da estrutura na análise ambiental do edifício. Outros grupos com contributos menores incluem os materiais classificados como “*Plastic, polymer, resin, paint, chemicals & bituminous*”, com 332 745,06 kg CO₂ eq. (2,5%), associados sobretudo aos revestimentos, selantes e sistemas de impermeabilização; o grupo “*Gypsum*”, com 49 204,81 kg CO₂ eq. (0,37%), relacionado com tetos falsos e divisórias interiores; “*Stone or aggregate*”, com 33 257,17 kg CO₂ eq. (0,25%); “*Glass*”, com 32 063,62 kg CO₂ eq. (0,24%); “*Clay based*”, com 6 434,71 kg CO₂ eq. (0,05%); “*Timber or timber based*”, com 991,70 kg CO₂ eq. (0,01%); e, por fim, o grupo “*Other*”, com 2 194,20 kg CO₂ eq., representando menos de 0,02% da pegada total.

Da análise dos resultados torna-se evidente que os materiais estruturais, nomeadamente betões e perfis metálicos, são os que mais contribuem para a pegada de carbono da obra em estudo, dado o seu volume elevado e coeficientes de emissão relativamente elevados. Este resultado demonstra que as fundações e a superestrutura tendem a representar uma parcela significativa do impacto ambiental associado à fase de construção, como era previsto na literatura [41]. É igualmente relevante sublinhar que o método expedito, pela sua natureza simplificada, agrega elementos por grupos de materiais generalistas, sem diferenciação detalhada por fabricante ou características específicas do produto. Como tal, os resultados devem ser interpretados como uma estimativa indicativa, adequada para apoio à decisão em fases iniciais do projeto, mas não substituem uma análise detalhada com base em DAP específicas, tal como previsto nas etapas posteriores da metodologia.

A Figura 60 resume a distribuição da pegada de carbono por grupo de materiais, permitindo uma leitura clara das prioridades de intervenção futura para redução de emissões. Toda a informação desagregada por especialidade encontra-se sistematizada no Anexo A2.

5.2. MÉTODO DETALHADO: ONE CLICK LCA (EXCEL)

O método detalhado: One Click LCA permite a análise aprofundada da pegada de carbono associada à construção, disponibilizando ao utilizador uma multiplicidade de gráficos e dados que facilitam a interpretação dos resultados. Nesta análise, os dados foram importados para a plataforma através do método baseado em ficheiros Excel, conforme descrito anteriormente, permitindo um controlo preciso sobre os elementos, materiais e parâmetros utilizados. Esta metodologia possibilita, nomeadamente, a desagregação da pegada por módulos do ciclo de vida, por tipo de estrutura e ainda a comparação com *benchmarks* de edifícios equivalentes.

Na Figura 61 é apresentado o valor de pegada de carbono total resultante da análise “*cradle to grave*”, ou seja, englobando os módulos A1-A4, B4-B5 e C1-C4, expresso em kg CO₂e por metro quadrado (m²) de área útil de pavimento e considerando um período de referência de 50 anos. Para o edifício em estudo, obteve-se um valor de 655 kg CO₂e/m², o que o posiciona na classe D da escala de classificação estabelecida para edifícios industriais e logísticos na Europa Ocidental. Esta classificação, ainda que não represente um desempenho de excelência, revela-se coerente com as soluções construtivas adotadas, em particular o predomínio de estruturas em betão armado.

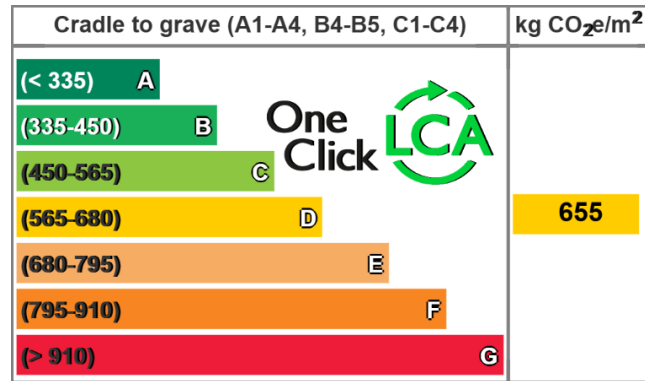


Figura 61 - Valor da pegada de carbono

A Figura 62 apresenta a distribuição percentual da pegada de carbono entre os diferentes módulos da ACV. Os módulos A1-A3, correspondentes à produção dos materiais de construção, representam a esmagadora maioria do impacto ambiental, com 82% do total. O transporte até ao local da obra (A4) contribui com 5%, enquanto o transporte de resíduos (C2) e o processamento final dos mesmos (C3) representam 1% e 2%, respetivamente. Estes resultados estão de acordo com a literatura e evidenciam a importância crítica das fases iniciais do ciclo de vida (produção e transporte de materiais) na determinação da pegada total do edifício [41, 52].

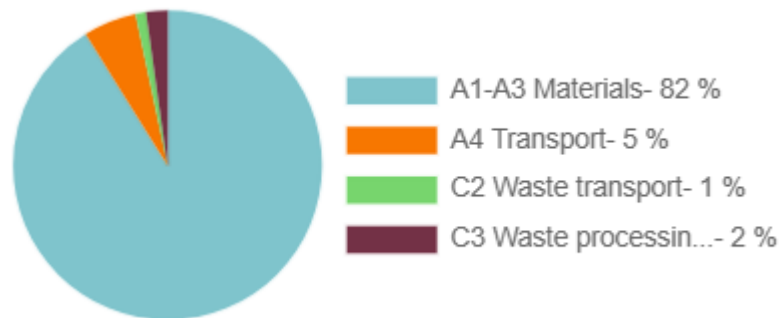


Figura 62 - Distribuição percentual da pegada de carbono entre os diferentes módulos da ACV

Por sua vez, a Figura 63 desagrega os materiais utilizados segundo a função estrutural no edifício, nos módulos A1-A3. Verifica-se que as estruturas horizontais como vigas, lajes e coberturas, concentram 66% do total da massa de materiais, seguidas pelas estruturas verticais e fachadas (11%) e pelas fundações (8%). Os restantes 15% estão associados a outros materiais e componentes construtivos. Estes dados reforçam a ideia de que a estrutura principal do edifício é o maior contribuinte para o impacto ambiental, sendo constituída maioritariamente por elementos de betão e aço.

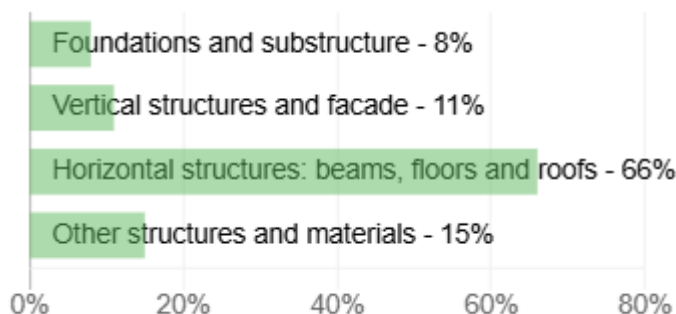


Figura 63 - Distribuição percentual do uso de materiais por categoria estrutural

Todos os resultados apresentados refletem o impacto ambiental estimado para os 50 anos de vida útil considerados no âmbito da certificação europeia Level(s), assegurando a coerência metodológica com as normas em vigor.

5.3. MÉTODO DETALHADO: ONE CLICK LCA (IFC)

Tal como no método anteriormente descrito, o One Click LCA permite uma avaliação detalhada da pegada de carbono associada à construção, disponibilizando ao utilizador um conjunto abrangente de indicadores e gráficos que facilitam a análise dos impactos ambientais. Neste caso, a principal diferença metodológica prende-se com o facto de os dados terem sido importados através de um ficheiro IFC, o que possibilita uma leitura automatizada das quantidades diretamente a partir do modelo BIM, sem necessidade de manipulação prévia em Excel. Esta abordagem garante maior rapidez e integração, embora com algumas limitações em termos de controlo direto sobre os parâmetros de cada item, quando comparado com o método utilizado no capítulo anterior.

A Figura 64 apresenta o resultado da análise “*cradle to grave*”, incluindo os módulos A1-A4 (produção e transporte dos materiais), B4-B5 (substituições e manutenções) e C1-C4 (fim de vida). O valor obtido foi de 649 kg CO₂e/m², ligeiramente inferior ao registado na abordagem baseada em ficheiro Excel (655 kg CO₂e/m²), mantendo, no entanto, a mesma classificação D segundo os referenciais estabelecidos para edifícios industriais e logísticos na Europa Ocidental. Tal como no capítulo anterior, este resultado reflete a predominância de soluções construtivas com elevada incorporação de betão armado, o que justifica a magnitude da pegada carbónica observada.

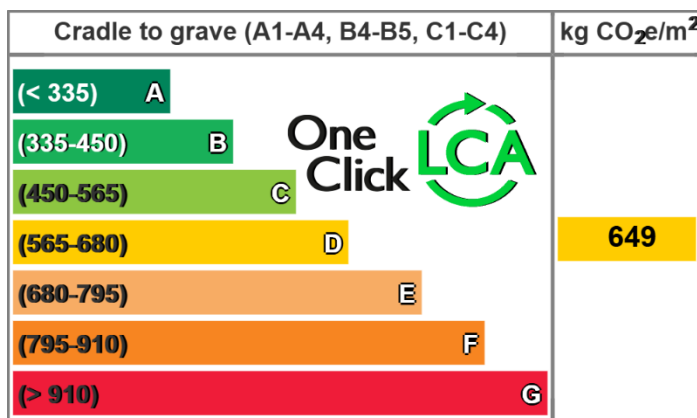


Figura 64 - Valor da pegada de carbono

No que respeita à decomposição dos impactos por fase do ciclo de vida, a Figura 65 confirma novamente que os módulos A1-A3 são responsáveis pela maioria das emissões, com 82% do total, tal como já se verificava na metodologia baseada em *Excel*. O impacto do transporte (A4) apresenta-se repartido entre dois fluxos com 7% e 6%, enquanto o transporte de resíduos (C2) e o processamento dos mesmos (C3) contribuem com 2% e 1%, respetivamente. Esta distribuição evidencia, uma vez mais, que a fase de produção dos materiais continua a ser o fator dominante na pegada global do edifício, independentemente do método de importação dos dados [41].

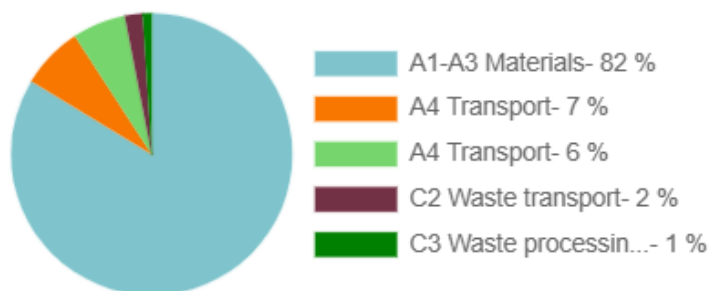


Figura 65 - Distribuição percentual da pegada de carbono entre os diferentes módulos da ACV

A distribuição dos materiais por função estrutural encontra-se ilustrada na Figura 66. Também aqui se observam resultados em linha com os do capítulo anterior, sendo as estruturas horizontais (vigas, lajes e coberturas) responsáveis por 81% da massa total de materiais. As estruturas verticais e fachadas representam 13%, enquanto os restantes 5% se referem a outros materiais não estruturais. A componente tecnológica do edifício tem um peso residual de 1%, o que confirma o perfil eminentemente estrutural da construção em análise.

