

ANÁLISE TÉCNICA, ECONÓMICA E AMBIENTAL DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE ELEMENTOS OPACOS DE FACHADAS

PAULO DINIS VEIGA MONTEIRO

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

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira
de Almeida

JUNHO DE 2025

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

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 - 2024/2025 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2025*.

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

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

A meus Pais

*“Patience and perseverance have a magical effect before which difficulties disappear
and obstacles vanish.”*

John Quincy Adams

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira e Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, por toda a orientação, paciência e sugestões disponibilizadas ao longo de todo este período. O forte sentido crítico, em prol de um bom trabalho, e o à-vontade sempre presente em todo este percurso tornaram-se essenciais para o desenvolvimento da dissertação. Não poderia ter tido um melhor acompanhamento.

À equipa da *FOCO – Projetos Sustentáveis*, em particular ao Engenheiro Pedro Sarmiento, deixo um sincero agradecimento pela calorosa receção, acolhimento incrível e pelo cuidado que tiveram para comigo enquanto lá estive. O forte apoio e disponibilidade para este estudo, assim como as mais sinceras e valiosas recomendações, demonstram ser cruciais para todo o desenvolvimento desta dissertação.

À Professora Doutora Maria Helena Corvacho agradeço pelo apoio prestado e pelos esclarecimentos fundamentais em diversas temáticas integradas no estudo técnico-científico e metodológico desta dissertação.

À minha família, em particular aos meus pais, avós e irmão, deixo o mais profundo reconhecimento pelo amor incondicional, pela extrema confiança depositada em mim e o constante apoio ao longo de todo o meu percurso académico e de vida. Sem todos vós, nada disto teria sido possível.

À minha namorada, e respetiva família, agradeço por toda a paciência, otimismo, amor e compreensão demonstrados ao longo de todos estes momentos. Cresci muito a teu lado e és, sem dúvida, uma das principais responsáveis por este meu sucesso. Sem ti, nada teria sido igual.

Ao Carlos, Duarte e Pedro, pela amizade, companheirismo, cumplicidade e entreaajuda ao longo de todo este percurso.

RESUMO

O desenvolvimento desta dissertação centra-se no contexto crítico e significativo da sustentabilidade no setor da construção. A construção contribui em grande parte para o surgimento de impactos ambientais, nomeadamente a emissão de gases com efeito de estufa e a geração de resíduos poluentes. Face a este problema, é fundamental apresentar um enquadramento geral sobre a sustentabilidade na construção, destacando os desafios atuais e as metodologias desenvolvidas com o objetivo de minimizar tais impactos durante as fases de construção e reabilitação de edifícios. Assim, desenvolveu-se uma ferramenta de cálculo capaz de verificar a viabilidade sustentável de algumas sugestões de intervenção para a reabilitação de fachadas.

Através de uma revisão bibliográfica abrangente, foi possível estudar temáticas relacionadas com o papel da sustentabilidade na construção civil, os seus principais problemas e desafios associados, assim como analisar metodologias e indicadores comparativos do tipo avaliação do ciclo de vida (LCA) e avaliação do custo do ciclo de vida (LCCA). Estes temas realçam a necessidade urgente de adotar soluções ambientalmente mais responsáveis, com uma otimização de custos e um melhor desempenho térmico.

Neste sentido, a dissertação sustenta o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo com este enquadramento teórico, centrando-a na comparação integrada entre indicadores ambientais, técnicos e económicos, dando a conhecer as suas bases, métodos de cálculo e limitações. Para a sua aplicação, foram testados diversos sistemas de fachada que aplicam os princípios de uma reabilitação energética em alguns edifícios existentes, com volumetrias e configurações diferentes, permitindo comparar de forma isolada e agrupada a viabilidade sustentável das soluções estudadas.

Com base neste conjunto de resultados, foi possível definir um leque de conclusões claras e fundamentadas a partir dos valores obtidos pela ferramenta, destacando as diferenças associadas à materialidade do sistema, o seu desempenho térmico resultante da sua aplicação e todo o processo de avaliação económica das intervenções propostas para um dado período de estudo.

Desta forma, com a criação da *FOCO₂ LCCA*, será possível não só analisar os resultados obtidos para cada tipo de parâmetro estabelecido, como também proporcionar um apoio mais eficaz e informativo ao projetista, relativamente à sua tomada de decisão, com a existência de uma interface prática, flexível e que promove a digitalização no setor da construção.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade, Avaliação do Ciclo de Vida, Avaliação do Custo do Ciclo de Vida, Reabilitação de Fachadas, Melhoria Energética.

ABSTRACT

The development of this dissertation focuses on the critical and significant context of sustainability in the construction sector. Construction is a major contributor to environmental impacts, particularly greenhouse gas emissions and the generation of polluting waste. Considering this issue, it is essential to provide a general framework on sustainability in construction, highlighting current challenges and methodologies developed to minimize such impacts during the construction and rehabilitation phases of buildings. As such, a calculation tool was developed to assess the sustainable feasibility of various proposed interventions for façade rehabilitation.

Through a comprehensive literature review, it was possible to study topics related to the role of sustainability in civil construction, its main problems and associated challenges, as well as to analyse methodologies and comparative indicators such as life cycle assessment (LCA) and life cycle cost assessment (LCCA). These topics underscore the urgent need to adopt more environmentally responsible solutions, optimizing costs and improving thermal performance.

In this context, the dissertation supports the development of a calculation tool based on this theoretical framework, focusing on the integrated comparison of environmental, technical, and economic indicators, and presenting its foundations, calculation methods and limitations. For its application, several façade systems were tested that implement principles of energy rehabilitation in existing buildings, with different volumes and configurations, allowing for both isolated and grouped comparisons of the sustainable feasibility of the studied solutions.

Based on this set of results, it was possible to establish a range of clear and well-founded conclusions derived from the values obtained through the tool, highlighting the differences associated with the materiality of the systems, their thermal performance resulting from application, and the entire economic assessment process of the proposed interventions over a defined study period.

Thus, with the creation of *FOCO2 LCCA*, it will be possible not only to analyse the results obtained for each type of established parameter but also to provide more effective and informative support to the designer in their decision-making process, through a practical, flexible interface that promotes digitalization in the construction sector.

