

CÁLCULO COMPARATIVO DA PEGADA CARBÓNICA DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS EM FASE DE PROJETO

ISABELLY SAYURI HISSADOMI DA SILVA

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



Orientadora: Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho

JUNHO DE 2024

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2023/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

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 - 2023/2024 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2024*.

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

“Happiness is not having what you want, but wanting what you have.”

Rabbi Hyman Schachtel

AGRADECIMENTOS

Gostaria de primeiramente expressar minha sincera e eterna gratidão aqueles que foram essenciais no meu percurso até aqui: os meus pais, Reinaldo e Márcia. Sem vocês, nada disso seria possível. Agradeço por todo o amor, apoio e incentivo desde sempre, em absolutamente todos os aspectos da minha vida. Vocês são a minha inspiração diária.

Ao meu parceiro de vida e melhor companhia, Rafael. Agradeço pelo amor, parceria e apoio, não só durante a realização desta dissertação, mas ao longo de todos esses anos. Você foi fundamental na minha jornada. Que privilégio poder crescer ao seu lado e compartilhar este momento!

À Professora Doutora Maria Helena Corvacho, gostaria de agradecer imensamente pela paciência e tempo dedicados a mim. Muito obrigada por partilhar comigo todo esse conhecimento e experiência admiráveis. Sua orientação e apoio foram essenciais para o meu crescimento acadêmico e para o êxito deste trabalho.

Ao Engenheiro Pedro Sarmiento e a toda equipa da FOCO, agradeço imensamente pela hospitalidade, integração e apoio durante o desenvolvimento desta tese. Muito obrigada por dedicarem tempo para me orientar e partilharem o vosso conhecimento. Suas contribuições impulsionaram significativamente o meu progresso, no âmbito da engenharia e da sustentabilidade.

Por fim, aos meus amigos e colegas, que estiveram ao meu lado em cada etapa deste percurso acadêmico, tornando esta jornada mais leve e memorável. Agradeço por seu apoio, companheirismo e por fazerem parte desta conquista.

RESUMO

A presente dissertação propõe uma abordagem fundamentada na necessidade urgente de mitigar os impactos ambientais, sendo o setor da construção civil responsável por uma parcela significativa das emissões globais de GEE. Com base nesse contexto, o trabalho visa desenvolver e validar uma ferramenta para calcular a pegada de carbono de diferentes soluções construtivas em fase de projeto.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica para estabelecer um estudo sólido das práticas de sustentabilidade e das metodologias de análise de ciclo de vida aplicadas à construção civil, além de ferramentas existentes para avaliação da sustentabilidade em edifícios. Essa revisão foi essencial para identificar lacunas nas ferramentas existentes e determinar as melhores práticas a serem incorporadas na nova ferramenta.

A partir desse enquadramento teórico, desenvolveu-se a ferramenta “FOCO₂, *Analyser*” em formato Excel. Essa ferramenta foi projetada para ser intuitiva e acessível, permitindo aos gestores de projetos avaliar e comparar as emissões de gases com efeito de estufa associadas a diferentes materiais e soluções construtivas. Uma base de dados específica foi elaborada para suportar a ferramenta, contendo informações sobre as emissões de CO₂ desde a extração dos materiais até a porta da fábrica, e dados necessários para estimativa de emissões associadas ao transporte dos materiais ao local da construção.

A validação prática da ferramenta foi realizada através de estudos de caso em projetos reais, onde diversas soluções construtivas foram analisadas e comparadas. Os resultados obtidos não apenas corroboraram a eficácia da ferramenta, mas também identificaram áreas de melhoria e ajustes necessários para a melhoria da aplicação.

Além da contribuição prática, a dissertação oferece uma discussão sobre os impactos ambientais da construção civil e propõe direções para futuros desenvolvimentos. Estas incluem a expansão da ferramenta para abranger outros indicadores ambientais além do potencial de aquecimento global, bem como a consideração de todo o ciclo de vida dos materiais, desde a sua produção até ao descarte.

Dessa forma, a dissertação pretende preencher lacunas na avaliação de sustentabilidade na construção, com foco específico em edifícios em Portugal, oferecendo uma ferramenta prática e estruturada para auxiliar na tomada de decisões mais sustentáveis no setor da construção civil. Essa contribuição é essencial frente à urgência global de mitigar as mudanças climáticas e promover práticas construtivas mais responsáveis e eficientes.

PALAVRAS-CHAVE: Potencial de Aquecimento Global, Construção Sustentável, Soluções Construtivas, Avaliação de Ciclo de Vida, Declaração Ambiental de Produto.

ABSTRACT

This dissertation proposes an approach aimed at the urgent need to mitigate environmental impacts, particularly within the construction sector, recognized for its significant contribution to global GWP emissions. In this context, the main objective of the study is to develop and validate a tool for calculating the carbon footprint of various construction solutions during the design phase.

Initially, a comprehensive literature review was conducted to establish a solid understanding of sustainability practices and life cycle analysis methodologies applied to construction, including the evaluation of existing tools. This review was crucial for identifying gaps in available methodologies and determining best practices to be incorporated into the new tool.

Based on this theoretical framework, the “FOCO₂, *Analyser*” tool was developed in Excel format. This tool was designed to be intuitive and accessible, allowing project managers to assess and compare greenhouse gas emissions associated with different materials and construction solutions. A specific database was developed to support the tool, containing detailed information from material extraction to factory gate, as well as data necessary to estimate emissions from material transportation to the construction site.

The practical validation of the tool was conducted through case studies on real projects, where various construction solutions were analyzed and compared. The results not only confirmed the tool's effectiveness but also identified areas for improvement and adjustments to optimize its future application.

In addition to its practical contribution, the dissertation provides an in-depth discussion on the environmental impacts of the construction industry and proposes directions for future developments. These include expanding the tool to cover other environmental indicators beyond global warming potential, as well as considering the entire life cycle of materials, from production to disposal.

Thus, the dissertation not only addresses gaps in sustainability assessment in construction, with a specific focus on buildings in Portugal, but also offers a practical and structured tool to assist in making more sustainable decisions in the construction sector. This contribution is crucial in light of the global urgency to mitigate climate change and promote more responsible and efficient construction practices.

KEYWORDS: Global Warming Potential, Sustainable Construction, Construction Solutions, Life Cycle Assessment, Environmental Product Declaration.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3. METODOLOGIA	2
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
 2. ESTADO DA ARTE	 5
2.1. SUSTENTABILIDADE	5
2.2. PEGADA CARBÓNICA	6
2.3. GASES COM EFEITO DE ESTUFA	6
2.3.1. EFEITO DE ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL	6
2.3.2. <i>GREENHOUSE GAS PROTOCOL (GHG PROTOCOL)</i>	8
2.4. ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E MARCOS INTERNACIONAIS	9
2.4.1. PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC)	9
2.4.2. CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (UNFCCC)	10
2.4.3. PROTOCOLO DE KYOTO	10
2.4.4. ACORDO DE PARIS	10
2.4.5. RESUMO DOS MARCOS INTERNACIONAIS RELACIONADOS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	11
2.5. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL	11
2.5.1. CONCEITO	11
2.5.2. CERTIFICAÇÕES AMBIENTAIS EM EDIFÍCIOS	11
2.5.3. A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO E OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	14
2.5.4. PASSAPORTE DIGITAIS DE PRODUTOS (DPP) E PASSAPORTE DE MATERIAIS (MP)	14
2.5.5. ENQUADRAMENTO NORMATIVO	15
2.5.5.1. EN 15643-2 – Sustentabilidade das obras de construção – Avaliação da sustentabilidade dos edifícios – Parte 2: Enquadramento para avaliação do desempenho ambiental	15

2.5.5.2. EN 15978 – Sustentabilidade das obras de construção – Avaliação do desempenho ambiental dos edifícios – Método de cálculo.....	16
2.6. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	17
2.6.1. CONCEITO	17
2.6.2. ENQUADRAMENTO NORMATIVO: EN ISO 14040 E EM ISO 14044 – GESTÃO AMBIENTAL – AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – PRINCÍPIOS E ENQUADRAMENTO/REQUISITOS E LINHAS DE ORIENTAÇÃO	18
2.6.3. FERRAMENTAS DE CÁLCULO DE ACV	21
2.6.3.1. Introdução	21
2.6.3.2. <i>One Click LCA</i>	22
2.6.3.3. <i>TOTEM</i>	22
2.6.3.4. <i>LCA4Building</i>	23
2.6.3.4. Resumo das Ferramentas Analisadas	23
2.7. DECLARAÇÃO AMBIENTAL DE PRODUTO	24
2.7.1. CONCEITO	24
2.7.2. ENQUADRAMENTO NORMATIVO	24
2.7.2.1. EN ISO 14025 – Rótulos e declarações ambientais – Declarações ambientais Tipo III – Princípios e procedimentos	24
2.7.2.2. EN 15804 – Sustentabilidade das obras de construção – Declarações ambientais dos produtos – Regras de base para as categorias de produto de construção	25
2.8. PRINCIPAIS NORMAS UTILIZADAS.....	27
 3. CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO	 29
3.1. CARACTERIZAÇÃO	29
3.2. FRONTEIRAS DO SISTEMA.....	30
3.3. CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS	30
3.4. FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA.....	32
 4. CASOS DE ESTUDO	 35
4.1. CARACTERIZAÇÃO.....	35
4.2. CASO DE ESTUDO 1: AIRES ORNELAS	36
4.2.1. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO.....	36
4.2.2. COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS.....	37

4.3. CASO DE ESTUDO 2: CASA DO CASTELO MOURÃO	44
4.3.1. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO.....	44
4.3.2. COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS.....	45
4.4. CASO DE ESTUDO 3: ILHAS DA LOMBA	54
4.4.1. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO.....	54
4.4.2. COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS.....	56
 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	 67
5.1. INTRODUÇÃO.....	67
5.2. RESULTADOS DO CASO DE ESTUDO 1: AIRES ORNELAS.....	67
5.3. RESULTADOS DO CASO DE ESTUDO 2: CASA DO CASTELO MOURÃO.....	74
5.4. RESULTADOS DO CASO DE ESTUDO 3: ILHAS DA LOMBA	80
 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	 89
6.1. CONCLUSÕES	89
6.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	90
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Três pilares da sustentabilidade (Elkington, 1994).....	5
Figura 2.2 – Os dezassete Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (United Nations, 2015)	6
Figura 2.3 – Efeito de estufa (Center for Sustainable Systems, University of Michigan, 2023)	7
Figura 2.4 – Concentração de GEE entre 1850 e 2019: dióxido de carbono (CO ₂), metano (CH ₄) e óxido nitroso (N ₂ O) (IPCC, 2023).....	9
Figura 2.5 – Temperatura global da superfície entre 1850 e 2020 (IPCC, 2023).....	10
Figura 2.6 – Categorias avaliadas no sistema de certificação BREEAM	12
Figura 2.7 – Categorias avaliadas no sistema de certificação LEED (GBC Brasil, 2024).....	12
Figura 2.8 – Vertentes avaliadas no sistema de certificação LiderA (LiderA, 2024)	13
Figura 2.9 – Critérios avaliados no sistema de certificação SBToolPT (SBToolPT, 2024)	13
Figura 2.10 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ligados diretamente à construção sustentável. Adaptado de (United Nations, 2015).....	14
Figura 2.11 – Principais categorias de impactos ambientais	15
Figura 2.12 – Parâmetros declarados de utilização de recursos	16
Figura 2.13 – Outras informações adicionais declaradas	16
Figura 2.14 – Módulos incluídos no ciclo de vida de um edifício (EN 15804, 2012)	17
Figura 2.15 – Exemplo de um sistema de produto para ACV (EN ISO 14040, 2006).....	18
Figura 2.16 – Sistema de Produto: produção de blocos de betão (Silva, et al., 2016).....	19
Figura 2.17 – Fases e aplicações da ACV (EN ISO 14040, 2006)	19
Figura 2.18 – Processos unitários e fluxos a serem incluídos no sistema	20
Figura 2.19 – Categorias dos Processos Unitários.....	21
Figura 2.20 – Processos incluídos na avaliação “cradle-to-gate” e “cradle-to-grave” (Solar Decathlon - U.S. Department of Energy, 2024)	25
Figura 2.21 – Informações declaradas no módulo A4 (EN 15804, 2012).....	26
Figura 3.1 – Estrutura da FOCO ₂ Analyser.....	30
Figura 3.2 – Estrutura da base de dados desenvolvida.....	31
Figura 3.3 – Interface de introdução de dados da FOCO ₂ Analyser	33
Figura 3.4 – Apresentação de resultados e comparação do GWP de duas soluções construtivas	34
Figura 4.1 – Fachada principal do edifício existente (Ferreira, 2021).....	36
Figura 4.2 – Pormenor construtivo da cobertura: solução de projeto de “Aires Ornelas”	37
Figura 4.3 – Pormenor construtivo da cobertura: solução alternativa de “Aires Ornelas”	38

Figura 4.4 – Corte horizontal da fachada: solução de projeto de “Aires Ornelas”	39
Figura 4.5 – Corte horizontal da fachada: solução alternativa de “Aires Ornelas”	40
Figura 4.6 – Pormenor construtivo do pavimento intermédio: solução de projeto de “Aires Ornelas” ..	41
Figura 4.7 – Pormenor construtivo do pavimento intermédio: solução alternativa de “Aires Ornelas” ..	42
Figura 4.8 – Pormenor construtivo das paredes interiores: solução de projeto de “Aires Ornelas”	43
Figura 4.9 – Pormenor construtivo das paredes interiores: solução alternativa de “Aires Ornelas”	44
Figura 4.10 – Fotografia do edifício existente (Caleiro, 2022)	45
Figura 4.11 – Modelo 3D do exterior do novo edifício (Caleiro, 2022)	45
Figura 4.12 – Pormenor construtivo da cobertura: solução de projeto de “Casa do Castelo Mourão”. 46	
Figura 4.13 – Pormenor construtivo da cobertura: solução alternativa de “Casa do Castelo Mourão”. 47	
Figura 4.14 – Corte construtivo do mezanino: solução de projeto de “Casa do Castelo Mourão”.	48
Figura 4.15 – Corte construtivo do mezanino: solução alternativa de “Casa do Castelo Mourão”.	48
Figura 4.16 – Comparação das fundações entre a solução de projeto e solução alternativa de “Casa do Castelo Mourão”	49
Figura 4.17 – Pormenor construtivo do pavimento térreo: solução de projeto e alternativa de “Casa do Castelo Mourão”	49
Figura 4.18 – Pormenor construtivo da fachada: solução de projeto de “Casa do Castelo Mourão”	51
Figura 4.19 – Corte horizontal da fachada: solução alternativa de “Casa do Castelo Mourão”	52
Figura 4.20 – Pormenor construtivo das paredes interiores: solução de projeto de “Casa do Castelo Mourão”	53
Figura 4.21 – Pormenor construtivo das paredes interiores: solução alternativa de “Casa do Castelo Mourão”	54
Figura 4.22 – Área de intervenção e edificado existente (Pinto, Cabral, Moura, & Caleiro, 2022)	55
Figura 4.23 – Área de intervenção e modelo 3D do novo edificado (Pinto, Cabral, Moura, & Caleiro, 2022)	55
Figura 4.24 – Modelo 3D da galeria interna (Pinto, Cabral, Moura, & Caleiro, 2022)	56
Figura 4.25 – Pormenor construtivo da cobertura: solução de projeto de “Ilhas da Lomba”	57
Figura 4.26 – Pormenor construtivo da cobertura: solução alternativa de “Ilhas da Lomba”	58
Figura 4.27 – Pormenor construtivo do pavimento intermédio: solução de projeto de “Ilhas da Lomba”	59
Figura 4.28 – Pormenor construtivo do pavimento intermédio: solução alternativa de “Ilhas da Lomba”	60
Figura 4.29 – Pormenor construtivo do pavimento térreo: solução de projeto de “Ilhas da Lomba”	61
Figura 4.30 – Pormenor construtivo do pavimento térreo: solução alternativa de “Ilhas da Lomba”	62
Figura 4.31 – Corte horizontal da fachada: solução de projeto de “Ilhas da Lomba”	63

Figura 4.32 – Corte horizontal da fachada: solução alternativa de “Ilhas da Lomba”	64
Figura 4.33 – Pormenor construtivo das paredes interiores: solução de projeto de “Ilhas da Lomba” .	65
Figura 4.34 – Pormenor construtivo das paredes interiores: solução alternativa de “Ilhas da Lomba” .	66

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Potencial de Aquecimento Global equivalente dos gases com efeito de estufa (IPCC, 2023)	8
Quadro 2.2 – Quadro-Resumo dos principais marcos internacionais relacionado às mudanças climáticas.....	11
Quadro 2.3 – Quadro-Resumo das ferramentas analisadas.	23
Quadro 2.4 – Quadro-Resumo das principais normas utilizadas	27
Quadro 4.1 – Quadro-Resumo dos Casos de Estudo	35
Quadro 4.2 – Cobertura “Aires Ornelas”: dados para avaliação da solução de projeto	38
Quadro 4.3 – Cobertura “Aires Ornelas”: dados para avaliação da solução alternativa	39
Quadro 4.4 – Fachada “Aires Ornelas”: dados para avaliação da solução de projeto	40
Quadro 4.5 – Fachada “Aires Ornelas”: dados para avaliação da solução alternativa	41
Quadro 4.6 – Pavimento intermédio “Aires Ornelas”: dados para avaliação da solução de projeto	41
Quadro 4.7 – Pavimento intermédio “Aires Ornelas”: dados para avaliação da solução alternativa	42
Quadro 4.8 – Paredes interiores “Aires Ornelas”: dados para avaliação da solução de projeto.....	43
Quadro 4.9 – Paredes interiores “Aires Ornelas”: dados para avaliação da solução alternativa	44
Quadro 4.10 – Cobertura “Casa do Castelo Mourão”: dados para avaliação da solução de projeto	46
Quadro 4.11 – Cobertura “Casa do Castelo Mourão”: dados para avaliação da solução alternativa	47
Quadro 4.12 – Mezanino “Casa do Castelo Mourão”: dados para avaliação da solução de projeto	48
Quadro 4.13 – Mezanino “Casa do Castelo Mourão”: dados para avaliação da solução alternativa.....	48
Quadro 4.14 – Pavimento térreo “Casa do Castelo Mourão”: dados para avaliação da solução de projeto.....	50
Quadro 4.15 – Pavimento térreo “Casa do Castelo Mourão”: dados para avaliação da solução alternativa	50
Quadro 4.16 – Fachada “Casa do Castelo Mourão”: dados para avaliação da solução de projeto.....	51
Quadro 4.17 – Fachada “Casa do Castelo Mourão”: dados para avaliação da solução alternativa	52
.....	
Quadro 4.18 – Paredes interiores “Casa do Castelo Mourão”: dados para avaliação da solução de projeto.....	53
Quadro 4.19 – Paredes interiores “Casa do Castelo Mourão”: dados para avaliação da solução alternativa	54
Quadro 4.20 – Cobertura “Ilhas da Lomba”: dados para avaliação da solução de projeto	57
Quadro 4.21 – Cobertura “Ilhas da Lomba”: dados para avaliação da solução alternativa.....	58

Quadro 4.22 – Pavimento intermédio “Ilhas da Lomba”: dados para avaliação da solução de projeto	59
Quadro 4.23 – Pavimento intermédio “Ilhas da Lomba”: dados para avaliação da solução alternativa	60
Quadro 4.24 – Pavimento térreo “Ilhas da Lomba”: dados para avaliação da solução de projeto	61
Quadro 4.25 – Pavimento térreo “Ilhas da Lomba”: dados para avaliação da solução alternativa	62
Quadro 4.26 – Fachada “Ilhas da Lomba”: dados para avaliação da solução de projeto	63
Quadro 4.27 – Fachada “Ilhas da Lomba”: dados para avaliação da solução alternativa	64
.....	
Quadro 4.28 – Paredes interiores “Ilhas da Lomba”: dados para avaliação da solução de projeto	65
Quadro 4.29 – Paredes interiores “Ilhas da Lomba”: dados para avaliação da solução alternativa	66
Quadro 5.1 – Resultados da cobertura “Aires Ornelas”: solução de projeto	68
Quadro 5.2 – Resultados da cobertura “Aires Ornelas”: solução alternativa	69
Quadro 5.3 – Comparação de resultados: cobertura “Aires Ornelas”	69
Quadro 5.4 – Resultados da fachada “Aires Ornelas”: solução de projeto	70
Quadro 5.5 – Resultados da fachada “Aires Ornelas”: solução alternativa	70
Quadro 5.6 – Comparação de resultados: fachada “Aires Ornelas”	71
Quadro 5.7 – Resultados do pavimento intermédio “Aires Ornelas”: solução de projeto	72
Quadro 5.8 – Resultados do pavimento intermédio “Aires Ornelas”: solução alternativa	72
Quadro 5.9 – Comparação de resultados: pavimento intermédio “Aires Ornelas”	72
Quadro 5.10 – Resultados das paredes interiores “Aires Ornelas”: solução de projeto	73
Quadro 5.11 – Resultados das paredes interiores “Aires Ornelas”: solução alternativa	73
Quadro 5.12 – Comparação de resultados: pavimento intermédio “Aires Ornelas”	73
Quadro 5.13 – Resultados da cobertura “Casa do Castelo Mourão”: solução de projeto	74
Quadro 5.14 – Resultados da cobertura “Casa do Castelo Mourão”: solução alternativa	75
Quadro 5.15 – Comparação de resultados: cobertura “Casa do Castelo Mourão”	75
Quadro 5.16 – Resultados do mezanino “Casa do Castelo Mourão”: solução de projeto	76
Quadro 5.17 – Resultados do mezanino “Casa do Castelo Mourão”: solução alternativa	76
Quadro 5.18 – Comparação de resultados: mezanino “Casa do Castelo Mourão”	76
Quadro 5.19 – Resultados do pavimento térreo “Casa do Castelo Mourão”: solução de projeto	77
Quadro 5.20 – Resultados do pavimento térreo “Casa do Castelo Mourão”: solução alternativa	77
Quadro 5.21 – Comparação de resultados: pavimento térreo “Casa do Castelo Mourão”	78
Quadro 5.22 – Resultados da fachada “Casa do Castelo Mourão”: solução de projeto	78
Quadro 5.23 – Resultados da fachada “Casa do Castelo Mourão”: solução alternativa	79
Quadro 5.24 – Comparação de resultados: fachada “Casa do Castelo Mourão”	79

Quadro 5.25 – Resultados das paredes interiores “Casa do Castelo Mourão”: solução de projeto	79
Quadro 5.26 – Resultados das paredes interiores “Casa do Castelo Mourão”: solução alternativa	80
Quadro 5.27 – Comparação de resultados: paredes interiores “Casa do Castelo Mourão”	80
Quadro 5.28 – Resultados da cobertura “Ilhas da Lomba”: solução de projeto	81
Quadro 5.29 – Resultados da cobertura “Ilhas da Lomba”: solução alternativa	81
Quadro 5.30 – Comparação de resultados: cobertura “Ilhas da Lomba”	82
Quadro 5.31 – Resultados do pavimento intermédio “Ilhas da Lomba”: solução de projeto	82
Quadro 5.32 – Resultados do pavimento intermédio “Ilhas da Lomba”: solução alternativa	83
Quadro 5.33 – Comparação de resultados: pavimento intermédio “Ilhas da Lomba”	83
Quadro 5.34 – Resultados do pavimento térreo “Ilhas da Lomba”: solução de projeto	84
Quadro 5.35 – Resultados do pavimento térreo “Ilhas da Lomba”: solução alternativa	84
Quadro 5.36 – Comparação de resultados: pavimento térreo “Ilhas da Lomba”	85
Quadro 5.37 – Resultados da fachada “Ilhas da Lomba”: solução de projeto	85
Quadro 5.38 – Resultados da fachada “Ilhas da Lomba”: solução alternativa	86
Quadro 5.39 – Comparação de resultados: fachada “Ilhas da Lomba”	86
Quadro 5.40 – Resultados das paredes interiores “Ilhas da Lomba”: solução de projeto	87
Quadro 5.41 – Resultados das paredes interiores “Ilhas da Lomba”: solução alternativa	87
Quadro 5.42 – Comparação de resultados: paredes interiores “Ilhas da Lomba”	87

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida, ou LCA – *Life Cycle Assessment*, em inglês

BREEAM – *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*, em inglês

DAP – Declaração Ambiental de Produto, ou EPD - *Environmental Declaration Product*, em inglês

DDP – Passaporte Digitais de Produto

GEE – Gases com Efeito de Estufa

GHG *Protocol* – *Greenhouse Gas Protocol*, em inglês

ICV - Inventário do Ciclo de Vida, ou LCI - *Life Cycle Inventory*, em inglês

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

PAG – Potencial de Aquecimento Global, ou GWP – *Global Warming Potential*, em inglês

RCP – Regras para Categorias de Produto

LEED – *Leadership in Energy and Environmental*, em inglês

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MP – Passaporte de Materiais

UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Devido à crescente consciência dos efeitos das ações humanas no meio ambiente e às mudanças climáticas, a sustentabilidade ambiental é atualmente uma prioridade global. Este cenário tem motivado a adoção de medidas e acordos internacionais, como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, que buscam limitar as emissões de gases com efeito de estufa e mitigar as alterações climáticas.

De acordo com o estudo conduzido pelo *Boston Consulting Group* em colaboração com o *World Economic Forum*, as edificações e infraestruturas contribuem com aproximadamente 40% das emissões globais de carbono a cada ano, totalizando cerca de 15 giga toneladas. Destaca-se que uma parcela substancial dessas emissões ocorre com a produção de materiais de construção representando aproximadamente 15 a 20% desta parcela (Boston Consulting Group; World Economic Forum, 2023).

Perante esse cenário, torna-se imprescindível desenvolver metodologias que auxiliem na avaliação e na promoção de práticas construtivas mais sustentáveis. A indústria da construção, por meio de iniciativas que visam a redução das emissões de carbono e a adoção de materiais e soluções construtivas mais sustentáveis, pode desempenhar um papel importante na promoção de um desenvolvimento mais sustentável e na redução dos efeitos ambientais.

1.2. OBJETIVOS

O presente estudo tem como principal objetivo desenvolver uma ferramenta para o cálculo comparativo da pegada carbônica de diferentes soluções construtivas em fase de projeto. Esta ferramenta deverá ser de fácil utilização, auxiliando os gestores de projeto na tomada de decisões mais sustentáveis e informadas.

Inicialmente, pretende-se realizar um estudo sobre o enquadramento geral da sustentabilidade e das preocupações ambientais, com especial atenção às convenções internacionais que regem estas questões. Este enquadramento fornecerá a base teórica e contextual necessária para compreender a importância e a urgência da redução das emissões de gases com efeito de estufa no setor da construção civil.

Adicionalmente, propõe-se efetuar uma pesquisa e análise das ferramentas de avaliação ambiental atualmente disponíveis, tanto a nível nacional quanto internacional. Esta pesquisa permitirá identificar as lacunas e limitações das ferramentas existentes, bem como as melhores práticas que poderão ser incorporadas no desenvolvimento da nova ferramenta.

Por fim, pretende-se desenvolver uma base de dados contendo informações essenciais para a ferramenta. Esta base de dados deverá incluir informações sobre as emissões de CO₂ associadas à produção de diversos materiais de construção, bem como informações para o cálculo do transporte desses materiais.

1.3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo envolveu diversas etapas para o desenvolvimento da ferramenta destinada ao cálculo da pegada carbónica e comparação de diferentes soluções construtivas em edificações, durante a fase de projeto.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica abordando os conceitos de sustentabilidade e análise do ciclo de vida, proporcionando uma compreensão aprofundada do estado atual do conhecimento nessas áreas e obtendo-se informações fundamentais para o desenvolvimento do estudo. De seguida, a revisão foi direcionada especificamente para o contexto da construção civil, explorando práticas e ferramentas existentes de cálculo de emissões carbónicas, em Portugal e em outras partes do mundo. Essa abordagem permitiu uma análise detalhada das metodologias empregadas nesse campo, facilitando a identificação de lacunas e oportunidades de melhoria.

Com base nas informações adquiridas durante a revisão bibliográfica e análise de lacunas encontradas nas ferramentas existentes, procedeu-se ao desenvolvimento da ferramenta em formato Excel, sendo denominada “FOCO₂, *Analyser*”. Esta foi projetada para ser intuitiva e de fácil utilização, permitindo aos utilizadores calcular as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) associadas a diferentes soluções construtivas. Além disso, foram incorporados recursos gráficos que possibilitam a comparação entre diferentes materiais e soluções construtivas, auxiliando na tomada de decisões mais sustentáveis durante o processo de projeto.