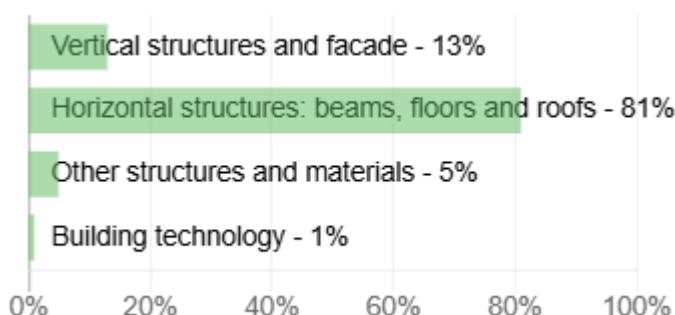


Figura 66 - Distribuição percentual do uso de materiais por categoria estrutural

5.4. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

A presente dissertação procedeu à ACV do edifício em estudo através de três metodologias distintas: um método expedito, baseado na classificação agregada dos elementos construtivos, e dois métodos detalhados, aplicados com recurso à plataforma One Click LCA, um através da importação manual por ficheiro *Excel* e outro com leitura direta do modelo BIM via ficheiro IFC.

Embora as abordagens apresentem diferenças na granularidade dos dados e na forma de importação da informação, todas partilham uma base metodológica comum. Com efeito, os três métodos foram desenvolvidos a partir de um modelo paramétrico elaborado no *software* Revit, em conformidade com a metodologia BIM, fornecido pela empresa Garcia Garcia, S.A. Esta uniformização na origem dos dados permitiu garantir consistência nos elementos modelados, assegurando que as variações observadas entre métodos se devem exclusivamente às especificidades de cada abordagem de cálculo.

Com o objetivo de assegurar comparabilidade entre as metodologias, a análise foi restringida ao âmbito A1–A3, correspondente à fase de produção dos materiais, uma vez que o método expedito foi desenvolvido apenas para estes módulos. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos nesta fase, expressos em emissões totais de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂ eq.), permitindo avaliar a coerência entre as três abordagens de cálculo.

Tabela 11 - Análise comparativa dos três métodos considerando o âmbito A1–A3 (produção dos materiais).

Método Aplicado	Valor obtido (kg CO ₂ eq.)	Diferença relativa (%)
Método Expedito	13 371 168,01	-----
Método Detalhado - Ficheiro Excel	11 887 670,75	-11,10%
Método Detalhado - Ficheiro IFC	11 705 107,69	-12,46%

Analizando os resultados, verifica-se que os dois métodos detalhados conduzem a valores inferiores de pegada de carbono face ao método expedito, com reduções na ordem dos 11,1 % e 12,5 %, respetivamente. Esta diferença é expectável, dado que os métodos detalhados permitem uma desagregação mais rigorosa dos materiais e componentes, baseada em Declarações Ambientais de Produto (DAP) específicas e compatíveis com cada elemento modelado. Consequentemente, os resultados obtidos refletem de forma mais precisa as características reais da construção, conduzindo a uma estimativa ambiental mais representativa. Por contraste, o método expedito recorre a uma categorização genérica dos elementos segundo grupos principais de materiais, o que, embora útil em fases preliminares de projeto, apresenta menor precisão na caracterização dos materiais e componentes, dado que se baseia em fatores médios agregados e não em dados específicos por produto.

A diferença observada entre os métodos pode ser justificada por diversos fatores. Em primeiro lugar, destaca-se a consideração de coeficientes de carbono distintos nas bases de dados utilizadas: enquanto o método expedito recorre a fatores médios associados a grupos genéricos de materiais, os métodos detalhados utilizam dados específicos por produto ou fabricante, com base em DAP, proporcionando assim uma caracterização mais precisa dos impactes. Além disso, no método expedito, os elementos construtivos são agrupados em categorias amplas, o que reduz a sensibilidade da análise às variações entre diferentes materiais ou sistemas construtivos.

Outro aspeto relevante prende-se com o facto de o método expedito se encontrar limitado ao âmbito A1–A3, não incluindo fases complementares do ciclo de vida, como o transporte dos materiais até ao local de construção (A4), a manutenção e substituição (B4–B5) ou o processamento de resíduos no fim de vida (C2–C3). Estas etapas são, no entanto, consideradas nos métodos detalhados, permitindo uma caracterização mais completa do desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida. A contabilização destas fases adicionais pode representar um contributo relevante no impacto total, sobretudo no horizonte de 50 anos de vida útil previsto para o edifício.

A análise foi posteriormente expandida ao âmbito “*cradle to grave*” (A1–A4, B4–B5, C1–C4), abrangendo as fases de produção, transporte, manutenção, substituição e fim de vida. A Tabela 12 sintetiza os resultados obtidos nos dois métodos detalhados, expressos por metro quadrado de área bruta de construção.

Tabela 12 - Comparação entre os métodos detalhados considerando o âmbito “*cradle to grave*” (A1–A4, B4–B5, C1–C4).

Método Aplicado	Valor obtido (kg CO ₂ eq./m ²)	Diferença relativa (%)
Método Detalhado - Ficheiro Excel	655,00	-----
Método Detalhado - Ficheiro IFC	649,00	-0,92%

A comparação entre os dois métodos detalhados (Excel e IFC) revela uma diferença muito reduzida, de apenas 0,9 %, o que reforça a consistência e fiabilidade da plataforma One Click LCA, independentemente do método de importação utilizado. Esta ligeira discrepância poderá advir da forma como as quantidades são extraídas: no método IFC, a leitura é automatizada com base em propriedades geométricas (volume, área, unidade), enquanto no método Excel há um controlo direto sobre as massas. Além disso, o facto de não ser possível garantir a correspondência exata entre as DAP atribuídas manualmente e as associadas automaticamente no modelo IFC pode justificar pequenas variações nos resultados.

Em síntese, a análise comparativa permite concluir que, apesar das diferenças de granularidade e de método de importação, os três métodos conduzem a resultados coerentes e tecnicamente consistentes. A utilização de um modelo BIM comum permitiu eliminar incertezas associadas à modelação e demonstrar que as variações observadas resultam exclusivamente das particularidades de cada abordagem de cálculo.

A plataforma One Click LCA disponibiliza uma funcionalidade específica que permite comparar variantes de projeto dentro do mesmo modelo de análise, facilitando a avaliação do impacto de alterações no design sobre os indicadores ambientais. Esta funcionalidade é particularmente útil em fases preliminares de conceção, permitindo aos projetistas quantificar os benefícios de medidas de otimização de materiais ou de desempenho energético. No caso presente, foi realizada uma comparação entre as versões de projeto “07-DESIGN” e “08-DESIGN”, tal como ilustrado na Figura 67, no que respeita à pegada de carbono total ao longo do ciclo de vida do edifício. Ambas as colunas representam o somatório de emissões de CO₂ equivalente (kg CO₂e) para cada fase do ciclo de vida, desagregadas por módulos conforme a norma EN 15978.

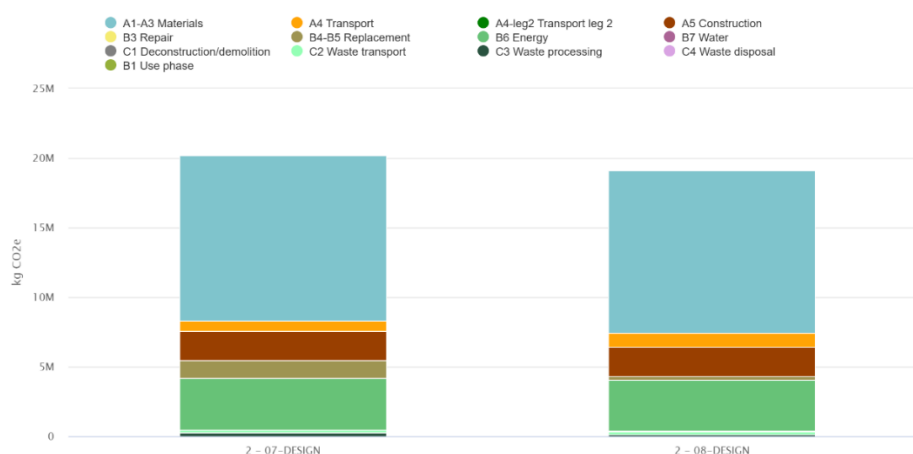


Figura 67 - Comparação entre os dois métodos detalhados utilizados

Verifica-se que a versão *08-DESIGN*, correspondente à aplicação do método de importação de ficheiros IFC, apresenta uma ligeira redução global nas emissões de carbono, com especial destaque para a diminuição das emissões nos módulos B6 (Energia) e B4-B5 (Substituição). Estes resultados sugerem uma melhoria na eficiência energética do edifício ao longo da fase de uso, bem como uma escolha mais durável ou sustentável dos materiais e sistemas construtivos, com menor necessidade de substituição ao longo dos 50 anos de vida útil. Os módulos A1-A3 (produção dos materiais) continuam a representar a maior fatia da pegada total em ambos os cenários, confirmando que a fase de construção inicial permanece como o principal fator de impacto ambiental. No entanto, a ligeira redução observada na versão 08 pode também refletir a adoção de materiais com menor intensidade carbónica ou a otimização de quantidades. Deste modo, esta comparação evidencia que ajustes de projeto, mesmo que pontuais, podem contribuir para reduções relevantes na pegada ambiental total, reforçando a utilidade das ferramentas de ACV no apoio à decisão em fases preliminares de conceção.

Em síntese, esta análise comparativa permite concluir que, apesar das variações observadas, os três métodos conduzem a resultados coerentes entre si, especialmente quando consideradas as limitações e os pressupostos próprios de cada abordagem. A utilização de um modelo BIM comum como ponto de partida revelou-se determinante para garantir a compatibilidade entre os métodos e para demonstrar a aplicabilidade prática das ferramentas digitais no suporte a decisões sustentáveis em fase de projeto.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES

Ao longo da presente dissertação foi possível identificar e analisar a relevância e o impacto ambiental do setor da construção, através da aplicação prática da ACV a um caso de estudo real. Esta análise utilizou diferentes metodologias baseadas em modelos digitais, estruturados segundo os princípios da modelação paramétrica BIM.

Os resultados obtidos permitiram evidenciar que os materiais estruturais, em particular o betão e o aço, são os principais responsáveis pela pegada de carbono do edifício, sobretudo nas fases iniciais do ciclo de vida (módulos A1-A3). Esta constatação reforça a importância crítica da fase de produção e transporte de materiais na determinação do impacto ambiental total de uma construção. A comparação entre os métodos aplicados demonstrou que o método expedito proporcionou uma estimativa rápida e inicial, enquanto os métodos detalhados (Excel e IFC) forneceram resultados mais precisos e desagregados. Os valores de pegada de carbono variaram entre 607,78 kg CO₂ eq./m² no método expedito e 655 kg CO₂ eq./m² e 649 kg CO₂ eq./m² nos métodos detalhados, respetivamente. Esta proximidade confirma que, quando suportados num modelo digital consistente, mesmo métodos mais simplificados podem fornecer estimativas válidas e úteis em fases preliminares. Por outro lado, os métodos detalhados, ao permitirem maior granularidade de dados e integração com Declarações Ambientais de Produto específicas, revelam-se mais adequados à definição de estratégias de otimização ambiental. Os resultados obtidos com o método IFC demonstraram uma coerência notável com os valores apurados na abordagem por Excel, tanto ao nível da pegada de carbono global como na distribuição dos impactos por fase e por tipo de estrutura. Esta consistência metodológica reforça a fiabilidade da plataforma One Click LCA e valida a aplicabilidade do formato IFC como alternativa viável para a integração da ACV com modelos BIM, sobretudo em contextos onde a interoperabilidade e automatização de processos são prioridades.