KEYWORDS: Sustainability, Life Cycle Assessment, Life Cycle Cost Assessment, Façade Rehabilitation, Energy Efficiency Improvement.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. INTERESSE E OBJETIVOS DO TRABALHO.....	1
1.3. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
SUSTENTABILIDADE NA REABILITAÇÃO DA CONSTRUÇÃO.....	5
2.1. PRINCÍPIOS DA SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	5
2.1.1. ENQUADRAMENTO	5
2.1.2. PILARES DA SUSTENTABILIDADE	5
2.1.3. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL VS. CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL	7
2.1.4. ECONOMIA CIRCULAR	7
2.2. IMPACTO AMBIENTAL E EMISSÕES NA CONSTRUÇÃO.....	8
2.2.1. ENQUADRAMENTO	8
2.2.2. FONTES DE EMISSÕES NO SETOR DA CONSTRUÇÃO	9
2.2.3. PEGADA CARBÓNICA DE UM EDIFÍCIO.....	10
2.2.4. IMPACTO DAS DEMOLIÇÕES E RESÍDUOS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO.....	10
2.2.5. BASES DE DADOS E SOFTWARES PARA ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL.....	10
2.3. AVALIAÇÃO E CUSTO DO CICLO DE VIDA NA CONSTRUÇÃO.....	11
2.4. NORMAS E REGULAMENTAÇÃO SOBRE EMISSÕES E SUSTENTABILIDADE	14
2.4.1. CERTIFICAÇÕES AMBIENTAIS PARA EDIFÍCIOS	14
2.4.2. METAS INTERNACIONAIS E REGULAMENTARES	17
2.5. PAPEL DA REABILITAÇÃO SUSTENTÁVEL	20
2.5.1. REABILITAÇÃO VS NOVA CONSTRUÇÃO	20
2.5.2. TÉCNICAS CONSTRUTIVAS SUSTENTÁVEIS	20
2.6. REABILITAÇÃO DE FACHADAS	21
2.6.1. PAPEL DA FACHADA NO EDIFÍCIO	21
2.6.2. ELEMENTOS OPACOS.....	22
2.7.3. VÃOS ENVIDRAÇADOS.....	26
DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO	29
3.1. ENQUADRAMENTO	29
3.2. FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO	30

3.2.1. CONSTITUIÇÃO DO SISTEMA.....	30
3.2.2. GUIA DE UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO	31
3.2.3. RESULTADOS ESPERADOS.....	34
3.3. LIMITAÇÕES E PRESSUPOSTOS.....	37
CASOS DE ESTUDO	39
4.1. ENQUADRAMENTO	39
4.2. CASO DE ESTUDO: PINHAIS DA FOZ.....	40
4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO	40
4.2.2. SOLUÇÕES ESTUDADAS.....	41
4.2.2.1. Sistema Construtivo Existente.....	41
4.2.2.2. Solução 1 – Sistema ETICS com EPS	43
4.2.2.3. Solução 2 – Sistema VETTURE	45
4.3. CASO DE ESTUDO: ESTRELA D’AVENIDA.....	48
4.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO	48
4.3.2. SOLUÇÕES ESTUDADAS.....	49
4.3.2.1. Solução Existente	49
4.3.2.2. Solução 1 – Sistema ETICS com Cortiça.....	51
4.3.2.3. Solução 2 – Sistema Fachada Ventilada	53
DISCUSSÃO DE RESULTADOS	57
5.1. ENQUADRAMENTO	57
5.2. RESULTADOS DAS SOLUÇÕES PARA O CASO <i>PINHAIS DA FOZ</i>.....	57
5.2.1. SOLUÇÃO 1 – SISTEMA ETICS COM EPS.....	57
5.2.2. SOLUÇÃO 2 – SISTEMA VETURE	59
5.3. RESULTADOS DAS SOLUÇÕES PARA O CASO <i>ESTRELA D’AVENIDA</i>	61
5.3.1. SOLUÇÃO 1 - SISTEMA ETICS COM CORTIÇA	61
5.3.2. SOLUÇÃO 2 - SISTEMA FACHADA VENTILADA	63
5.4. RESUMO DE RESULTADOS.....	65
5.4.1. AVALIAÇÃO DO CASO DE ESTUDO – <i>PINHAIS DA FOZ</i>	65
5.4.2. AVALIAÇÃO DO CASO DE ESTUDO – <i>ESTRELA D’AVENIDA</i>	68
CONCLUSÕES	71
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXOS.....	81
APLICAÇÃO DA <i>FOCO₂ LCCA</i> NO CONJUNTO <i>PINHAIS DA FOZ</i>.....	83