Foi elaborada uma base de dados própria, contendo informações sobre os materiais de construção mais amplamente utilizados. A partir das Declarações Ambientais de Produto (DAP) disponíveis publicamente, obtiveram-se dados do Potencial de Aquecimento Global (PAG) dos diversos tipos de materiais, desde sua extração da matéria-prima à porta da fábrica. Além disso, na base de dados foram incluídos os fatores de emissão dos transportes, levando em conta as emissões por percorrido em diferentes modos de transporte, para o cálculo das emissões do transporte dos materiais entre a fábrica e a obra.

A aplicação da ferramenta foi realizada por meio de casos de estudo de projetos reais, nos quais diferentes soluções construtivas foram analisadas e comparadas em termos de suas emissões carbónicas. Essa aplicação permitiu verificar a eficácia da ferramenta na prática e identificar possíveis melhorias ou ajustes necessários.

Por fim, os resultados obtidos foram analisados e discutidos em relação às suas contribuições para a promoção da sustentabilidade na construção civil. Foram identificadas ainda algumas lacunas no estudo da área e sugeridas direções para trabalhos e desenvolvimentos futuros, visando a contínua melhoria das práticas sustentáveis construtivas.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em 6 capítulos. A estrutura tem o intuito de proporcionar ao leitor uma compreensão clara dos temas abordados, da metodologia utilizada e das conclusões apresentadas.

O primeiro capítulo, de carácter introdutório, tem como objetivo fazer o enquadramento do panorama atual. É apresentada a relevância do desenvolvimento da presente dissertação, como resposta ao cenário atual, abordando também os objetivos e a metodologia adotada neste estudo.

O segundo capítulo pretende introduzir alguns conceitos gerais importantes, tal como marcos internacionais, relacionados com a sustentabilidade, visando proporcionar ao leitor uma melhor compreensão dos temas que serão abordados nos capítulos seguintes. Além disso, são apresentadas as normas internacionais existentes, além de metodologias e ferramentas existentes para a contabilização de emissões carbónicas, com o intuito de identificar de lacunas nas metodologias existentes, visando a melhoria na ferramenta desenvolvida.

O terceiro capítulo tem o propósito de introduzir a ferramenta, apresentando os métodos utilizados, bem como os seus limites. Além disso, é apresentada a base de dados desenvolvida.

O quarto capítulo, por sua vez, apresenta os diversos casos de estudo e as soluções construtivas a serem analisadas.

No quinto capítulo, é feita a apresentação e discussão dos resultados obtidos após a aplicação aos diferentes casos de estudo da ferramenta desenvolvida.

Por fim, no sexto e último capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas com os resultados dos casos de estudo e com o desenvolvimento da dissertação, bem como uma apresentação de sugestões de trabalhos futuros de maneira a contribuir para o aprimoramento da ferramenta desenvolvida, o aumento da sustentabilidade na construção e consequente mitigação das emissões carbónicas e alterações climáticas.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. SUSTENTABILIDADE

Conforme a bem conhecida definição adotada pela Comissão Brundtland das Nações Unidas em 1987, a sustentabilidade consiste na “capacidade de satisfazer as nossas necessidades no presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades”. Essa definição ressalta a importância de considerar não apenas os impactos imediatos das nossas ações, mas também os efeitos a longo prazo sobre o ambiente. (World Commission on Environment and Development, 1987)

O conceito de sustentabilidade frequentemente é associado exclusivamente à sua dimensão ambiental. No entanto, a sustentabilidade engloba também outras duas dimensões essenciais: a econômica e a social. Esta abordagem, conhecida como “*Triple Bottom Line*” (Figura 2.1), foi introduzida por John Elkington. Neste modelo, é proposto que as empresas não devem considerar apenas o seu lucro financeiro, mas também os seus impactos na sociedade e no meio ambiente. (Elkington, 1994)



Figura 2.1 – Três pilares da sustentabilidade (Elkington, 1994).

Uma manifestação concreta do compromisso global com a sustentabilidade é a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, aprovada pelas Nações Unidas em 2015. Nesta agenda, foram definidos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), ilustrada na Figura 2.2, que abordam diversos aspectos das três dimensões da sustentabilidade, desde a redução das desigualdades, a igualdade de gênero até à ação climática. Esses objetivos fornecem uma estrutura para orientar os esforços globais em direção a um futuro mais sustentável e equitativo (United Nations, 2015).



Figura 2.2 – Os dezassete Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (United Nations, 2015).

2.2. PEGADA CARBÓNICA

O conceito de pegada carbónica surge estreitamente relacionado com o conceito de pegada ecológica, este último foi pioneiramente definido, na década de 90, pelos cientistas William E. Rees e Mathis Wackernagel. A pegada ecológica, conforme descrita por Rees e Wackernagel, representa “a área de terra e água necessária para sustentar um determinado estilo de vida, levando em conta o consumo de recursos naturais e a absorção de resíduos” (William Rees, 1996).

A pegada carbónica, por sua vez, é objeto de diferentes definições dependendo do autor. Segundo a entidade Carbon Trust, a pegada carbónica define-se como uma medida da quantidade de gases com efeito de estufa ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas e fabricação até à sua utilização e reutilização final, reciclagem ou eliminação (Carbon Trust, 2018). Os autores Wiedmann e Minx definem-na como “uma medida da quantidade total exclusiva de emissões de dióxido de carbono direta e indiretamente causada por uma atividade ou acumulada durante as fases de vida de um produto” (Wiedmann & Minx, 2008). Já, Wright et al. consideram não só às emissões de CO₂, como também de CH₄ (Wright, Kemp, & Williams, 2011).

2.3. GASES COM EFEITO DE ESTUFA

2.3.1. EFEITO DE ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL

O efeito de estufa é um fenómeno natural, que desempenha um papel fundamental na regulação das condições climáticas e das temperaturas médias necessárias para sustentar a vida no planeta. Quando a radiação solar atinge a Terra, aproximadamente um terço é refletido diretamente de volta ao espaço, enquanto os dois terços restantes são absorvidos pela superfície terrestre e, em menor medida, pela atmosfera. Uma parte dessa radiação absorvida pela superfície terrestre é posteriormente irradiada de volta para atmosfera. No entanto, certos gases presentes na atmosfera capturam e retêm o calor, agindo como uma cobertura térmica que mantém o calor próximo da superfície, semelhante ao efeito de uma estufa, sendo assim denominados “gases com efeito de estufa” (IPCC, 2007).

Os gases com efeito de estufa, conforme estabelecido no Protocolo de Kyoto, são o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), o hexafluoreto de enxofre (SF₆) e duas famílias

de gases, hidrofluorcarbonetos (HFCs) e perfluorcarbonetos (PFCs). Estes gases, em quantidades adequadas, desempenham um papel crucial no equilíbrio climático do planeta (United Nations, 1997).

No entanto, o problema surge quando as atividades humanas causam um aumento na concentração desses gases na atmosfera, amplificando o efeito de estufa e levando ao fenômeno conhecido como aquecimento global. Este refere-se ao aumento progressivo da temperatura média terrestre, provocado principalmente pela libertação excessiva de gases com efeito de estufa resultante da queima de combustíveis fósseis, deflorestação, atividades industriais e outras práticas humanas (IPCC, 2007).

A Figura 2.3 ilustra de forma clara este fenômeno, em que compara os cenários entre o efeito de estufa natural e o efeito de estufa ampliado pelas atividades humanas.

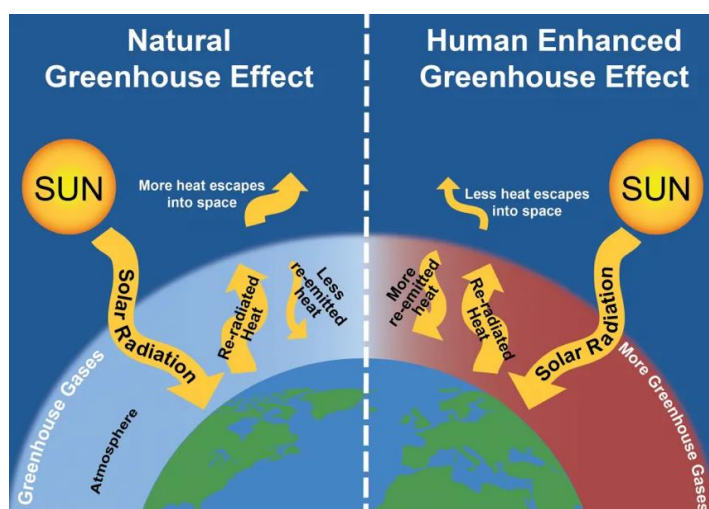


Figura 2.3 – Efeito de estufa (Center for Sustainable Systems, University of Michigan, 2023).

Conforme abordado anteriormente, grande parte da emissão de gases com efeito de estufa está relacionada com as atividades da construção civil, incluindo a extração de matérias-primas, a produção de materiais de construção, o transporte até a fábrica e até o local da obra, bem como os processos construtivos e a utilização do edifício. Estas atividades representam uma significativa contribuição para as emissões de gases com efeito de estufa, destacando a importância de práticas mais sustentáveis no setor da construção para mitigar os impactos ambientais associados (IPCC, 2023).

O indicador Potencial de Aquecimento Global (PAG), também frequentemente referido pela sua sigla em inglês, GWP (*Global Warming Potential*), é comumente expresso em quilogramas de CO₂ equivalente (kgCO₂e. ou kgCO₂eq.). Essa medida estabelece uma equivalência em termos de potencial de aquecimento global entre os gases com efeito de estufa, permitindo uma avaliação do impacto total causado por esses gases ao longo de um determinado período.

Essa equivalência deve ser feita uma vez que, devido às suas propriedades e seu tempo expectável de vida na atmosfera, alguns gases possuem uma contribuição mais significativa para o efeito de estufa do que outros. O Potencial de Aquecimento Global equivalente é uma métrica utilizada para quantificar a capacidade de um gás em reter energia em comparação com a emissão de 1 quilograma de CO₂. Isso significa que, o PAG indica quantas vezes um gás é mais potente em reter calor do que o dióxido de carbono, que é usado como referência com um PAG de 1. O Quadro 2.1, baseado em pesquisas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), apresenta o PAG a 100

anos de diversos gases com efeito de estufa. De acordo com este quadro, o PAG do N₂O é de 273, o que indica que a emissão de uma tonelada de N₂O tem o mesmo impacto no aquecimento global que 273 toneladas de CO₂ ao longo de um período de 100 anos (APA Ambiente, 2018).

Quadro 2.1 – Potencial de Aquecimento Global equivalente dos gases com efeito de estufa (IPCC, 2023).

Gás	AR6 – PAG 100
CO ₂	1
CH ₄ (fóssil)	28.8
CH ₄ (não fóssil)	27.0
N ₂ O	273
HFC-32	771
HFC-134a	1526
CFC-11	6226
PFC-14	7380

2.3.2. GREENHOUSE GAS PROCOTOCOL (GHG PROTOCOL)

O *Greenhouse Gas Protocol* é uma metodologia globalmente reconhecida para a quantificação e gestão das emissões de gases com efeito de estufa. Desenvolvido pelo *World Resources Institute* (WRI) e pelo *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), o *GHG Protocol* oferece um conjunto de regras e diretrizes que orientam empresas, governos e outras organizações a medir, gerenciar e relatar suas emissões de GEE de maneira consistente e transparente. A adoção desses padrões facilita a comparabilidade e credibilidade dos dados de emissões, essencial para a formulação de estratégias eficazes para a redução das emissões (GHG Protocol, 2024).

O *GHG Protocol* é dividido em várias normas específicas que atendem a diferentes necessidades de relato de emissões. As mais importantes incluem a *Corporate Standard*, que foca na contabilidade e reporte de emissões ao nível corporativo e a *Corporate Value Chain (Scope 3) Standard*, que fornece orientações detalhadas para quantificar e relatar as emissões indiretas na cadeia de valor.

Além delas, destaca-se ainda o *Product Life Cycle Standard*, que se dedica à quantificação das emissões de GEE ao longo do ciclo de vida dos produtos. Esta norma está em conformidade com as normas internacionais EN ISO 14040 e EN ISO 14044, que estabelecem os princípios e a estrutura para a Avaliação do Ciclo de Vida de sistemas de produtos, que serão mais bem discutidas no ponto 2.6.2. O *Product Life Cycle Standard* complementa essas normas ao fornecer metodologias detalhadas específicas para a contabilização das emissões de GEE (World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2011).

Além das normas, o *GHG Protocol* fornece ferramentas e diretrizes específicas para calcular as emissões relacionadas ao transporte, como fatores de emissão que consideram o tipo de veículo, capacidade de carga e distância percorrida.

2.4. ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E MARCOS INTERNACIONAIS

2.4.1. PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Um marco importante para a sustentabilidade foi a formação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, em 1988, como um órgão das Nações Unidas dedicado à avaliação do conhecimento científico sobre as mudanças climáticas. No ano de 1990, foi publicado o primeiro relatório do IPCC, que alertou sobre o aumento das concentrações de gases com efeito de estufa na atmosfera e seu papel no aquecimento global (IPCC, 1990).

O IPCC é atualmente uma autoridade internacional no âmbito das mudanças climáticas, produzindo relatórios de avaliação que sintetizam o conhecimento científico atual sobre o assunto, além de avaliar seus impactos e riscos futuros. Seu mais recente relatório, o Sexto Relatório de Avaliação (AR6), publicado em 2023, apresenta gráficos e dados que destacam as tendências alarmantes nas concentrações de gases com efeito de estufa e nas temperaturas globais superficiais ao longo das últimas décadas, evidenciando a urgência da crise climática (IPCC, 2023).

Ao analisar as Figuras 2.4 e 2.5, é evidente o aumento nas concentrações de gases com efeito de estufa a partir de 1950, correlacionado com um crescimento significativo nas temperaturas globais no mesmo período. De acordo com o AR6, observou-se um aumento de 1,1°C na temperatura média global durante o período entre 2011-2020 em comparação com o período de 1850-1900 (IPCC, 2023).

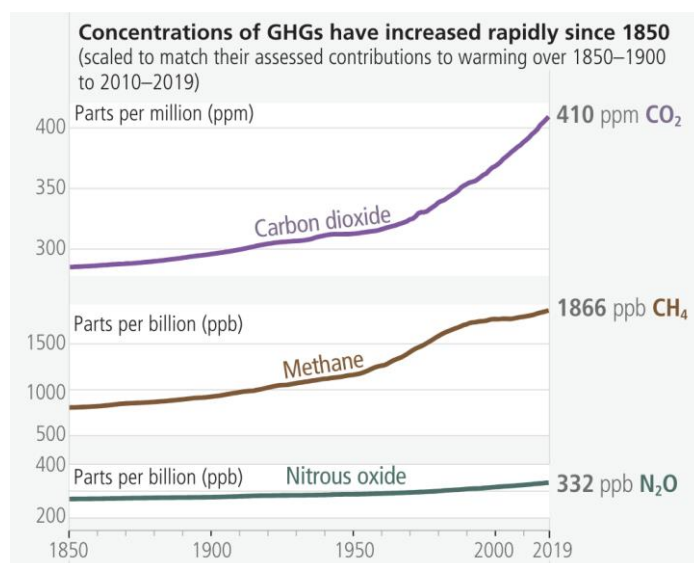


Figura 2.4 – Concentração de GEE entre 1850 e 2019: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2023).

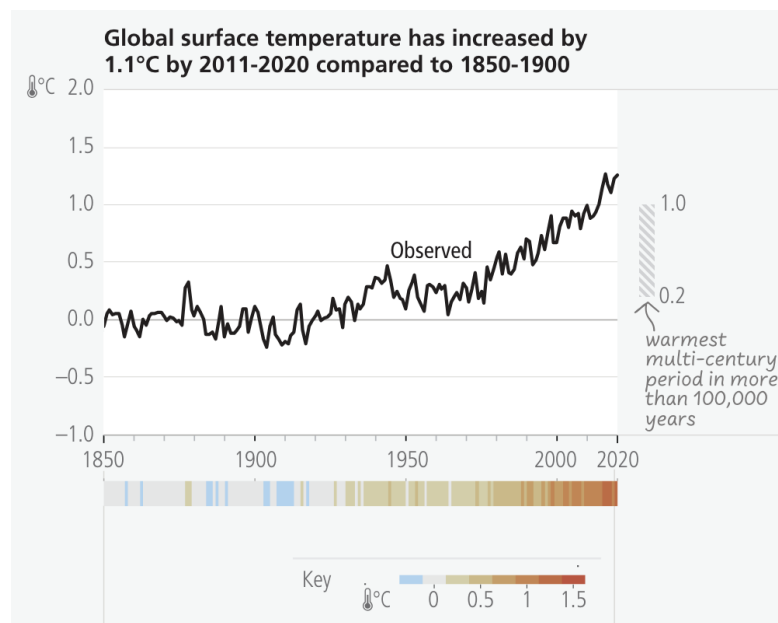


Figura 2.5 – Temperatura global da superfície entre 1850 e 2020 (IPCC, 2023).

2.4.2. CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (UNFCCC)

Em 1992, na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, também conhecida como ECO-92, no Rio de Janeiro, líderes mundiais assinaram a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Embora conferências anteriores tenham tratado de diversas questões ambientais, este evento foi um marco histórico sendo a primeira iniciativa global a abordar especificamente as preocupações com as mudanças climáticas em escala global. A UNFCCC delineou um caminho para a cooperação internacional em relação às mudanças climáticas e estabeleceu as bases para os acordos subsequentes, como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris.

2.4.3. PROTOCOLO DE KYOTO

Assinado em 1997 durante a Terceira Conferência das Partes (COP3) da UNFCCC, o Protocolo de Kyoto foi mais um marco histórico na luta contra as mudanças climáticas. Este tratado internacional foi o primeiro a estabelecer metas obrigatórias para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, tendo-se como objetivo de alcançar uma redução de 5% em relação aos níveis de 1990, entre os anos de 2008 e 2012 (United Nations, 1997).

2.4.4. ACORDO DE PARIS

Durante a 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC, realizada em 2015, foi assinado o Acordo de Paris, um dos acordos internacionais mais importantes no âmbito da mitigação das alterações climáticas. Este acordo estabeleceu um compromisso global de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, visando conter “o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços adicionais para limitá-lo a 1,5°C” (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2016).

No entanto, apesar dos esforços internacionais, as emissões de gases com efeito de estufa atingiram um novo recorde em 2022 e continuaram a crescer em 2023. O Relatório sobre a Lacuna de Emissões de 2023 revelou que, em setembro do mesmo ano, as temperaturas médias globais estavam 1,8°C acima dos níveis pré-industriais. Adicionalmente, constatou que, para atingir o objetivo de limitar o aquecimento global a 2°C, as emissões projetadas para 2030 precisam ser reduzidas em 28 por cento, enquanto para o cenário mais ambicioso de 1,5°C, essa redução deve chegar a 42 por cento as emissões de gases com efeito de estufa previstas para 2030 devem cair 28 por cento para alcançar o objetivo de limitar o aquecimento global a 2°C, e 42 por cento para o caminho mais ambicioso de 1,5°C (United Nations Environment Programme, 2023).

2.4.5. RESUMO DOS MARCOS INTERNACIONAIS RELACIONADOS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Para facilitar a compreensão dos principais marcos internacionais relacionados às mudanças climáticas, o Quadro 2.2 apresenta um resumo das informações mais relevantes.

Quadro 2.2 – Quadro-Resumo dos principais marcos internacionais relacionado às mudanças climáticas.

Marcos históricos	Ano	Informações mais relevantes
Formação do IPCC	1988	Autoridade internacional no âmbito das mudanças climáticas, que produz relatórios de avaliação que sintetizam o conhecimento científico atual sobre o assunto
UNFCCC	1992	Primeira iniciativa global a abordar especificamente as preocupações com as mudanças climáticas em escala global
Protocolo de Kyoto	1997	Primeiro tratado a estabelecer metas obrigatórias para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, tendo-se como objetivo de alcançar uma redução de 5% em relação aos níveis de 1990, entre os anos de 2008 e 2012
Acordo de Paris	2015	Compromisso global de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, visando conter “o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços adicionais para limitá-lo a 1,5°C”

2.5. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

2.5.1. CONCEITO

O conceito de “construção sustentável” foi introduzido por Charles Kibert, professor e acadêmico pioneiro no setor da construção sustentável, durante a Primeira Conferência Internacional sobre Construção Sustentável, realizada na Flórida, Estados Unidos, em 1994. Kibert descreveu a construção sustentável como “a criação e manutenção responsáveis de um ambiente construído saudável, baseado na utilização eficiente de recursos e em princípios ecológicos” (Kibert, 1994).

2.5.2. CERTIFICAÇÕES AMBIENTAIS DE EDIFÍCIOS

No contexto da construção sustentável, as certificações ambientais promovem práticas construtivas mais sustentáveis, desempenhando um papel importante na concretização dos princípios definidos por

Kibert. Destacam-se, por exemplo, as certificações internacionais *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM) e *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED).

O BREEAM, criado em 1990, no Reino Unido, pela *Building Research Establishment Limited* (BRE Global) e amplamente adotado, sobretudo na Europa, avalia e classifica edifícios com base em critérios ambientais, diferenciando-se pelas 12 categorias avaliadas, conforme ilustrado na Figura 2.6, e atribuindo diferentes níveis de classificação que variam de *Pass* a *Outstanding* (em português, suficiente a excepcional), dependendo da pontuação alcançada.



Figura 2.6 – Categorias avaliadas no sistema de certificação BREEAM.

O LEED, por sua vez, foi criado nos Estados Unidos, em 1998, pela *United States Green Building Council* (USGBC), com o objetivo de aprimorar a eficiência energética dos edifícios, reduzir as emissões de carbono e promover ambientes saudáveis para os utilizadores. O LEED é um sistema de certificação internacionalmente reconhecido, que avalia o desempenho ambiental de edifícios em nove categorias principais, ilustradas na Figura 2.7, e atribui certificações em quatro níveis - Certificado, Prata, Ouro e Platina - com base nos pontos acumulados em cada categoria avaliada (USGBC, 2024).



Figura 2.7 – Categorias avaliadas no sistema de certificação LEED (GBC Brasil, 2024).

Além desses sistemas internacionais, Portugal também possui sistemas de certificação ambiental de edifícios, como o LiderA e o *SBTool^{PT}*.

Criado em 2005, o LiderA, que se traduz por “Liderar pelo Ambiente para a construção sustentável”, avalia o desempenho dos edifícios desde a conceção até à utilização, seguindo seis vertentes e diferentes critérios, conforme ilustrados na Figura 2.8, atribuindo diferentes níveis de classificação, que vão de E a A+, de acordo com o desempenho em cada critério avaliado. Além disso, oferece orientação e assessoria para projetistas interessados em promover a sustentabilidade na construção, auxiliando na identificação de soluções sustentáveis, análise de viabilidade e apoio do desenvolvimento dessas soluções (LiderA, 2024).



Figura 2.8 – Vertentes avaliadas no sistema de certificação LiderA (LiderA, 2024).

Por fim, o *SBTool^{PT}* é uma certificação baseada no sistema de avaliação internacional *SBTool*, adaptada ao contexto português, que permite uma avaliação da sustentabilidade dos edifícios, contemplando as dimensões ambiental, social e económica, ao longo de todo o ciclo de vida do edifício, avaliando múltiplos parâmetros incluídos em categorias, conforme definidos na Figura 2.9. Adicionalmente, possui versões como o *SBTool^{PT}*-H direcionado a edifícios residenciais (Mateus & Bragança, 2011) e o *SBTool^{PT}*-UP, direcionado à promoção da sustentabilidade urbana (Bragança, 2017).



Figura 2.9 – Critérios avaliados no sistema de certificação *SBTool^{PT}* (SBToolPT, 2024).

2.5.3. A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO E OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Considerando o impacto da construção no meio ambiente, conforme foi abordado anteriormente, a indústria da construção pode desempenhar um papel significativo no contexto dos ODS, podendo estar relacionada direta ou indiretamente com os diversos objetivos definidos.

Neste contexto, ao fazer escolhas mais conscientes de materiais de construção e soluções construtivas, seguindo os princípios da construção sustentável, é possível contribuir diretamente com os seguintes ODS:

- Objetivo 7 – Energias Renováveis e Acessíveis
- Objetivo 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis
- Objetivo 12 – Produção e Consumo Sustentáveis
- Objetivo 13 – Ação Climática
- Objetivo 15 – Proteger a Vida Terrestre

A Figura 2.10 ilustra alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável diretamente ligados à construção sustentável.



Figura 2.10 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ligados diretamente à construção sustentável. Adaptado de (United Nations, 2015).

2.5.4. PASSAPORTE DIGITAL DE PRODUTOS (DPP) E PASSAPORTES DE MATERIAIS (MP)

Em 2022, a União Europeia propõe um regulamento destinado a estabelecer uma estrutura para definir requisitos visando produtos sustentáveis, baseado no Pacto Ecológico Europeu e no Plano de Ação para a Economia Circular. Uma das ferramentas propostas é o passaporte digital de produtos, projetado para fornecer transparência e informações ampliadas aos consumidores e empresas sobre os aspectos ambientais e de sustentabilidade dos produtos disponíveis no mercado da União Europeia, fornecendo informações como origem, durabilidade e composição dos produtos, bem como seu potencial para reutilização, reparação ou desmontagem (European Commission, 2022).

Os passaportes de materiais, por sua vez, são documentos digitais que contêm informações detalhadas sobre produtos e materiais utilizados em edifícios, incluindo dados sobre sustentabilidade e circularidade. Ao fornecer acesso a informações específicas e rastreáveis, esses passaportes visam aprimorar a transparência e a gestão de recursos ao longo do ciclo de vida dos produtos e materiais. Embora atualmente seu uso não seja obrigatório, há planos para torná-los obrigatórios no futuro. A

implementação generalizada desses passaportes promete melhorar significativamente o acesso a informações sobre produtos, a rastreabilidade ao longo da cadeia de valor e a avaliação do valor e potencial de reutilização dos materiais (Honic, Meda Magalhães, & Van den Bosch, 2024).

2.5.5. ENQUADRAMENTO NORMATIVO

2.5.5.1. EN 15643-2 - Sustentabilidade das obras de construção - Avaliação da sustentabilidade dos edifícios - Parte 2: Enquadramento para a avaliação do desempenho ambiental

A EN 15643 faz parte de uma série de normas que aborda a sustentabilidade das obras de construção, focada na avaliação da sustentabilidade dos edifícios, que devem englobar as três dimensões da sustentabilidade. Dividida em 4 partes, a Parte 1 estabelece os princípios gerais para essa avaliação, enquanto a Parte 2 fornece um conjunto de diretrizes para avaliar o desempenho ambiental dos edifícios. Já, as Partes 3 e 4 focam-se nos aspetos económicos e sociais, respetivamente (EN 15643-1, 2014).

O objetivo principal da EN 15643-2 é estabelecer um conjunto de diretrizes para avaliar o desempenho ambiental dos edifícios. Para a avaliação, deve ser considerado o “equivalente funcional” de um edifício, onde é definida informações como o tipo de edifício, o padrão de utilização, requisitos técnicos e funcionais, além da vida útil, permitindo uma abordagem consistente e comparável em diferentes contextos e regiões. A avaliação inclui não só os impactos relacionados aos materiais de construção do edifício, como também os relacionados com a operação do edifício, como consumo de energia para aquecimento, arrefecimento, ventilação, aquecimento de água, iluminação, entre outros (EN 15643-2, 2014).

Para descrever o desempenho ambiental do edifício, são utilizados não só os indicadores das categorias de impactos ambientais, como também os indicadores de utilização de recursos e outras informações adicionais.

As Figuras 2.11 a 2.13 ilustram os indicadores avaliados no desempenho ambiental dos edifícios.

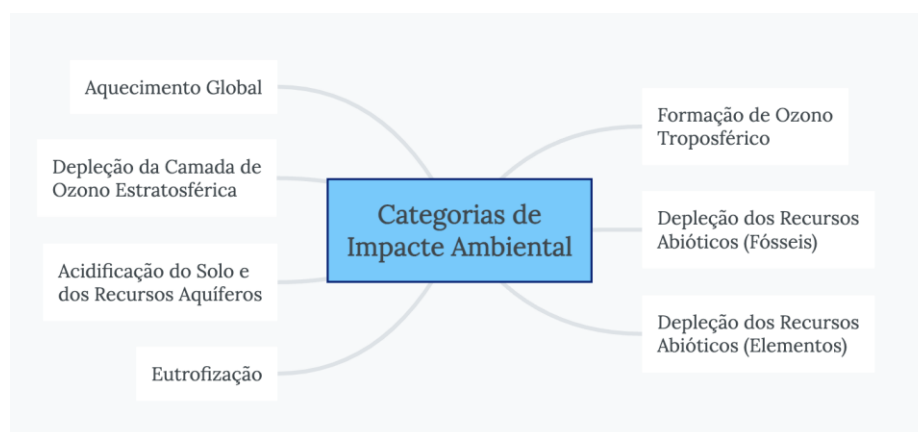


Figura 2.11 – Principais categorias de impactos ambientais.