Relativamente à utilização da modelação paramétrica BIM para a análise do ciclo de vida, concluiu-se que esta abordagem proporciona uma maior precisão na obtenção de quantidades, uma elevada consistência dos dados e facilita a atualização contínua da informação ao longo do desenvolvimento do projeto. Contudo, revelou-se crítica a qualidade do modelo inicial, dado que modelos incompletos ou inadequadamente parametrizados podem comprometer significativamente a fiabilidade dos resultados obtidos. Neste sentido, importa reforçar que a fiabilidade dos resultados depende, em grande medida, da qualidade da modelação realizada a montante. Em situações em que não existe acesso ao Mapa de Trabalhos e Quantidades (MTQ), toda a informação presente no modelo BIM torna-se crítica para a análise ambiental. Detalhes como a inclusão da densidade de armadura de reforço no betão, a inserção de fichas técnicas completas e a identificação clara e padronizada dos produtos modelados são fundamentais para garantir uma associação inequívoca entre os elementos e as respetivas DAP. Do mesmo modo, é altamente recomendável evitar o uso de elementos *Model In-Place*, frequentemente adotados pela sua simplicidade de modelação, mas que dificultam a interoperabilidade e a extração de dados estruturados, por

não conterem parâmetros consistentes ou normalizados. Estes aspetos demonstram que a colaboração entre as equipas de projeto e análise é essencial, devendo ser promovida uma cultura de modelação orientada para a sustentabilidade e para a análise do ciclo de vida.

Quanto à interoperabilidade, a metodologia adotada demonstrou um elevado potencial na facilitação dos processos de transferência e integração de dados entre programas distintos. A exportação para ficheiros IFC mostrou-se especialmente promissora devido à sua natureza aberta e neutra, permitindo uma maior flexibilidade na escolha das ferramentas complementares de análise ambiental. No entanto, constatou-se ainda a existência de limitações técnicas na importação direta dos ficheiros IFC para a plataforma One Click LCA, especialmente relacionadas com as unidades de medição dos materiais e elementos modelados, evidenciando que há espaço para melhorias técnicas e padronizações futuras que facilitem ainda mais esta interoperabilidade.

Conclui-se, portanto, que a integração entre BIM e ACV é tecnicamente viável e oferece vantagens concretas em termos de eficiência, precisão e tomada de decisão fundamentada. O desenvolvimento de fluxos de trabalho integrados, desde a modelação até à análise de impactes, constitui uma abordagem promissora para responder às exigências de sustentabilidade no setor da construção. Para tal, é imprescindível garantir uma parametrização rigorosa dos modelos digitais desde as fases iniciais do projeto e investir no contínuo aperfeiçoamento da interoperabilidade entre ferramentas, promovendo a padronização e a formação técnica dos intervenientes.

6.2. PROPOSTAS DE MELHORIA

Com base na experiência adquirida ao longo da realização da presente dissertação, foi possível identificar um conjunto de aspetos que poderão ser aprimorados em futuras aplicações da metodologia de ACV com base em modelos BIM. As propostas de melhoria a seguir apresentadas têm como objetivo aumentar a fiabilidade dos resultados, melhorar a eficiência dos fluxos de trabalho e promover a padronização da informação nos modelos digitais.

Uma das principais propostas prende-se com a necessidade de sensibilizar e capacitar os colaboradores responsáveis pela modelação digital dos projetos, de forma que estes incorporem, desde o início, a informação necessária à posterior análise ambiental. No caso concreto da presente dissertação, verificou-se que vários elementos do modelo apresentavam lacunas ao nível dos parâmetros materiais. Teria sido essencial que campos como "*Structural Material*" ou "*Type Comments*" contivessem, de forma padronizada, a identificação do tipo de material, a respetiva densidade, e outras propriedades físicas relevantes. A ausência desta informação obrigou à introdução manual de dados e dificultou a correspondência entre os elementos modelados e as DAP, comprometendo a fluidez do processo. Neste sentido, recomenda-se também o preenchimento de um parâmetro específico no modelo BIM com o link direto para a ficha técnica de cada produto ou sistema construtivo. Esta medida permitiria aceder de forma imediata a dados como composição, massa por unidade e, eventualmente, o valor de carbono incorporado declarado pelo fabricante. A inclusão desta informação facilitaria substancialmente a extração de dados para cálculo de massas e para a seleção das DAP correspondentes. Esta prática está alinhada com as boas práticas internacionais, nomeadamente com a definição de EIR - *Exchange Information Requirements* (Requisitos de Troca de Informação), que deverá orientar a estrutura e o conteúdo da informação digital nos futuros projetos.

Outra medida recomendada consiste na criação de um *template* BIM interno especificamente orientado para projetos com requisitos ambientais. Esse *template* deverá incluir parâmetros obrigatórios para ACV, famílias modeladas com os campos adequados previamente configurados, exemplos de preenchimento e uma lista de verificação que permita validar os modelos antes da exportação. Cabe ao *BIM Manager* a responsabilidade de sensibilizar e coordenar os modeladores BIM para o cumprimento rigoroso destas regras, assegurando que a modelação é realizada com vista à posterior análise de ciclo de

vida. Esta normalização interna permite uniformizar o nível de detalhe, garantir a consistência da informação e facilitar o trabalho do responsável pela ACV. Para além disso, recomenda-se a adoção sistemática de sistemas de classificação normalizados, como o Uniclass 2015, assegurando que todos os elementos possuem um código funcional. Esta prática facilita a correspondência com bases de dados ambientais e a integração automatizada com plataformas como o One Click LCA.

No que respeita ao módulo de transporte (A4), propõe-se a criação de parâmetros BIM específicos destinados a incorporar informação relativa ao fornecedor de cada material. Com base nesta informação, poderá ser automaticamente calculada a distância entre a obra e a origem do material, por exemplo através de ferramentas em Excel aplicadas ao MTQ. Esta abordagem permite uma estimativa mais precisa das emissões associadas ao transporte, reduzindo a dependência de valores médios, conforme também proposto por Rodrigues [56].

No que respeita à estimativa do consumo anual de água (módulo B7), utilizada como entrada na plataforma One Click LCA, propõe-se uma melhoria metodológica face ao procedimento seguido na presente dissertação. A estimativa aplicada teve por base dados médios de consumo por pessoa e percentagens adaptadas de usos residenciais, o que, embora justificável na ausência de dados mais específicos e sugerido pelo responsável da empresa na área da sustentabilidade, poderá não refletir com precisão a realidade de uma instalação industrial e administrativa. Assim, recomenda-se que, em futuras aplicações, seja privilegiada a recolha de dados reais através de registos de faturação, leituras de contadores digitais ou outras medições diretas da instalação. Em alternativa, poderá recorrer-se a *benchmarks* específicos para edifícios industriais, disponíveis em publicações institucionais, bases de dados setoriais ou estudos académicos. Esta abordagem permitirá obter estimativas mais robustas e alinhadas com a realidade operacional do edifício, reduzindo a incerteza associada à adaptação de perfis residenciais. Além disso, reforçará a fiabilidade da análise ambiental na fase de utilização do edifício, contribuindo para decisões mais informadas e sustentáveis.

Outro aspeto identificado é a necessidade de melhorar a qualidade e normalização das fichas técnicas dos produtos. Atualmente, muitas fichas técnicas não contêm informação essencial como massa, consumo por unidade ou percentagem de reciclabilidade. Os fabricantes devem ser incentivados a disponibilizar esta informação de forma padronizada, o que facilitaria o cálculo de massas, a estimativa do carbono incorporado e a correspondência com as DAP.

No contexto nacional, foi também identificado um número reduzido de produtos portugueses com DAP disponíveis. Esta limitação compromete a representatividade da construção nacional nas plataformas internacionais de ACV. Assim, recomenda-se que entidades reguladoras e associações setoriais promovam a criação de DAP nacionais, através de campanhas de sensibilização, apoio técnico e normas orientadoras para os fabricantes. Enquanto esta cobertura não for atingida, propõe-se o desenvolvimento de uma matriz de correspondência entre produtos nacionais e as alternativas existentes nas bases de dados do One Click LCA. Esta matriz deverá ser construída com base em critérios técnicos como composição, densidade, reciclabilidade e função construtiva, permitindo uma correspondência mais rigorosa e fundamentada entre os materiais utilizados em obra e os disponíveis nas ferramentas de ACV.

Por fim, destaca-se a importância de reforçar a formação interna em modelação orientada para a sustentabilidade. Os técnicos devem ser capacitados não só nas exigências geométricas e construtivas dos modelos BIM, mas também nos requisitos ambientais associados à análise do ciclo de vida. A promoção de uma cultura de colaboração multidisciplinar entre projetistas, modeladores e especialistas em sustentabilidade será essencial para consolidar esta metodologia de forma eficaz e integrada na prática profissional da empresa.

Estas propostas de melhoria visam, em conjunto, reforçar a qualidade e utilidade dos modelos BIM como suporte à tomada de decisão ambiental, potenciando a sua aplicação sistemática em projetos futuros com elevados padrões de desempenho sustentável.

6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho demonstraram o potencial da integração entre metodologias BIM e ACV, mas também evidenciaram diversos constrangimentos técnicos e operacionais que poderão ser alvo de melhoria em trabalhos futuros. Um dos principais eixos de desenvolvimento prende-se com a necessidade de aprofundar a automatização dos fluxos de trabalho entre modelos BIM e plataformas de análise ambiental, reduzindo a dependência de processos manuais de verificação e mapeamento de dados. Neste sentido, será relevante explorar o desenvolvimento de scripts avançados em Dynamo ou outras linguagens visuais, que permitam não só extrair quantidades, mas também converter unidades e validar automaticamente os parâmetros ambientais críticos.

Outro vetor promissor consiste na criação de bibliotecas de famílias BIM ambientalmente qualificadas, com ligação direta a DAPs verificadas, permitindo uma atribuição automática de impactos ainda em fase de modelação. A disponibilização de tais bibliotecas, alinhadas com sistemas de classificação normalizados (como o Uniclass 2015), facilitaria a interoperabilidade e eliminaria grande parte dos erros associados à ausência ou à má parametrização dos elementos.

Adicionalmente, a interoperabilidade através do formato IFC mostrou-se funcional, mas limitada pela ausência de controlo sobre as unidades exportadas e pela fraca capacidade de mapeamento automático de certos elementos técnicos, como equipamentos de AVAC e sistemas elétricos. Futuros desenvolvimentos poderão explorar formas de enriquecimento semântico dos ficheiros IFC, por exemplo através da adoção de propriedades personalizadas ou através do uso do formato IFC 4x3, que oferece maior capacidade de representação de propriedades ambientais e de ligação com bases de dados externas. Neste contexto, ganha relevância o trabalho atualmente em curso pela buildingSMART International, nomeadamente o desenvolvimento de um IDS (*Information Delivery Specification*) para metodologias BIM-ACV, que poderá vir a constituir um avanço significativo na definição de requisitos mínimos para análises ambientais automatizadas.

A criação de plataformas interoperáveis que combinem modelação 3D, parametrização ambiental e painéis de visualização interativa de análise em tempo real constitui igualmente uma direção de evolução relevante. Estas ferramentas permitirão apoiar decisões em fases conceptuais, sem comprometer a fiabilidade dos resultados, tornando a análise de ciclo de vida acessível a profissionais sem formação especializada em avaliação ambiental.