APLICAÇÃO <i>FOCO</i>₂ <i>LCCA</i> NO CONJUNTO <i>ESTRELA D'AVENIDA</i>.....	87
DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTOS UTILIZADAS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Pilares da Sustentabilidade [4]	6
Figura 2 - Os dezassete objetivos de desenvolvimento sustentável proposto pelas Nações Unidas [5]	7
Figura 3 - Transição de economia linear para uma economia circular [6]	8
Figura 4 - Fases e módulos dos ciclos LCA de edifícios [20]	11
Figura 5 - Fluxo geral de trabalho para o cálculo da LCCA (adaptada de [23])	12
Figura 6 - Principais macro objetivos do LEVEL(s) (adaptado de [28])	15
Figura 7 - Os três níveis crescentes associados a um projeto LEVEL(s) (adaptado de [28])	15
Figura 8 -Esquema de vertentes e áreas associadas à certificação LiderA [29]	16
Figura 9 - Níveis de bom desempenho da certificação LiderA [29]	16
Figura 10 - Representação cronológica de alguns dos marcos internacionais em prol da sustentabilidade.....	17
Figura 11 - Evolução das Permissões de Carbono da União Europeia [42]	18
Figura 12 - Objetivos nacionais promovidos pelo PNEC 2030 [44]	19
Figura 13 - Composição Esquemática 3D de um sistema ETICS [63]	24
Figura 14 - Representação esquemática vertical (a), frontal (b) e perfil (c) de um Verture kit para fachadas [66].....	24
Figura 15 – Detalhes de dois tipos de soluções de fachada ventilada: a) com isolamento térmico; b) sem isolamento térmico [61]	25
Figura 16 - Evolução esquemática dos sistemas de parede dupla. Adaptado de [67].....	25
Figura 17 - Esquema de tipo de aplicação de isolamento térmico pelo interior [68]	25
Figura 18 - Esquema do funcionamento de vidros de baixa emissividade - Low-E [70]	26
Figura 19 - Caixilharia em Alumínio com Corte Térmico [71]	26
Figura 20 - Tipos de Vidros utilizados em Janelas [69]	27
Figura 21 - Folha de cálculo <i>Interface</i>	30
Figura 22 - Folha de cálculo <i>Resultado "X"</i>	31
Figura 23 - Folha de cálculo <i>Comparação de Resultados</i>	31
Figura 24 – Exemplo de aplicação do quadro informativo da folha de cálculo <i>Interface</i>	32
Figura 25 - Exemplo de aplicação do <i>Quadro Auxiliar Térmico</i>	32
Figura 26 - Exemplo de aplicação no <i>Quadro Auxiliar - Avaliação do Ciclo de Vida (LCA)</i>	33
Figura 27 - Exemplo de aplicação do <i>Quadro Auxiliar Económico</i>	33
Figura 28 - Exemplo aplicado no <i>Quadro Avaliação Ambiental</i>	34
Figura 29 - Exemplo aplicado no <i>Quadro Avaliação Técnica</i>	34

Figura 30 - Exemplo aplicado no Quadro <i>Avaliação Económica</i>	35
Figura 31 - Gráficos complementares à avaliação económica da solução exemplo	35
Figura 32 - Quadros de resultados ambientais, técnicos e económicos para as soluções exemplo ...	36
Figura 33 - Gráficos complementares à comparação das soluções exemplares	36
Figura 34 - Fotografia do Conjunto Edificado <i>Pinhais da Foz</i>	40
Figura 35 - Vista aérea do caso de estudo.....	40
Figura 36 - Esquema construtivo horizontal da solução existente no conjunto <i>Pinhais da Foz</i>	42
Figura 37 - Esquema construtivo horizontal da solução em ETICS com EPS.....	44
Figura 38 - Esquema construtivo horizontal da solução em sistema Vetur	46
Figura 39 - Fotografia de um dos edifícios do conjunto <i>Estrela d'Avenida</i>	48
Figura 40 - Vista aérea do caso de estudo.....	48
Figura 41 - Esquema construtivo da fachada existente no <i>Estrela d'Avenida</i>	49
Figura 42 - Esquema construtivo horizontal da solução em ETICS com aglomerado de cortiça	51
Figura 43 - Esquema construtivo horizontal da solução em sistema Fachada Ventilada.....	53
Figura 44 - Avaliação do Custo de Vida do Sistema ETICS em EPS, comparado com o restauro do existente	58
Figura 45 - Tempo mínimo necessário até que o Sistema ETICS com EPS atinja o retorno do investimento inicial.....	59
Figura 46 - Avaliação do Custo de Vida do Sistema Vetur, comparado com o restauro do existente	60
Figura 47 - Tempo mínimo necessário até que o Sistema do Tipo Vetur atinja o retorno do investimento inicial	61
Figura 48 - Avaliação do Custo de Vida do Sistema ETICS com Cortiça, comparado com o restauro do existente	62
Figura 49 - Tempo mínimo necessário até que o Sistema ETICS com cortiça atinja o retorno inicial .	63
Figura 50 - Avaliação do Custo de Vida da Fachada Ventilada, comparado com o restauro do existente	64
Figura 51 - Tempo mínimo necessário até que a Fachada Ventilada atinja o retorno do investimento inicial	65
Figura 52 - Avaliação Global das Soluções Propostas para o conjunto <i>Pinhais da Foz</i>	67
Figura 53 - Avaliação do ciclo de vida, por m ² , das intervenções proposta ao conjunto <i>Estrela d'Avenida</i>	69
Figura 54 - Avaliação Global das Soluções Propostas para o conjunto <i>Estrela d'Avenida</i>	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial de Aquecimento Global (GWP) equivalente dos gases com efeito estufa (adaptado de [13]).	9
Tabela 2 - Comparação entre sistemas térmicos para fachadas [57][58][59][60][61][62][63][64][65] ..	23
Tabela 3 – Fatores de emissões utilizadas para os diferentes tipos de transporte de materiais	37
Tabela 4 - Constituição e Desempenho Térmico da Solução Existente	42
Tabela 5 - Mapa de Trabalhos e Quantidades para a reabilitação do sistema existente (cenário base)	43
Tabela 6 – Configuração e Desempenho Térmico da configuração da Solução 1	44
Tabela 7 - Mapa de Trabalhos e Quantidades da Solução 1	45
Tabela 8 - Configuração e Desempenho Térmico da Solução 2	46
Tabela 9 - Mapa de Trabalhos e Quantidades da Solução 2	47
Tabela 10 – Configuração e Desempenho Térmico da Solução Existente	50
Tabela 11 - Mapa de Trabalhos e Quantidades para a reabilitação do sistema existente (cenário base)	50
Tabela 12 - Configuração Térmica da Solução em ETICS com Aglomerado de Cortiça	52
Tabela 13 - Mapa de Trabalhos e Quantidades Geral da instalação do Sistema ETICS em Cortiça ..	52
Tabela 14 - Configuração e Desempenho Térmico da Fachada Ventilada	54
Tabela 15 - Mapa de Trabalhos e Quantidades Geral da instalação da Fachada Ventilada	54
Tabela 16 - Avaliação do Ciclo de Vida total do Sistema ETICS em EPS	58
Tabela 17 - Avaliação do Ciclo de Vida do Sistema ETICS em EPS por m ²	58
Tabela 18 - Avaliação do Ciclo de Vida total do Sistema em Vetre	59
Tabela 19 - Avaliação do Ciclo de Vida do Sistema em Vetre por m ²	60
Tabela 20 - Avaliação do Ciclo de Vida total do Sistema ETICS em Aglomerado de Cortiça Expandida	61
Tabela 21 - Avaliação do Ciclo de Vida do Sistema ETICS em Aglomerado de Cortiça Expandida por m ²	62
Tabela 22 - Avaliação do Ciclo de Vida total do Sistema Fachada Ventilada	63
Tabela 23 - Avaliação do Ciclo de Vida do Sistema Fachada Ventilada por m ²	64
Tabela 24 - Avaliação técnica das propostas de intervenção para o conjunto <i>Pinhais da Foz</i>	65
Tabela 25 - Avaliação Ambiental total das propostas de intervenção para o conjunto <i>Pinhais da Foz</i>	66
Tabela 26 - Avaliação Ambiental, por m ² , das propostas de intervenção para o conjunto <i>Pinhais da Foz</i>	66
Tabela 27 - Avaliação Económica das propostas de intervenção para o conjunto <i>Pinhais da Foz</i>	67