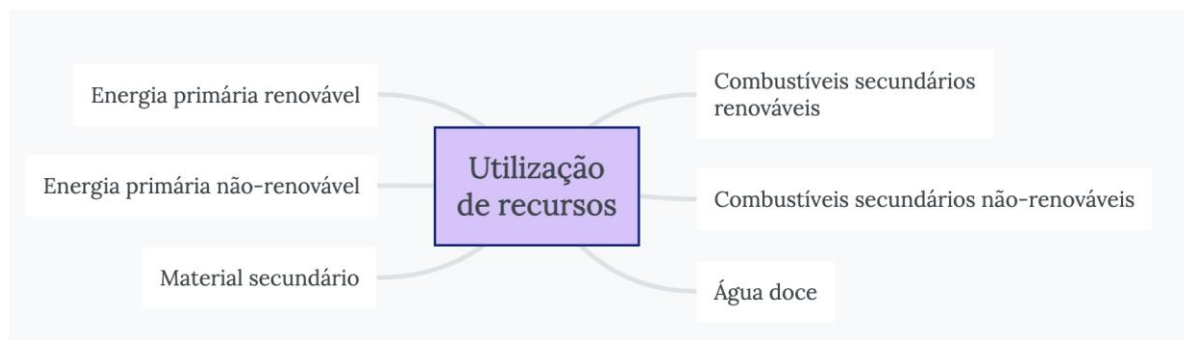


Figura 2.12 – Parâmetros declarados de utilização de recursos.

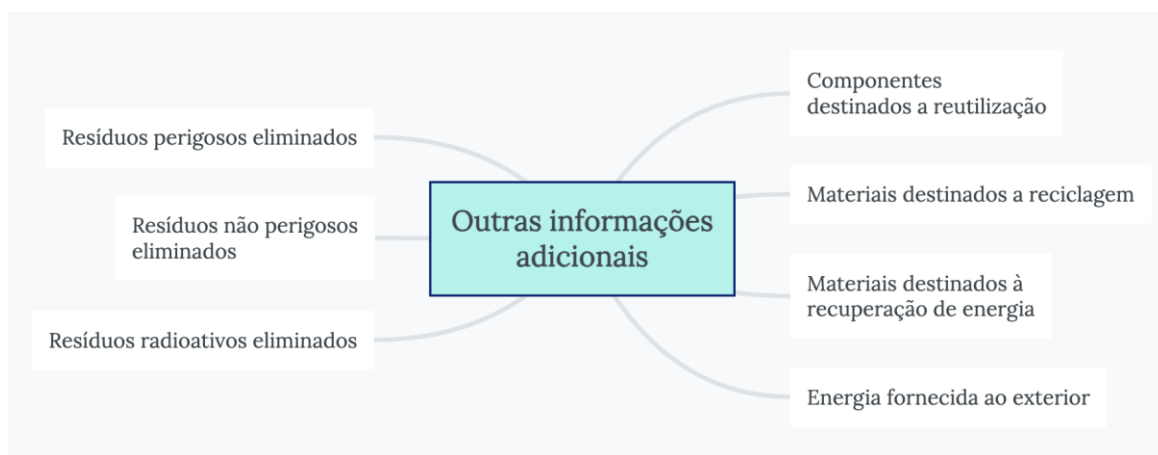


Figura 2.13 – Outras informações adicionais declaradas.

2.5.5.2. EN 15978 - Sustentabilidade das obras de construção - Avaliação do desempenho ambiental dos edifícios - Método de cálculo

Enquanto a EN 15643-2 estabelece o enquadramento geral e os princípios para avaliar o desempenho ambiental dos edifícios, a EN 15978 concentra-se nos métodos específicos de cálculo para essa avaliação. Esta norma delineia um método de cálculo baseado na Avaliação do Ciclo de Vida, que será mais bem explorada no próximo ponto, para avaliar o desempenho ambiental de um edifício e fornece orientações para comunicar os resultados dessa avaliação. Aplicável a edifícios novos, existentes e projetos de reabilitação, a EN 15978 requer a definição de informações como equivalente funcional, período de referência de estudo e as fronteiras do sistema (EN 15643-2, 2014) (EN 15978, 2019).

A norma faz referência aos diferentes módulos que se referem às diferentes etapas do ciclo de vida de um edifício (Figura 2.14).

Os módulos A1-A3 correspondem à Etapa de Produto, abrangendo a extração de matérias-primas (A1), o transporte até a fábrica (A2) e a fabricação do produto (A3).

Os módulos A4-A5 referem-se à Etapa do Processo de Construção, no qual são considerados o transporte do produto de construção da fábrica até ao estaleiro e o transporte dos equipamentos de construção (A4), bem como os processos de construção e instalação no edifício (A5).

Os módulos B1-B5 representam a Etapa de Utilização relacionados com os elementos construtivos, incluindo utilização e aplicação do produto (B1), manutenção (B2), reparação (B3), substituição (B4) e renovação (B5).

Os módulos B6-B7 referem-se à Etapa de Utilização relacionados com a utilização do edifício, considerando o uso operacional de energia (B6) e de água (B7).

Os módulos C1-C4 abordam a Etapa de Fim de Vida, considerando os processos de desconstrução e demolição (C1), transporte dos resíduos para processamento (C2), processamento para reutilização, recuperação ou reciclagem (C3) e eliminação (C4).

Há ainda um módulo adicional, D, que avalia benefícios e cargas além da fronteira do sistema, incluindo potencial reutilização, recuperação e/ou reciclagem.

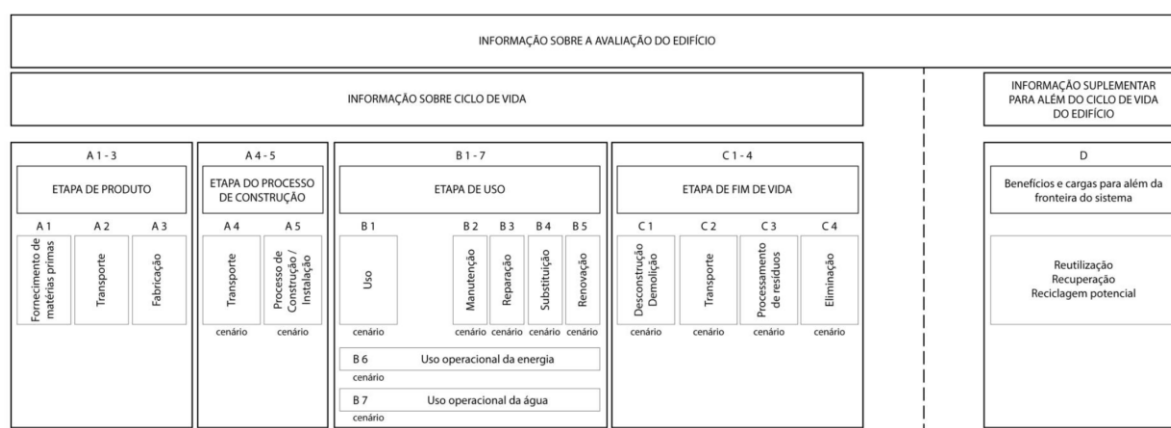


Figura 2.14 – Módulos incluídos no ciclo de vida de um edifício (EN 15804, 2012).

Para a avaliação ambiental do edifício, é essencial definir cenários (ver ponto 2.7.2.2) que representem pressupostos, sejam eles assumidos, estimados ou baseados em medições reais. Esses cenários devem ser descritos e documentados, deixando claro quais pressupostos estão sendo adotados e os limites de sua aplicação dentro do contexto do edifício e ao longo de seu ciclo de vida.

2.6. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

2.6.1. CONCEITO

A Avaliação do Ciclo de Vida, também chamado em seu termo em inglês, *Life Cycle Assessment* (LCA), é uma metodologia utilizada para avaliar o impacto ambiental de um sistema de produto ao longo de todo o seu ciclo de vida, que engloba a extração de matérias-primas, a produção, a utilização, o tratamento de fim de vida e o seu descarte final. A ACV desempenha um papel importante na identificação de oportunidades para melhorar o desempenho ambiental dos produtos ao longo do seu ciclo de vida (EN ISO 14040, 2006).

Embora este estudo dê maior ênfase ao potencial de aquecimento global, é importante ressaltar que a ACV abrange uma variedade de impactos ambientais associados ao ciclo de vida de produtos ou serviços. Além do potencial de aquecimento global, a ACV também considera outros impactos ambientais, como o potencial de depleção da camada de ozono estratosférica, a acidificação do solo e dos recursos aquíferos, entre outros, que podem ser consultados na Figura 2.11 (EN 15804, 2012).

2.6.2. ENQUADRAMENTO NORMATIVO: EN ISO 14040 E EN ISO 14044 - GESTÃO AMBIENTAL - AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - PRINCÍPIOS E ENQUADRAMENTO/REQUISITOS E LINHAS DE ORIENTAÇÃO

A norma EN ISO 14040 descreve os princípios e o enquadramento da Avaliação do Ciclo de Vida de um sistema de produto, introduzindo conceitos fundamentais de modo a garantir a qualidade e consistência dos estudos. A norma EN ISO 14044 complementa a EN ISO 14040, fornecendo requisitos específicos e diretrizes detalhadas para a realização da ACV. Este ponto pretende resumir os principais conceitos e diretrizes fornecidos pelas normas.

Um sistema de produto, conforme definido pelas normas, consiste num “conjunto de processos unitários com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas, e que modelam o ciclo de vida de um produto”.

A Figura 2.15 apresenta um exemplo de sistema de produto para a ACV. Nesse sistema, os fluxos elementares representam o uso de recursos naturais, bem como as emissões e descargas para o ambiente (ar, água e solo). Os fluxos de produtos, por sua vez, incluem entradas e saídas de outros sistemas de produtos ligados ao processo principal, como por exemplo, matérias-primas provenientes de outros sistemas, assim como materiais destinados à reutilização em diferentes contextos.

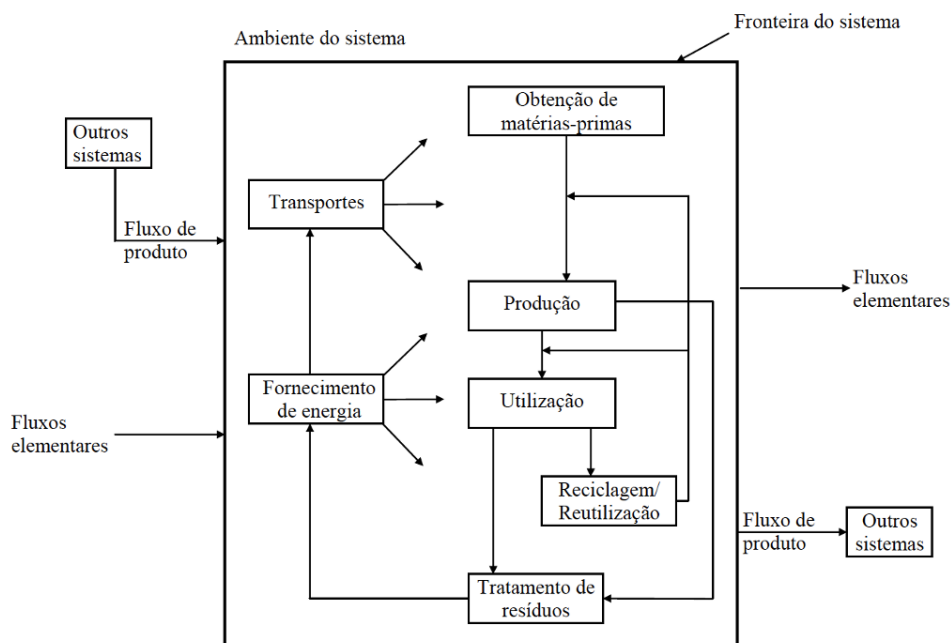


Figura 2.15 – Exemplo de um sistema de produto para ACV (EN ISO 14040, 2006).

Para facilitar a compreensão, podemos analisar um exemplo aplicado no âmbito na construção civil: o sistema de produto da produção de blocos de betão, ilustrado na Figura 2.16.

Na Figura, é possível verificar de forma clara os diversos fluxos:

- Fluxos elementares (chamado pelos autores de “Fluxo de energia” e “Fluxo da natureza”)
 - *Inputs*: produção de energia elétrica, água (poço)

- *Outputs*: efluentes, água evaporada
- Fluxos de produto (chamado pelos autores de “Fluxo de material”):
 - *Inputs*: produção de cimento, produção de areia, produção de brita/pó de pedra, etc.
 - *Outputs*: resíduos para aterro inerte, resíduos para incineração

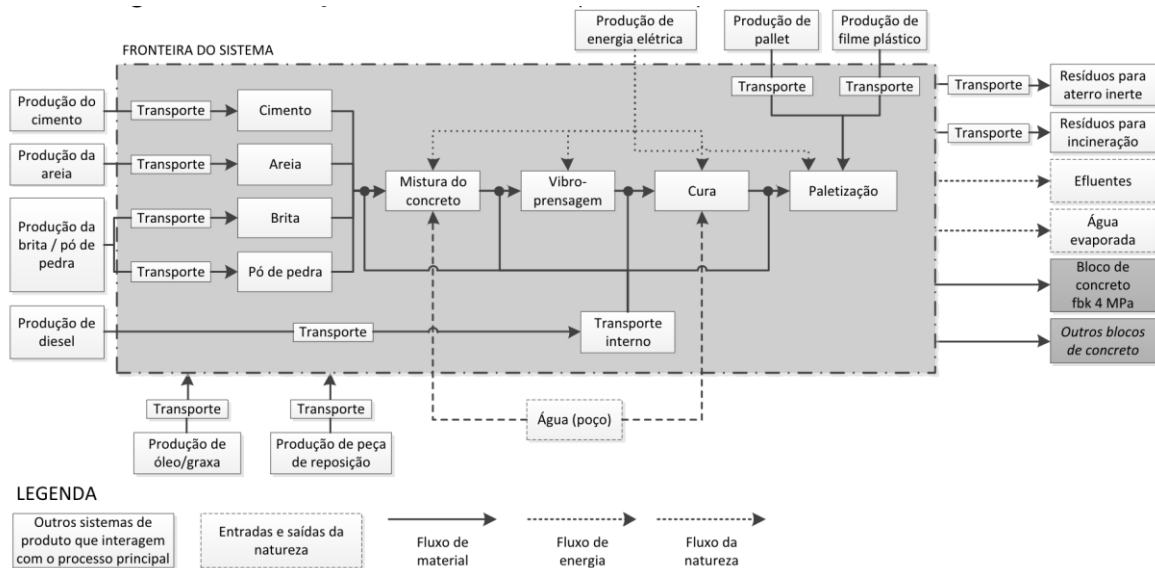


Figura 2.16 – Sistema de Produto: produção de blocos de betão (Silva, et al., 2016).

Segundo a norma, a ACV é dividida em quadro diferentes fases (Figura 2.17).

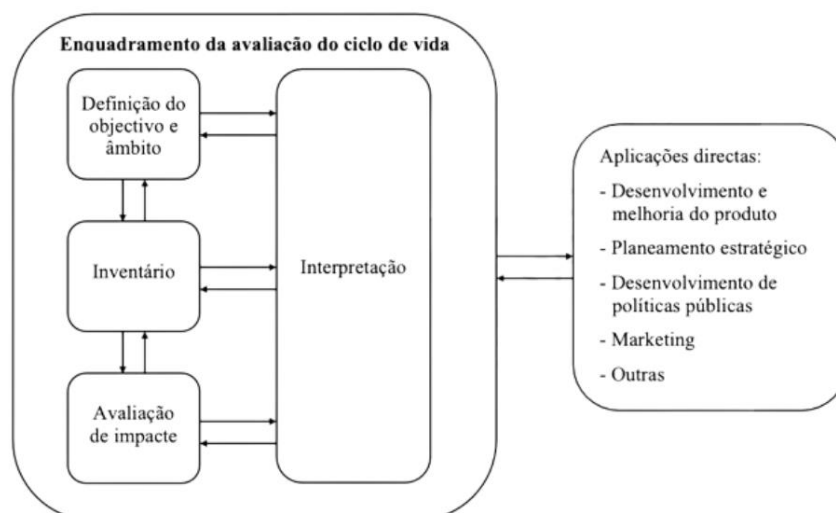


Figura 2.17 – Fases e aplicações da ACV (EN ISO 14040, 2006).

Na etapa inicial, de **definição do objetivo e âmbito**, são definidos o sistema de produto a ser estudado, a sua função, a unidade funcional, a fronteira do sistema, as categorias de impactos ambientais a serem avaliadas, entre outros aspectos.

É fundamental ressaltar a importância da definição da função de um sistema de produto e sua unidade funcional. Um sistema pode ter diversas funções possíveis, e aquelas escolhidas para análise dependem do objetivo e do âmbito da ACV. A unidade funcional quantifica as funções identificadas, definindo as características de desempenho do produto. Seu principal objetivo é assegurar a comparabilidade dos resultados da ACV, para que essas comparações sejam feitas com uma base comum.

No contexto da construção civil, um exemplo prático seria o caso dos isolamentos térmicos. Ao avaliar os impactos ambientais de um isolamento térmico, por exemplo, é necessário comparar materiais com as mesmas características de desempenho, ou seja, a mesma resistência térmica.

Outro conceito importante a referir é o conceito de “fronteira do sistema”. Esta define os processos unitários a serem incluídos no sistema, considerando diferentes etapas do ciclo de vida, processos unitários e fluxos, ilustrados na Figura 2.18 (EN ISO 14040, 2006).

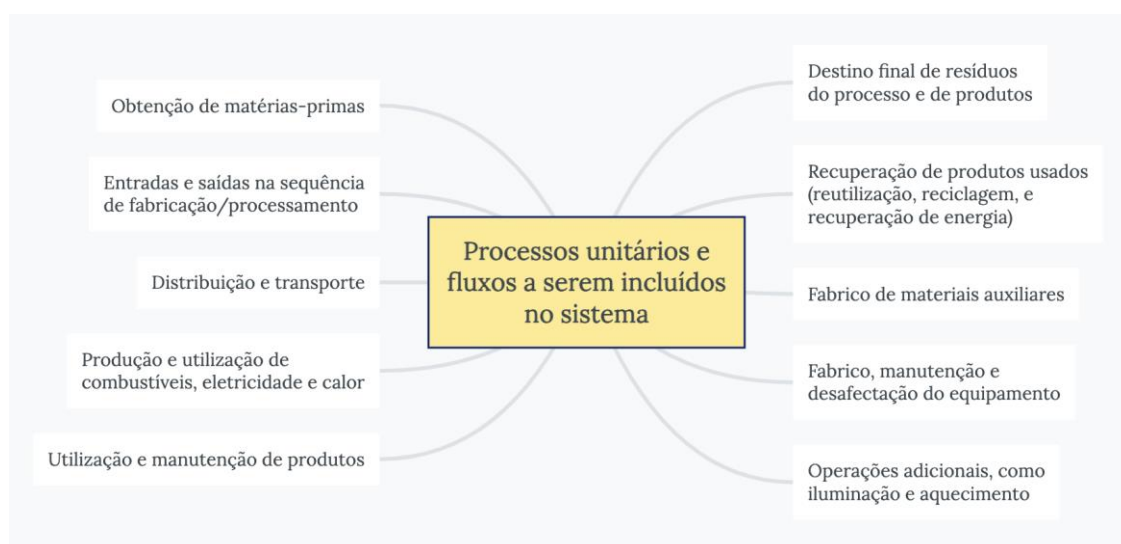


Figura 2.18 – Processos unitários e fluxos a serem incluídos no sistema.

Na segunda fase, é realizado o **inventário do ciclo de vida (ICV)**, também conhecido pela sua designação em inglês, como *life cycle inventory* (LCI), na qual é realizada a coleta de dados sobre as entradas e saídas de materiais, energia e resíduos ao longo de todas as etapas do ciclo de vida do sistema de produto, bem como o tratamento dos dados.

De acordo com a norma, os dados dos processos unitários dentro da fronteira do sistema são classificados nas seguintes categorias, ilustradas na Figura 2.19 (EN ISO 14040, 2006).

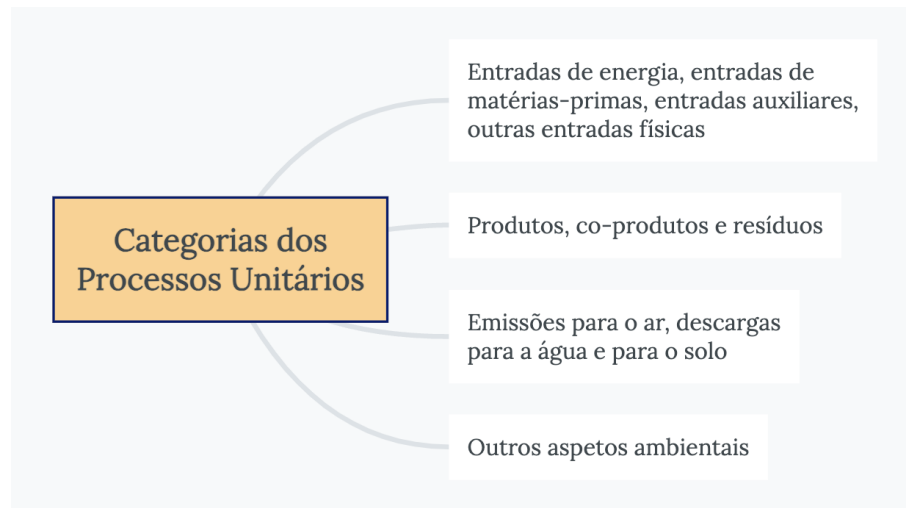


Figura 2.19 – Categorias dos Processos Unitários.

Na terceira fase, é feita a **avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)**, também conhecida pela sua designação em inglês, como *life cycle impact assessment (LCIA)*, com o propósito de compreensão e avaliação dos impactos ambientais potenciais do sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida. Isso é alcançado através da associação dos resultados obtidos no ICV às categorias de impactos ambientais, fornecendo informação para a fase seguinte, de interpretação de resultados.

Esta não avalia completamente todas as questões ambientais relacionadas ao sistema de produto, mas aborda apenas aquelas especificadas na primeira fase. É importante ressaltar as limitações desta fase, que estão vinculadas às limitações nas fases anteriores, como a definição da fronteira do sistema, a omissão de alguns processos unitários e a possível falta de qualidade dos dados no ICV, entre outras questões.

Na fase final da ACV, é feita a **interpretação dos resultados**, na qual os resultados obtidos na fase do inventário ou na avaliação de impacto, ou de ambos, são reunidos e discutidos para a chegada de conclusões, recomendações e tomada de decisões, de acordo com a definição do objetivo e âmbito definidos na primeira fase. O objetivo desta fase é apresentar de forma coerente, clara e compreensível os resultados de uma ACV.

Não existem metodologias existentes que associem de forma precisa os potenciais impactos ambientais. No entanto, a ACV é valiosa para a melhoria dos produtos, planejamento estratégico, marketing e comparação entre diferentes produtos com características de desempenho semelhantes.

2.6.3. FERRAMENTAS DE CÁLCULO DE ACV

2.6.3.1. Introdução

Atualmente, há uma variedade significativa de ferramentas disponíveis para a realização da Avaliação do Ciclo de Vida de sistemas de produtos. Cada uma dessas ferramentas apresenta suas próprias potencialidades e fragilidades. Destacam-se algumas das mais conhecidas para ACV de sistemas de produto: Sima Pro, Open LCA, GaBi, Athena e Umberto.

Além das ferramentas de uso geral, existem também aquelas voltadas especificamente para a ACV de edificações. Com o objetivo de verificar as suas potencialidades, compreender melhor as limitações e

identificar dificuldades em sua utilização, visando a melhoria da ferramenta em questão, foram realizados testes e análises das ferramentas disponíveis. Os próximos pontos abordarão algumas informações relevantes obtidas durante este processo de teste e avaliação.

2.6.3.2. *One Click LCA*

A *One Click LCA* é uma ferramenta de software amplamente reconhecida e utilizada na indústria da construção civil devido à sua especialização em Avaliação do Ciclo de Vida em edifícios. Apesar de ter sido criada na Finlândia, a ferramenta destaca-se pela sua extensa base de dados internacional relacionada à ACV de construção. Além disso, é frequentemente empregada na elaboração de Declarações Ambientais de Produto e Certificações Ambientais de Edifícios (*One Click LCA*, 2024).

A ferramenta possui uma vasta gama de opções e *inputs* disponíveis, como os materiais de construção a serem utilizados, consumo de água e energia, operações em obra, entre outros. Essa ampla gama de *inputs* confere maior precisão em termos de ACV, cumprindo de forma eficaz o seu propósito, na análise de ACV na construção civil. Por outro lado, resulta em desafios quanto a usabilidade e torna a ferramenta menos prática para utilizadores menos experientes.

Para atender aos objetivos da ferramenta a desenvolver, deseja-se, por tanto, que a mesma ofereça uma interface mais simplificada e intuitiva, com foco nos *inputs* essenciais necessários para a comparabilidade de soluções construtivas.

2.6.3.3. *TOTEM*

A *TOTEM* é uma ferramenta desenvolvida na Bélgica, destinada a avaliar o impacto ambiental de edifícios ao longo de seu ciclo de vida, visando otimizar escolhas e reduzir o impacto ambiental de projetos de construção e renovação. Essa ferramenta incorpora uma ampla gama de dados ambientais provenientes de Declarações Ambientais de Produtos Belgas (B-EPDs), que compreendem informações de fabricantes de produtos de construção disponíveis no mercado belga ou que podem ser utilizados em edifícios na Bélgica. Ao utilizar dados ambientais genéricos para materiais e componentes de construção, os mesmos são harmonizados tanto quanto possível com o contexto belga (*TOTEM*, 2023).

Para garantir essa representatividade geográfica dentro do contexto belga, prioriza-se o uso de dados representativos para a Europa Ocidental. Na ausência de processos disponíveis na Europa Ocidental, os dados são adaptados, substituindo-se os fluxos de energia (como eletricidade e calor), fluxos de água e processamento de materiais por processos europeus equivalentes. Esses ajustes são aplicados apenas para os fluxos incluídos na produção do produto analisado, enquanto os relacionados à energia, água e processamento de materiais nos processos subjacentes não são modificados para se adequar ao contexto da Europa Ocidental. De acordo com análises, as harmonizações dos processos subjacentes não possuem um impacto significativo nos resultados (Delem & Spirinckx, 2009).

Essa ferramenta é particularmente relevante devido à sua capacidade de comparar soluções construtivas e sua abordagem à representatividade geográfica. A *FOCO₂ Analyser*, embora tenha enfrentado desafios na representação geográfica, tal como será melhor abordado posteriormente, visa realizar comparações de soluções construtivas adaptadas ao contexto português.

2.6.3.4. LCA4Building

A *LCA4Building* é uma ferramenta portuguesa, desenvolvida em formato Excel, concebida para calcular não apenas o potencial de aquecimento global, como também a energia e o carbono incorporados nos materiais, desde a extração das matérias-primas, transporte até a fábrica, produção do material de construção, até a porta da fábrica, não incluindo o transporte entre a fábrica e a obra. Possui uma interface simplificada e de fácil utilização, em que o utilizador insere dados, como tipo de material, unidade e quantidade. A ferramenta se destaca por fornecer resultados dos parâmetros analisados, tanto de forma global, quanto separadamente por elementos construtivos, permitindo uma análise ampla do desempenho ambiental do edifício. No entanto, sua utilidade para a comparação entre diferentes soluções construtivas é limitada (Ferraz, 2019).

Durante a revisão bibliográfica, constatou-se uma limitada disponibilidade de ferramentas voltadas especificamente para o contexto português. A *LCA4Building*, embora valiosa em sua funcionalidade, utiliza como base de dados o “ICE - *Inventory of Carbon and Energy*” desenvolvida pela Universidade de Bath, que não reflete especificamente a realidade e os materiais em Portugal. Para aprimorar sua relevância no cenário nacional, seria pertinente a integração de dados específicos da região portuguesa, considerando características específicas de produção de materiais de construção. Embora a ferramenta seja útil em suas funcionalidades, é importante notar que não oferece a capacidade de comparar diretamente diferentes soluções construtivas (University of Bath, 2024).

2.6.3.5. RESUMO DAS FERRAMENTAS ANALISADAS

Para facilitar a compreensão, o Quadro 2.3 apresenta um resumo das ferramentas analisadas, destacando suas potencialidades e desafios identificados.

Quadro 2.3 – Quadro-Resumo das ferramentas analisadas.