Por fim, a generalização destas metodologias em contexto profissional dependerá não apenas da evolução técnica das ferramentas, mas também da capacitação dos intervenientes e da adoção de práticas colaborativas baseadas em *standards* partilhados. Investir em formação específica e promover o envolvimento dos BIM Managers, projetistas e consultores ambientais desde fases iniciais do projeto será essencial para consolidar a integração efetiva entre BIM e ACV no setor da construção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.-T. San-José Lombera and I. Garrucho Aprea, "A system approach to the environmental analysis of industrial buildings," *Building and Environment*, vol. 45, no. 3, pp. 673-683, 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.08.012.
- [2] M. Najjar, K. Figueiredo, A. W. A. Hammad, and A. Haddad, "Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy efficient buildings," *Applied Energy*, vol. 250, pp. 1366-1382, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.05.101.
- [3] W. Wang, K. Xu, S. Song, Y. Bao, and C. Xiang, "From BIM to digital twin in BIPV: A review of current knowledge," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 67, p. 103855, 2024, doi: 10.1016/j.seta.2024.103855.
- [4] M. Finkbeiner, A. Inaba, R. Tan, K. Christiansen, and H.-J. Klüppel, "The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 11, pp. 80-85, 2006, doi: 10.1065/lca2006.02.002.
- [5] Z. Chen, L. Chen, X. Zhou, L. Huang, M. Sandanayake, and P.-S. Yap, "Recent Technological Advancements in BIM and LCA Integration for Sustainable Construction: A Review," *Sustainability*, vol. 16, no. 3, p. 1340, 2024, doi: 10.3390/su16031340.
- [6] R. Jin, B. Zhong, L. Ma, A. Hashemi, and L. Ding, "Integrating BIM with building performance analysis in project life-cycle," *Automation in Construction*, vol. 106, p. 102861, 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.102861.
- [7] C. A. Ruggerio, "Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions," *Science of The Total Environment*, vol. 786, p. 147481, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147481.
- [8] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, and W. W. Behrens III, *The Limits to Growth*, 1 ed. New York, USA: Universe Books, 1972
- [9] J. C. Hanekamp, G. Vera-Navas, and S. W. and Verstegen, "The historical roots of precautionary thinking: the cultural ecological critique and 'The Limits to Growth'," *Journal of Risk Research*, vol. 8, no. 4, pp. 295-310, 2005, doi: 10.1080/1366987042000265056.
- [10] M. Ivanova, "UNEP in Global Environmental Governance: Design, Leadership, Location," *Global Environmental Politics*, vol. 10, no. 1, pp. 30-59, 2010, doi: 10.1162/glep.2010.10.1.30.
- [11] G. H. Brutland, "Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development," United Nations, 1987. [Online]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- [12] I. Sachs, *Desenvolvimento sustentável, bio-industrialização descentralizada e novas configurações rural-urbanas: os casos da Índia e do Brasil*. São Paulo: Cortez, 1997
- [13] J. Elkington, *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. Oxford: Capstone, 1997. ISBN: 9781900961271
- [14] H. M. Van Bellen, "Desenvolvimento sustentável: uma descrição das principais ferramentas de avaliação," *Ambiente & Sociedade*, vol. 7, 06/01 2004, doi: 10.1590/S1414-753X2004000100005.
- [15] L. R. D. Oliveira, R. M. Medeiros, P. D. B. Terra, and O. L. G. Quelhas, "Sustentabilidade: da evolução dos conceitos à implementação como estratégia nas organizações," *Production*, vol. 22, no. 1, pp. 70-82, 2011, doi: 10.1590/s0103-65132011005000062.
- [16] S. Pereira and R. Curi, "Meio Ambiente, Impacto Ambiental e Desenvolvimento Sustentável: Conceituações Teóricas sobre o Despertar da Consciência Ambiental," *REUNIR: Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade*, vol. 2, p. 35, 12/28 2012, doi: 10.18696/reunir.v2i4.78.
- [17] Earth Day Network. "The History of Earth Day." <https://www.earthday.org/history> [accessed 25/07/2025].
- [18] United Nations Framework Convention on Climate Change. "Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change." https://unfccc.int/kyoto_protocol [accessed 25/07/2025].

- [19] United Nations. "Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development." United Nations. <https://sustainabledevelopment.un.org/outcomedocuments/agenda21> [accessed 25/07/2025].
- [20] United Nations, "Report of the World Summit on Sustainable Development," New York, A/CONF.199/20, 2002. [Online]. Available: <https://digitallibrary.un.org/record/478154>
- [21] United Nations, "The Future We Want: Outcome Document of the United Nations Conference on Sustainable Development (Rio+20)," New York, A/CONF.216/L.1, 2012. [Online]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/futurewewant.html>
- [22] United Nations Framework Convention on Climate Change, "Adoption of the Paris Agreement," FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1, 2015. [Online]. Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [23] United Nations Framework Convention on Climate Change, "Glasgow Climate Pact," Bonn, FCCC/PA/CMA/2021/L.16, 2021. [Online]. Available: <https://unfccc.int/documents/310497>
- [24] European Commission, "The European Green Deal," Brussels, COM(2019) 640 final, 2019. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640>
- [25] S. Nosratabadi, A. Mosavi, S. Shamshirband, E. Kazimieras Zavadskas, A. Rakotonirainy, and K. W. Chau, "Sustainable Business Models: A Review," *Sustainability*, vol. 11, no. 6, p. 1663, 2019, doi: 10.3390/su11061663.
- [26] R. D. d. S. Magalhães, "A caminho do desenvolvimento sustentável. Implementação de um laboratório vivo para a sustentabilidade.," Tese de Mestrado, Faculdade de Arquitetura, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10400.5/6708>
- [27] N. Barter and S. Russell, "Sustainable Development: 1987 to 2012 - Don't Be Naive, it's not about the Environment.," 02/12/2012.
- [28] R. Goodland, "The Concept of Environmental Sustainability," *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 26, pp. 1–24, 1995. [Online]. Available: <https://are.berkeley.edu/courses/ARE298/Readings/goodland.pdf>.
- [29] I. Scoones, "Sustainability," *Development in Practice*, vol. 17, no. 4-5, pp. 589-596, 2007, doi: 10.1080/09614520701469609.
- [30] I. Schutte, "A strategic management plan for the sustainable development of geotourism in South Africa," 01/01 2009.
- [31] ONU, "Transformar o nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.," in "Nações Unidas," 2015. [Online]. Available: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>
- [32] R. Costa and J. B. Andrade Guerra, *Estado sociedade e sustentabilidade*. Palhoça: Editora Unisul, 2018. ISBN 978-85-8019-207-0
- [33] United Nations Environment Programme, "2020 Global Status Report for Buildings and Construction," Nairobi, Kenya, 2020. [Online]. Available: https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf
- [34] D. F. R. Parracho *et al.*, "Modular Construction in the Digital Age: A Systematic Review on Smart and Sustainable Innovations," *Buildings*, vol. 15, no. 5, p. 765, 2025, doi: 10.3390/buildings15050765.
- [35] F. Pomponi and A. Moncaster, "Circular economy for the built environment: A research framework," *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 710-718, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.055.
- [36] Y. Yardımcı, B. B. Colak Demirel, and M. Ertosun Yıldız, "Climatic Influences on the Environmental Performances of Residential Buildings: A Comparative Case Study in Turkey," *Buildings*, vol. 14, no. 12, p. 4015, 2024, doi: 10.3390/buildings14124015.
- [37] P. Gallo, R. Romano, and E. Belardi, "Smart Green Prefabrication: Sustainability Performances of Industrialized Building Technologies," *Sustainability*, vol. 13, no. 9, p. 4701, 2021, doi: 10.3390/su13094701.

- [38] A. M. Moncaster and K. E. Symons, "A method and tool for 'cradle to grave' embodied carbon and energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350 standards," *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 514-523, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.046.
- [39] J. B. Guinée *et al.*, "Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future," *Environmental Science & Technology*, vol. 45, no. 1, pp. 90-96, 2011, doi: 10.1021/es101316v.
- [40] International Organization for Standardization, "ISO 14040: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework," 2006.
- [41] O. Ortiz, F. Castells, and G. Sonnemann, "Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 1, pp. 28-39, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012.
- [42] C. Benoît, & Mazijn, B, "Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products," *UNEP/SETAC Life Cycle Initiative*, 2009.
- [43] M. Traverso, F. Asdrubali, A. Francia, and M. Finkbeiner, "Towards life cycle sustainability assessment: An implementation to photovoltaic modules," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, pp. 1068-1079, 2012, doi: 10.1007/s11367-012-0433-8.
- [44] M. Finkbeiner, E. M. Schau, A. Lehmann, and M. Traverso, "Towards Life Cycle Sustainability Assessment," *Sustainability*, vol. 2, no. 10, pp. 3309-3322, 2010, doi: 10.3390/su2103309.
- [45] K. Lu, X. Jiang, J. Yu, V. W. Y. Tam, and M. Skitmore, "Integration of life cycle assessment and life cycle cost using building information modeling: A critical review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 285, p. 125438, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125438.
- [46] L. F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez, and A. Castell, "Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 394-416, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.037.
- [47] M. Hauschild *et al.*, "Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, pp. 683-697, 2012, doi: 10.1007/s11367-012-0489-5.
- [48] M. Rybaczevska-Błazejowska and D. Jezierski, "Comparison of ReCiPe 2016, ILCD 2011, CML-IA baseline and IMPACT 2002+ LCIA methods: a case study based on the electricity consumption mix in Europe," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 29, pp. 1799-1817, 2024, doi: 10.1007/s11367-024-02326-6.
- [49] J. B. Guinée *et al.*, "Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards. Background and operational annex," Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden, 2002.
- [50] M. A. J. Huijbregts *et al.*, "ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, no. 2, pp. 138-147, 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [51] European Commission – Joint Research Centre, "ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance," Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg, 2010. [Online]. Available: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAIL-online-12March2010.pdf>
- [52] CEN – European Committee for Standardization, "EN 15978:2011 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method," CEN, Brussels, 2011.
- [53] T. Potrc Obrecht, R. Kunič, S. Jordan, and A. Legat, "Roles of the reference service life (RSL) of buildings and the RSL of building components in the environmental impacts of buildings," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 323, p. 012146, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012146.
- [54] E. Palumbo, B. Soust-Verdaguer, C. Llatas, and M. Traverso, "How to Obtain Accurate Environmental Impacts at Early Design Stages in BIM When Using Environmental Product Declaration. A Method to Support Decision-Making," *Sustainability*, vol. 12, no. 17, p. 6927, 2020, doi: 10.3390/su12176927.