Tabela 28 - Avaliação técnica das propostas de intervenção para o conjunto <i>Estrela d'Avenida</i>	68
Tabela 29 - Avaliação Ambiental total das propostas de intervenção para o conjunto <i>Estrela d'Avenida</i>	68
Tabela 30 - Avaliação Económica das propostas de intervenção para o conjunto <i>Estrela d'Avenida</i> .	69

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ADENE	Agência Nacional para a Energia
AIRR	Taxa Interna de Retorno Ajustada, em inglês <i>Adjusted Internal Rate of Return</i>
AR6	Sexto Relatório de Avaliação, em inglês <i>Sixth Assessment Report</i>
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environment Assessment Method</i> , em inglês
CBA	Análise Custo-Benefício, em inglês <i>Cost-Benefit Analysis</i>
CIB	Conselho Internacional da Construção, em francês <i>Conseil International du Bâtiment</i>
CO ₂ eq.	Dióxido de Carbono Equivalente
COP21	21. ^a Conferência das Partes da UNFCCC
DGNB	<i>Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen</i> , em alemão
DPB	Período de Recuperação Descontado, em inglês <i>Discounted Payback</i>
ELCD	Base de Dados Europeia, em inglês <i>European Reference Life Cycle Database</i>
EPS	Poliestireno Expandido
ETICS	<i>External Thermal Insulation Composite System</i>
EU ETS	Sistema de Comércio de Licenças de Emissão da União Europeia, em inglês <i>European Union Emissions Trading System</i>
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GWP	Potencial de Aquecimento Global, em inglês <i>Global Warming Potential</i>
IPCC	Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas, em inglês <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LCC	Avaliação do Ciclo de Vida, em inglês <i>Life Cycle Assessment</i>
LCC	Custo do Ciclo de Vida, em inglês <i>Life Cycle Cost</i>
LCCA	Avaliação do Custo do Ciclo de Vida, em inglês <i>Life Cycle Cost Assessment</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environment Assessment</i> , em inglês
LiderA	Lidera pelo Ambiente
NASA	Administração Norte Americana da Aeronáutica e Espaço, em inglês <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NS	Poupança Líquida, em inglês <i>Net-Savings</i>
NZEB	Edifícios com Necessidade Quase Nulas de Energia, em inglês <i>Nearly Zero-Energy Building</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PEE	Pacto Ecológico Europeu

PNEC 2030	Plano Nacional Energia e Clima 2030
PNGR 2030	Plano Nacional de Gestão de Resíduos
PRR	Plano de Recuperação e Resiliência
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
SIR	Rácio Poupança-Investimento, em inglês <i>Saving-to-Investment Ratio</i>
U	Coeficiente de Transmissão Térmica, em $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, em inglês <i>United Nations Environment Programme</i>
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática
UPV	Valor Atual Atualizado, em inglês <i>Uniform Present Value</i>
UPV*	Valor Atual Atualizado e Modificado, em inglês <i>Modified Uniform Present Value</i>
λ	Condutibilidade Térmica, em $W/(m \cdot ^\circ C)$

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A crescente preocupação com a sustentabilidade no setor da construção é resultado do impacto que esta área promove em todas as frentes em que está inserida. No entanto, este problema tem impulsionado a investigação, avaliação e procura por um desenvolvimento de soluções mais eficientes a nível energético e “amigas” do ambiente.

Destacando os elementos opacos que definem as fachadas, estes influenciam de forma significativa a influência térmica e técnica que o edifício terá, desempenhando um papel crucial no desempenho global energético. A inadequada escolha destes elementos contribui para o alto consumo de equipamentos de aquecimento e arrefecimento, promovendo não só um aumento de custos operacionais no edifício como também as emissões de gases com efeito de estufa que resultam da utilização destes aparelhos. Assim, uma reabilitação pensada e focada na melhoria energética, composta por uma materialidade menos prejudicial para o meio ambiente, assume um papel crucial na atualidade. Esta procura reduzir as necessidades de consumo operacionais e, ao mesmo tempo, minimizar as emissões de gases com efeito de estufa, favorecendo diretamente um maior conforto térmico para o seu utilizador e uma melhoria na qualidade ambiental tanto no interior como exterior dos edifícios [1].

Neste seguimento, as análises técnicas, económicas e ambientais de soluções de reabilitação energética tornam-se essenciais para fundamentar este tipo escolha, que procura promover a sustentabilidade nos processos de reabilitação. A avaliação do ciclo de vida (LCA) e a análise do custo do ciclo de vida (LCCA) assumem um papel central ao permitir a quantificação e comparação dos impactos ambientais e económicos ao longo da vida útil das soluções.

Desta forma, a reabilitação energética e sustentável das fachadas representa uma oportunidade estratégica para mitigar os impactos ambientais no ramo da construção, promovendo uma melhor eficiência energética nos edifícios e contribuindo ativamente para a neutralização carbónica dos mesmos. A integração destas metodologias reforça a importância de uma visão sistemática e cuidada para um cenário a longo prazo, sendo essencial para o desenvolvimento e avanço da otimização de soluções construtivas mais responsáveis, sustentáveis e resilientes.