Ferramenta	País de aplicação	Potencialidades	Desafios ou lacunas
<i>One Click LCA</i>	Internacional	Ampla gama de <i>inputs</i> , o que confere maior precisão na ACV	Ampla gama de <i>inputs</i> , o que confere maior dificuldade de usabilidade por utilizadores menos experientes
<i>TOTEM</i>	Bélgica	Capacidade de comparação de soluções construtivas	Base de dados voltados a realidade belga, não especificamente voltada a realidade portuguesa
<i>LCA4Building</i>	Portugal	Interface simplificada, de fácil utilização; Cálculo do potencial de aquecimento global total e por elementos construtivos	Limitação na comparação de soluções construtivas; Base de dados não especificamente voltada a realidade portuguesa; Não inclui as emissões do módulo A4

2.7. DECLARAÇÃO AMBIENTAL DE PRODUTO

2.7.1. CONCEITO

Uma Declaração Ambiental de Produto, ou, em inglês, *Environmental Product Declaration* (EPD), é um documento normalizado que fornece informações sobre o desempenho ambiental de um produto ao longo de todo o seu ciclo de vida. Estas declarações são baseadas na Avaliação do Ciclo de Vida, em conformidade com as normas EN ISO 14040 e 14044, fornecendo dados de impactos ambientais associados ao produto (EN ISO 14040, 2006) (EN ISO 14044, 2006).

As DAP são, segundo a norma EN ISO 14025, Declarações Ambientais do Tipo III e diferenciam-se das Declarações ou Rótulos Ambientais do Tipo I e do Tipo II pela natureza e rigor das informações fornecidas. As Declarações Ambientais do Tipo I são rotulagens ecológicas baseadas num conjunto de requisitos ambientais predeterminados que o produto rotulado deverá satisfazer, oferecendo assim uma garantia ao consumidor de que o produto obedece a esses requisitos. As Declarações Ambientais Tipo II são auto-declarações feitas pelo próprio fabricante ou fornecedor, sem verificação independente, e geralmente fornecem informações sobre atributos ambientais específicos do produto. Em contraste, as DAP (Tipo III), além de se basearem em análises detalhadas do ciclo de vida do produto, são verificadas por terceiros (EN ISO 14024, 2018) (EN 14021, 2016).

As DAP são particularmente úteis para a comparação entre produtos que desempenham funções similares, oferecendo uma base objetiva para a tomada de decisões sustentáveis. No entanto, sua adoção é voluntária, o que pode representar um obstáculo, já que muitas empresas optam por não emitir DAP de seus produtos. Durante a revisão bibliográfica, verificou-se uma escassez significativa de DAP registadas para materiais de construção em Portugal, sobretudo de carácter estrutural. Isso representa um desafio no estudo e seleção de soluções construtivas sustentáveis, devido à falta de fontes confiáveis de dados específicos.

2.7.2. ENQUADRAMENTO NORMATIVO

2.7.2.1. EN ISO 14025 - Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais Tipo III - Princípios e procedimentos

A norma EN ISO 14025 estabelece os princípios e requisitos para a criação e desenvolvimento de Declarações Ambientais de Produto, fornecendo diretrizes para a comunicação de informações ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto. Ela define os critérios e metodologias para elaborar as DAP, garantindo a consistência e confiabilidade das informações divulgadas sobre o desempenho ambiental dos produtos. A norma visa promover a transparência e a comparabilidade entre os produtos, facilitando a tomada de decisões sustentáveis pelos consumidores e demais partes interessadas (EN ISO 14025, 2006).

Um aspeto fundamental abordado pela norma EN ISO 14025 é o procedimento para a definição das Regras para Categorias de Produto (RCP), que estabelecem regras e requisitos específicos para o desenvolvimento de DAP de diferentes categorias tipos de produtos. Essas regras são projetadas para garantir a consistência e a comparabilidade das informações ambientais entre produtos similares. Ao seguir as RCP relevantes para cada categoria de produto, as empresas podem assegurar a conformidade com os padrões estabelecidos, promovendo a transparência e a confiabilidade nas declarações ambientais.

2.7.2.2. EN 15804 - Sustentabilidade das obras de construção - Declarações ambientais dos produtos - Regras de base para as categorias de produtos de construção

A norma EN 15804, em conformidade com a EN ISO 14025, fornece as regras gerais para as categorias de produtos aplicáveis a todos os produtos e serviços de construção, com o objetivo de garantir que as Declarações Ambientais dos Produtos relativas aos produtos ou serviços de construção são elaboradas, verificadas e apresentadas de forma harmonizada (EN 15804, 2012).

As DAP recebem diferentes designações conforme os módulos incluídos na ACV. Aquelas que abrangem somente os módulos A1 a A3 são denominadas “*cradle-to-gate*”, ou “do berço ao portão” em português. Enquanto isso, as que englobam todos os módulos, desde A1 até C4, são chamadas “*cradle-to-grave*”, ou “do berço ao túmulo” em português. Além disso, existe a designação “*cradle-to-gate with options*”, ou, em português, “do berço ao portão com opções”, que se baseia nos módulos A1 a A3, mas também inclui opcionalmente outros módulos. A Figura 2.20 ilustra as diferenças dos módulos incluídos nas análises “*cradle-to-gate*” e “*cradle-to-grave*”.

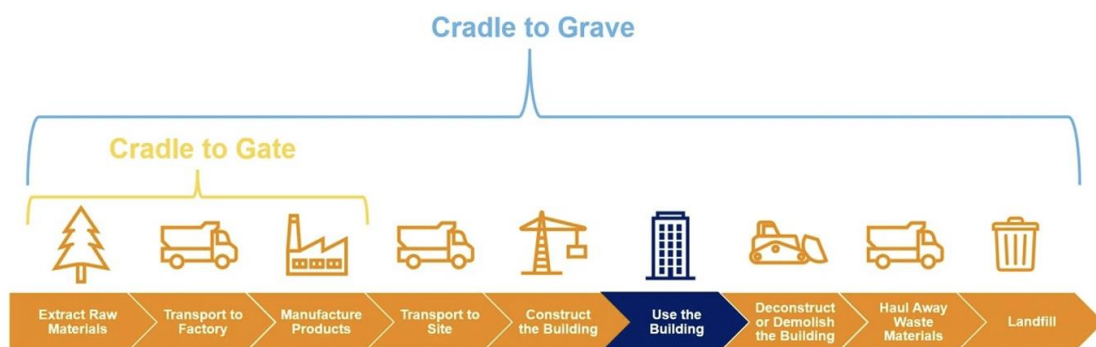


Figura 2.20 – Processos incluídos na avaliação “*cradle-to-gate*” e “*cradle-to-grave*” (Solar Decathlon - U.S. Department of Energy, 2024).

Em conformidade com a norma EN ISO 14040, a EN 15804 define que a unidade funcional de um produto de construção deve ser baseada não só nas suas características de desempenho, como também na sua vida útil de referência (VUR). A VUR, deve ser declarada na DAP, e refere-se a “vida útil expectável de um produto de construção sujeito a certas condições padrão ou de referência e que poderá servir de base para a estimativa da vida útil noutras condições de utilização” (EN ISO 14040, 2006) (EN 15804, 2012).

A norma aborda ainda o conceito de “unidade declarada”, que é utilizada ao invés da unidade funcional quando a DAP não é baseada numa ACV completa “*cradle-to-grave*”. A unidade declarada fornece uma referência para normalizar os fluxos de materiais de um produto de construção, permitindo também combinar os fluxos de materiais atribuídos ao produto de construção e combinar os impactos ambientais para as etapas selecionadas de um ciclo de vida incompleto.

A unidade declarada deve referir-se às aplicações típicas dos produtos e pode ser de diferentes tipos. Se uma unidade diferente for usada, deve-se fornecer informações sobre como convertê-la para uma ou mais das unidades requeridas, como:

- um elemento (por exemplo: 1 tijolo, 1 janela);

- massa, em quilogramas (por exemplo: 1 kg de cimento);
- comprimento, em metros lineares (por exemplo: 1 m de viga);
- superfície, em metros quadrados (por exemplo: 1 m² de revestimento);
- volume, em metros cúbicos (por exemplo: 1 m³ de betão).

A EN 15804 estabelece ainda diretrizes para o desenvolvimento de cenários que suportam o cálculo dos módulos de informação, abrangendo todos os processos relacionados às diversas etapas do ciclo de vida do produto de construção, com exceção dos módulos A1 a A3. Tais cenários devem ser realistas e representativos, adaptando-se às características específicas do projeto e do edifício em análise.

Quando informações técnicas adicionais sobre o transporte do produto da fábrica até o local de construção (módulo A4) são fornecidas na DAP, devem ser disponibilizadas as informações especificadas na Figura 2.21.

Parâmetro	Unidade do parâmetro (expressa por unidade funcional/declarada)
Tipo de combustível e consumo do veículo ou tipo de veículo utilizado para o transporte, por exemplo caminhão de longa distância, barco, etc.	Litro de tipo de combustível por distância ou tipo de veículo, Diretiva 2007/37/CE da Comissão (Norma Europeia Emissões)
Distância	km
Utilização da capacidade (incluindo os retornos em vazio)	%
Massa volumica a granel dos produtos transportados	kg/m ³
Fator de utilização da capacidade volumica (fator: =1 ou < 1 ou ≥ 1 para os produtos comprimidos ou embalados)	Não aplicável

Figura 2.21 – Informações declaradas no módulo A4 (EN 15804, 2012).

Na DAP, são declarados não só indicadores de impacto ambiental (Figura 2.11), como também os indicadores de utilização de recursos (Figura 2.12) e outras informações adicionais (Figura 2.13).

O indicador de impacto ambiental estudado nesta dissertação é o Potencial de Aquecimento Global total (*GWP-total*), que pode ser subdividida em diferentes componentes, cada um refletindo diversas fontes e tipos de emissões de gases com efeito de estufa. Os principais componentes do *GWP-total* incluem:

- ***GWP-fossil***: Esta componente considera as emissões e remoções de GEE originários da oxidação ou redução de combustíveis fósseis ou materiais contendo carbono fóssil, através de processos como combustão, incineração e deposição em aterros. Também inclui emissões de GEE de processos como a calcinação e carbonatação de materiais à base de cimento e cal;
- ***GWP-biogenic***: Esta componente refere-se às emissões provenientes de fontes biogénicas, como a biomassa e outros materiais orgânicos. A biomassa inclui madeira, resíduos agrícolas e outros materiais de origem biológica que podem ser utilizados como combustíveis ou matérias-primas;

- **GWP-LULUC:** Esta componente está relacionada à utilização do solo e às mudanças no uso da terra. Inclui emissões resultantes de processos de desmatamento e outras alterações no uso do solo.

Alguns materiais possuem *GWP-biogenic* negativo, o que indica que a quantidade de CO₂ removida da atmosfera durante a produção do material é maior do que a emitida, resultando em um impacto líquido positivo no combate ao aquecimento global.

2.8. PRINCIPAIS NORMAS UTILIZADAS

Para facilitar a compreensão, o Quadro 2.4 resume as principais normas estudadas e suas principais aplicações. Vale destacar que essas normas são interrelacionadas e em conformidade entre si.

Quadro 2.4 – Quadro-Resumo das principais normas utilizadas.

Norma	Principais características
EN ISO 14040	Estabelece os princípios e requisitos para realização da Avaliação de Ciclo de Vida de sistemas de produtos
EN ISO 14044	Estabelece diretrizes específicas para realização da Avaliação de Ciclo de Vida de sistemas de produtos
EN ISO 14025	Estabelece os princípios e requisitos para a criação e desenvolvimento de Declarações Ambientais de Produtos no geral , com base na ACV
EN 15804	Estabelece os princípios e requisitos para a criação e desenvolvimento de Declarações Ambientais de serviços e produtos de construção
EN 15643-2	Estabelece princípios e diretrizes para avaliar o desempenho ambiental dos edifícios
EN 15978	Estabelece métodos de cálculo para avaliar o desempenho ambiental dos edifícios

3

CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO

3.1. CARACTERIZAÇÃO

A ferramenta construída foi desenvolvida em formato Excel, sendo denominada *FOCO₂ Analyser* e composta por células a serem preenchidas pelo utilizador e que fornece resultados automáticos de acordo com os dados inseridos. Esta ferramenta utiliza uma base de dados desenvolvida especificamente para o propósito desta dissertação, juntamente com fórmulas de cálculo predefinidas.

O principal objetivo ao desenvolver esta ferramenta foi criar uma solução intuitiva, prática e de fácil utilização, voltada para profissionais da área de construção, em particular gestores de projetos. A intenção é que os utilizadores possam integrar esta ferramenta no seu quotidiano de trabalho de forma a calcular as emissões de carbono equivalente associadas a diferentes soluções construtivas. Assim, pretende-se capacitar os profissionais para tomar decisões mais informadas e sustentáveis durante a fase de projeto, contribuindo assim para a redução da pegada carbónica total do projeto e, consequentemente, para uma redução das emissões de GEE na atmosfera.

Esta ferramenta oferece uma forma prática para avaliar o desempenho ambiental de diferentes soluções construtivas, permitindo a identificação de potenciais áreas de melhorias e a adoção de materiais e sistemas que promovam a sustentabilidade na construção.

A Figura 3.1 apresenta a estrutura geral da ferramenta desenvolvida.

De acordo com a norma EN 15978, se houver uma DAP específica de um produto utilizado no edifício, o módulo de informação da Etapa de Produto (A1 a A3) não deve ser alterado. Na ausência de uma DAP específica ou quando esta não estiver completa, podem ser utilizados e adaptados os módulos de informação da Etapa de Produto de DAP genéricas ou conjuntos de dados de produtos semelhantes, adaptados para refletir a situação real (EN 15978, 2019).

A base de dados é composta por materiais de construção mais comuns, com os dados obtidos a partir de diferentes DAP consultadas. Priorizou-se o uso de DAP portuguesas para assegurar melhor representatividade geográfica. Na ausência dessas, foram priorizadas declarações de outros países da Europa e, em último caso, de outras regiões. A lista de DAP consultadas está incluída nos Anexos. Como mencionado anteriormente, há uma quantidade limitada de DAP de produtos portugueses ou utilizados em Portugal, o que levou ao uso significativo de dados de produtos de outros países.

Foram também criados valores genéricos para diversos materiais, a partir de valores médios das DAP consultadas. É importante notar que esses valores genéricos podem não ter precisão ideal devido à amostra limitada de cada material, embora sejam úteis para comparações entre soluções devido à ordem de grandeza.

Com a conclusão da ferramenta, espera-se que a base de dados seja continuamente enriquecida com mais informações ao longo do tempo, utilizando dados fiáveis, que poderão ser encontrados nos passaportes de materiais (ver ponto 2.5.4) e outras fontes confiáveis. À medida que novos dados se tornem disponíveis, a qualidade e a relevância da base de dados serão aprimoradas, substituindo produtos por outros mais representativos em Portugal, aumentando assim a representatividade geográfica.

A Figura 3.2 ilustra a estrutura da base de dados desenvolvida.

Salvamento Automático

</

Figura 3.2 – Estrutura da base de dados desenvolvida.

Além disso, a norma exige que as informações utilizadas na avaliação do edifício sejam verificadas quanto à coerência dos cenários para o edifício, como a adaptação da distância de transporte.

Para calcular as emissões associadas ao transporte dos materiais entre a fábrica e o local de construção, foram incluídos na base de dados os fatores de emissão da “Ferramenta de Reporte de GEE” do PME Sustentável. Estes fatores foram baseados em dados do GHG *Protocol* e de publicações internacionalmente aceites, como os métodos IPCC, estatísticas nacionais, estudos técnicos e científicos, entre outros, adaptando-se à realidade portuguesa (PME Sustentável, 2024).

Apesar de disponíveis diversos dados de fatores de emissão, com o intuito de simplificar a utilização da ferramenta, foram incluídos os dados de transportes mais comuns ou valores médios, sendo incluídos os dados relativos aos seguintes tipos de transporte:

- Veículo ligeiro de mercadorias (1,305t – 1,74t);
- Veículo pesado não articulado (7,5t – 17t);
- Veículo pesado articulado (3,5t – 33t);
- Comboio de carga;
- Navio de carga (valores médios);
- Transporte aéreo de carga (valores médios).

Os fatores de emissão referem-se aos gases com efeito de estufa emitidos num determinado processo. No contexto do transporte, esses fatores indicam as emissões de CO₂ equivalente, expressas em quilogramas, de acordo com o tipo de veículo. Estes fatores são úteis para estimar as emissões associadas ao transporte dos materiais, levando em consideração a distância a ser percorrida e a quantidade transportada.

3.4. FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA

A Figura 3.3 ilustra a interface de introdução de dados da ferramenta, na qual o utilizador preenche os campos em branco. Os campos em cinzento são preenchidos automaticamente a partir de informações contidas na base de dados, enquanto os campos em azul são cálculos realizados automaticamente pela ferramenta.

Ao usar a ferramenta, o utilizador inicia inserindo os **dados do projeto**, incluindo o nome do projeto, o elemento construtivo a ser estudado e a sua área.

Em seguida, são inseridos os **materiais** que compõem o elemento construtivo, tanto da solução de referência quanto de diversas soluções alternativas a serem analisadas. O utilizador pode escolher entre materiais de marcas específicas disponíveis na base de dados ou materiais genéricos.

É necessário especificar a **quantidade** de material a ser utilizada. A ferramenta orienta o utilizador sobre a unidade apropriada para cada tipo de material, com base nas recomendações comuns dos projetistas. Materiais estruturais, como madeira e betão, devem ser inseridos em metros cúbicos (m³), enquanto o aço deve ser especificado em quilogramas (kg). Para alvenarias e isolamentos térmicos, é preciso informar a espessura (mm), e as membranas de impermeabilização exigem a inserção em quilogramas por metro quadrado (kg/m²). Alguns materiais, como telhas, ETICS e certas membranas, possuem valores pré-definidos de kg/m², eliminando a necessidade de inserir informações adicionais.

A ferramenta exibe ainda a localização da fábrica do produto escolhido. O utilizador insere o **tipo de transporte** e a **distância** estimada a ser percorrida, podendo considerar a localização da fábrica do produto ou estimar distâncias de acordo com o cenário estabelecido no projeto.

m2

SOLUÇÃO DE PROJETO	
--------------------	--

Material	Informações de Projeto		Base de Dados		Peso (kg)	Peso (%)	GWP A1-A3		Localização da Fábrica	Tipo de Transporte	Distância estimada (km)	GWP A4		GWP A1-A4
							kgCO2eq./kg	kgCO2eq.				kgCO2eq./km.t	kgCO2eq.	
Chapa metálica - GENÉRICA		-	10	kg/m2	10,00	10,8	3,020	30,20	A definir	Camião Rígido	185	0,413	0,76	30,96
Membrana subtelha - GENÉRICA		-	0,185	kg/m2	0,19	0,2	2,054	0,38	A definir	Carrinha	15	0,874	0,00	0,38
Painel OSB - GENÉRICO	45	mm	595,333	kg/m3	26,79	29,0	-1,462	-39,16	A definir	Camião Rígido	100	0,413	1,11	-38,06
XPS - SOPREMA	60	mm	41,3333	kg/m3	2,48	2,7	1,707	4,23	Portugal - Alpiarça	Camião Articulado	260	0,153	0,10	4,33
Aço Estrutural - GENÉRICO	31,6	kg	-	-	31,60	34,2	0,726	22,93	A definir	Camião Articulado	30	0,153	0,15	23,08
Lã Mineral - VOLCALIS	150	mm	12,5	kg/m3	1,88	2,0	1,496	2,81	Portugal - Bustos	Camião Rígido	90	0,413	0,07	2,87
Membrana para-vapor - GENÉRICA		-	0,156	kg/m2	0,16	0,2	2,875	0,45	A definir	Camião Rígido	160	0,413	0,01	0,46
Montante - GENÉRICO		-	2,3	kg/m2	2,30	2,5	2,305	5,30	A definir	Camião Articulado	430	0,153	0,15	5,45
Placa de Gesso cartonado - GYPFOR	25	mm	680	kg/m3	17,00	18,4	0,211	3,58	Portugal - Sines	Camião Articulado	430	0,153	1,12	4,70
				Total	92,39	100	Total	30,72				Total	3,47	34,18

SOLUÇÃO ALTERNATIVA	
---------------------	--

Material	Informações de Projeto		Base de Dados		Peso (kg)	Peso (%)	GWP A1-A3		Localização da Fábrica	Tipo de Transporte	Distância estimada (km)	GWP A4		GWP A1-A4
							kgCO2eq./kg	kgCO2eq.				kgCO2eq./km.t	kgCO2eq.	kgCO2eq.
Telha cerâmica - GENÉRICA		-	42,5667	kg/m2	42,57	40,0	0,246	10,49	A definir	Camião Rígido	90	0,413	1,58	12,07
Madeira Maciça - GENÉRICA	0,0016	m3	481	kg/m3	0,77	0,7	-1,403	-1,08	A definir	Camião Articulado	50	0,153	0,01	-1,07
Membrana subtelha - GENÉRICA		-	0,185	kg/m2	0,19	0,2	2,054	0,38	A definir	Carrinha	15	0,874	0,00	0,38
Painel OSB - GENÉRICO	35	mm	595,333	kg/m3	20,84	19,6	-1,462	-30,46	A definir	Camião Rígido	100	0,413	0,86	-29,60
XPS - SOPREMA	60	mm	41,3333	kg/m3	2,48	2,3	1,707	4,23	Portugal - Alpiarça	Camião Articulado	260	0,153	0,10	4,33
Madeira Lamelada Colada - GENÉRICA	0,04	m3	458,367	kg/m3	18,33	17,2	-1,348	-24,72	A definir	Camião Articulado	50	0,153	0,14	-24,58
Lã Mineral - VOLCALIS	150	mm	12,5	kg/m3	1,88	1,8	1,496	2,81	Portugal - Bustos	Camião Rígido	90	0,413	0,07	2,87
Membrana para-vapor - GENÉRICA		-	0,156	kg/m2	0,16	0,1	2,875	0,45	A definir	Camião Rígido	160	0,413	0,01	0,46
Montante - GENÉRICO		-	2,3	kg/m2	2,30	2,2	2,305	5,30	A definir	Camião Articulado	430	0,153	0,15	5,45
Placa de Gesso cartonado - GYPFOR	25	mm	680	kg/m3	17,00	16,0	0,211	3,58	Portugal - Sines	Camião Articulado	430	0,153	1,12	4,70
			Total		106,50	100	Total	-29,02				Total	4,04	-24,98

Figura 3.3 – Interface de introdução de dados da FOCO₂ *Analyser*.

Com base nas informações fornecidas referentes ao projeto em análise e nos dados da base de dados, a ferramenta realiza o cálculo do potencial de aquecimento global nos módulos A1-A3 e A4, fornecendo resultados tanto por metro quadrado quanto para o total do elemento construtivo. Além disso, é apresentado um gráfico comparativo que auxilia na visualização das diferenças nos resultados.

A Figura 3.4 ilustra a apresentação dos resultados apresentados pela FOCO₂ Analyser, bem como a comparação do potencial de aquecimento global de duas soluções construtivas.

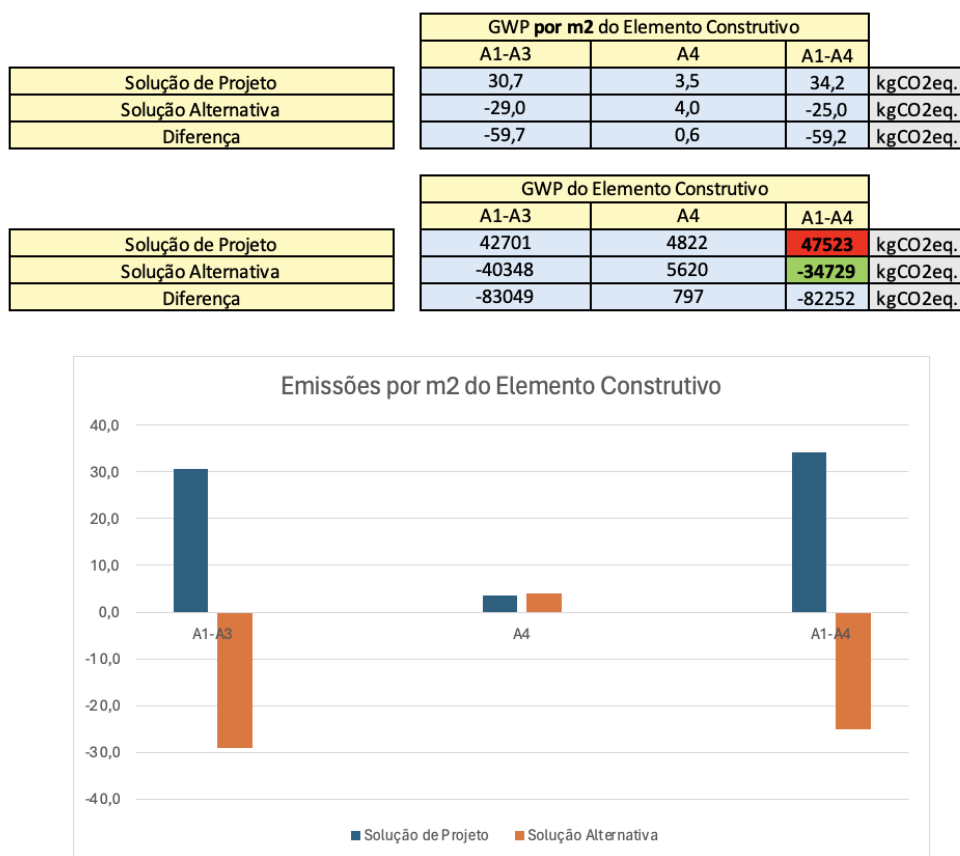


Figura 3.4 – Apresentação de resultados e comparação do GWP de duas soluções construtivas.

4

CASOS DE ESTUDO

4.1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação foi realizada em ambiente empresarial, no gabinete de projetos FOCO – Projetos Sustentáveis, cuja principal missão é a execução de projetos, que maximizem a economia das soluções, reduzam o uso de materiais com elevada pegada ecológica e contribuam para a valorização do património arquitetónico (FOCO Projetos Sustentáveis, 2024).

No contexto do desenvolvimento e aprimoramento da ferramenta, a aplicação prática é essencial para assegurar a sua eficácia e aplicabilidade. Assim, este capítulo apresenta uma seleção de casos de estudo de projetos reais que serão utilizados como cenários de teste para a ferramenta desenvolvida, além de avaliar a sustentabilidade de projetos realizados pela empresa.

Os casos de estudo selecionados incluem 3 projetos habitacionais de diferentes dimensões e complexidades, cada um com suas particularidades. O primeiro caso, “Aires Ornelas”, envolve a reabilitação e ampliação de uma construção da primeira metade do século XX. O segundo, “Casa do Castelo Mourão”, aborda a demolição de parte do edifício existente e a construção de um edifício autossuficiente em termos de redes elétrica, abastecimento de água e drenagem, utilizando predominantemente materiais locais. O terceiro caso, “Ilhas da Lomba”, refere-se a uma nova construção que emprega materiais correntes e técnicas de construção “pesada”, como betão armado e alvenaria de tijolo.

O Quadro 4.1 apresenta um resumo dos Caso de Estudo analisados.

Quadro 4.1 – Quadro-Resumo dos Casos de Estudo.

Caso de Estudo	Projeto
Aires Ornelas	Reabilitação e ampliação de construção da primeira metade do século XX
Casa do Castelo Mourão	Reconversão de um pequeno edifício destinado a arrumos numa habitação <i>off-grid</i>
Ilhas da Lomba	Demolição e Construção de 46 fogos, utilizando materiais de construção tradicionais

Através da análise detalhada destes casos de estudo, procura-se não apenas testar a aplicabilidade da ferramenta desenvolvida, mas também identificar possíveis lacunas, desafios e oportunidades de melhoria. Ao confrontar a ferramenta com situações reais enfrentadas pela empresa, será possível refinar as suas funcionalidades, ajustar parâmetros e aprimorar a sua eficácia em facilitar a tomada de decisões mais sustentáveis.

4.2. CASO DE ESTUDO 1: AIRES ORNELAS

4.2.1. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO

O projeto “Aires Ornelas”, projetado pela arquiteta Filipa Ferreira, representa um projeto de reabilitação e ampliação de um edifício existente, localizado na freguesia do Bonfim, no Porto. A habitação é composta por dois pisos, tendo uma área de cerca de 45 m² por piso. A estrutura da casa é composta por paredes resistentes em alvenaria de pedra, pavimentos com vigamento de madeira e cobertura realizada por asnas de madeira (Ferreira, 2021).

O novo projeto visa ampliar a habitação em altura e profundidade, propondo ações que transformarão positivamente o edifício. As principais ações incluem a preservação do desenho original do edifício tanto no exterior quanto no interior, conciliando com o novo programa proposto.