- [55] C. Illankoon and S. C. Vithanage, "Closing the loop in the construction industry: A systematic literature review on the development of circular economy," *Journal of Building Engineering*, vol. 76, p. 107362, 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.107362.
- [56] M. C. C. Rodrigues, "Análise do Ciclo de Vida na Perspetiva da Certificação BREEAM na Construção: Proposta de Metodologia," Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10216/132308>
- [57] CEN – European Committee for Standardization, "EN 15804:2012+A2:2019 – Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products," CEN, Brussels, 2019.
- [58] L. Bragança and R. Mateus, *Avaliação do Ciclo de Vida dos Edifícios: Impacte Ambiental de Solução Construtivas*. Porto, Portugal: Publindústria, 2011.9789899654334
- [59] DAPHabitat. "O que são DAP?" https://daphabitat.pt/pt_PT/dap/o-que-sao/ [accessed 22/05/2025].
- [60] Institut Bauen und Umwelt. "IBU – Institut Bauen und Umwelt." <https://ibu-epd.com/> [accessed 22/05/2025].
- [61] EPD International (Environdec). "The International EPD® System – Home." <https://www.environdec.com/home> [accessed 22/05/2025].
- [62] T. Mattinzioli, D. Lo Presti, and A. Jiménez del Barco Carrión, "A critical review of life cycle assessment benchmarking methodologies for construction materials," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 33, p. e00496, 2022, doi: 10.1016/j.susmat.2022.e00496.
- [63] S. Azhar, W. Carlton, D. Olsen, and I. Ahmad, "Building information modeling for sustainable design and LEED (R) rating analysis," *Automation in Construction*, vol. 20, pp. 217-224, 2011, doi: 10.1016/j.autcon.2010.09.019.
- [64] L. Rodrigues, J. M. P. Q. Delgado, A. Mendes, A. G. B. Lima, and A. S. Guimarães, "Sustainability Assessment of Buildings Indicators," *Sustainability*, vol. 15, no. 4, p. 3403, 2023, doi: 10.3390/su15043403.
- [65] D. T. Doan, A. Ghaffarianhoseini, N. Naismith, T. Zhang, A. Ghaffarianhoseini, and J. Tookey, "A critical comparison of green building rating systems," *Building and Environment*, vol. 123, pp. 243-260, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.07.007.
- [66] U.S. Green Building Council. "LEED – Leadership in Energy and Environmental Design." <https://www.usgbc.org/leed> [accessed 22/05/2025].
- [67] GBCA – Green Building Council Australia. "Green Star Rating System." <https://new.gbca.org.au/green-star/> [accessed 22/05/2025].
- [68] International WELL Building Institute. "The WELL Building Standard." <https://www.wellcertified.com> [accessed 22/05/2025].
- [69] iiSBE – International Initiative for a Sustainable Built Environment. "SBTool Overview." <https://www.iisbe.org/sbmethod> [accessed 22/05/2025].
- [70] European Commission. "Level(s): European framework for sustainable buildings." https://green-forum.ec.europa.eu/levels_en [accessed 22/05/2025].
- [71] L. Schweber and H. and Haroglu, "Comparing the fit between BREEAM assessment and design processes," *Building Research & Information*, vol. 42, no. 3, pp. 300-317, 2014, doi: 10.1080/09613218.2014.889490.
- [72] Building Research Establishment (BRE). "BREEAM Standards." <https://breeam.com/standards/> [accessed 22/05/2025].
- [73] Building Research Establishment (BRE). "How BREEAM Works." <https://breeam.com/about/how-breeam-works> [accessed 22/05/2025].
- [74] J. F. F. Rodríguez, "Sustainable Design Protocol in BIM Environments: Case Study of 3D Virtual Models of a Building in Seville (Spain) Based on BREEAM Method," *Sustainability*, vol. 15, no. 7, p. 5787, 2023, doi: 10.3390/su15075787.
- [75] T. Dalla Mora, E. Bolzonello, C. Cavalliere, and F. Peron, "Key Parameters Featuring BIM-LCA Integration in Buildings: A Practical Review of the Current Trends," *Sustainability*, vol. 12, no. 17, p. 7182, 2020, doi: 10.3390/su12177182.

- [76] B. Succar, "Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders," *Automation in Construction*, vol. 18, no. 3, pp. 357-375, 2009, doi: 10.1016/j.autcon.2008.10.003.
- [77] Y. Jung and M. Joo, "Building information modelling (BIM) framework for practical implementation," *Automation in Construction*, vol. 20, no. 2, pp. 126-133, 2011, doi: 10.1016/j.autcon.2010.09.010.
- [78] R. Charef, H. Alaka, and S. Emmitt, "Beyond the third dimension of BIM: A systematic review of literature and assessment of professional views," *Journal of Building Engineering*, vol. 19, pp. 242-257, 2018, doi: 10.1016/j.jobe.2018.04.028.
- [79] Harmony Advanced Technologies. "BIM Dimensions Explained: From 3D to 10D." <https://www.harmony-at.com/en/blog/bim-dimensions> [accessed 22/05/2025].
- [80] Engenharia 360. "Lista de dimensões BIM na engenharia." <https://engenharia360.com/lista-de-dimensoes-bim-na-engenharia/> [accessed 25/07/2025].
- [81] F. H. Abanda, B. Balu, S. E. Adukpo, and A. Akintola, "Decoding ISO 19650 Through Process Modelling for Information Management and Stakeholder Communication in BIM," *Buildings*, vol. 15, no. 3, p. 431, 2025, doi: 10.3390/buildings15030431.
- [82] J. Abualdenien and A. Borrmann, "Levels of detail, development, definition, and information need: a critical literature review," *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 27, pp. 363-392, 2022, doi: 10.36680/j.itcon.2022.018.
- [83] Autodesk. "Autodesk Revit – Overview." <https://www.autodesk.com/products/revit/overview> [accessed 22/05/2025].
- [84] Autodesk. "Autodesk BIM 360 – Construction Management Software." <https://www.autodesk.com/bim-360/> [accessed 22/05/2025].
- [85] buildingSMART International. "Industry Foundation Classes (IFC)." <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/> [accessed 24/05/2025].
- [86] Autodesk. "Dynamo: Visual Programming for Design." https://help.autodesk.com/sfdcarticles/attachments/Dynamo_Visual_Programming_for_Design.pdf [accessed 24/05/2025].
- [87] UK BIM Framework, "Guidance Part D: Developing Information Requirements – Edition 2," Centre for Digital Built Britain; BSI; UK BIM Alliance, 2021. [Online]. Available: https://ukbimframework.org/wp-content/uploads/2021/02/Guidance-Part-D_Developing-information-requirements_Edition-2.pdf
- [88] S. M. Fernandes, "Implementação do Building Information Modeling (BIM) na gestão da construção de obras públicas em Portugal," Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2020. [Online]. Available: <https://repositorium.uminho.pt/handle/1822/70916>
- [89] buildingSMART International. "The Curious Case of the MVD." <https://www.buildingsmart.org/the-curious-case-of-the-mvd/> [accessed 24/05/2025].
- [90] buildingSMART International. "The Open BIM approach." <https://www.buildingsmart.org/about/openbim/> [accessed 24/5/2025].
- [91] J. Zhang, Q. Liu, Z. Hu, J. Lin, and F. Yu, "A multi-server information-sharing environment for cross-party collaboration on a private cloud," *Automation in Construction*, vol. 81, pp. 180-195, 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.06.021.
- [92] R. Santos, A. A. Costa, J. D. Silvestre, and L. Pyl, "Integration of LCA and LCC analysis within a BIM-based environment," *Automation in Construction*, vol. 103, pp. 127-149, 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.02.011.
- [93] buildingSMART International. "Information Delivery Specification (IDS)." <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/information-delivery-specification-ids/#documentation> [accessed 24/05/2025].
- [94] buildingSMART International. "BIM Collaboration Format (BCF)." <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/bim-collaboration-format/> [accessed 24/05/2025].

- [95] buildingSMART International. "buildingSMART Data Dictionary (bSDD)." <https://www.buildingsmart.org/users/services/buildingsmart-data-dictionary/> [accessed 24/05/2025].
- [96] D. F. R. Parracho and J. Poças Martins, "E5.5 - Relatório: "Casos de Aplicação: Pavimentos e Infraestruturas Rodoviárias"," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/150133>
- [97] buildingSMART International. "Information Delivery Manual (IDM)." <https://technical.buildingsmart.org/standards/information-delivery-manual/> [accessed 24/05/2025].
- [98] R. Lima, F. Salvado, M. J. F. Silva, and P. Couto, "Sistemas de classificação de informação da construção adaptados à sustentabilidade: Experiência internacional relevante," in *PTBIM 2022 – 4.º Congresso Português de Building Information Modelling*, Guimarães, Portugal, 2022, vol. 1, doi: 10.21814/uminho.ed.32.54.
- [99] H. Luo, G. Gao, H. Huang, Z. Ke, C. Peng, and M. Gu, "A Geometric-Relational Deep Learning Framework for BIM Object Classification," pp. 349-365, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-25082-8_23.
- [100] Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção (PTPC), "Relatório de Atividade 2 – Sistema de Estruturação da Classificação na Construção Sustentável (SECClasS)," PTPC, Lisboa, 2021. [Online]. Available: https://www.eeagrants.gov.pt/media/5776/relatorio_actividade-2_secclass.pdf
- [101] SECClasS Project Team. "Sobre o SECClasS." SECClasS.pt. <https://secclass.pt/sobre/> [accessed 30/05/2025].
- [102] S. Parece, R. Resende, and V. Rato, "A BIM-based tool for embodied carbon assessment using a Construction Classification System," *Developments in the Built Environment*, vol. 19, p. 100467, 2024, doi: 10.1016/j.dibe.2024.100467.
- [103] National Building Specification. "Uniclass 2015 - A Unified Classification System for the UK Construction Industry." NBS Enterprises Ltd. ER. <https://www.thenbs.com/our-tools/uniclass-2015> [accessed 30/05/2025].
- [104] National Building Specification. "Mapping Scenarios." NBS Enterprises Ltd. ER. <https://www.thenbs.com/knowledge/mapping-scenarios> [accessed 30/05/2025].
- [105] D. Pupeikis, A. A. Navickas, E. Klumbyte, and L. Seduikyte, "Comparative Study of Construction Information Classification Systems: CCI versus Uniclass 2015," *Buildings*, vol. 12, no. 5, p. 656, 2022, doi: 10.3390/buildings12050656.
- [106] TopBIM. "Building Energy Modeling (BEM)." <https://www.topbim.pt/building-energy-modeling-bem/> [accessed 30/05/2025].
- [107] One Click LCA. "One Click LCA – Life Cycle Assessment Software for Construction." <https://oneclicklca.com/> [accessed 30/05/2025].
- [108] One Click LCA. "Life Cycle Costing (LCC) Software for Design and Construction Projects." <https://oneclicklca.com/software/design-construction/life-cycle-costing> [accessed 30/05/2025].
- [109] L. Ma, R. Azari, and M. Elnimeiri, "A Building Information Modeling-Based Life Cycle Assessment of the Embodied Carbon and Environmental Impacts of High-Rise Building Structures: A Case Study," *Sustainability*, vol. 16, no. 2, p. 569, 2024, doi: 10.3390/su16020569.
- [110] KieranTimberlake. "Tally – Life Cycle Assessment App for Revit." <https://kierantimberlake.com/page/tally> [accessed 30/05/2025].
- [111] SimaPro. "Life Cycle Assessment (LCA)." <https://simapro.com/life-cycle-assessment/> [accessed 30/05/2025].
- [112] GreenDelta. "openLCA – Life Cycle Assessment Software." <https://www.openlca.org/> [accessed 30/05/2025].
- [113] A. Mohammed, I. Elmasoudi, and M. Ghannam, "Life cycle environmental impact assessment of steel structures using building information modeling," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 10, 2025, doi: 10.1007/s41062-024-01840-8.
- [114] Athena Sustainable Materials Institute. "Overview of Athena Software and LCA Data." <https://www.athenasmi.org/our-software-data/overview/> [accessed 30/05/2025].