1.2. INTERESSE E OBJETIVOS DO TRABALHO

Esta dissertação, realizada em ambiente empresarial em colaboração com *FOCO – Projetos Sustentáveis*, foca-se na necessidade urgente de promover intervenções sustentáveis e na melhoria do desempenho energético dos edifícios, com especial incidência na reabilitação das fachadas, uma vez que se trata

de um elemento frequentemente desvalorizado nas análises globais do edificado. Os elementos opacos da envolvente exterior assumem um papel determinante para a eficiência energética e o conforto térmico interior do edifício, porém o processo de fabricação e instalações dos mesmo podem contribuir diretamente nas emissões de gases poluentes.

Neste sentido, o presente estudo visa contribuir para o aprofundamento do conhecimento técnico-científico na área da reabilitação sustentável, oferecendo uma abordagem integrada que considera, em simultâneo, os impactos técnicos, económicos e ambientais das soluções de intervenção. O foco recai, assim, no desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo, suportada por uma grande diversidade de metodologias que abrangem estes campos, de forma a obter uma análise abrangente dos diversos fatores definidos. Dentro destas metodologias, destacam-se a avaliação do ciclo de vida (LCA) e a análise do custo do ciclo de vida (LCCA) das intervenções, permitindo, respetivamente, comparar entre si a análise ambiental e económica para um determinado período, fornecendo não só o suporte ao projetista para a escolha da solução mais adequada, como também beneficiar o utilizador final, ao garantir decisões mais conscientes, duráveis e eficientes.

Nesse sentido, o principal foco deste trabalho consistiu no desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo que conseguisse estudar e avaliar estes diferentes parâmetros técnicos, económicos e ambientais, sendo à posteriori estes os objetivos secundários da mesma:

- Avaliação individual ou em simultâneo de diferentes soluções de reabilitação energética de elementos que constituem a fachada;
- Aplicação de metodologias de análise do ciclo de vida (LCA) e custo de ciclo de vida (LCC) para quantificar os seus impactos;
- Ampliação deste estudo sustentável com uma introdução técnica, garantindo que a solução proposta está de acordo com a regulamentação térmica atualmente em vigor;
- Criação e sugestão de critérios de apoio à decisão para a escolha da solução mais eficiente e sustentável no contexto da construção e reabilitação de edifícios, tornando este processo mais apelativo, acessível e flexível para aqueles que a irão utilizar.

Esta ferramenta pretende tornar a comparação entre estes componentes numa análise muito mais acessível, flexível e simples para o estudo das intervenções sugeridas, apoiando os profissionais do setor na tomada de decisões, alinhando a promoção por escolhas energeticamente benéficas, a neutralidade carbónica e a responsabilidade ambiental no setor da construção.

1.3. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação encontra-se estruturada de forma lógica e sequencial, com o objetivo de guiar o leitor através do contexto, da abordagem metodológica e os principais resultados alcançados. Inicialmente, no Capítulo 1 são apresentados os fundamentos que justificam a realização do trabalho, os objetivos que o orientaram e a forma como todo o trabalho está organizado.

Segue-se, com o Capítulo 2, uma secção dedicada à revisão técnico-científica, na qual estão reunidos e sistematizados os conceitos relacionados com a sustentabilidade aplicada na reabilitação construtiva nos edifícios, dando maior ênfase aos trabalhos associados à sua envolvente. Este estado de arte incorpora a definição e evolução do conceito de sustentabilidade, permitindo fazer uma revisão acerca do impacto provocado pelo setor da construção no meio ambiente. Para além disso, esta secção aborda os desafios atualmente associados a esta temática, apresenta uma análise técnico-económica geral de um conjunto de soluções de reabilitação energética em fachadas de edifícios, assim como aborda as metodologias de

avaliação do ciclo de vida, do custo do ciclo de vida e, posteriormente, da avaliação do custo do ciclo de vida de certas intervenções.

No Capítulo 3 é apresentada uma abordagem metodológica adotada para o desenvolvimento do trabalho, descrevendo os procedimentos utilizados para a criação de uma ferramenta de cálculo, que permitirá calcular uma diversidade de parâmetros aplicados na sustentabilidade da construção. Com ela, será possível quantificar os critérios ambientais, económicos e técnicos de cada tipo de intervenção a propor, complementando este estudo com uma análise comparativa entre elas, de forma a identificar qual destas soluções apresenta um melhor desempenho em cada um dos indicadores definidos.

Na sequência da metodologia, o Capítulo 4 dá a conhecer a aplicação prática da ferramenta, introduzindo os casos que serão alvo de estudo, assim como os diversos cenários interventivos propostos para a reabilitação das fachadas inseridas. Num momento seguinte, serão disponibilizados no Capítulo 5 os resultados obtidos na ferramenta para cada tipo de solução, analisando-as criticamente, interpretando os impactos associados à viabilidade técnica, económica e ambiental das mesmas em diferentes contextos de aplicação. Esta análise permite extrair uma comparação conclusiva relevante ao desempenho das soluções para cada fator estabelecido, assegurando que a melhor solução é escolhida.

Por fim, o documento finaliza com o Capítulo 6, destinado a um conjunto de considerações finais que sintetizam as principais conclusões obtidas ao longo do estudo da dissertação, acrescentando algumas possibilidades de continuação e aprofundamento da investigação, com sugestões para futuros desenvolvimentos na mesma área. Para além destas secções, o documento inclui ainda anexos com informações complementares, dados técnicos e tabelas de apoio, bem como uma secção final de referências bibliográficas, onde são listadas todas as fontes utilizadas.

2

SUSTENTABILIDADE NA REABILITAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

2.1. PRINCÍPIOS DA SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1.1. ENQUADRAMENTO

Em 1981, surge pela primeira vez a referência do termo *sustentabilidade*, sendo Lester Brown o responsável por defini-la como a comunidade que satisfaça as suas necessidades, sem que prejudique as possibilidades de gerações futuras [1].

Em 1987, na Comissão de Brundtland, o termo *sustentabilidade* surge novamente, mas a partir de uma adaptação da definição proferida por Brown, considerando que se trata da capacidade em atingir as necessidades do presente, sem que esta comprometa as expectativas e requisitos pretendidos por gerações futuras [1][2].