No interior, serão mantidos pavimentos e parte da compartimentação original. Além disso, haverá melhorias no desempenho dos elementos construtivos existentes, incluindo o reforço das vigas do piso, a introdução de isolamento acústico entre frações e isolamento térmico.

A Figura 4.1 ilustra a fachada principal do edifício existente.



Figura 4.1 – Fachada principal do edifício existente (Ferreira, 2021).

4.2.2. COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS

No projeto “Aires Ornelas”, foi objetivo dos projetistas a definição de soluções sustentáveis. Para avaliar a sustentabilidade dessas soluções, pretende-se compará-las com opções de projeto mais tradicionais. A solução alternativa escolhida para a comparação foi selecionada de forma que fosse equivalente tanto quanto possível do ponto de vista técnico, em particular em termos de resposta estrutural, mas também do ponto de vista térmico ou acústico. Além disso, a comparação priorizou elementos construtivos comumente escolhidos pelos projetistas, excluindo itens decorativos, como revestimentos e tintas, que são preferências específicas do arquiteto.

As soluções propostas pelos projetistas e as correspondentes quantidades de material foram obtidas a partir do Mapa de Trabalhos e Quantidades (MTQ) e das Peças Desenhadas do projeto. Foram comparados diferentes elementos do edifício, como cobertura, pavimentos intermédios, fachada e paredes interiores. O pavimento térreo não foi considerado, pois na reabilitação manteve-se os materiais existentes, alterando-se apenas o revestimento cerâmico. Adicionalmente, foram assumidos tipos de transportes e distâncias médias com base em pesquisas de acordo com a localização de fábricas de materiais, levando em conta o local da construção.

De notar que esses são valores estimados e a ferramenta calcula os valores possíveis a nível do projeto, não sendo possível garantir os produtos específicos escolhidos pelo empreiteiro, a localização da fábrica o tipo de transporte utilizado.

As Figuras 4.2 a 4.9 apresentam as soluções construtivas, enquanto os Quadros 4.2 a 4.9 fornecem os dados considerados na avaliação das emissões associadas aos elementos construtivos, tanto para as soluções de projeto como para as soluções alternativas.

A cobertura, conforme prevista no projeto, consiste em uma cobertura tradicional plana, cuja impermeabilização é realizada com uma membrana betuminosa de 4+5 kg/m² e pendente de 2% obtida por meio de uma camada de forma com madeira maciça. A estrutura de suporte é formada por vigas de madeira lamelada colada, isoladas com duas placas de lã mineral de 50 mm. O revestimento interior é feito com dupla placa de gesso cartonado de 12.5 mm.

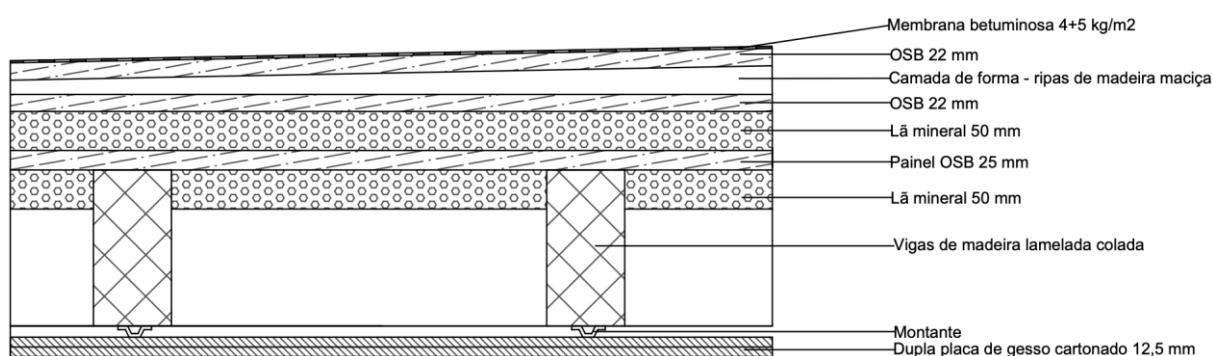


Figura 4.2 – Pormenor construtivo da cobertura: solução de projeto de “Aires Ornelas”.

Quadro 4.2 – Cobertura “Aires Ornelas”: dados para avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Membrana betuminosa	9,00	Camião Articulado	800
Painel OSB	41,08	Camião Rígido	100
Madeira maciça (camada de forma)	3,46	Camião Articulado	50
Lã mineral	1,25	Camião Rígido	90
Madeira lamelada colada (viga)	18,33	Camião Articulado	1200
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	430
Gesso cartonado	17,00	Camião Articulado	430

Como solução alternativa, previu-se uma cobertura invertida plana com revestimento exterior em seixo rolado de 50 mm, mantendo o revestimento interior com dupla placa de gesso cartonado de 12,5 mm. A estrutura é composta por uma laje maciça de betão armado de 200 mm de espessura, sobre a qual assenta uma camada de betonilha leve com argila expandida de 60 mm. Sobre essa camada, aplica-se a impermeabilização com membrana betuminosa de 3+4 kg/m², seguida pelo isolamento térmico de XPS de 100 mm, uma manta geotêxtil e, por fim, a proteção pesada em seixo rolado.

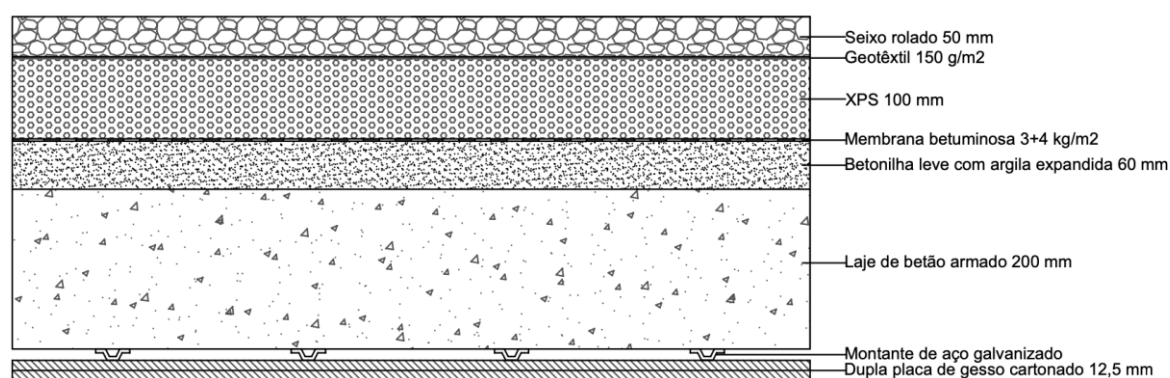


Figura 4.3 – Pormenor construtivo da cobertura: solução alternativa de “Aires Ornelas”.

Quadro 4.3 – Cobertura “Aires Ornelas”: dados para a avaliação da solução alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Seixo rolado	75,00	Camião Rígido	20
Geotêxtil	0,16	Carrinha	20
XPS	4,13	Camião Articulado	260
Membrana betuminosa	7,00	Camião Rígido	160
Betonilha leve com argila expandida	34,50	Camião Rígido	160
Betão (laje maciça)	477,97	Camião Rígido	30
Aço para betão armado (laje maciça)	14,34	Camião Rígido	30
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	430
Gesso cartonado	17,00	Camião Articulado	430

A fachada, conforme prevista no projeto, consiste em uma estrutura de pilares de madeira lamelada colada, revestida por painéis OSB. Pelo exterior, utiliza-se o sistema ETICS com lâ mineral de 80 mm. A fachada é isolada também pelo interior com placas de lâ mineral de 50 mm e revestida internamente por dupla placa de gesso cartonado.

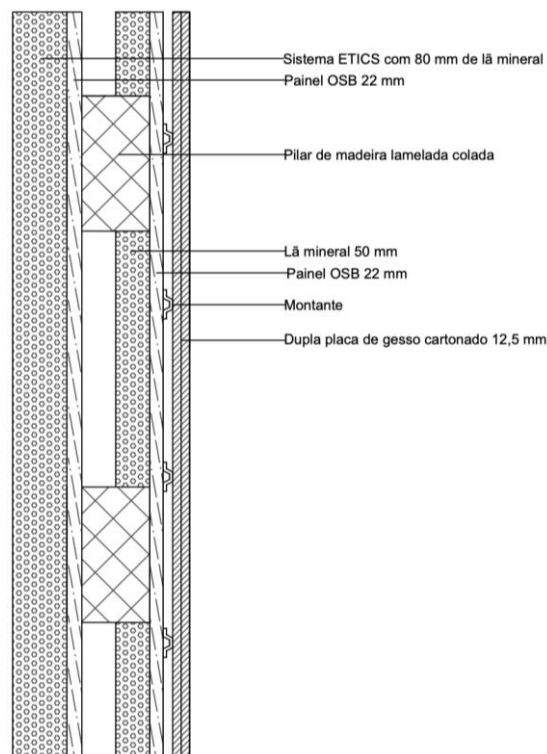


Figura 4.4 – Corte horizontal da fachada: solução de projeto de “Aires Ornelas”.

Quadro 4.4 – Fachada “Aires Ornelas”: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Sistema ETICS com 80mm de lâ mineral	20,25	Camião Rígido	90
Painel OSB	26,19	Camião Rígido	100
Madeira lamelada colada (pilar)	18,33	Camião Articulado	50
Lã mineral	0,63	Camião Rígido	90
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	430
Gesso cartonado	17,00	Camião Articulado	430

Como alternativa, a estrutura é modificada, substituindo os pilares de madeira lamelada colada por pilares de betão armado. Além disso, é utilizada alvenaria de tijolo cerâmico térmico, rebocada pelo interior. O sistema ETICS é mantido.

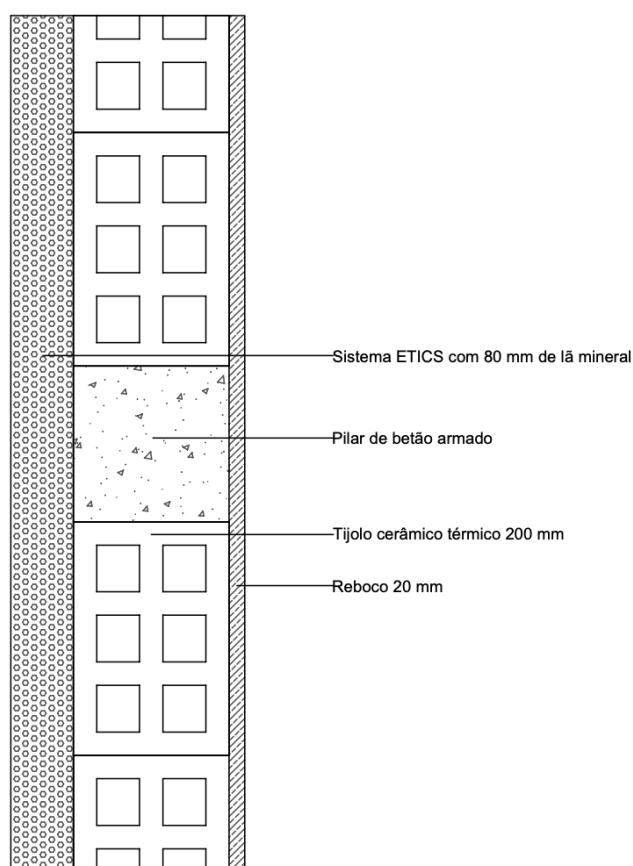


Figura 4.5 – Corte horizontal da fachada: solução alternativa de “Aires Ornelas”.

Quadro 4.5 – Fachada “Aires Ornelas”: dados para a avaliação da solução de alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Sistema ETICS com 80mm de lâ mineral	20,25	Camião Rígido	90
Betão (pilar)	47,80	Camião Rígido	30
Aço para betão armado (pilar)	1,43	Camião Rígido	30
Tijolo cerâmico térmico	141,80	Camião Rígido	30
Reboco	26,67	Camião Rígido	70

No projeto original, o pavimento intermédio é constituído por uma estrutura de vigas de madeira lamelada colada, isolado com lâ mineral de 50 mm, e o revestimento de teto é feito com dupla placa de gesso cartonado de 12,5 mm. Sobre a estrutura, é prevista a aplicação de uma manta acústica, seguida por um painel OSB de 25 mm e o revestimento do pavimento superior.

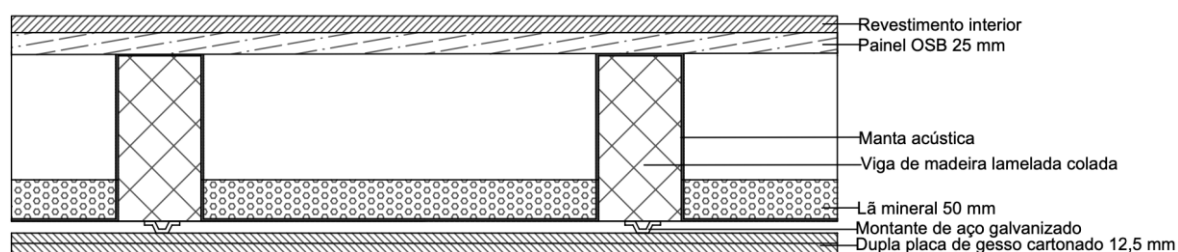


Figura 4.6 – Pormenor construtivo do pavimento intermédio: solução de projeto de “Aires Ornelas”.

Quadro 4.6 – Pavimento intermédio “Aires Ornelas”: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Revestimento interior	-	-	-
Painel OSB	14,88	Camião Rígido	100
Manta acústica	6,49	Camião Rígido	160
Madeira lamelada colada (viga)	18,33	Camião Articulado	1200
Lã mineral	0,63	Camião Rígido	90
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	430
Gesso cartonado	17,00	Camião Articulado	430

Como alternativa, a estrutura de vigas é substituída por uma laje maciça de betão armado de 200 mm de espessura, sobre a qual assenta uma camada de 60 mm betonilha leve com argila expandida, isolamento térmico de lã mineral de 50 mm, seguida de betonilha de 50 mm e revestimento do piso superior. Mantém-se o revestimento de teto em gesso cartonado.

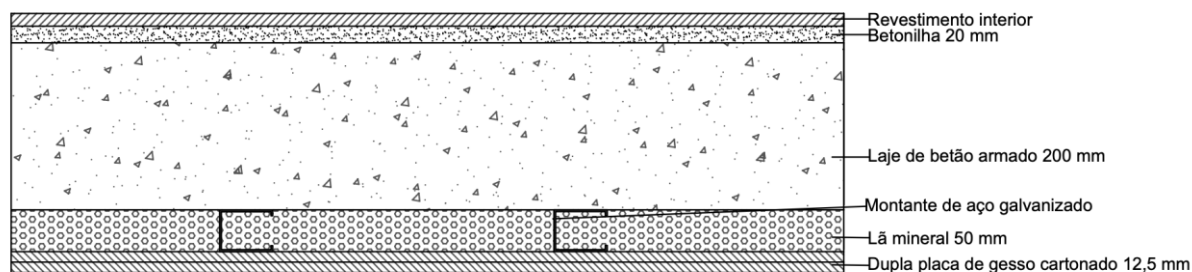


Figura 4.7 – Pormenor construtivo do pavimento intermédio: solução alternativa de “Aires Ornelas”.

Quadro 4.7 – Pavimento intermédio “Aires Ornelas”: dados para a avaliação da solução alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Revestimento interior	-	-	-
Betonilha	40,00	Camião Rígido	70
Betão (laje)	477,97	Camião Rígido	30
Aço para betão armado (laje)	14,34	Camião Rígido	30
Lã mineral	0,63	Camião Rígido	90
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	430
Gesso cartonado	17,00	Camião Articulado	430

As paredes interiores, por sua vez, são constituídas por alvenaria leve, compostas por dupla placa de gesso cartonado, isoladas no seu interior com lã mineral.

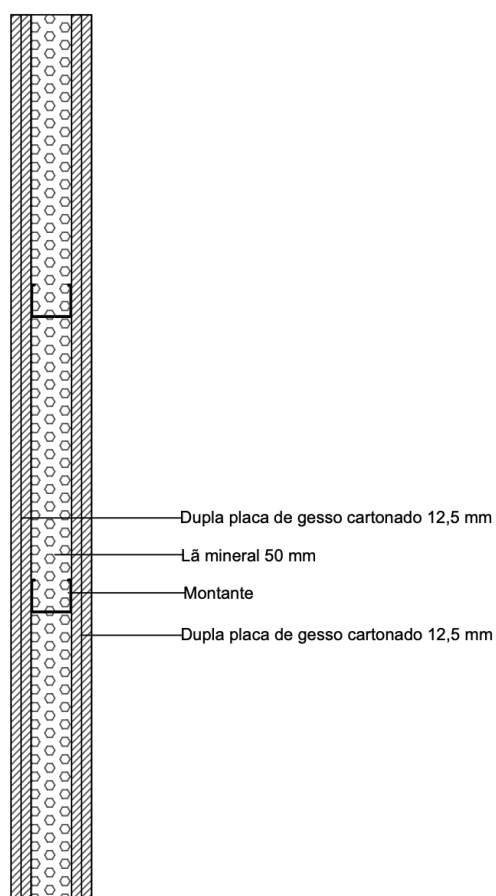


Figura 4.8 – Pormenor construtivo das paredes interiores: solução de projeto de “Aires Ornelas”.

Quadro 4.8 – Paredes interiores “Aires Ornelas”: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Gesso cartonado	34,00	Camião Articulado	430
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Rígido	430
Lã mineral	0,63	Camião Rígido	90

Como alternativa, são propostas paredes de alvenaria com tijolo cerâmico térmico de 11 cm de espessura e rebocadas em ambos os lados.

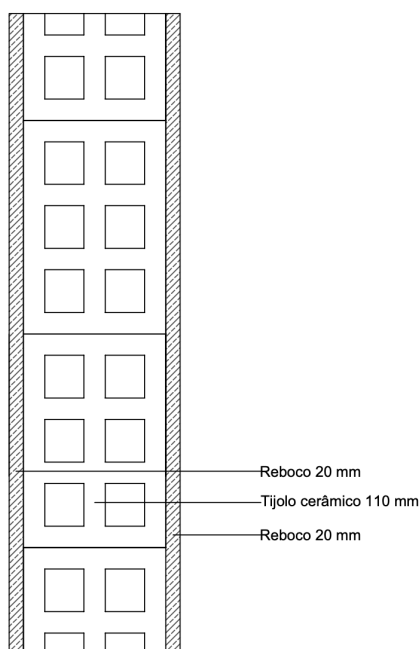


Figura 4.9 – Pormenor construtivo das paredes interiores: solução alternativa de “Aires Ornelas”.

Quadro 4.9 – Paredes interiores “Aires Ornelas”: dados para a avaliação da solução alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Reboco	56,00	Camião Rígido	70
Tijolo cerâmico	77,99	Camião Rígido	90

4.3. CASO DE ESTUDO 2: CASA DO CASTELO MOURÃO

4.3.1. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO

O projeto “Casa do Castelo Mourão”, projetado pelo arquiteto Luís Vitorino Caleiro, tem como principal objetivo a reconversão de um pequeno edifício destinado a arrumos numa pequena moradia T1. A propriedade, com aproximadamente 20,25 m², está localizada em terreno agrícola ao norte do Castelo da vila de Mourão, e próximo à capela de S. Sebastião (século XV) (Caleiro, 2022).

A construção é típica do Alentejo, com um telhado de duas águas, uma porta e paredes pintadas de branco. Prevê-se a demolição de parte da estrutura existente, execução de nova laje em betão, novas paredes em taipa e uma cobertura inclinada em estrutura de madeira. Pretende-se a construção de um edifício denominado *off-grid*, isto é, desconectado das redes elétrica, de gás, de abastecimento e de drenagem, utilizando predominantemente materiais locais e sustentáveis.



Figura 4.10 – Fotografia do edifício existente (Caleiro, 2022).



Figura 4.11 – Modelo 3D do exterior do novo edifício (Caleiro, 2022).

4.3.2. COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS

No projeto “Casa do Castelo Mourão”, foram também escolhidas soluções consideradas sustentáveis pelos projetistas. Foram comparadas as soluções adotadas em projetos com soluções alternativas mais correntes para os seguintes elementos: cobertura, mezanino, fachada e paredes interiores, a fim de medir a sustentabilidade. Para o caso do pavimento térreo, excepcionalmente, buscou-se uma solução alternativa mais sustentável.

Tal como no caso anterior, a escolha da solução alternativa buscou manter equivalência em termos de resposta estrutural, térmica e acústica. Além disso, foram consideradas as informações do projeto e baseadas em pesquisas sobre a localização das fábricas de materiais em relação ao local da obra.

As Figuras 4.12 a 4.21 apresentam as soluções construtivas, enquanto os Quadros 4.10 a 4.19 fornecem os dados considerados na avaliação das emissões associadas aos elementos construtivos, tanto para as soluções de projeto como para as soluções alternativas.

A cobertura prevista em projeto consiste em uma cobertura inclinada com estrutura composta por vigas de madeira lamelada colada. O revestimento exterior é feito com telhas cerâmicas, assentadas sobre ripado e contra-ripado de madeira maciça de 20x40 mm e membrana subtelha, isolada com 100 mm de lã mineral. O revestimento interior é finalizado com dupla placa de gesso cartonado.

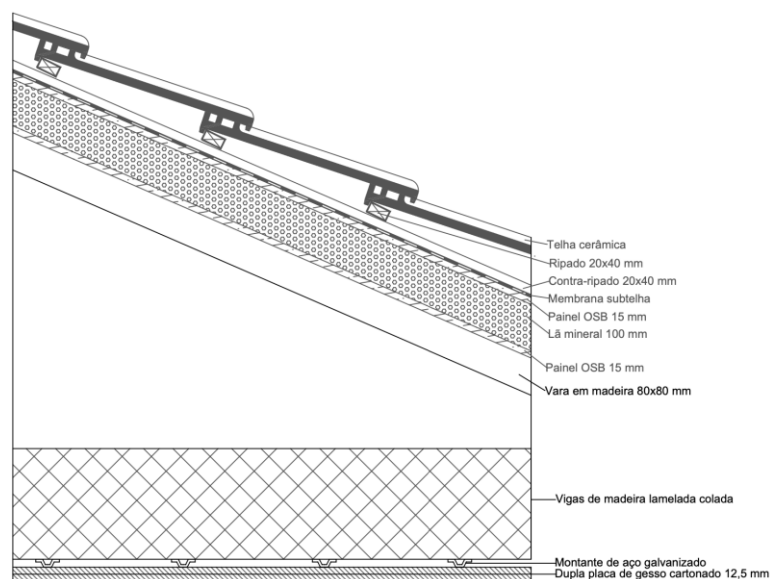


Figura 4.12 – Pormenor construtivo da cobertura: solução de projeto de “Casa do Castelo Mourão”.

Quadro 4.10 – Cobertura “Casa do Castelo Mourão”: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Telha cerâmica	42,57	Camião Articulado	25
Madeira maciça (ripado, contra-ripado e vara)	3,85	Camião Articulado	200
Membrana subtelha	0,19	Camião Articulado	450
Painel OSB	17,86	Camião Articulado	60
Lã mineral	1,25	Camião Articulado	400
Madeira lamelada colada (viga)	18,33	Camião Articulado	1200
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	200
Gesso cartonado	17,00	Camião Articulado	200

Como alternativa, considera-se a substituição das vigas de madeira lamelada colada por uma laje maciça de betão armado, mantendo o sistema de impermeabilização e os revestimentos exterior e interior. Além disso, o isolamento em lã mineral é substituído por XPS com a mesma espessura.

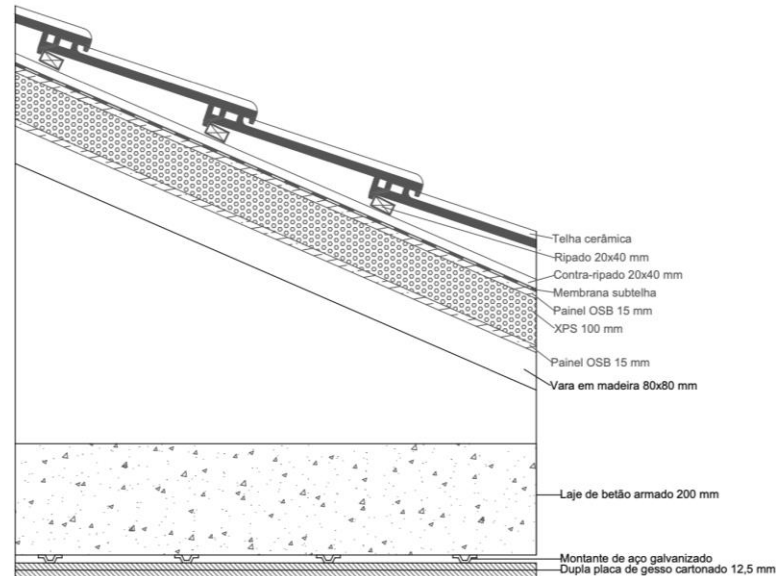


Figura 4.13 – Pormenor construtivo da cobertura: solução alternativa de “Casa do Castelo Mourão”.

Quadro 4.11 – Cobertura “Casa do Castelo Mourão”: dados para a avaliação da solução alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Telha cerâmica	42,57	Camião Articulado	25
Madeira maciça (ripado, contra-ripado e vara)	3,85	Camião Articulado	200
Membrana subtelha	0,19	Camião Articulado	450
Pannel OSB	17,86	Camião Articulado	60
XPS	4,13	Camião Rígido	180
Betão (laje)	477,97	Camião Rígido	20
Aço para betão armado (laje)	14,34	Camião Articulado	150
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	200
Gesso cartonado	17,00	Camião Articulado	200

No projeto, está previsto um mezanino composto por vigas de madeira lamelada colada, isolado com 100 mm de lã mineral e revestido em ambos os lados com contraplacado de bétula de 20 mm.

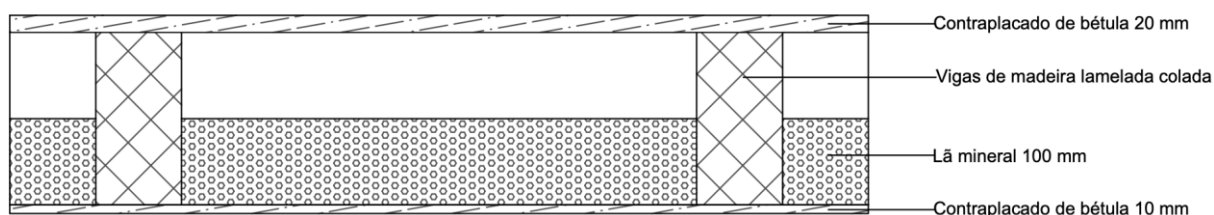


Figura 4.14 – Corte construtivo do mezanino: solução de projeto de “Casa do Castelo Mourão”.

Quadro 4.12 – Mezanino “Casa do Castelo Mourão”: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Contraplacado de bétula	20,40	Camião Articulado	2600
Madeira lamelada colada (viga)	18,37	Camião Articulado	1200
Lã mineral	1,25	Camião Articulado	1200

Como alternativa, foi alterada apenas a estrutura, substituindo as vigas de madeira lamelada colada por perfis estruturais IPE 100.

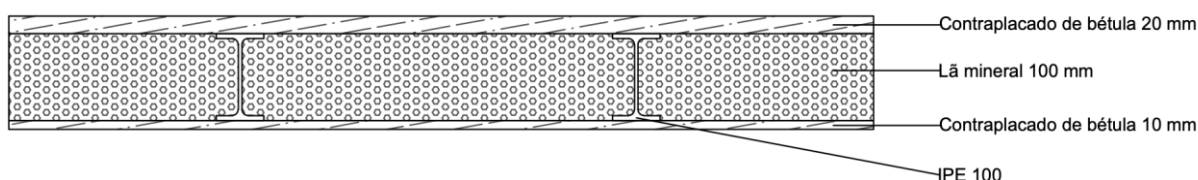


Figura 4.15 – Corte construtivo do mezanino: solução alternativa de “Casa do Castelo Mourão”.

Quadro 4.13 – Mezanino “Casa do Castelo Mourão”: dados para a avaliação da solução alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Contraplacado de bétula	20,93	Camião Articulado	260
Aço estrutural (viga)	16,20	Camião Articulado	150
Lã mineral	1,25	Camião Articulado	400

No caso do pavimento térreo, a solução original adotada no projeto consiste em um ensoleiramento geral de betão sob todo o edifício, que acarreta emissões significativas. Diante disso, foi proposta uma alternativa mais sustentável, utilizando sapatas de betão para as fundações das paredes em taipa, complementadas por uma betonilha leve de argila expandida.