- [115] J. Yan, Q. Lu, J. Tang, L. Chen, J. Hong, and T. Broyd, "Digital Tools for Revealing and Reducing Carbon Footprint in Infrastructure, Building, and City Scopes," *Buildings*, vol. 12, no. 8, p. 1097, 2022, doi: 10.3390/buildings12081097.
- [116] One Click LCA. "Global LCA Data – Capabilities." <https://oneclicklca.com/why-us/capabilities/global-lca-data> [accessed 30/05/2025].
- [117] I. B. Alecrim, "Aplicação da Metodologia BIM em Análises de Ciclo da Vida (LCA)," Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2020. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1822/76153>
- [118] S. Parece, T. Costa, T. Gonçalves, P. Rodrigues, and R. Resende, "Uma ferramenta baseada em BIM para a avaliação expedita do carbono incorporado utilizando o sistema de classificação SECClasS," in *PTBIM 2024 - 5.º Congresso Português de Building Information Modelling*, Lisboa, Portugal, 2024, vol. 2, pp. 223–235, doi: 10.21814/uminho.ed.164.18.
- [119] J. F. G. Machado, "Análise de Ciclo de Vida na Perspetiva da Certificação BREEAM," Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Porto, 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10400.22/21068>
- [120] Garcia Garcia S.A. "Empresa." <https://www.garcia.pt/pt/empresa/> [accessed 03/07/2025].
- [121] Autodesk. "Shared Parameters." <https://help.autodesk.com/view/RVT/2025/ENU/?guid=GUID-E7D12B71-C50D-46D8-886B-8E0C2B285988> [accessed 26/07/2025].
- [122] The Dynamo Team. "Selecionando Elementos do Revit." Autodesk. https://primer2.dynamobim.org/pt-br/7_dynamo_for_revit/2-selecting [accessed 26/07/2025].
- [123] C. Jones, "The Inventory of Carbon and Energy (ICE) – Version 2.0," Sustainable Energy Research Team (SERT), University of Bath, Bath, United Kingdom, 2011. [Online]. Available: <https://greenbuildingencyclopaedia.uk/wp-content/uploads/2014/07/Full-BSRIA-ICE-guide.pdf>
- [124] J. C. F. Marques, "Estudo de Composições de Betão para Aplicação na Obra de Construção de VGP Park Montijo," Laboratório Central – Betão Liz, S.A., Lisboa, Relatório Técnico 238/24, 2024.
- [125] EPAL. "Uso eficiente da água." <https://www.epal.pt/EPAL/menu/%C3%A1gua/campanhas/uso-eficiente> [accessed 10/07/2025].
- [126] Aqua eXperience. "Guia Prático de Sustentabilidade Aqua eXperience." <https://www.aquaexperience.pt/assets/frontend/desktop/ebook/Ebook-Aqua-eXperience.pdf> [accessed 10/07/2025].
- [127] N. Dodd, S. Donatello, and M. Cordella, "Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings. User Manual 1: Introduction to the Level(s) common framework (Publication version 1.1)," 2021. [Online]. Available: https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-01/UM1_Introduction_to_Level%28s%29_v1.1_27pp.pdf
- [128] One Click LCA. "IFC Viewer & Data Exporter." <https://help.oneclicklca.com/en/articles/275859-ifc-viewer-data-exporter> [accessed 14/07/2025].

ANEXOS

A1. CÓDIGOS DYNAMO

A1.1. ROTINA EM DYNAMO PARA IDENTIFICAR ELEMENTOS EM BETÃO COM "BET" NO PARÂMETRO *TYPE COMMENTS*

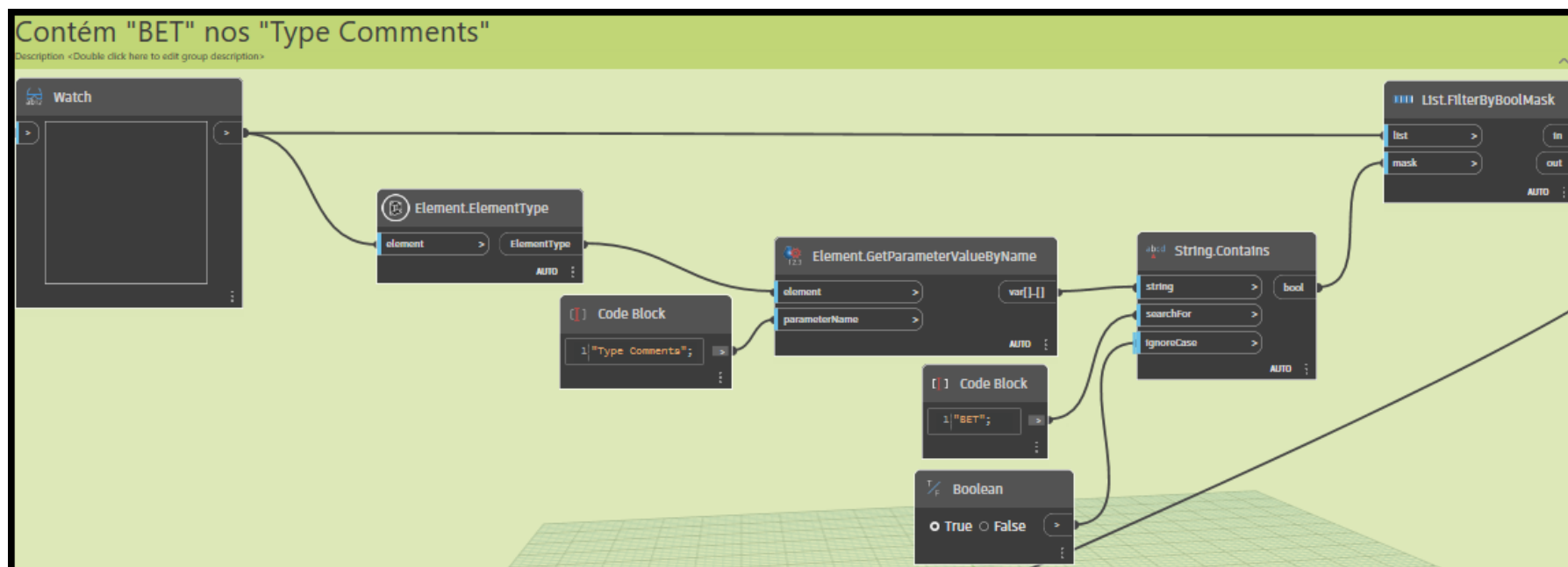


Figura 68 - Vista ampliada da rotina Dynamo para identificação de elementos em betão

A1.2. ATRIBUIÇÃO DO MATERIAL "CONCRETE OR CEMENTITIOUS" E DO RESPECTIVO COEFICIENTE DE CARBONO A ELEMENTOS EM BETÃO.

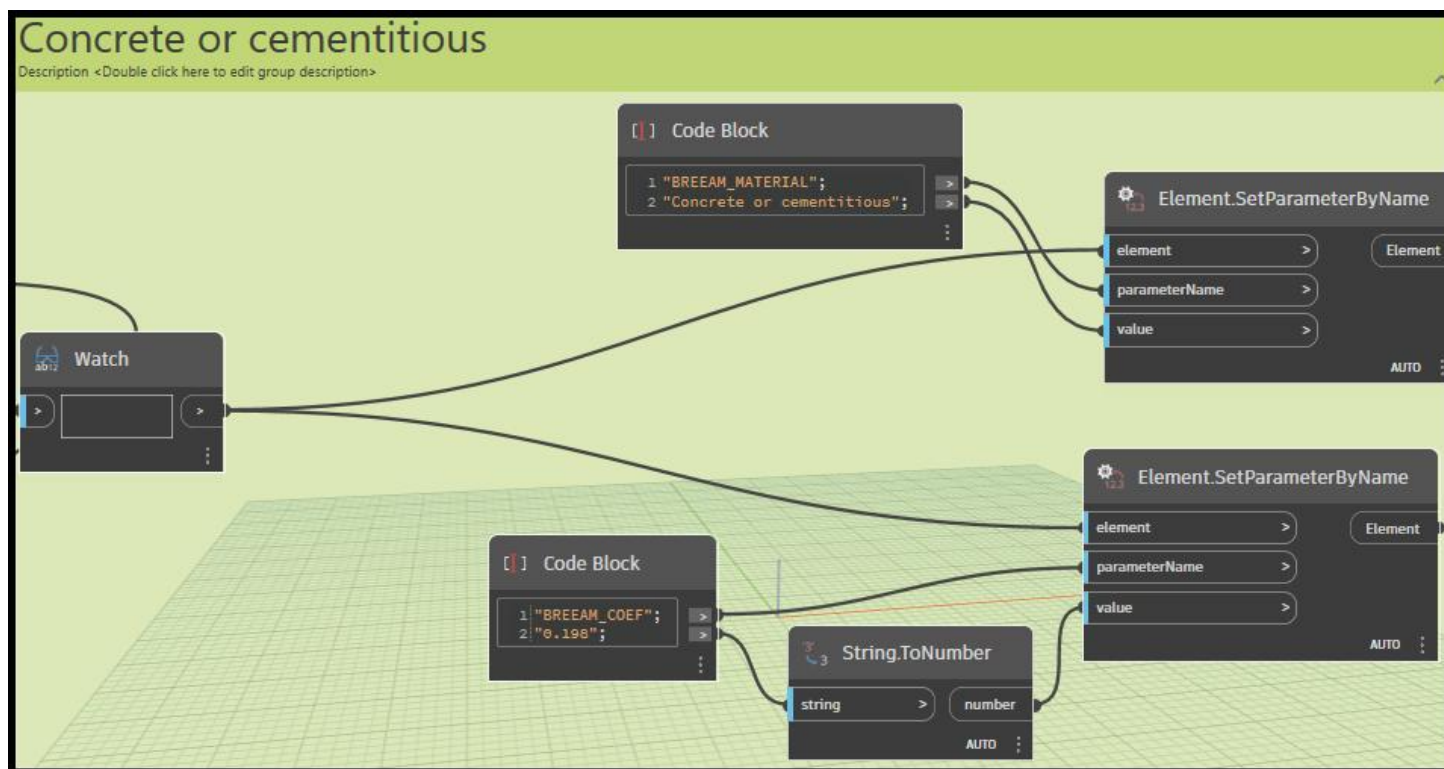


Figura 69 - Vista ampliada da rotina Dynamo para definição automatizada do material "Concrete or cementitious" e respetivo coeficiente de carbono

A1.3. ATRIBUIÇÃO DOS PARÂMETROS *BREEAM Class - MAT01* E *BREEAM Location - MAT03*, COM BASE NA CORRESPONDÊNCIA ENTRE A CLASSIFICAÇÃO UNICLASS 2015 (EF) E OS DADOS IMPORTADOS DE FICHEIRO EXCEL.