Assim, pode-se afirmar que a sustentabilidade assenta em dois conceitos cruciais: as necessidades e as limitações. A primeira pretende abordar e estudar as exigências que tanto o utilizador como a comunidade requerem para uma boa satisfação dos resultados pedidos. Relativamente à segunda, visa-se o problema global da limitação de recursos ou bens, relacionado com as consequências provenientes das necessidades pretendidas, para as gerações presentes e futuras.

Desta forma, a temática da sustentabilidade surge com bastante relevância para o setor da construção, uma vez que se insere como uma área bastante propícia à promoção de impactos provenientes de todas as etapas de produção e manutenção da construção, afetando o bem-estar do ambiente e, consequentemente, as ambições das futuras gerações.

2.1.2. PILARES DA SUSTENTABILIDADE

Em 1994, John Elkington introduz um novo conceito de modelo que pretende desafiar o desempenho de uma certa instituição com questões relacionadas com a sustentabilidade. Este modelo designa-se por “Triple Bottom Line” (Figura 1) e incide na importância de um equilíbrio das temáticas fundamentais em que a sustentabilidade atualmente se baseia: ambiental, económica e social [3].

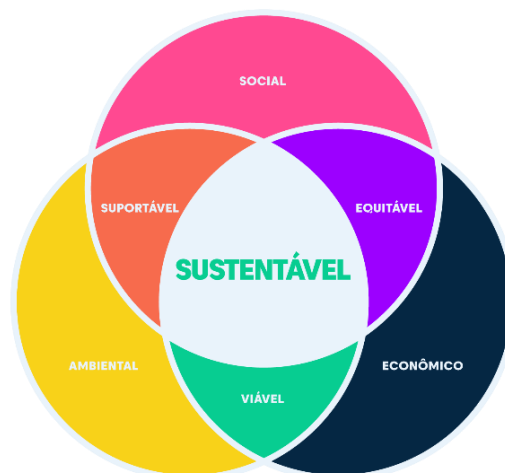


Figura 1 - Pilares da Sustentabilidade [4]

O pilar ambiental, por vezes demasiado destacado quando comparado com os restantes, está associado à minimização dos impactos ambientais causados pelas atividades humanas. Este pretende não só maximizar a eficiência dos recursos explorados, como também diminuir as emissões de gases com efeito estufa (GEE) e fazer uma gestão adequada dos resíduos, para uma melhor preservação da biodiversidade.

Relativamente à dimensão social, esta refere-se aos impactos que as atividades provocam sobre o conforto e qualidade de vida dos seus utilizadores. Este tópico remete não só para boas condições pós-construção como requisitos térmicos e acústicos, mas também para condicionantes durante a sua fase de execução, como condições de trabalho, promoção de saúde e segurança.

A terceira temática refere-se à parte económica, que responde a questões relacionadas com a viabilidade financeira do projeto e o retorno sobre o investimento do mesmo. Redução de custos operacionais, eficiência energética e valorização imobiliária são alguns dos fatores para um bom resultado neste campo.

Em 2015, as Nações Unidas definiram, através da Agenda 2030, um grande marco para o compromisso sustentável global. Neste documento foram desenvolvidos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), (Figura 2), com o propósito de apelar por urgente desenvolvimento sustentável à escala mundial, definindo as prioridades e aspirações para que este aconteça [5].



Figura 2 - Os dezassete objetivos de desenvolvimento sustentável proposto pelas Nações Unidas [5]

2.1.3. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL VS. CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL

O conceito convencional da construção passa por todo o processo de produção e conceção do edificado baseado no intensivo uso de materiais convencionais, sem grande consideração nas questões ambientais relacionadas com o ciclo de vida do mesmo. Este processo segue uma sequência de etapas que envolvem a extração, transformação, utilização e despejo, resultando numa elevada produção de desperdícios e de emissões, apesar da sua viabilidade económica [1].

Desta forma, surge o termo construção sustentável que procura desafiar o setor da construção no campo da sustentabilidade. Em 1994, na primeira conferência internacional do Conseil International du Bâtiment (CIB), a construção sustentável definiu-se como a criação e operação de um ambiente construído saudável, baseado na eficiência dos recursos e num design ecológico [1]. C.J. Kimber, uma referência no que toca a temas relacionados com a sustentabilidade, define-a como aquela que engloba os problemas associados aos principais ramos da sustentabilidade, isto é, a viabilidade ambiental, económica e social de um dado edifício, contextualizado por uma certa comunidade [1].

Este tipo de construção, ao contrário da tradicional, trabalha especialmente com base nos princípios da economia circular, estratégias de redução de consumos energéticos e recursos e certificações ambientais, com o intuito de combater os problemas relacionados com os resíduos e emissões produzidos, associados ao desafio económico.

2.1.4. ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular consiste num modelo económico que visa maximizar a eficiência na utilização de recursos e minimizar o desperdício de resíduos, incentivando a reutilização, reciclagem e regeneração de materiais ao longo de todo o ciclo de vida.

Os princípios fundamentais deste modelo, observados na Figura 3, consistem na redução e/ou extinção dos resíduos descartados e inutilizados, na moderação da extração de materiais provenientes da natureza, promovendo ciclos de desenvolvimento focados na sustentabilidade dos produtos e ainda numa dissociação do crescimento económico derivado do elevado consumo de recursos [6].