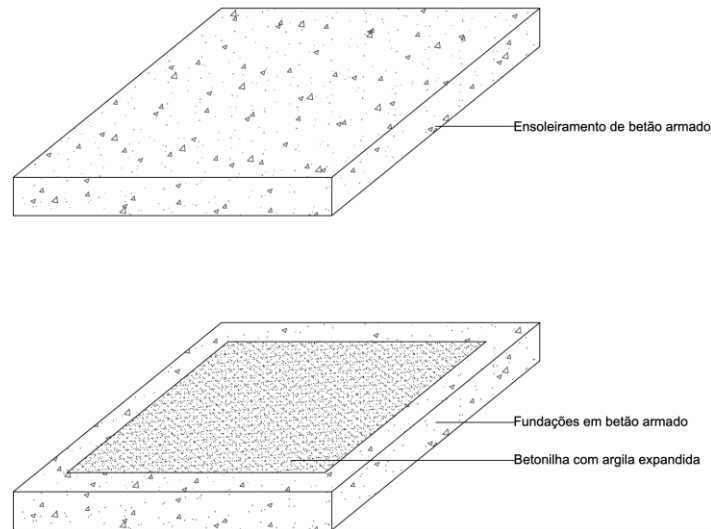


Figura 4.16 – Comparação das fundações entre a solução de projeto e solução alternativa de “Casa do Castelo Mourão”.

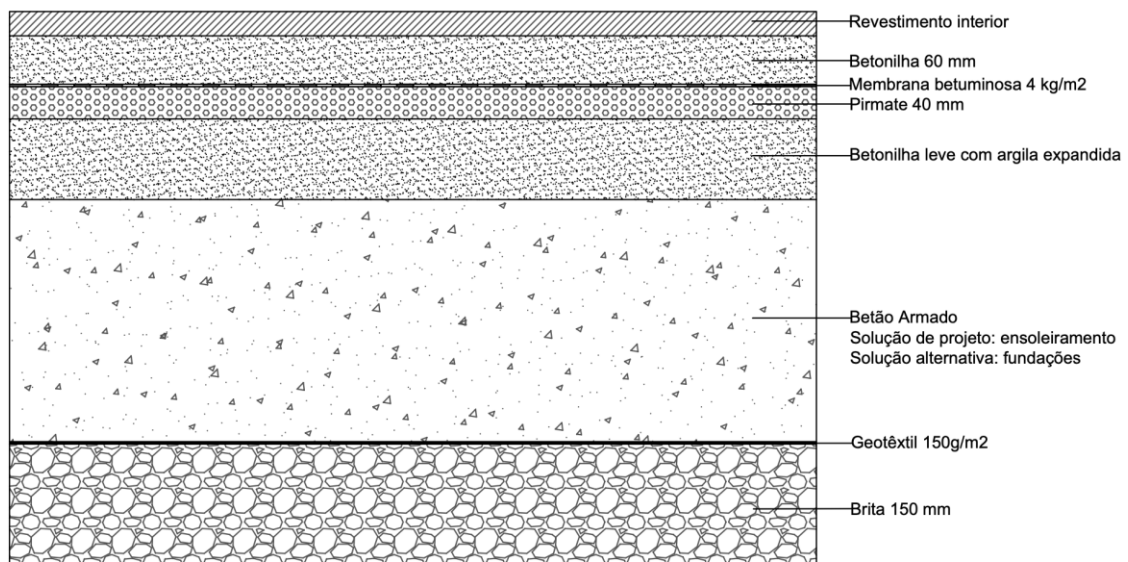


Figura 4.17 – Pormenor construtivo do pavimento térreo: solução de projeto e alternativa de “Casa do Castelo Mourão”.

Quadro 4.14 – Pavimento térreo “Casa do Castelo Mourão”: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Acabamento interior	-	-	-
Betonilha	120,00	Camião Articulado	400
Membrana betuminosa	4,00	Camião Articulado	320
Pirmate	1,52	Camião Rígido	175
Betonilha com argila expandida	57,50	Camião Articulado	150
Betão (ensoleiramento)	716,96	Camião Rígido	20
Aço para betão armado (ensoleiramento)	21,51	Camião Articulado	150
Geotêxtil	0,16	Camião Articulado	300
Brita	228,00	Camião Rígido	70

Quadro 4.15 – Pavimento térreo “Casa do Castelo Mourão”: dados para a avaliação da solução alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Acabamento interior	-	-	-
Betonilha	120,00	Camião Articulado	400
Membrana betuminosa	4,00	Camião Articulado	320
Pirmate	1,52	Camião Rígido	175
Betonilha com argila expandida	69,00	Camião Articulado	260
Betão (fundações)	286,78	Camião Rígido	20
Aço para betão armado (fundações)	8,60	Camião Articulado	150
Geotêxtil	0,16	Camião Articulado	300
Brita	228,00	Camião Rígido	70

A fachada foi originalmente projetada com paredes de taipa de 50 cm de espessura, revestidas internamente com uma camada de 60 mm de reboco térmico e finalizadas com acabamento interior.

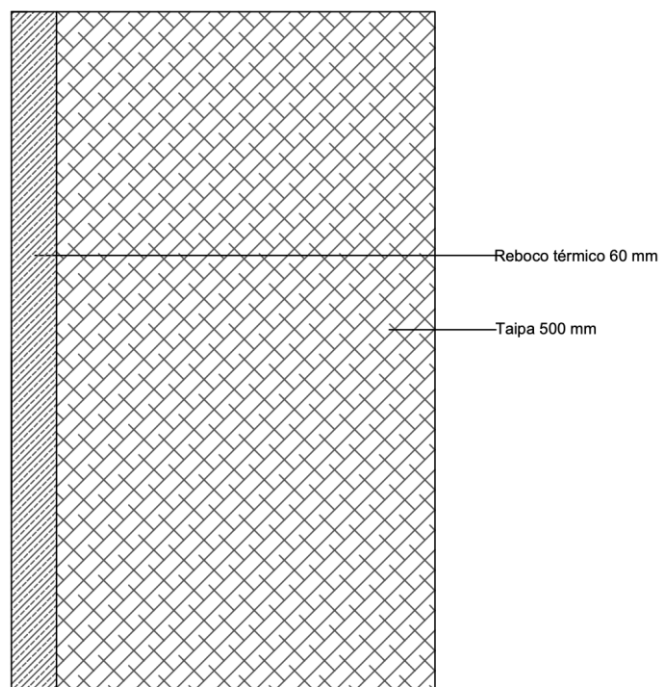


Figura 4.18 – Pormenor construtivo da fachada: solução de projeto de “Casa do Castelo Mourão”.

Quadro 4.16 – Fachada “Casa do Castelo Mourão”: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Taipa	969,50	-	-
Reboco térmico	9,60	Camião Articulado	400

Como alternativa, foi prevista alvenaria de bloco de betão térmico, rebocada pelo exterior com uma camada de 20 mm e isolada internamente com lâ mineral de 60 mm, com revestimento interior de dupla placa de gesso cartonado de 12,5 mm.

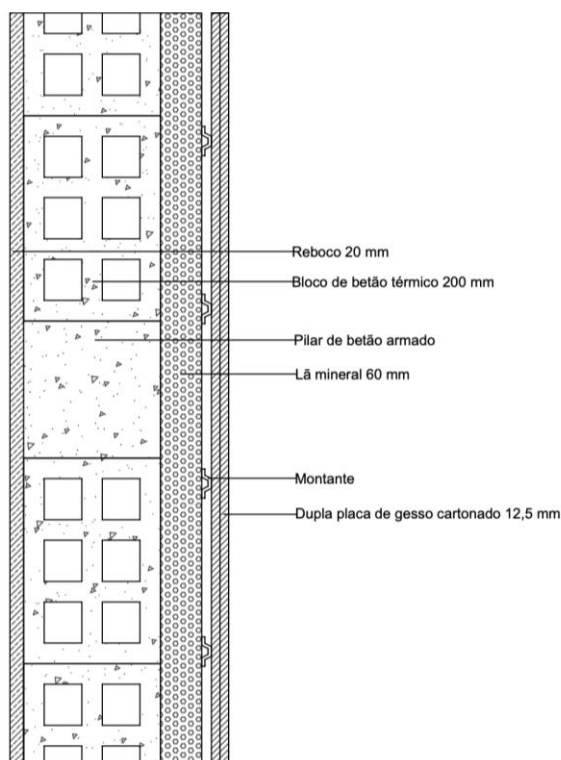


Figura 4.19 – Corte horizontal da fachada: solução alternativa de “Casa do Castelo Mourão”.

Quadro 4.17 – Fachada “Casa do Castelo Mourão”: dados para a avaliação da solução alternativa

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Reboco	28,00	Camião Articulado	400
Bloco de betão térmico	238,00	Camião Articulado	320
Betão (pilar)	47,80	Camião Rígido	20
Aço para betão armado (pilar)	1,43	Camião Articulado	150
Lã mineral	0,75	Camião Articulado	400
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	200
Gesso cartonado	17,00	Camião Articulado	200

Conforme previsto no projeto, as paredes interiores são compostas por dois contraplacados de bétula de 20 mm de espessura, entre os quais é inserida uma camada de isolamento de lã mineral de 100 mm de espessura.

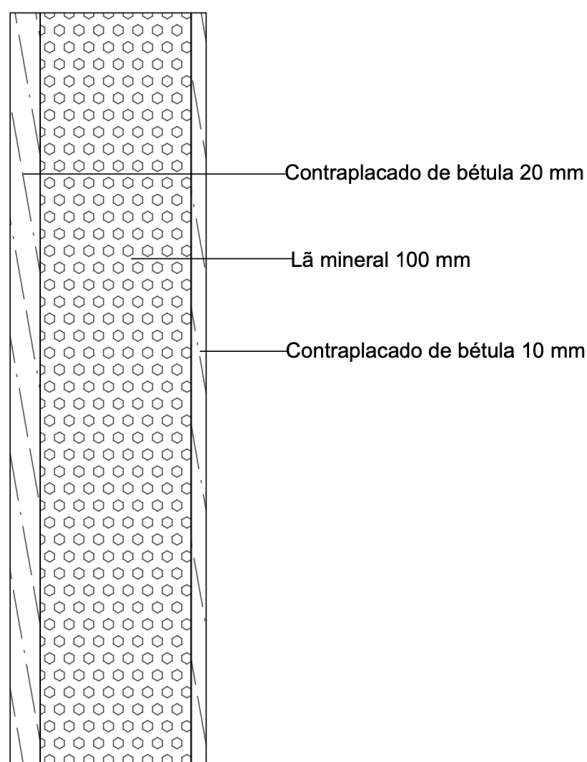


Figura 4.20 – Pormenor construtivo das paredes interiores: solução de projeto de “Casa do Castelo Mourão”.

Quadro 4.18 – Paredes interiores Casa do Castelo Mourão: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Contraplacado de bétula	20,40	Camião Articulado	2600
Lã mineral	1,25	Camião Articulado	1200

Como alternativa, foi considerada uma solução de alvenaria de tijolo cerâmico furado de 11 cm de espessura, rebocada em ambos os lados.

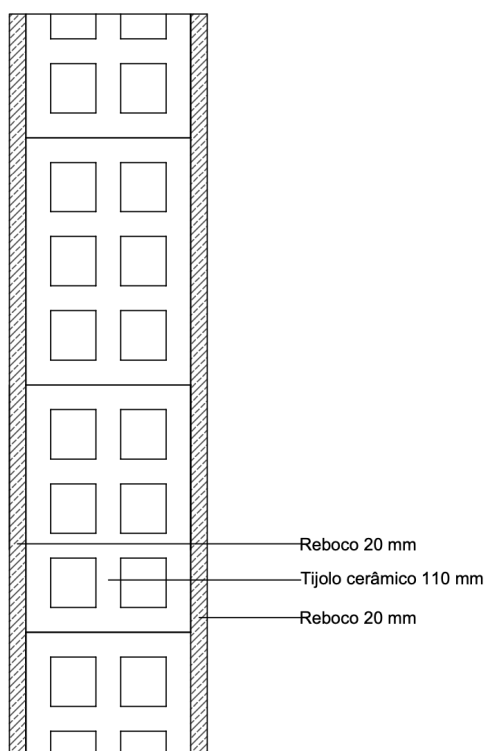


Figura 4.21 – Pormenor construtivo das paredes interiores: solução alternativa de “Casa do Castelo Mourão”.

Quadro 4.19 – Paredes interiores Casa do Castelo Mourão: dados para a avaliação da solução alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo	Tipo de transporte	Distância estimada
Reboco	56,00	Camião Articulado	400
Tijolo cerâmico	141,06	Carrinha	25

4.4. CASO DE ESTUDO 3: ILHAS DA LOMBA

4.4.1. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO

O projeto “Ilhas da Lomba” foi desenvolvido pelos arquitetos Francisco Pinto, Francisco Cabral, Maria de Moura e Luís Caleiro. O conjunto existente inclui seis ilhas em estado avançado de degradação, com condições de salubridade precárias. O objetivo desta intervenção é unificar estas ilhas, ampliando os espaços coletivos e aumentando a permeabilidade do solo, além de construir habitações com áreas dignas e equipadas para atender às necessidades atuais da população (Pinto, Cabral, Moura, & Caleiro, 2022).

Para isso, será necessário demolir completamente as construções existentes, recuperando e reutilizando todos os materiais de valor. A Figura 4.11 apresenta a área de intervenção e o edificado existente, enquanto a Figura 4.12 ilustra um modelo 3D do novo edificado.

Estão previstos 46 fogos com tipologias variando entre T1, T2 e T3, em volumes de dois pisos conectados por uma galeria interna contínua, ilustrada na Figura 4.13, reservada para usos coletivos, dedicando-se a eventos e atividades recreativas para os moradores.



Figura 4.22 – Área de intervenção e edificado existente (Pinto, Cabral, Moura, & Caleiro, 2022).



Figura 4.23 – Área de intervenção e modelo 3D do novo edificado (Pinto, Cabral, Moura, & Caleiro, 2022).



Figura 4.24 – Modelo 3D da galeria interna (Pinto, Cabral, Moura, & Caleiro, 2022).

4.4.2. COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS

Ao contrário dos casos anteriores, o projeto “Ilhas da Lomba”, a sustentabilidade não foi uma preocupação central. O objetivo é comparar e analisar as emissões associadas aos seguintes elementos: cobertura, pavimentos intermédios, fachada e paredes interiores, caso fossem adotadas soluções mais sustentáveis. Para o caso do pavimento térreo, excecionalmente, optou-se por alterar a composição dos materiais com a mesma função para avaliar a sua contribuição com o GWP.

Utilizando a mesma metodologia dos casos de estudo anteriores em relação à apresentação das informações, as Figuras 4.25 a 4.34 mostram as soluções construtivas, enquanto os Quadros 4.20 a 4.29 fornecem os dados considerados na avaliação das emissões associadas aos elementos construtivos, tanto para as soluções de projeto como para as soluções alternativas.

A cobertura, conforme prevista em projeto, é uma cobertura inclinada revestida por chapa metálica, que assenta sobre membrana subtelha, painel OSB de 15 mm e isolamento XPS de 60 mm. A estrutura é composta por perfis metálicos do tipo IPE 160 isolados com lã mineral de 150 mm. Sob a estrutura, encontra-se uma membrana para-vapor, um painel OSB de 15 mm e o revestimento interior, feito com dupla placa de gesso cartonado de 12,5 mm.

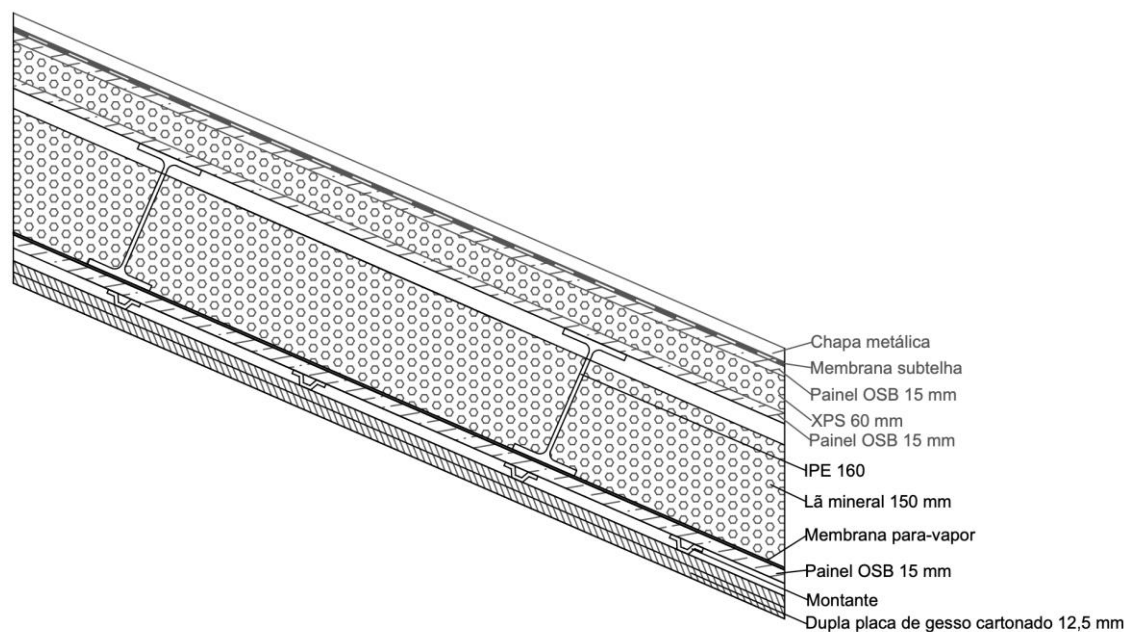


Figura 4.25 – Pormenor construtivo da cobertura: solução de projeto de “Ilhas da Lomba”.

Quadro 4.20 – Cobertura “Ilhas da Lomba”: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Chapa metálica	10,00	Camião Rígido	185
Membrana subtelha	0,19	Carrinha	15
Painel OSB	26,79	Camião Rígido	100
XPS	2,48	Camião Articulado	260
Aço estrutural (viga)	31,60	Camião Articulado	30
Lã mineral	1,88	Camião Rígido	90
Membrana para-vapor	0,16	Camião Rígido	160
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	430
Gesso cartonado	17,00	Camião Articulado	430

Como alternativa, os sistemas de impermeabilização e isolamento térmico permanecem inalterados, sendo alterada a estrutura metálica, que foi substituída por vigas de madeira lamelada colada. Além disso, o revestimento exterior foi trocado da chapa metálica para telha cerâmica.

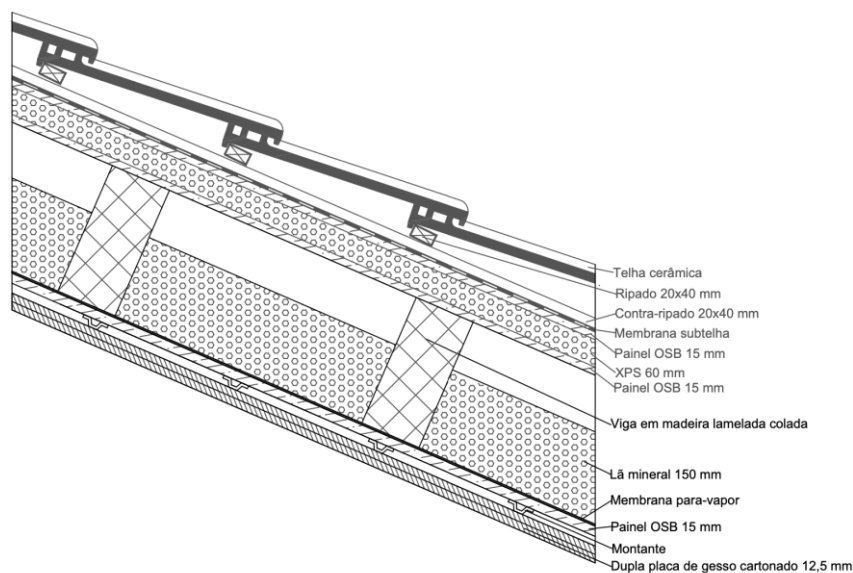


Figura 4.26 – Pormenor construtivo da cobertura: solução alternativa de “Ilhas da Lomba”.

Quadro 4.21 – Cobertura “Ilhas da Lomba”: dados para a avaliação da solução alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Telha cerâmica	42,57	Camião Rígido	90
Madeira maciça (ripado e contra-ripado)	0,77	Camião Articulado	50
Membrana subtelha	0,19	Carrinha	15
Painel OSB	20,84	Camião Rígido	100
XPS	2,48	Camião Articulado	260
Madeira lamelada colada (viga)	18,33	Camião Articulado	50
Lã mineral	1,88	Camião Rígido	90
Membrana para-vapor	0,16	Camião Rígido	160
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	430
Gesso cartonado	17,00	Camião Articulado	430

O pavimento intermédio é composto por uma estrutura de betão armado, sobre a qual são instaladas uma manta acústica e uma camada de geotêxtil. Em seguida, é aplicada uma betonilha com argila expandida, seguida de uma betonilha regular, e finalmente o revestimento do piso superior. Abaixo da estrutura, há uma camada de isolamento de lã mineral de 30 mm e uma placa de gesso cartonado de 15 mm.

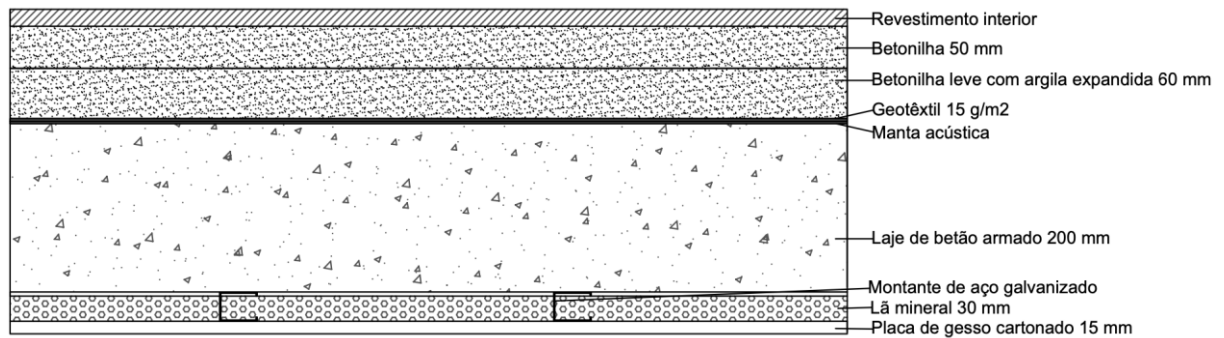


Figura 4.27 – Pormenor construtivo do pavimento intermédio: solução de projeto de “Ilhas da Lomba”.

Quadro 4.22 – Pavimento intermédio “Ilhas da Lomba”: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Revestimento interior	-	-	-
Betonilha	100,00	Camião Rígido	70
Betonilha com argila expandida	34,50	Camião Rígido	160
Geotêxtil	0,16	Carrinha	20
Manta acústica	6,49	Camião Rígido	160
Betão (laje)	477,97	Camião Rígido	30
Aço para betão armado (laje)	14,34	Camião Articulado	30
Lã mineral	0,38	Camião Rígido	90
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	430
Gesso cartonado	10,20	Camião Articulado	430

Como alternativa, a laje de betão foi substituída por vigas de madeira lamelada colada e a camada de betonilha foi trocada por painéis OSB, mantendo-se o isolamento e o revestimento interior inalterados.

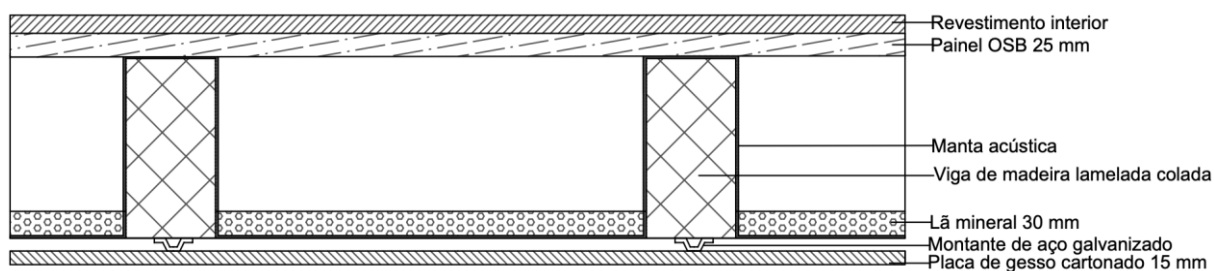


Figura 4.28 – Pormenor construtivo do pavimento intermédio: solução alternativa de “Ilhas da Lomba”.

Quadro 4.23 – Pavimento intermédio “Ilhas da Lomba”: dados para a avaliação da solução alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Revestimento interior	-	-	-
Painel OSB	14,88	Camião Rígido	100
Manta acústica	6,49	Camião Rígido	160
Madeira lamelada colada (viga)	183,35	Camião Articulado	1200
Lã mineral	0,38	Camião Rígido	90
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	430
Gesso cartonado	10,20	Camião Articulado	430

No projeto, o pavimento térreo é composto por uma estrutura de ensoleiramento de betão armado, sobre a qual é aplicada uma membrana betuminosa de 4 kg/m². Em seguida, é instalado um isolamento de XPS com 40 mm de espessura, uma betonilha de 60 mm de espessura e, finalmente, o revestimento interior.

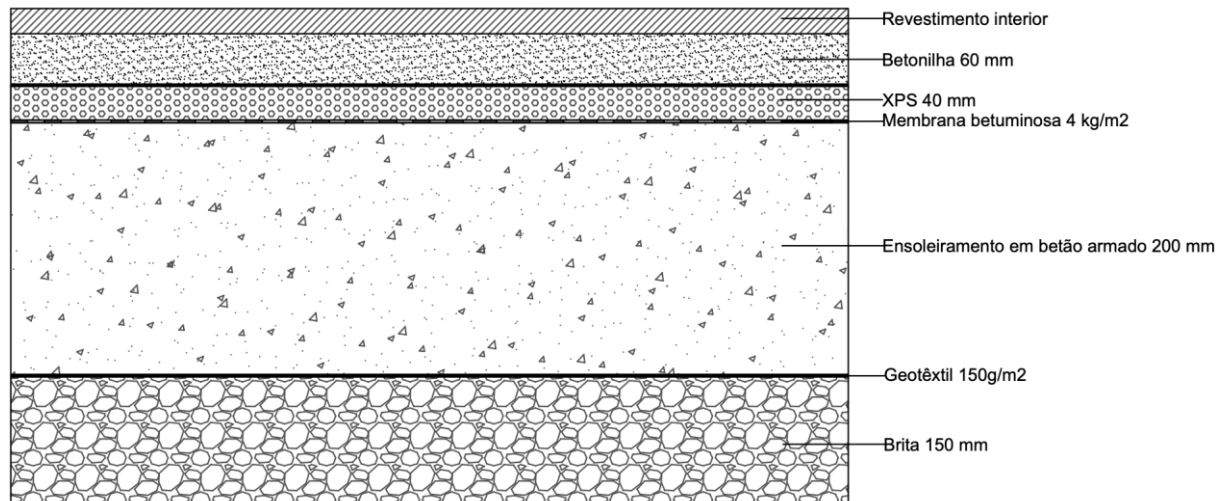


Figura 4.29 – Pormenor construtivo do pavimento térreo: solução de projeto de “Ilhas da Lomba”.

Quadro 4.24 – Pavimento térreo “Ilhas da Lomba”: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Revestimento interior	-	-	-
Betonilha	120,00	Camião Rígido	70
XPS	1,65	Camião Articulado	260
Membrana betuminosa	4,00	Camião Rígido	160
Betão (ensoleiramento)	477,97	Camião Rígido	30
Aço para betão armado (ensoleiramento)	14,34	Camião Articulado	30
Geotêxtil	0,16	Carrinha	20
Brita	228,00	Camião Articulado	40

Como alternativa, os materiais das camadas foram alterados, substituindo o isolamento XPS por PIR e a membrana betuminosa por uma membrana TPO.