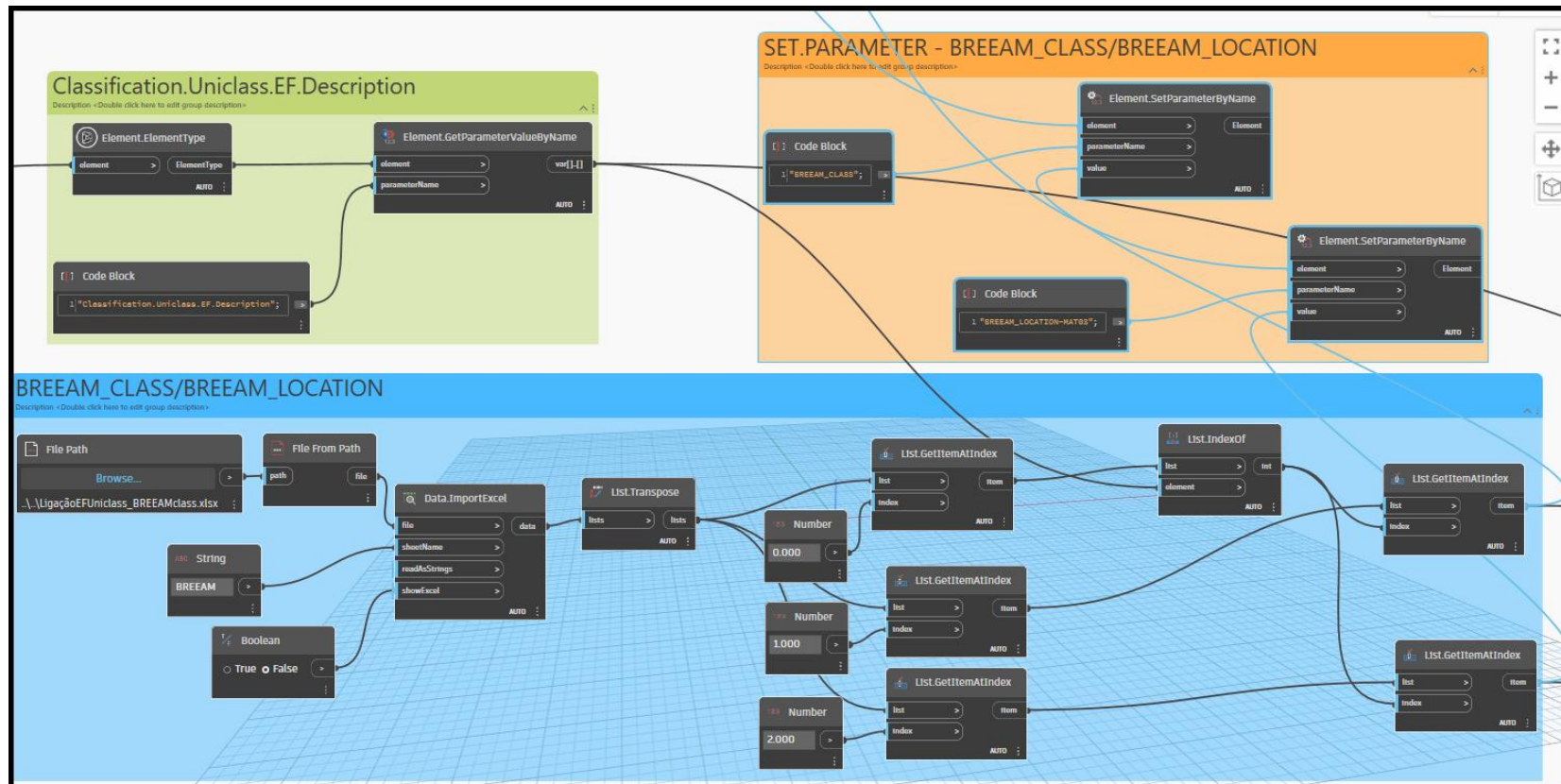


Figura 70 - Vista ampliada da rotina Dynamo para atribuição dos parâmetros *BREEAM Class – MAT01* e *BREEAM Location - MAT03* com base na correspondência entre a classificação Uniclass 2015 e dados importados do Excel