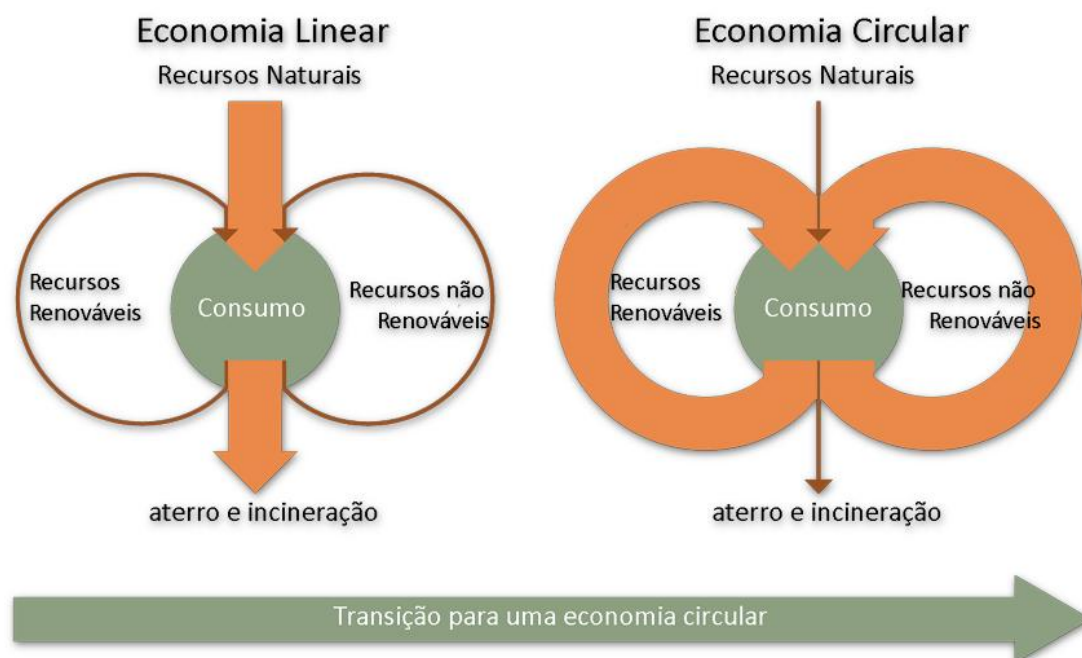


Figura 3 - Transição de economia linear para uma economia circular [6]

2.2. IMPACTO AMBIENTAL E EMISSÕES NA CONSTRUÇÃO

2.2.1. ENQUADRAMENTO

Num contexto mais generalizado, o impacto ambiental é descrito como as alterações associadas ao processo construtivo, resultantes, de forma direta ou indireta, de uma ação promovida pelo ser humano, sendo esta capaz de influenciar tanto o meio que o rodeia como aqueles que nele vivem. Estes podem ter um papel positivo quando promovem, propositadamente para a melhoria ambiental da região, ou um papel negativo quando contribuem para o aumento da poluição, da contaminação do ar e da água, e, sobretudo, quando favorecem a extinção de um certo grupo de seres vivos ou ecossistemas existentes [1][7].

Estas alterações estão associadas a diversos setores económicos que, diante das suas necessidades, comprometem o meio em que vivemos. Entre estes o setor da construção, segundo várias organizações nacionais e mundiais, assume um papel crucial para o aumento dos impactos ambientais, devido a vários fatores influenciadores.

De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), sabe-se que o setor da construção é responsável pela emissão global de cerca de 20% de gases com efeito de estufa, também responsável pelo consumo de cerca de 40% da energia global produzida na União Europeia [8][9]. Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente, a construção civil é encarregue pela extração de 24% dos recursos naturais existentes e pela emissão de 25 a 40% do total de resíduos consequente das suas atividades [10].

2.2.2. FONTES DE EMISSÕES NO SETOR DA CONSTRUÇÃO

Como se referiu no tópico anterior, o setor da construção tem impactos ambientais relevantes, sendo que na sua maioria são resultantes das emissões globais de gases com efeito estufa, ao longo do ciclo de vida do edificado.

Segundo a NASA, o efeito de estufa consiste no processo de retenção de calor na atmosfera terrestre devido à ação de alguns gases, promovendo uma baixa variação da temperatura média ao longo do dia, desde que estes gases se encontrem em quantidades controladas. Os principais gases com efeito de estufa são o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido de azoto (N_2O), gases fluoretados como hidrofluorcarbonetos (HFCs) e perfluorocarbonetos (PFCs), entre outros [11].

O problema associado ao efeito de estufa surge da produção desses mesmos gases em escala elevada e descontrolada, levando à alteração do balanço climático e ecológico do planeta. A partir do potencial de aquecimento global, GWP, isto é, a capacidade relativa que um gás de efeito de estufa tem de reter calor na atmosfera, indicam-se na Tabela 1, a quantificação estudada para cada tipo de emissão. Nesta tabela pode-se verificar a capacidade que cada tipo de gás tem a mais de reter calor quando comparamos com o CO_2 , sendo alguns dos mais relevantes os hidrofluorcarbonetos e perfluorocarbonetos, ainda que se encontrem na atmosfera em pequenas quantidades [12] [13].

Tabela 1 - Potencial de Aquecimento Global (GWP) equivalente dos gases com efeito estufa (adaptado de [13]).

<i>Nome do Gás</i>	<i>Designação Química</i>	<i>PAG num Horizonte de 100 anos (Segundo AR6)</i>
Dióxido de Carbono	CO_2	1
Metano – Não Fóssil	CH_4	27,0
Metano – Fóssil	CH_4	29,8
Óxido Nitroso	N_2O	273
Trifluoreto de Nitrogénio	NF_3	17.400
Hexafluoreto de Enxofre	SF_6	24.300
HFC-134a	CH_2FCF_3	1.530
PFC-14	CF_4	7.380

No setor da construção pode-se subdividir as principais formas de emissão de gases que contribuem para o efeito de estufa e consequentes alterações climáticas [1]. Primeiramente tem-se o carbono operacional, (OC), referente às emissões associadas à geração de energia necessária para o funcionamento de todo o edifício ao longo do seu ciclo de vida. Isso incluiu, por exemplo, a produção de energia para alcançar os requisitos necessários elétricos e térmicos do edificado.

Por sua vez, o carbono incorporado, (EC), resulta da energia despendida na extração, produção, instalação e manutenção de materiais e tecnologias construtivas utilizados em todo o processo construtivo de um dado edifício.

Por fim, o carbono de transporte (TC) está relacionado com as emissões provenientes da logística envolvida na recolha de materiais de um dado ponto inicial A até à entrega do mesmo para um destinatário final B, incluindo toda a cronologia de vida do material estudado.