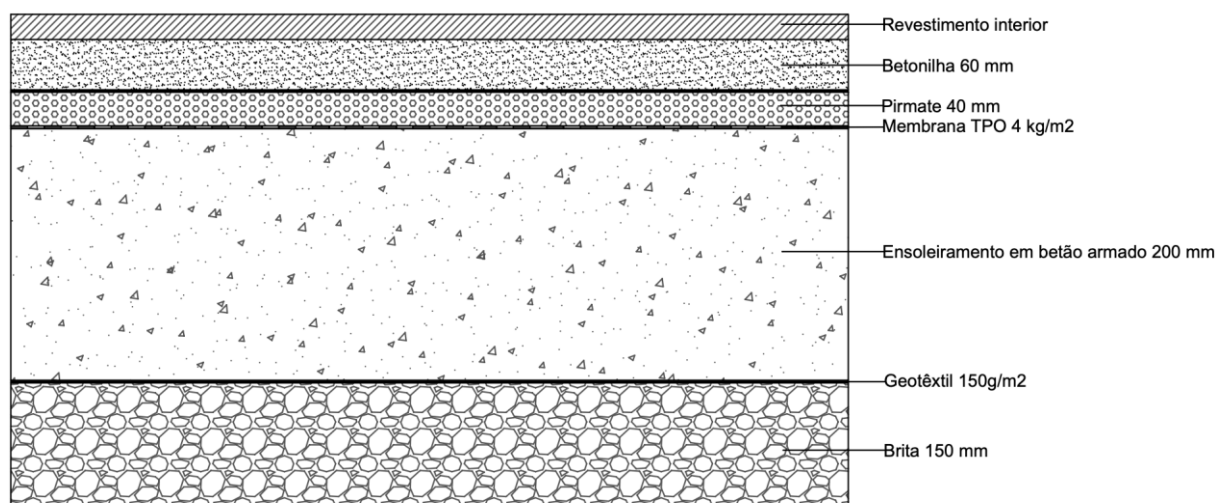


Figura 4.30 – Pormenor construtivo do pavimento térreo: solução alternativa de “Ilhas da Lomba”.

Quadro 4.25 – Pavimento térreo “Ilhas da Lomba”: dados para a avaliação da solução alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Revestimento interior	-	0	0
Betonilha	120,00	Camião Rígido	70
Pirmate	1,52	Carrinha	15
Membrana TPO	4,00	Camião Rígido	110
Betão (ensoleiramento)	477,97	Camião Rígido	30
Aço para betão armado (ensoleiramento)	14,34	Camião Articulado	30
Geotêxtil	0,16	Carrinha	20
Brita	228,00	Camião Articulado	40

As fachadas, conforme previstas em projeto, consistem em estruturas de pilares de betão armado e alvenaria de bloco de betão térmico com 20 cm de espessura. Externamente, é utilizado um sistema ETICS com 80 mm de EPS, enquanto internamente há um isolamento adicional de 50 mm de lã mineral, revestido com dupla placa de gesso cartonado de 12,5 mm.

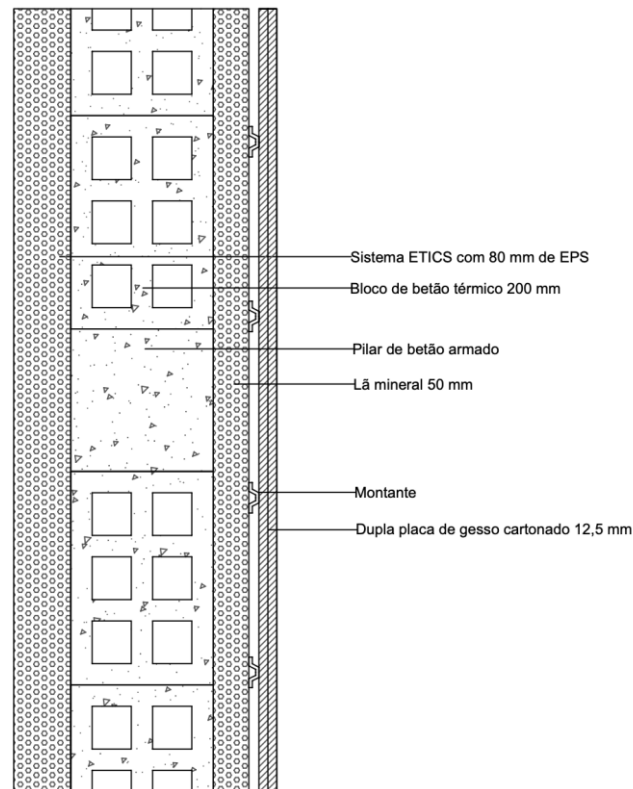


Figura 4.31 – Corte horizontal da fachada: solução de projeto de “Ilhas da Lomba”.

Quadro 4.26 – Fachada “Ilhas da Lomba”: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Sistema ETICS com 80mm de EPS	12,28	Camião Rígido	75
Betão (pilar)	47,80	Camião Rígido	30
Aço para betão armado (pilar)	1,43	Camião Articulado	30
Bloco de betão térmico	238,00	Camião Articulado	170
Lã mineral	0,38	Camião Rígido	90
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	430
Gesso cartonado	17,00	Camião Articulado	430

Como alternativa, o ETICS de EPS foi substituído por um sistema ETICS com 40 mm de cortiça. A estrutura de pilares de betão armado e a alvenaria de tijolo de betão térmico foram substituídas por pilares de madeira e painéis OSB de 20 mm. O isolamento de lã mineral foi também trocado por aglomerado de cortiça expandida de 110 mm, mantendo-se o revestimento interior em gesso cartonado.

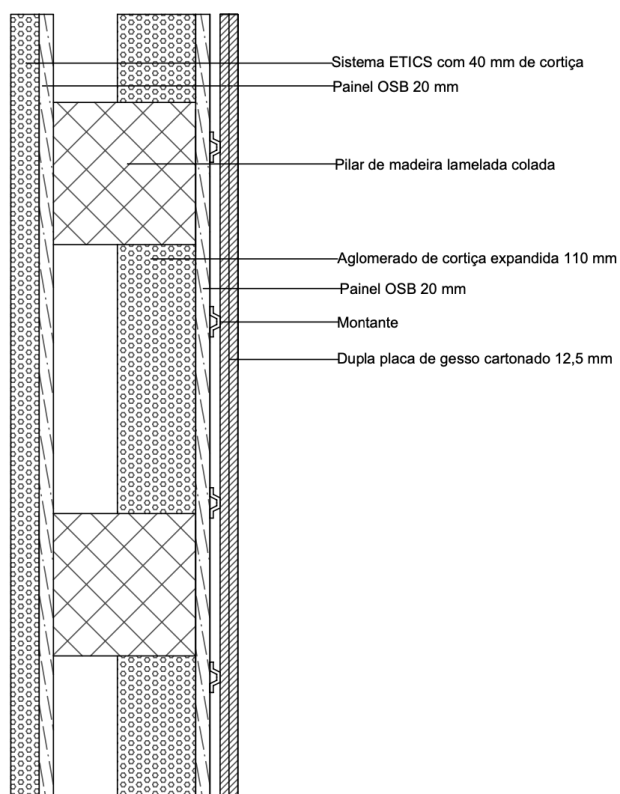


Figura 4.32 – Corte horizontal da fachada: solução alternativa de “Ilhas da Lomba”.

Quadro 4.27 – Fachada “Ilhas da Lomba”: dados para a avaliação da solução alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Sistema ETICS com 40mm de EPS	6,05	Camião Rígido	75
Painel OSB	23,81	Camião Rígido	100
Madeira lamelada colada (pilar)	18,33	Camião Articulado	1200
Aglomerado de Cortiça Expandida	12,65	Camião Rígido	240
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Articulado	430
Gesso cartonado	17,00	Camião Articulado	430

Por fim, as paredes interiores previstas no projeto consistem em alvenaria simples de tijolo cerâmico furado com 11 cm de espessura, rebocadas em ambos os lados com uma espessura de 20 mm.

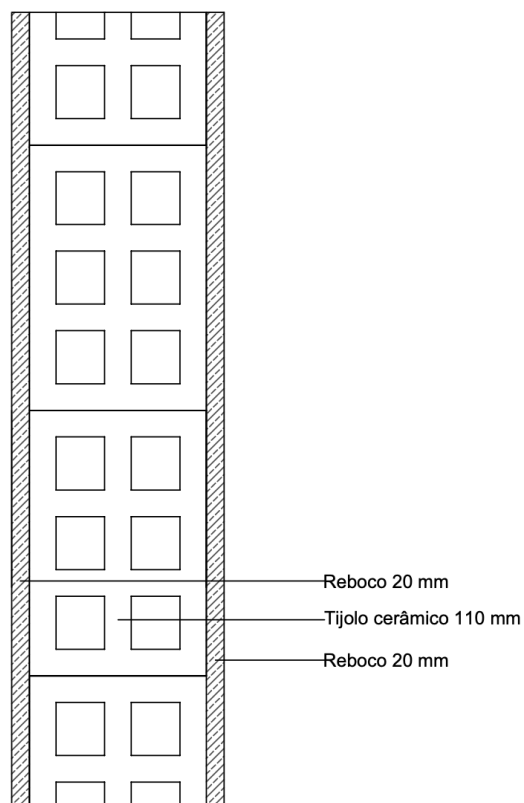


Figura 4.33 – Pormenor construtivo das paredes interiores: solução de projeto de “Ilhas da Lomba”.

Quadro 4.28 – Paredes interiores “Ilhas da Lomba”: dados para a avaliação da solução de projeto.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Reboco	56,00	Camião Articulado	250
Tijolo cerâmico	141,06	Camião Articulado	50

Como alternativa, são previstas paredes leves compostas por placas de gesso cartonado, com isolamento interior de lã mineral de 50 mm.

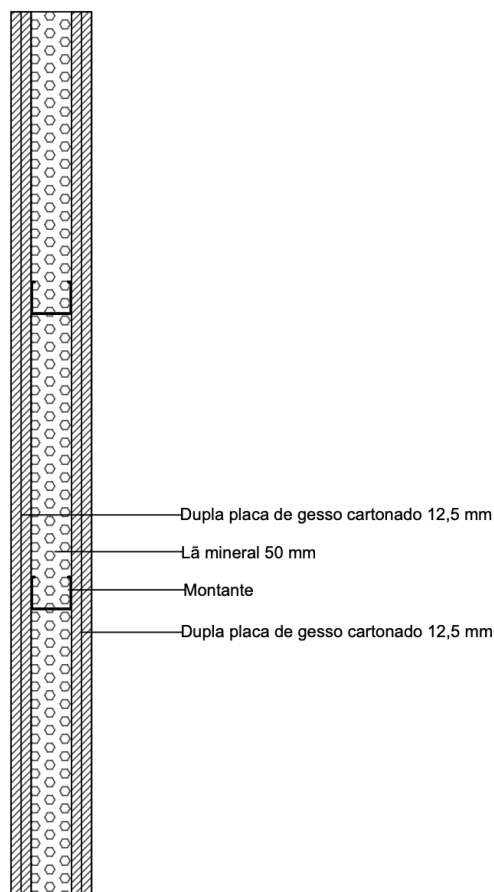


Figura 4.34 – Pormenor construtivo das paredes interiores: solução alternativa de “Ilhas da Lomba”.

Quadro 4.29 – Paredes interiores “Ilhas da Lomba”: dados para a avaliação da solução alternativa.

Materiais	Qtd. por m ² de elemento construtivo [kg]	Tipo de transporte	Distância estimada [km]
Gesso cartonado	34,00	Camião Rígido	350
Montante de aço galvanizado	2,30	Camião Rígido	350
Lã mineral	1,25	Camião Rígido	90

5

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da ferramenta FOCO₂ *Analyser* nos diferentes casos de estudo. O objetivo é analisar os resultados do indicador do potencial de aquecimento global entre os módulos A1 e A4, fornecendo uma comparação detalhada das emissões de CO₂ associadas às soluções adotadas nos projetos em relação às soluções alternativas propostas.

Os subcapítulos seguintes detalharão os resultados obtidos, medidos em quilogramas de CO₂ equivalente por metro quadrado do elemento construtivo, apresentando as emissões de cada material das soluções construtivas analisadas, permitindo uma avaliação do impacto ambiental de cada material utilizado.

Além disso, será feita uma comparação das emissões totais **por metro quadrado do elemento construtivo** das diferentes soluções, considerando todos os materiais. Esta análise permitirá identificar a contribuição dos materiais e soluções construtivas para o aquecimento global, promovendo práticas de construção mais sustentáveis.

5.2. RESULTADOS DO CASO DE ESTUDO 1: AIRES ORNELAS

Como mencionado anteriormente, no projeto “Aires Ornelas”, foi objetivo dos projetistas a definição de soluções sustentáveis e, para avaliar a sustentabilidade dessas soluções, pretendeu-se comparar com soluções construtivas mais correntes.

Para o caso da cobertura, verificou-se que a solução de projeto inclui materiais como madeira maciça, painéis OSB e vigas de madeira lamelada colada, o que conferiu um indicador de aquecimento global negativo. Isso ocorre porque a madeira é considerada um material de construção renovável, e durante o crescimento das árvores, estas absorvem CO₂ da atmosfera. Portanto, ao utilizar madeira como material de construção, há uma compensação parcial das emissões de CO₂ associadas à produção e uso desses materiais.

Como alternativa, comparou-se os resultados caso a estrutura fosse feita com materiais tradicionais, como betão e aço. O betão armado é um material cuja produção é intensiva em energia e gera grandes quantidades de CO₂. Especificamente, o cimento Portland, principal componente do betão, é responsável por uma parcela significativa dessas emissões, devido ao processo de calcinação do

calcário. Além disso, o aço contribui consideravelmente para o impacto ambiental devido ao consumo de energia na extração de matéria-prima, processamento e fabricação.

Os Quadros 5.1 e 5.2 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respectivamente. O Quadro 5.3 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.1 – Resultados da cobertura “Aires Ornelas”: solução de projeto.

Materiais	Peso [kg]	Peso [%]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Membrana betuminosa	9,00	9,74	7,17	1,10	8,27
Painel OSB	41,08	44,44	-60,05	1,70	-58,35
Madeira maciça (camada de forma)	3,46	3,75	-4,86	0,03	-4,83
Lã mineral	1,25	1,35	1,87	0,05	1,92
Madeira lamelada colada (viga)	18,33	19,84	-24,72	3,37	-21,35
Montante de aço galvanizado	2,30	2,49	5,30	0,15	5,45
Gesso cartonado	17,00	18,39	3,58	1,12	4,70
Total	92,43	100	-71,71	7,52	-64,20

Quadro 5.2 – Resultados da cobertura “Aires Ornelas”: solução alternativa.

Materiais	Peso [kg]	Peso [%]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Seixo rolado	75,00	11,86	0,27	0,62	0,89
Geotêxtil	0,16	0,03	0,44	0,00	0,44
XPS	4,13	0,65	7,06	0,16	7,22
Membrana betuminosa	7,00	1,11	5,58	0,46	6,04
Betonilha leve com argila expandida	34,50	5,46	12,17	2,28	14,45
Betão (laje maciça)	477,97	75,58	53,48	5,92	59,40
Aço para betão armado (laje maciça)	14,34	2,27	6,47	0,18	6,65
Montante de aço galvanizado	2,30	2,49	5,30	0,15	5,45
Gesso cartonado	17,00	18,39	3,58	1,12	4,70
Total	632,41	130	94,34	10,90	105,24

Quadro 5.3 – Comparação de resultados: cobertura “Aires Ornelas”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	58,58	-26,17	3,51	-22,66
Solução alternativa	632,41	94,34	10,90	105,24
Diferença	573,82	120,51	7,39	127,90

Em relação à fachada, na qual a solução de projeto consiste em pilares de madeira e parede de gesso cartonado, observou-se que, ao considerar pilares de betão e alvenaria de tijolo cerâmico térmico rebocada pelo interior, houve um aumento significativo no GWP.

As placas de gesso cartonado apresentam um baixo potencial de aquecimento global por quilograma de material. No entanto, é importante considerar o impacto dos montantes utilizados para fixar essas placas, geralmente feitos de aço galvanizado, que geram emissões significativas devido à produção do aço e ao processo de galvanização, ambos altamente intensivos em energia. Ainda assim, o peso em quilogramas por metro quadrado da solução alternativa é significativamente menor do que o da solução de projeto, resultando não apenas em menores emissões nos módulos A1-A3, mas também no módulo A4, devido à redução da carga transportada.

O ETICS também exerce um impacto significativo no GWP, uma vez que sua produção demanda um elevado consumo de energia para fabricação dos isolamentos e dos componentes estruturais, além do uso de adesivos à base de solventes ou fixadores mecânicos, o que contribui ainda mais para as emissões de GEE.

Os Quadros 5.4 e 5.5 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respectivamente. O Quadro 5.6 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.4 – Resultados da fachada “Aires Ornelas”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Sistema ETICS com 80mm de lã mineral	20,25	23,91	17,60	0,75	18,35
Painel OSB	26,19	30,92	-38,29	1,08	-37,21
Madeira lamelada colada (pilar)	18,33	21,65	-24,72	0,14	-24,58
Lã mineral	0,63	0,74	0,94	0,02	0,96
Montante de aço galvanizado	2,30	2,72	5,30	0,15	5,45
Gesso cartonado	17,00	20,07	3,58	1,12	4,70
Total	84,70	100	-35,60	3,27	-32,33

Quadro 5.5 – Resultados da fachada “Aires Ornelas”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Sistema ETICS com 80mm de lã mineral	20,25	8,51	17,60	0,75	18,35
Betão (pilar)	47,80	20,09	5,35	0,59	5,94
Aço para betão armado (pilar)	1,43	0,60	0,65	0,02	0,66
Tijolo cerâmico térmico	141,80	59,59	27,59	1,76	29,35
Reboco	26,67	11,21	3,97	0,77	4,74
Total	237,95	100	55,16	3,89	59,05

Quadro 5.6 – Comparação de resultados: fachada “Aires Ornelas”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	84,70	-35,60	3,27	-32,33
Solução alternativa	237,95	55,16	3,89	59,05
Diferença	153,24	90,76	0,62	91,38

Seguindo a mesma análise, para o pavimento intermédio, ao considerar a solução alternativa que utiliza materiais de construção mais correntes, como estrutura de betão armado, verifica-se uma diferença adicional de 492 kg por metro quadrado de elemento construtivo. Essa diferença resulta no aumento do GWP não apenas na etapa de produção dos materiais, como também dos transportes, considerando a carga transportada.

Além disso, é importante ressaltar a contribuição da betonilha, que também conta com o cimento Portland como um de seus principais componentes, associado a emissões significativas de GEE.

Em relação aos elementos com GWP positivo na solução de projeto, ou seja, que contribuem para o aquecimento global, destacam-se a membrana acústica, o gesso cartonado e o seu montante. A membrana acústica é mais necessária para as soluções de madeira devido à sua capacidade de absorver e reduzir o ruído transmitido, uma vez que a madeira é mais suscetível à propagação sonora do que o betão. Por outro lado, o betão, sendo um material mais denso, naturalmente oferece uma melhor resistência ao som, diminuindo a necessidade de uma membrana acústica. Apesar dessas considerações, a opção de projeto original ainda se destaca como a escolha mais sustentável em termos de GWP.

Os Quadros 5.7 e 5.8 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respetivamente. O Quadro 5.9 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.7 – Resultados do pavimento intermédio “Aires Ornelas”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Revestimento interior	-	-	-	-	-
Painel OSB	14,88	24,96	-21,76	0,61	-21,14
Manta acústica	6,49	10,88	2,49	0,43	2,92
Madeira lamelada colada (viga)	18,33	30,75	-24,72	3,37	-21,35
Lã mineral	0,63	1,05	0,94	0,02	0,96
Montante de aço galvanizado	2,30	3,86	5,30	0,15	5,45
Gesso cartonado	17,00	28,51	3,58	1,12	4,70
Total	59,63	100	-34,17	5,71	-28,46

Quadro 5.8 – Resultados do pavimento intermédio “Aires Ornelas”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Revestimento interior	-	-	-	-	-
Betonilha	40,00	7,24	7,92	1,16	9,08
Betão (laje)	477,97	86,55	53,48	5,92	59,40
Aço para betão armado (laje)	14,34	2,60	6,47	0,18	6,65
Lã mineral	0,63	0,11	0,94	0,02	0,96
Montante de aço galvanizado	2,30	0,42	5,30	0,15	5,45
Gesso cartonado	17,00	3,08	3,58	1,12	4,70
Total	552,24	100	77,68	8,55	86,24

Quadro 5.9 – Comparação de resultados: pavimento intermédio “Aires Ornelas”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	59,63	-34,17	5,71	-28,46
Solução alternativa	552,24	77,68	8,55	86,24
Diferença	492,60	111,85	2,84	114,70

Embora os outros elementos construtivos estudados - como a cobertura, fachada e pavimento intermédio - tenham demonstrado ter valores negativos para GWP, contribuindo assim para a redução do aquecimento global, as paredes interiores mostraram um impacto negativo nesse aspeto. No entanto, ao comparar com a solução alternativa que utiliza tijolo cerâmico térmico rebocado, percebe-se que ainda assim é uma opção mais sustentável em termos de GWP, devido à sua característica de “construção leve”.

Além disso, verificam-se emissões significativas relacionadas ao tijolo cerâmico. Isso decorre principalmente do seu processo de fabricação, que envolve a extração de matérias-primas, como argila, o transporte desses materiais para as instalações de produção, o processo de moldagem e secagem em fornos a altas temperaturas. Todo esse ciclo de produção pode gerar emissões significativas de gases com efeito de estufa, especialmente se a energia utilizada no processo não for proveniente de fontes renováveis.

Os Quadros 5.10 e 5.11 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respetivamente. O Quadro 5.12 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.10 – Resultados das paredes interiores “Aires Ornelas”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Gesso cartonado	34,00	92,08	7,16	2,24	9,40
Montante de aço galvanizado	2,30	6,23	5,30	0,41	5,71
Lã mineral	0,63	1,69	0,94	0,02	0,96
Total	36,93	100	13,40	2,67	16,07

Quadro 5.11 – Resultados das paredes interiores “Aires Ornelas”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Reboco	56,00	41,79	8,62	1,62	10,24
Tijolo cerâmico	77,99	58,21	15,18	2,90	18,07
Total	133,99	100	23,80	4,52	28,32

Quadro 5.12 – Comparação de resultados: pavimento intermédio “Aires Ornelas”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	36,93	13,40	2,67	16,07
Solução alternativa	133,99	23,80	4,52	28,32
Diferença	97,07	10,40	1,85	12,25

5.3. RESULTADOS DO CASO DE ESTUDO 2: CASA DO CASTELO MOURÃO

No projeto “Casa do Castelo Mourão”, a sustentabilidade foi também uma preocupação central. Este subcapítulo apresentará os resultados obtidos a partir da comparação entre as soluções de projeto e as soluções alternativas.

No caso da cobertura, mais uma vez, ao substituir a estrutura de madeira por uma estrutura de betão armado, observou-se também um aumento significativo do GWP. Além disso, substituiu-se a lã mineral por XPS, que possui maior GWP, devido ao uso de materiais derivados do petróleo, agentes expansores com alto GWP e processos de fabricação mais intensivos em energia (Wilson, 2010). Em contraste, a lã mineral, apesar de ainda consumir energia durante a produção, utiliza materiais naturais, como areia, vidro e rochas vulcânicas, com menor impacto ambiental, resultando em um GWP mais baixo.

Destaca-se ainda o papel significativo das telhas cerâmicas nas emissões, que possuem processos produtivos semelhantes aos tijolos cerâmicos, conforme mencionado anteriormente.

Os Quadros 5.13 e 5.14 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais da cobertura nas soluções de projeto e alternativa, respectivamente. O Quadro 5.15 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.13 – Resultados da cobertura “Casa do Castelo Mourão”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Telha cerâmica	42,57	41,19	10,49	0,16	10,65
Madeira maciça (ripado, contra-ripado e vara)	3,85	3,72	-5,40	0,12	-5,28
Membrana subtelha	0,19	0,18	0,38	0,01	0,39
Painel OSB	17,86	17,28	-26,11	0,16	-25,95
Lã mineral	1,25	1,21	1,87	0,08	1,95
Madeira lamelada colada (viga)	18,33	17,74	-24,72	3,37	-21,35
Montante de aço galvanizado	2,30	2,23	5,30	0,07	5,37
Gesso cartonado	17,00	16,45	3,58	0,52	4,10
Total	103,34	100	-34,61	4,50	-30,11

Quadro 5.14 – Resultados da cobertura “Casa do Castelo Mourão”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Telha cerâmica	42,57	7,34	10,49	0,16	10,65
Madeira maciça (ripado, contra-ripado e vara)	3,85	0,66	-5,40	0,12	-5,28
Membrana subtelha	0,19	0,03	0,38	0,01	0,39
Painel OSB	17,86	3,08	-26,11	0,16	-25,95
XPS	4,13	0,71	7,06	0,31	7,36
Betão (laje)	477,97	82,38	53,48	3,95	57,43
Aço para betão armado (laje)	14,34	2,47	6,47	0,33	6,80
Montante de aço galvanizado	2,30	0,40	5,30	0,07	5,37
Gesso cartonado	17,00	2,93	3,58	0,52	4,10
Total	580,21	100	55,24	5,63	60,88

Quadro 5.15 – Comparação de resultados: cobertura “Casa do Castelo Mourão”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	103,34	-34,61	4,50	-30,11
Solução alternativa	580,21	55,24	5,63	60,88
Diferença	476,86	89,85	1,14	90,99

No caso do pavimento intermédio, foi proposta uma solução alternativa em aço estrutural no lugar da estrutura de madeira, mantendo os outros materiais do elemento construtivo. Ainda assim, observaram-se valores negativos para o GWP em ambas as soluções devido à utilização do contraplacado de bétula, que é um material de origem biogénica.

Para a solução de projeto, considerou-se um cenário onde os materiais fossem todos produzidos em fábricas fora de Portugal, enquanto na solução alternativa foram utilizados materiais de produção nacional. Diante deste cenário, verificou-se que a solução de projeto continua sendo mais sustentável em termos de GWP do que a solução alternativa. Isso se deve à capacidade dos materiais biogénicos de retirar CO₂ da atmosfera e às emissões associadas à extração das matérias-primas e aos processos de produção do aço.

Os Quadros 5.16 e 5.17 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respetivamente. O Quadro 5.18 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.16 – Resultados do mezanino “Casa do Castelo Mourão”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Contraplacado de bétula	20,40	50,98	-25,68	8,13	-17,55
Madeira lamelada colada (viga)	18,37	45,90	-25,57	3,38	-22,20
Lã mineral	1,25	3,12	1,87	0,23	2,10
Total	40,02	100	-49,38	11,73	-37,65

Quadro 5.17 – Resultados do mezanino “Casa do Castelo Mourão”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Contraplacado de bétula	20,93	54,53	-25,75	0,83	-24,92
Aço estrutural (viga)	16,20	42,21	11,76	0,37	12,13
Lã mineral	1,25	3,26	1,87	0,08	1,95
Total	38,38	100	-12,13	1,28	-10,85

Quadro 5.18 – Comparação de resultados: mezanino “Casa do Castelo Mourão”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	40,02	-49,38	11,73	-37,65
Solução alternativa	38,38	-12,13	1,28	-10,85
Diferença	-1,64	37,25	-10,45	26,80

No caso do pavimento térreo, a solução alternativa visou minimizar as emissões por meio da redução do uso de betão. Para isso, foi realizada a substituição da laje de betão por fundações das paredes em taipa, complementadas por uma camada de betonilha com argila expandida.

Verificou-se uma redução do GWP, devido às altas emissões associadas à produção do betão. A betonilha com argila expandida revelou-se uma solução mais sustentável devido ao seu baixo peso volumétrico, tornando a solução mais leve.

Os Quadros 5.19 e 5.20 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respetivamente. O Quadro 5.21 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.19 – Resultados do pavimento térreo “Casa do Castelo Mourão”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Acabamento interior	-	-	-	-	-
Betonilha	120,00	10,44	23,76	7,36	31,12
Membrana betuminosa	4,00	0,35	3,19	0,20	3,38
Pirmate	1,52	0,13	4,21	0,11	4,32
Betonilha com argila expandida	57,50	5,00	20,28	1,32	21,61
Betão (ensoleiramento)	716,96	62,36	80,22	5,92	86,14
Aço para betão armado (ensoleiramento)	21,51	1,87	9,71	0,49	10,20
Geotêxtil	0,16	0,01	0,44	0,01	0,44
Brita	228,00	19,83	0,55	6,59	7,14
Total	1149,65	100	142,34	22,00	164,34

Quadro 5.20 – Resultados do pavimento térreo “Casa do Castelo Mourão”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Acabamento interior	-	-	-	-	-
Betonilha	120,00	16,71	23,76	7,36	31,12
Membrana betuminosa	4,00	0,56	3,19	0,20	3,38
Pirmate	1,52	0,21	4,21	0,11	4,32
Betonilha com argila expandida	69,00	9,61	24,34	2,75	27,09
Betão (fundações)	286,78	39,94	32,09	2,37	34,46
Aço para betão armado (fundações)	8,60	1,20	3,88	0,20	4,08
Geotêxtil	0,16	0,02	0,44	0,01	0,44
Brita	228,00	31,75	0,55	6,59	7,14
Total	718,07	100	92,45	19,58	112,02

Quadro 5.21 – Comparação de resultados: cobertura “Casa do Castelo Mourão”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	1149,65	142,34	22,00	164,34
Solução alternativa	718,07	92,45	19,58	112,02
Diferença	-431,58	-49,90	-2,42	-52,32

Em relação à fachada, a solução de projeto consiste em paredes feitas em taipa rebocadas com reboco térmico. A taipa, um sistema construtivo tradicionalmente composto por terra e materiais orgânicos, possui emissões sem significado.