A2. DISTRIBUIÇÃO DA PEGADA DE CARBONO POR MATERIAIS

A2.1. ESPECIALIDADE DE ESTRUTURAS

Soma de Pegada (kg CO2 eq.) por Tipo de Material

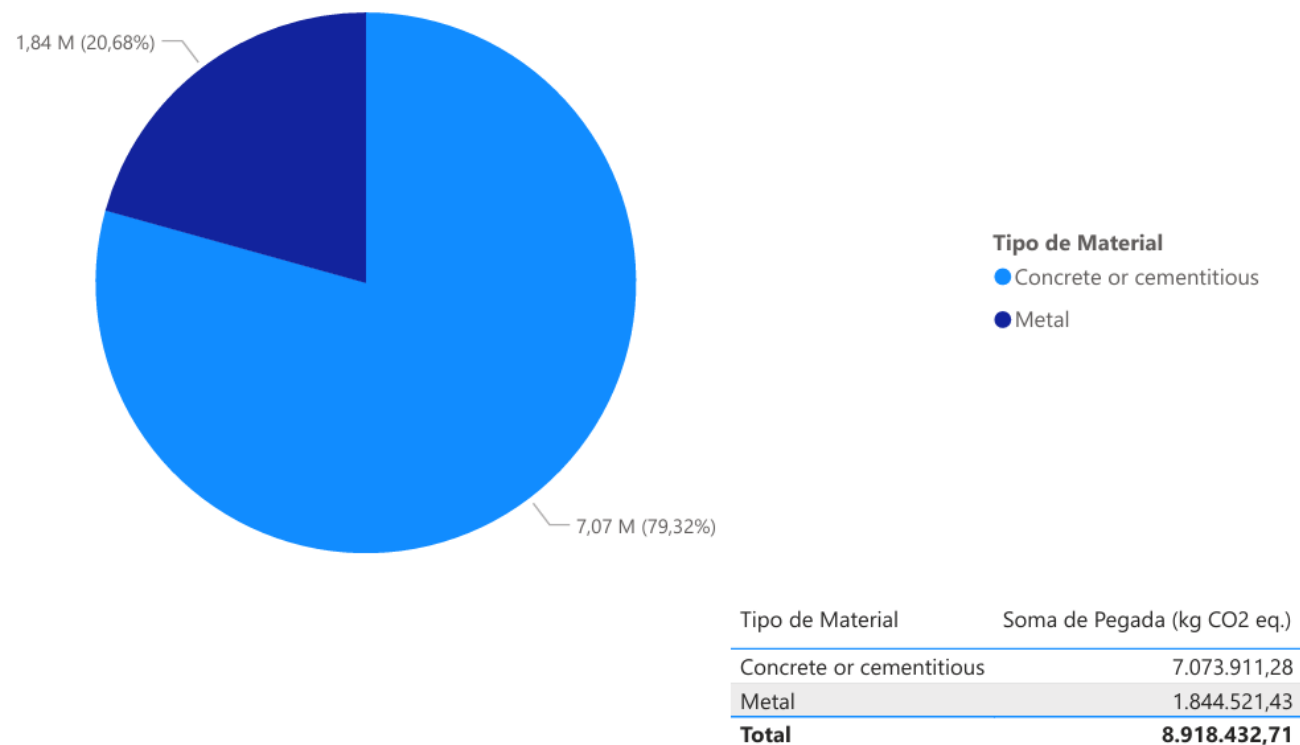


Figura 71 - Estimativa da pegada de carbono do modelo de estruturas

A2.2. ESPECIALIDADE DE HIDRÁULICA

Soma de Pegada (kg CO2 eq.) por Tipo de Material

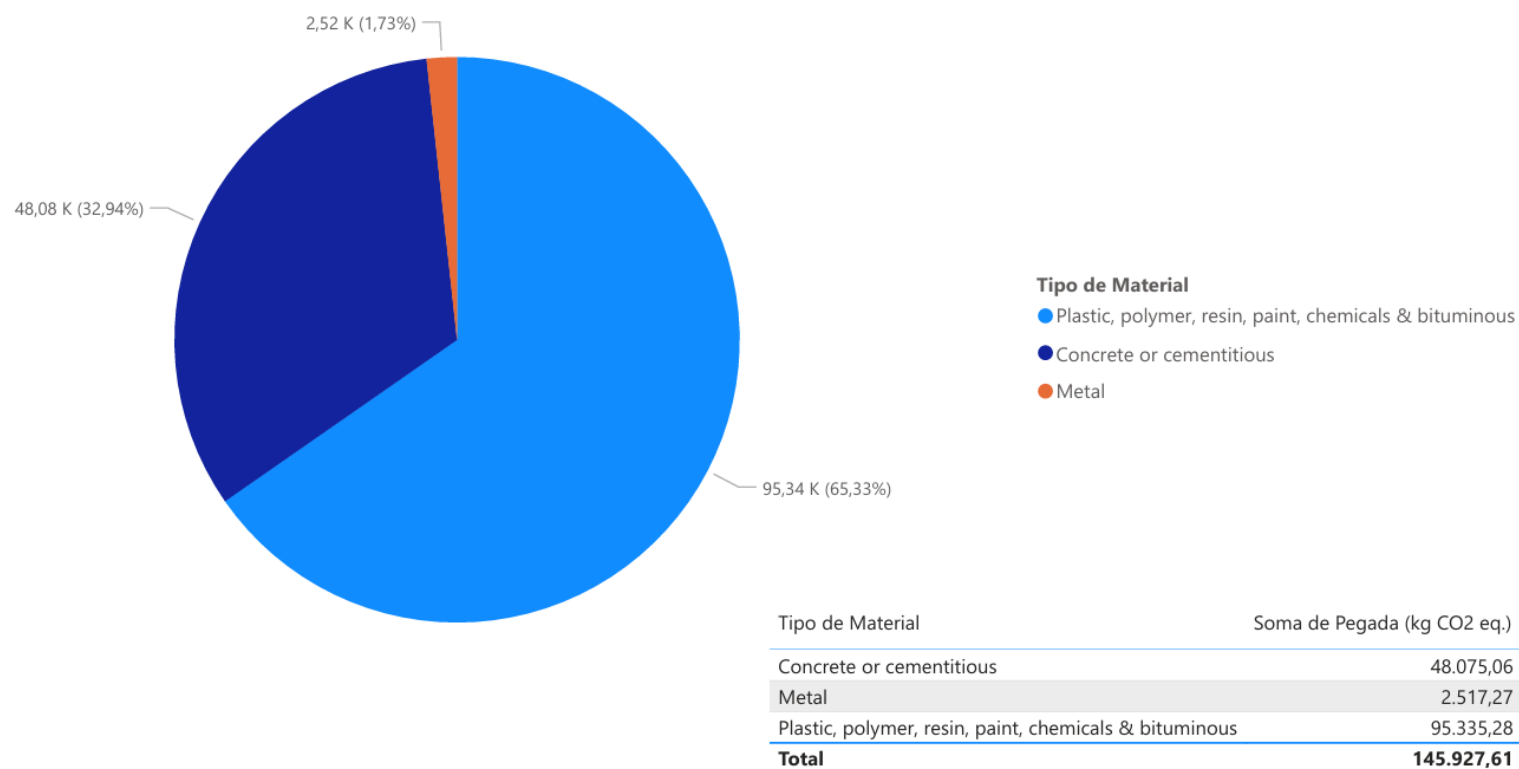


Figura 72 - Estimativa da pegada de carbono do modelo de hidráulica

A2.3. ESPECIALIDADE DE REDES ELÉTRICAS

Soma de Pegada (kg CO2 eq.) por Tipo de Material

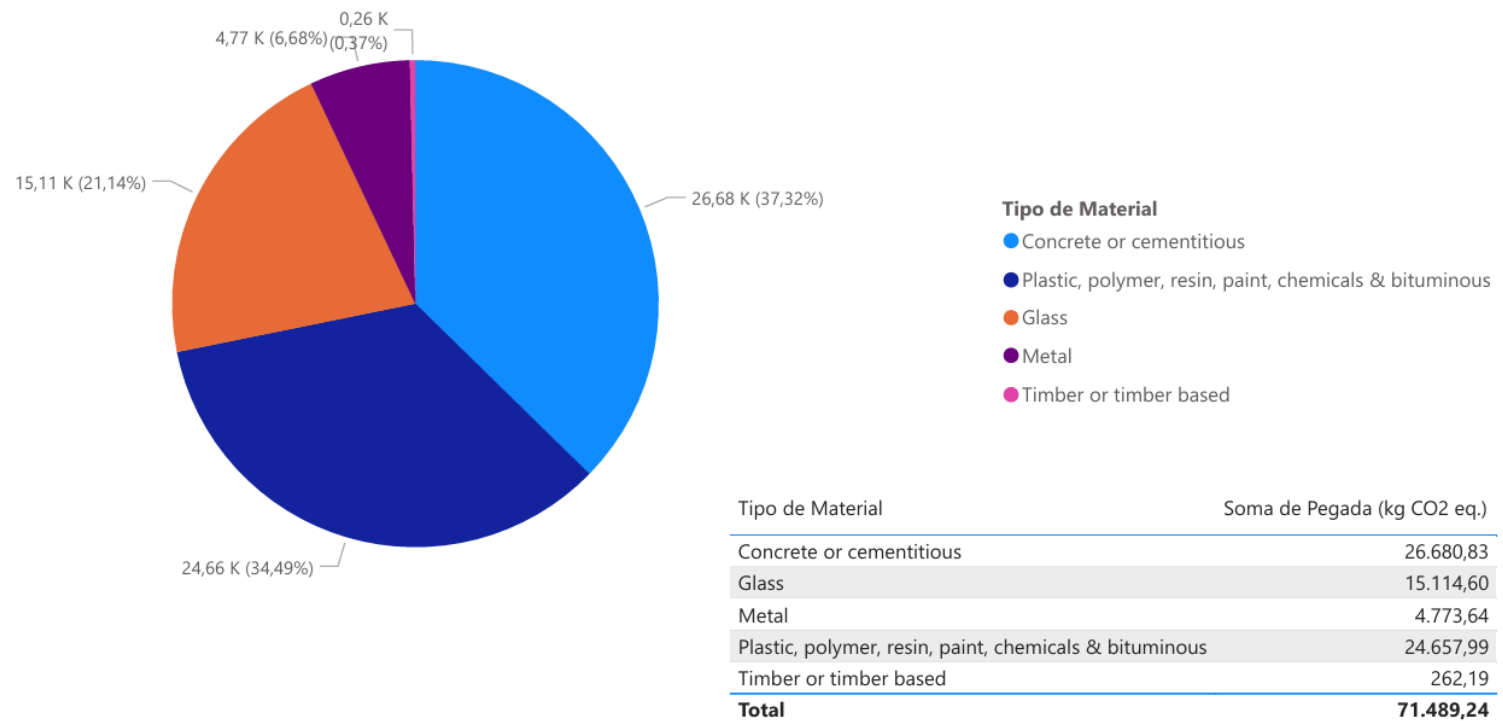


Figura 73 - Estimativa da pegada de carbono do modelo de redes elétricas

A2.4. ESPECIALIDADE DE MECÂNICA

Soma de Pegada (kg CO2 eq.) por Tipo de Material

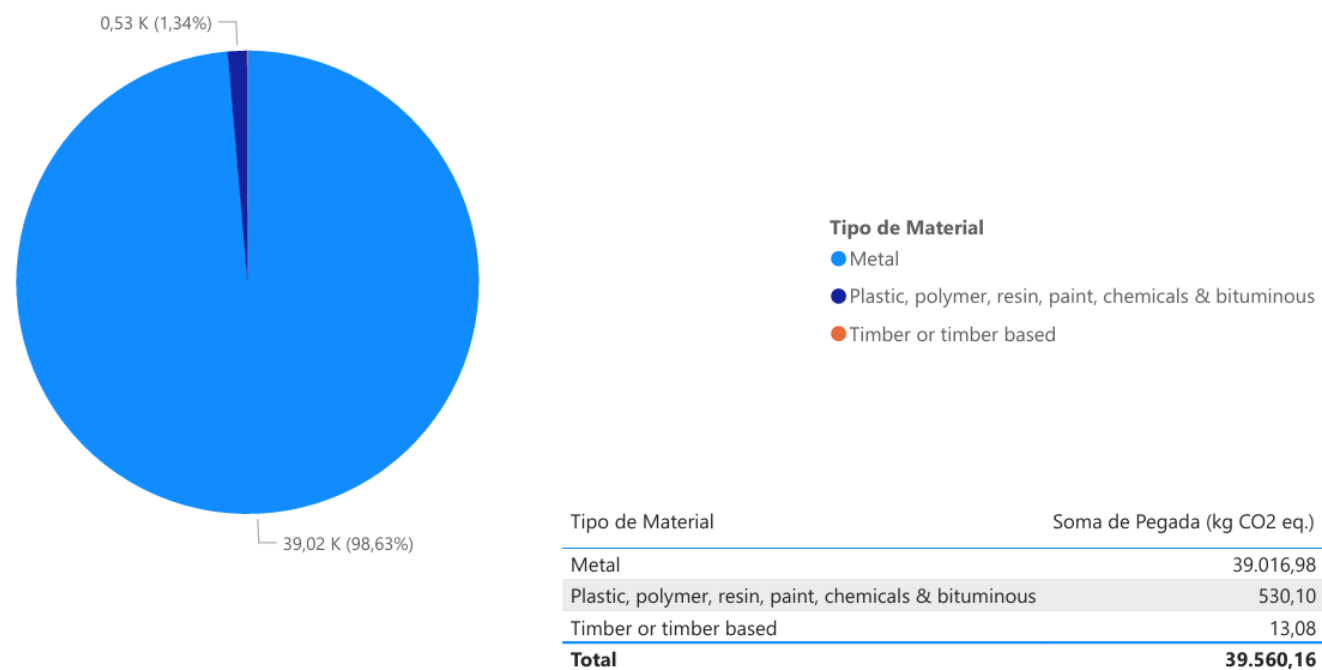
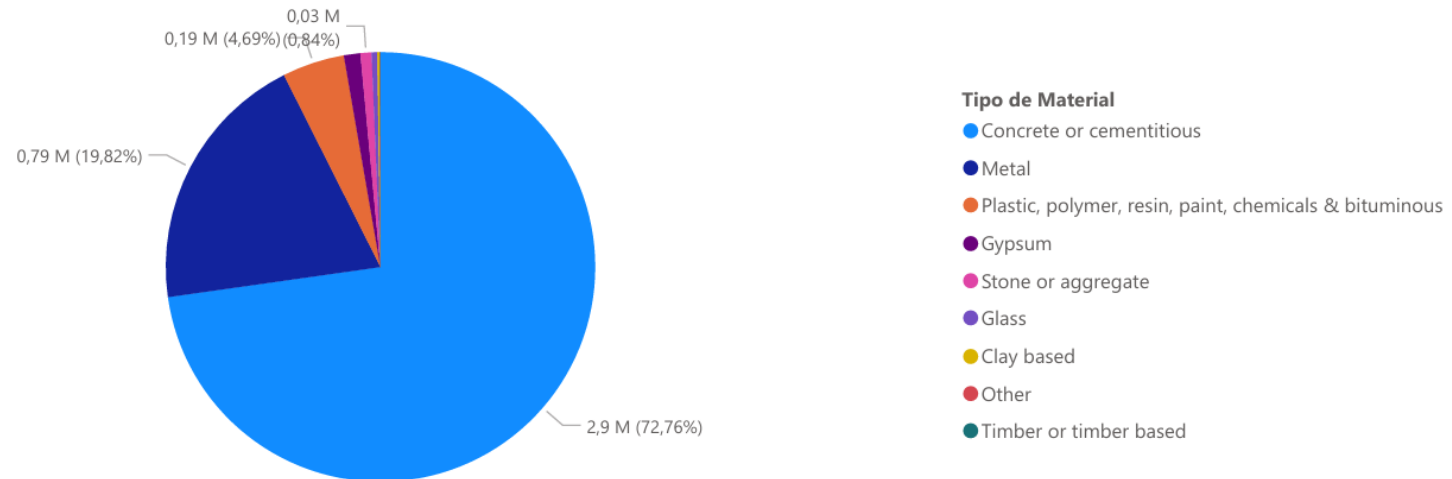


Figura 74 - Estimativa da pegada de carbono do modelo de mecânica

A2.5. ESPECIALIDADE DE ARQUITETURA

Soma de Pegada (kg CO2 eq.) por Tipo de Material



Tipo de Material	Soma de Pegada (kg CO2 eq.)
Clay based	6.434,71
Concrete or cementitious	2.897.222,44
Glass	16.949,02
Gypsum	49.204,81
Metal	789.264,26
Other	2.194,20
Plastic, polymer, resin, paint, chemicals & bituminous	186.641,15
Stone or aggregate	33.257,17
Timber or timber based	716,43
Total	3.981.884,20

Figura 75 - Estimativa da pegada de carbono do modelo de arquitetura

A2.6. ESPECIALIDADE DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS

Soma de Pegada (kg CO2 eq.) por Tipo de Material

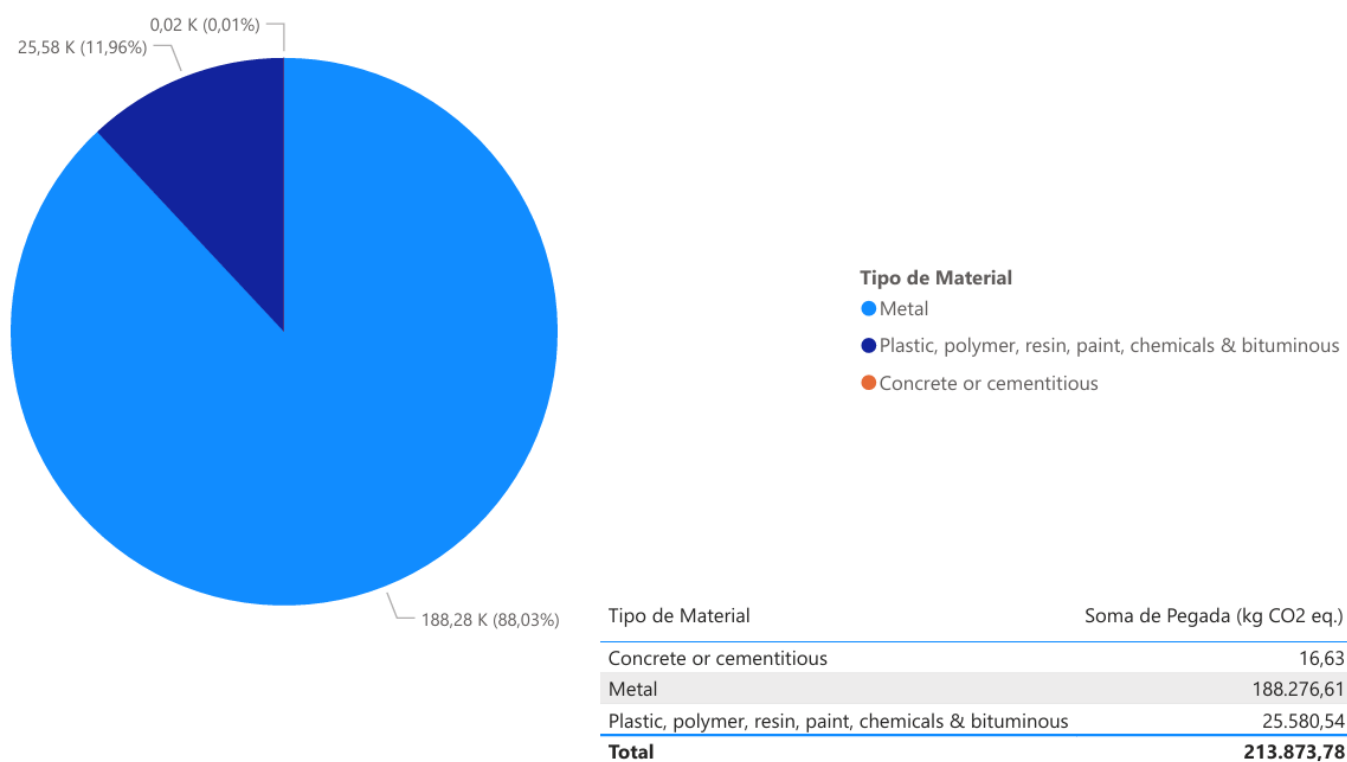


Figura 76 - Estimativa da pegada de carbono do modelo de segurança contra incêndios