Como alternativa, foi feita uma comparação com as emissões associadas a uma parede com pilares de betão armado e alvenaria de bloco de betão térmico, isolado pelo interior. Nessa análise, observou-se uma grande contribuição das emissões provenientes do bloco de betão térmico, também produzido com cimento Portland, associado a altas emissões de CO₂ durante o processo de produção.

Os Quadros 5.22 e 5.23 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respetivamente. O Quadro 5.24 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.22 – Resultados da fachada “Casa do Castelo Mourão”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Taipa	969,50	99,02	0,00	0,00	0,00
Reboco térmico	9,60	0,98	7,85	0,59	8,44
Total	979,10	100	7,85	0,59	8,44

Quadro 5.23 – Resultados da fachada “Casa do Castelo Mourão”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Reboco	28,00	8,35	4,31	1,72	6,03
Bloco de betão térmico	238,00	70,99	41,14	11,67	52,81
Betão (pilar)	47,80	14,26	5,35	0,39	5,74
Aço para betão armado (pilar)	1,43	0,43	0,65	0,03	0,68
Lã mineral	0,75	0,22	1,12	0,05	1,17
Montante	2,30	0,69	5,30	0,07	5,37
Gesso cartonado	17,00	5,07	3,58	0,52	4,10
Total	335,28	100	61,45	14,45	75,90

Quadro 5.24 – Comparação de resultados: fachada “Casa do Castelo Mourão”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	979,10	7,85	0,59	8,44
Solução alternativa	335,28	61,45	14,45	75,90
Diferença	-643,82	53,60	13,86	67,46

Por fim, as paredes interiores do projeto são compostas por duas camadas de contraplacado de bétula, preenchidas por lã mineral. Como alternativa, foram consideradas paredes de alvenaria de tijolo cerâmico rebocado. Essa opção não apenas envolve materiais com emissões significativas, mas também é mais pesada, resultando mais uma vez num aumento do GWP.

Os Quadros 5.25 e 5.26 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respetivamente. O Quadro 5.27 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.25 – Resultados das paredes interiores “Casa do Castelo Mourão”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Contraplacado de bétula	20,40	94,23	-25,68	8,13	-17,55
Lã mineral	1,25	5,77	1,87	0,23	2,10
Total	21,65	100	-23,81	8,36	-15,45

Quadro 5.26 – Resultados das paredes interiores “Casa do Castelo Mourão”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Reboco	56,00	28,42	8,62	3,43	12,06
Tijolo cerâmico	141,06	71,58	36,31	3,08	39,39
Total	197,06	100	44,94	6,52	51,45

Quadro 5.27 – Comparação de resultados: paredes interiores “Casa do Castelo Mourão”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	21,65	-23,81	8,36	-15,45
Solução alternativa	197,06	44,94	6,52	51,45
Diferença	175,41	68,75	-1,84	66,90

5.4. RESULTADOS DO CASO DE ESTUDO 3: ILHAS DA LOMBA

No projeto “Ilhas da Lomba”, foram utilizadas soluções construtivas mais correntes. Este subcapítulo apresentará os resultados obtidos a partir da comparação dessas soluções de projeto com soluções alternativas, visando reduzir o potencial de aquecimento global das construções.

No caso da cobertura, constituída no projeto por estrutura de aço e revestimento em chapa metálica, a solução alternativa utilizou vigas de madeira lamelada colada e revestimento em telha cerâmica. Embora a telha cerâmica seja uma solução mais pesada, ela apresenta menores emissões nos módulos A1-A3 em comparação com a chapa metálica. A chapa metálica tem altas emissões no seu processo de produção, devido ao elevado consumo de energia e ao uso de processos intensivos de refino e fabricação do aço. A solução alternativa mostrou-se mais pesada relativamente a de projeto, traduzindo em maiores emissões no módulo A4. No entanto, apesar disso, ainda assim observou-se uma redução do GWP neste elemento construtivo.

Os Quadros 5.28 e 5.29 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respetivamente. O Quadro 5.30 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.28 – Resultados da cobertura “Ilhas da Lomba”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO2eq.]	GWP (A4) [kgCO2eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO2eq.]
Chapa metálica	10,00	10,82	30,20	0,76	30,96
Membrana subtelha	0,19	0,20	0,38	0,00	0,38
Painel OSB	26,79	29,00	-39,16	1,11	-38,06
XPS	2,48	2,68	4,23	0,10	4,33
Aço estrutural (viga)	31,60	34,20	22,93	0,15	23,08
Lã mineral	1,88	2,03	2,81	0,07	2,87
Membrana para-vapor	0,16	0,17	0,45	0,01	0,46
Montante de aço galvanizado	2,30	2,49	5,30	0,15	5,45
Gesso cartonado	17,00	18,40	3,58	1,12	4,70
Total	92,39	100	30,72	3,47	34,18

Quadro 5.29 – Resultados da cobertura “Ilhas da Lomba”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO2eq.]	GWP (A4) [kgCO2eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO2eq.]
Telha cerâmica	42,57	39,97	10,49	1,58	12,07
Madeira maciça (ripado e contra-ripado)	0,77	0,72	-1,08	0,01	-1,07
Membrana subtelha	0,19	0,17	0,38	0,00	0,38
Painel OSB	20,84	19,56	-30,46	0,86	-29,60
XPS	2,48	2,33	4,23	0,10	4,33
Madeira lamelada colada (viga)	18,33	17,22	-24,72	0,14	-24,58
Lã mineral	1,88	1,76	2,81	0,07	2,87
Membrana para-vapor	0,16	0,15	0,45	0,01	0,46
Montante de aço galvanizado	2,30	2,16	5,30	0,15	5,45
Gesso cartonado	17,00	15,96	3,58	1,12	4,70
Total	106,50	100	-29,02	4,04	-24,98

Quadro 5.30 – Comparação de resultados: cobertura “Ilhas da Lomba”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	92,39	30,72	3,47	34,18
Solução alternativa	106,50	-29,02	4,04	-24,98
Diferença	14,12	-59,74	0,57	-59,16

Em relação ao pavimento intermédio, a estrutura do betão armado com camadas de betonilha foi substituída por vigas de madeira lamelada colada e painéis OSB. Essa mudança resultou numa redução no peso do elemento construtivo, bem como no potencial de aquecimento global do mesmo.

Os Quadros 5.31 e 5.32 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respetivamente. O Quadro 5.33 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.31 – Resultados do pavimento intermédio “Ilhas da Lomba”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Revestimento interior	-	-	-	-	-
Betonilha	100,00	15,47	19,80	2,89	22,69
Betonilha com argila expandida	34,50	5,34	12,17	2,28	14,45
Geotêxtil	0,16	0,02	0,44	0,00	0,44
Manta acústica	6,49	1,00	2,49	0,43	2,92
Betão (laje)	477,97	73,95	53,48	5,92	59,40
Aço para betão armado (laje)	14,34	2,22	6,47	0,07	6,54
Lã mineral	0,38	0,06	0,56	0,01	0,57
Montante de aço galvanizado	2,30	0,36	5,30	0,15	5,45
Gesso cartonado	10,20	1,58	2,15	0,67	2,82
Total	646,34	100	102,85	12,43	115,28

Quadro 5.32 – Resultados do pavimento intermédio “Ilhas da Lomba”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Revestimento interior	-	-	-		-
Painel OSB	14,88	6,84	-21,76	0,61	-21,14
Manta acústica	6,49	2,98	2,49	0,43	2,92
Madeira lamelada colada (viga)	183,35	84,26	-247,20	33,71	-213,49
Lã mineral	0,38	0,17	0,56	0,01	0,57
Montante de aço galvanizado	2,30	1,06	5,30	0,15	5,45
Gesso cartonado	10,20	4,69	2,15	0,67	2,82
Total	217,60	100	-258,46	35,59	-222,86

Quadro 5.33 – Comparação de resultados: pavimento intermédio “Ilhas da Lomba”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	646,34	102,85	12,43	115,28
Solução alternativa	217,60	-258,46	35,59	-222,86
Diferença	-428,74	-361,31	23,17	-338,15

Com o objetivo de avaliar o impacto da composição dos materiais com a mesma função, no pavimento térreo, procedeu-se à substituição do isolamento de XPS por PIR, e membrana betuminosa por membrana TPO. Verificou-se que ambos os novos materiais contribuíram para o aumento do GWP. Essa diferença está relacionada às diferentes matérias-primas utilizadas e aos processos de produção envolvidos.

Os Quadros 5.34 e 5.35 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respetivamente. O Quadro 5.36 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.34 – Resultados do pavimento térreo “Ilhas da Lomba”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Revestimento interior	-	-	-	-	-
Betonilha	120,00	14,18	23,76	3,47	27,23
XPS	1,65	0,20	2,82	0,07	2,89
Membrana betuminosa	4,00	0,47	3,19	0,26	3,45
Betão (ensoleiramento)	477,97	56,49	53,48	5,92	59,40
Aço para betão armado (ensoleiramento)	14,34	1,69	6,47	0,07	6,54
Geotêxtil	0,16	0,02	0,44	0,00	0,44
Brita	228,00	26,95	0,55	1,40	1,94
Total	846,13	100	90,70	11,19	101,89

Quadro 5.35 – Resultados do pavimento térreo “Ilhas da Lomba”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Revestimento interior	-	-	-	-	-
Betonilha	120,00	14,18	23,76	3,47	27,23
Pirmate	1,52	0,18	4,21	0,02	4,23
Membrana TPO	4,00	0,47	10,99	0,18	11,17
Betão (ensoleiramento)	477,97	56,50	53,48	5,92	59,40
Aço para betão armado (ensoleiramento)	14,34	1,69	6,47	0,07	6,54
Geotêxtil	0,16	0,02	0,44	0,00	0,44
Brita	228,00	26,95	0,55	1,40	1,94
Total	845,99	100	99,89	11,06	110,95

Quadro 5.36 – Comparação de resultados: pavimento térreo “Ilhas da Lomba”

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	846,13	90,70	11,19	101,89
Solução alternativa	845,99	99,89	11,06	110,95
Diferença	-0,13	9,19	-0,13	9,06

A fachada, constituída por pilares de betão armado e alvenaria de bloco de betão térmico isoladas pelo exterior com ETICS de EPS e, pelo interior, com lâ mineral, possuem um valor significativo de emissões de GEE. Como alternativa, foi avaliada uma solução com pilares de madeira e painéis OSB, isoladas pelo exterior com sistema ETICS com cortiça e pelo interior com aglomerado de cortiça expandida. Mais uma vez, a escolha de materiais de origem biogénica resultou num potencial de aquecimento global negativo.

Os Quadros 5.37 e 5.38 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respetivamente. O Quadro 5.39 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.37 – Resultados da fachada “Ilhas da Lomba”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Sistema ETICS com 80mm de EPS	12,28	3,85	8,25	0,38	8,63
Betão (pilar)	47,80	14,97	5,35	0,59	5,94
Aço para betão armado (pilar)	1,43	0,45	0,65	0,01	0,65
Bloco de betão térmico	238,00	74,56	41,14	6,20	47,34
Lâ mineral	0,38	0,12	0,56	0,01	0,57
Montante de aço galvanizado	2,30	0,72	5,30	0,15	5,45
Gesso cartonado	17,00	5,33	3,58	1,12	4,70
Total	319,19	100	64,83	8,46	73,30

Quadro 5.38 – Resultados da fachada “Ilhas da Lomba”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Sistema ETICS com 40mm de EPS	6,05	7,55	-0,61	0,19	-0,42
Painel OSB	23,81	29,71	-34,81	0,98	-33,83
Madeira lamelada colada (pilar)	18,33	22,88	-24,72	3,37	-21,35
Aglomerado de Cortiça Expandida	12,65	15,78	-33,66	1,25	-32,41
Montante de aço galvanizado	2,30	2,87	5,30	0,15	5,45
Gesso cartonado	17,00	21,21	3,58	1,12	4,70
Total	80,15	100	-84,92	7,07	-77,85

Quadro 5.39 – Comparação de resultados: fachada “Ilhas da Lomba”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	319,19	64,83	8,46	73,30
Solução alternativa	80,15	-84,92	7,07	-77,85
Diferença	-239,04	-149,75	-1,40	-151,15

Por fim, as paredes interiores constituídas por tijolo cerâmico rebocado poderiam ser substituídas, alternativamente, por paredes leves feitas de gesso cartonado, isoladas com lã mineral. Embora essa alternativa ainda contribua negativamente para o aquecimento global, resultaria em uma redução de aproximadamente 58% no GWP.

Os Quadros 5.40 e 5.41 apresentam o peso e o GWP dos diferentes materiais do elemento construtivo nas soluções de projeto e alternativa, respetivamente. O Quadro 5.42 faz uma comparação dos resultados obtidos.

Quadro 5.40 – Resultados das paredes interiores “Ilhas da Lomba”: solução de projeto.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Reboco	56,00	28,42	8,62	2,15	10,77
Tijolo cerâmico	141,06	71,58	36,31	1,08	37,39
Total	197,06	100	44,94	3,23	48,16

Quadro 5.41– Resultados das paredes interiores “Ilhas da Lomba”: solução alternativa.

Materiais	Peso (kg)	Peso (%)	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Gesso cartonado	34,00	90,55	7,16	4,92	12,08
Montante de aço galvanizado	2,30	6,13	5,30	0,33	5,63
Lã mineral	1,25	3,33	1,87	0,05	1,92
Total	37,55	100	14,33	5,29	19,63

Quadro 5.42 – Comparação de resultados: paredes interiores “Ilhas da Lomba”.

	Peso [kg]	GWP (A1-A3) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A4) [kgCO ₂ eq.]	GWP (A1-A4) [kgCO ₂ eq.]
Solução de projeto	197,06	44,94	3,23	48,16
Solução alternativa	37,55	14,33	5,29	19,63
Diferença	-159,51	-30,60	2,07	-28,54

6

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Diante das preocupações atuais com a sustentabilidade e as alterações climáticas, torna-se urgente a redução das emissões de gases com efeito de estufa. Neste estudo, foi desenvolvida a ferramenta *FOCO₂ Analyser*, com o objetivo de reduzir o potencial de aquecimento global das edificações através da comparação de diferentes soluções construtivas.

Os resultados demonstram que a componente estrutural, devido ao seu peso, possui um impacto significativo no valor final do GWP. A comparação entre materiais estruturais evidenciou que os materiais de origem biogénica, como a madeira, apresentam um desempenho ambiental superior em termos de GWP em comparação com materiais tradicionais como betão armado e aço estrutural. Em particular, a madeira oferece a vantagem de absorver CO₂ durante o seu crescimento, o que compensa as emissões associadas à sua produção. Em contraste, o cimento Portland e o aço geram emissões consideráveis devido aos processos de produção intensivos em energia e às consequentes emissões de CO₂.

No que diz respeito aos isolamentos, a cortiça demonstrou ser um material sustentável com GWP negativo, enquanto a lã mineral, embora feita de materiais naturais como areia, vidro e rochas vulcânicas, contribui negativamente para o aquecimento global devido ao consumo energético durante a sua produção. Por outro lado, materiais como XPS e PIR apresentaram pior desempenho em termos de GWP devido ao uso de materiais derivados do petróleo, agentes expansores com alto GWP e processos de fabricação mais intensivos em energia, os quais contribuem significativamente para as emissões de gases com efeito de estufa.

De forma geral, a adoção de soluções mais leves contribui para uma redução substancial das emissões, não apenas nos módulos A1-A3, como também no módulo A4.

No contexto do revestimento da cobertura, a substituição da chapa metálica por telha cerâmica resultou numa redução do GWP, apesar do aumento no peso total da solução alternativa. A telha cerâmica, embora mais pesada, gera menores emissões durante a sua produção em comparação com a chapa metálica, que envolve processos altamente energéticos e emissões significativas de CO₂.

A “*FOCO₂ Analyser*” provou ser eficaz na avaliação comparativa da pegada carbónica de diferentes soluções construtivas. Os casos de estudos realizados validaram a capacidade da ferramenta em identificar materiais e soluções com menores emissões de gases com efeito de estufa, proporcionando

uma base sólida para decisões mais sustentáveis, alinhando-se com as metas globais de mitigação das mudanças climáticas.

A ferramenta destaca-se pela sua interface intuitiva e acessível, permitindo aos profissionais da construção civil realizarem avaliações práticas da pegada carbónica das soluções construtivas. Assim, preenche-se uma lacuna significativa no contexto português, onde há uma necessidade crescente de ferramentas práticas e voltadas a realidade nacional na análise da sustentabilidade.

No entanto, a precisão dos resultados é limitada pela atual escassez de Declarações Ambientais de Produto específicas para os materiais utilizados em Portugal. À medida que mais informações se tornam disponíveis e a base de dados seja alimentada, a ferramenta tem o potencial de fornecer resultados mais precisos e representativos.

6.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Diante das conclusões apresentadas, sugere-se que futuros trabalhos se concentrem no enriquecimento da base de dados para melhorar a representatividade geográfica e a precisão dos resultados, e no aprimoramento da ferramenta para abranger outros aspetos da sustentabilidade nos edifícios.

À medida que mais informações forem disponibilizadas, o enriquecimento da base de dados com produtos específicos utilizados nas construções em Portugal pode aprimorar a precisão dos resultados, tanto no módulo de produção quanto no transporte, considerando a localização das fábricas e o tipo de transporte utilizado pelos fabricantes.

Para promover a circularidade dos materiais, a ferramenta poderia avaliar também a utilização de materiais reciclados e a incorporação de resíduos na produção dos materiais. Isso não apenas reduziria os impactos ambientais, mas também poderia impulsionar a circularidade no setor.

Adicionalmente, seria vantajoso incluir uma análise de custos das soluções construtivas, dado que o preço é um fator determinante na escolha dessas soluções. A consideração conjunta do impacto económico e ambiental pode proporcionar uma visão mais completa e prática para a tomada de decisões no setor da construção civil.

Sugere-se ainda considerar outras fases do ciclo de vida do edifício, como a etapa de uso e manutenção e a etapa de fim de vida dos materiais, incluindo informações sobre a geração de resíduos, além de informações complementares de potencial reutilização, recuperação energética ou reciclagem desses materiais.

Por fim, seria importante ainda uma adaptação futura da ferramenta para incluir outros indicadores ambientais para além do potencial de aquecimento global, como potencial de depleção da camada de ozono estratosférica, acidificação do solo e de água, eutrofização, utilização de recursos, entre outros. Essa adaptação permitiria uma avaliação mais abrangente do desempenho ambiental das soluções construtivas, promovendo práticas mais sustentáveis e economicamente viáveis no campo da construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APA Ambiente. (2018). *Descarbonizar 2050*. Sítio da Internet (<https://descarbonizar2050.apambiente.pt/descarbonizar2050/base-cientifica/>). Data de acesso: 04 de abril de 2024.
- Boston Consulting Group, & World Economic Forum. (2023). *Scaling low-carbon design and construction with concrete: Enabling the path to net-zero for buildings and infrastructure*. Sítio da Internet (<https://www.weforum.org/publications/scaling-low-carbon-design-and-construction-with-concrete-enabling-the-path-to-net-zero-for-buildings-and-infrastructure/>). Data de acesso: 04 de abril de 2024.
- Bragança, L. (2017). *SBTool Urban: Instrumento para a promoção da sustentabilidade urbana*. In *Singeburb - Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana*, Volume 1, 3191–3202, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.
- BREEAM. (2024). *A guide to how BREEAM works*. Sítio da Internet (<https://bregroup.com/web/breeam/about/how-breeam-works>). Data de acesso: 29 de abril de 2024.
- Caleiro, L. V. (2022). *Casa do Castelo Mourão*. [Projeto de arquitetura.]
- Carbon Trust. (2018). *A guide to carbon footprinting for businesses*. Sítio da Internet (<https://www.carbontrust.com/our-work-and-impact/guides-reports-and-tools/a-guide-to-carbon-footprinting-for-businesses>). Data de acesso: 13 de abril de 2024.
- Center for Sustainable Systems, University of Michigan. (2023). *Climate change: Science and impacts factsheet*. Sítio da Internet (<https://css.umich.edu/publications/factsheets/climate-change/climate-change-science-and-impacts-factsheet>). Data de acesso: 13 de abril de 2024.
- Delem, L., Spirinckx, C. (2009). *Note on elaboration of refined methodology and work instrument*. In *SuFiQuaD*, chapter 1, §2.3 Methodology impact of building materials, SuFiQuaD.
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Oxford: Capstone.
- EN 14021. (2016). *Rótulos e declarações ambientais - Autodeclarações ambientais (Rotulagem ambiental Tipo II)*.
- EN 15643-1. (2014). *Sustentabilidade das obras de construção - Avaliação da sustentabilidade dos edifícios - Parte 1: Enquadramento geral*.
- EN 15643-2. (2014). *Sustentabilidade das obras de construção - Avaliação da sustentabilidade dos edifícios - Parte 2: Enquadramento para a avaliação do desempenho ambiental*.
- EN 15804. (2012). *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*.
- EN 15978. (2019). *Sustentabilidade das obras de construção - Avaliação do desempenho ambiental dos edifícios - Método de cálculo*.
- EN ISO 14024. (2018). *Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais Tipo I - Princípios e procedimentos*.
- European Commission. (2022). *Regulation of the European parliament and of the council establishing a framework for setting Ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive*

2009/125/EC. Sítio da Internet (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0142>). Data de acesso: 06 de junho de 2024.

Ferraz, E. (2019). *Análise de ciclo de vida de materiais construtivos: Contributo para a certificação de edifícios*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Ferreira, F. (2021). *Aires Ornelas*. [Projeto de arquitetura.]

FOCO Projetos Sustentáveis. (2024). Sítio da Internet (<https://www.foco.pt/>). Data de acesso: 16 de março de 2024.

GBC Brasil. (2024). Sítio da Internet (<https://www.gbcbrasil.org.br/certificacao/certificacao-leed/>). Data de acesso: 28 de abril de 2024.

GHG Protocol. (2024). Sítio da Internet (<https://ghgprotocol.org/standards-guidance>). Data de acesso: 17 de abril de 2024.

Honic, M., Meda Magalhães, P., & Van den Bosch, P. (2024). *From data templates to material passports and digital product passports*. In *Building information modelling (BIM) in design, circular economy and sustainability* (Stefanakis, A., & Nikolaou, I., eds.).

IPCC. (2024). Sítio da Internet (<https://www.ipcc.ch/about/>). Data de acesso: 05 de abril de 2024.

IPCC. (1990). *Climate change: The IPCC scientific assessment*.

IPCC. (2007). *AR4 climate change 2007: Synthesis report*.

IPCC. (2023). *AR6 climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Kibert, C. (1994). *Sustainable construction: Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16, November 6-9, 1994, Tampa, Florida, USA*. University of Florida, Tampa, Florida, USA.

LiderA. (2024). Sítio da Internet (<https://www.lidera.info>). Data de acesso: 28 de abril de 2024.

Mateus, R., & Bragança, L. (2011). *Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the methodology SBTool PT-H*. Building and Environment, 46, 1962-1971.

EN 15804. (2012). *Sustentabilidade das obras de construção - Declarações ambientais dos produtos - Regras de base para as categorias de produtos de construção*.

EN ISO 14025. (2006). *Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais Tipo III - Princípios e procedimentos*.

EN ISO 14040. (2006). *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e enquadramento*.

EN ISO 14044. (2006). *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e linhas de orientação*.

One Click LCA. (2024). Sítio da Internet (<https://oneclicklca.com/>). Data de acesso: 15 de abril de 2024.

Pinto, F., Cabral, F., Moura, M., & Caleiro, L. (2022). *Ilhas da Lomba*. [Projeto de arquitetura.]

PME Sustentável. (2024). Sítio da Internet (<https://pmesustentavel.apee.pt/>). Data de acesso: 16 de maio de 2024.

- Rees, W., & Wackernagel, M. (1996). *Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable—And why they are a key to sustainability*. *Environmental Impact Assessment Review*, 16(4), 223-248.
- SBToolPT. (2024). Sítio da Internet (https://www.sbtool.pt/files/Brochura_SBTOOLpt_.pdf). Data de acesso: 10 de junho de 2024.
- Silva, F. B., Arduin, R. H., Souza, C. A., Vinhal, L. D., Teixeira, C. E., & Oliveira, L. A. (2016). *Aspectos metodológicos para a realização de estudos de avaliação de ciclo de vida (ACV) para produtos de construção*. In *Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Desafios e perspectivas da internacionalização da construção*. São Paulo, SP, Brasil.
- Solar Decathlon - U.S. Department of Energy. (2024). Sítio da Internet (<https://www.solardecathlon.gov/building-science.html>). Data de acesso: 15 de abril de 2024.
- TOTEM. (2023). *Environmental profile of buildings*. Sítio da Internet (<https://www.totem-building.be/>). Data de acesso: 20 de abril de 2024.
- United Nations. (1997). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- United Nations. (2015). *Agenda 2030 – Objetivos de desenvolvimento sustentável*. Sítio da Internet (<https://ods.pt/ods/>). Data de acesso: 03 de abril de 2024.
- United Nations Environment Programme (2023). *Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again)*. Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2016). *The Paris Agreement*.
- University of Bath. (2024). *Embodied carbon - The ICE Database*. Sítio da Internet (<https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>). Data de acesso: 29 de abril de 2024.
- USGBC. (2024). Sítio da Internet (<https://www.usgbc.org/>). Data de acesso: 28 de abril de 2024.
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A definition of 'carbon footprint'. In Pertsova, C. C. (Ed.), *Ecological economics research trends: Chapter 1*, 1-11. Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, Estados Unidos.
- Wilson, A. (2010). *Avoiding the Global Warming Impact of Insulation*. Building Green.
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Relatório Brundtland (Our common future)*. Sítio da Internet (<https://www.un.org/en/academic-impact/sustainability>). Data de acesso: 12 de abril de 2024.
- World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. (2011). *Product life cycle accounting and reporting standard*. Greenhouse Gas Protocol. World Resources Institute, Washington, DC, Estados Unidos.
- Wright, L. A., Kemp, S., & Williams, I. M. (2011). 'Carbon footprinting': Towards a universally accepted definition. In *Carbon Management*, 61-72. Future Science Ltd, Highfield, Southampton, Reino Unido.

ANEXO

LISTA DE DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO CONSULTADAS

Apresenta-se a seguir a lista das Declarações Ambientais de Produto consultadas para a construção da base de dados da ferramenta. Esta lista contém diferentes sistemas de numeração e formatos, de acordo com as normas e regulamentações locais e internacionais:

DAP 001:2015	GlobalEPD-008-012	S-P-02936	S-P-07807
DAP 001:2016		S-P-02989	S-P-07847
DAP 001:2019	HUB-0024	S-P-03682	S-P-08737
DAP 002:2016	HUB-0394	S-P-03860	S-P-08738
DAP 009:2022	NEPD-341-230	S-P-03983	S-P-08931
DAP 011:2022	NEPD-4402-3622	S-P-04045	S-P-08931
DAP 015:2022	NEPD-4555-3811	S-P-04051	S-P-08948
EPD-BBS-20190164-IBA1	NEPD-4579-3832	S-P-04244	S-P-08975
EPD-BBS-20190170-IBA1	S-P-00273	S-P-04453	S-P-09530
EPD-BFS-20230271-IBG1	S-P-00526	S-P-04608	S-P-09767
EPD-BPC-20170092-CCD1	S-P-00691	S-P-04752	S-P-09837
EPD-BFS-20230271-IBG1	S-P-00750	S-P-04806	S-P-10542
EPD-BPC-20170092-CCD1	S-P-00782	S-P-05133	S-P-10870
EPD-EGG-20200248-IBC1	S-P-00905	S-P-05181	S-P-10916
EPD-EGG-20200248-IBC1	S-P-00906	S-P-05225	S-P-11038
EPD-RIVA ACIER-197	S-P-00910	S-P-05575	S-P-11088
EPD-RUB-20230230-IBC1	S-P-01254	S-P-05614	S-P-11145
EPDITALY0058	S-P-01493	S-P-05924	S-P-11218
EPDITALY0107	S-P-01554	S-P-06079	S-P-11240
GlobalEPD EN16783-001	S-P-01850	S-P-06248	S-P-11398
GlobalEPD EN16783-002	S-P-01899	S-P-06520	S-P-12046
GlobalEPD EN16783-002	S-P-01923	S-P-06869	S-P-12137
GlobalEPD EN16783-002	S-P-01989	S-P-07317	S-P-12808
GlobalEPD EN16783-002	S-P-02106	S-P-07323	S-P-13275
GlobalEPD EN16783-002	S-P-02417	S-P-07747	
GlobalEPD EN16783-002	S-P-02473	S-P-07766	