Estas três categorias de emissões são bastante importantes para a quantificação da equivalência de dióxido de carbono emitido e, consequentemente, para o cálculo da pegada carbónica de um dado edifício.

2.2.3. PEGADA CARBÓNICA DE UM EDIFÍCIO

A pegada de carbono apresenta-se como um termo mais desenvolvido da definição abordada anteriormente. Esta estabelece-se como a soma total dos gases de efeito estufa (GEE) emitidos, diretamente ou não, como consequência das atividades humanas e é geralmente expressa em quilogramas ou toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) por metro quadrado [1]. Segundo a Agência Europeia do Ambiente, o dióxido de carbono equivalente é uma unidade de medida comparativa às diferentes emissões provenientes de GEEs, tendo em conta o seu potencial de aquecimento global [14]. Essas emissões desempenham um papel significativo nas alterações climáticas, refletindo-se em variações extremas ao nível da temperatura, precipitação, vento e entre outros tantos fatores que influenciam o clima global [15].

Como se observou anteriormente, o setor da construção tem papel relevante no que toca às emissões de carbono, sendo que estas podem ser subdivididas em carbono operacional (OC), carbono incorporado (EC) e carbono de transporte (TC), sendo contabilizadas em quilograma de CO₂eq. Com a equação (1) traduz-se a metodologia de cálculo para a avaliação da pegada de carbono, consistindo na relação entre a soma dessas três componentes com a área total edificada.

$$\text{Pegada Carbónica} \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \text{eq}}{\text{m}^2} \right) = \frac{[OC + EC + TC]}{\text{Área de Construção}} \quad (1)$$

Esta métrica permite quantificar o impacto ambiental de um certo edifício ao longo do seu ciclo de vida, possibilitando a implementação e correção de estratégias minimizadoras face às emissões e à melhoria da sustentabilidade na construção civil [16].

2.2.4. IMPACTO DAS DEMOLIÇÕES E RESÍDUOS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO

A construção civil é um dos setores com bastantes impactos climáticos, consequente da elevada produção de resíduos sólidos. Uma gestão inadequada dos resíduos pode levar a graves consequências relacionadas com a sustentabilidade, devido a uma incorreta ou inexistente diferenciação do tratamento de resíduos e consequente despejo e depósito dos mesmos em locais impróprios.

Segundo o Decreto-Lei n.º 176/2008, considera-se resíduos de construção e demolição, RCD, todos aqueles que são provenientes de obras de construção, reconstrução, alteração, conservação, demolição e derrocada de edifícios [17]. À partida, como o próprio nome indica, existirão dois grandes grupos responsáveis por essa geração, classificados pela sua origem: demolição e construção. Este último grupo estende-se ainda para construções novas e para reabilitação e renovação de edifícios. Restos de betão, tijolo, telhas, ladrilhos, madeira, mistura betuminosas e metais são alguns exemplos de resíduos produzidos durante uma obra.

Este processo tem grande impacto na comunidade e na envolvente e, procurar estratégias para a sua redução é crucial para que se atinja tanto metas ambientais como o equilíbrio da biodiversidade. Documentos como o Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR 2030) demonstra um certo compromisso em definir e identificar estratégias inovadoras aplicáveis às construções de grande e pequena escala [18].

2.2.5. BASES DE DADOS E SOFTWARES PARA ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL

As avaliações dos impactos ambientais dos edifícios podem ser efetuadas a partir de várias metodologias e ferramentas. A criação ou ampliação de uma base de dados rigorosa e extensa permite reunir

informações detalhadas e cruciais, para mais tarde, com a utilização de alguns softwares simples e bem trabalhados, ser possível efetuar um estudo bastante aproximado da realidade.

De uma maneira geral, a maioria das bases de dados são normalmente adotadas em diferentes metodologias relativas à sustentabilidade. A Base de Dados Europeia, ELCD, produzida pela Comissão Europeia, disponibiliza uma grande abrangência de dados e informações utilizadas para a análise dos impactos ambientais de certos produtos e serviços, distribuindo-os pelos vários setores económicos. Porém, também se pode ter em conta outras bases de referência como Global LCA Data, promovido pelo One-ClickLCA, GaBi Database, Ecoinvent, entre muitas outras.

Para além das bases de dados, existe uma grande variedade de softwares que abordam os impactos ambientais nos edifícios, sendo diferenciados pela metodologia utilizada, dependendo do que o utilizador pretende estudar relativamente ao problema. Programas como EC3, GaBi e Carbon Footprint Calculator são alguns exemplos de diferentes complexidades, capazes de avaliar a pegada carbónica.

2.3. AVALIAÇÃO E CUSTO DO CICLO DE VIDA NA CONSTRUÇÃO

Para que a construção civil possa evoluir de forma sustentável, aqueles que nela trabalham terão que adotar estratégias e métodos que avaliem a viabilidade ambiental através de tecnologias mais favoráveis ao meio ambiente, aliadas com a análise da viabilidade económica entre projetos de características diferentes e necessidades específicas dos seus utilizadores [16].

A avaliação do ciclo de vida, em inglês Life Cycle Assessment (LCA), consiste num dos vários métodos que permitem a avaliar e ajudar nas tomadas de decisão sustentáveis para a renovação, demolição ou construção de um dado edifício. Esta metodologia permite avaliar as emissões de dióxido de carbono equivalente, prejudiciais ao meio ambiente, em todas as diferentes fases da vida útil do edificado[19].

Como mostra a Figura 4, este sistema procura calcular as cargas associadas aos processos de produção dos materiais (A1-A3), transporte e construção/installação (A4-A5), utilização (B1-B7) e de fim de vida da estrutura (C1-C4). Para além de todos estes processos, existe ainda um último destinado à reciclagem e reutilização (D), promovido pelos ideais da economia circular e da crescente procura pela maximização de regeneração de materiais sem propósito útil [19][20].



Figura 4 - Fases e módulos dos ciclos LCA de edifícios [20]

A avaliação do ciclo de vida é regulada por normas internacionais, nomeadamente EN 15978 e EN 15643, que pretendem promover a sustentabilidade da construção e a implementação de etapas para a avaliação do ciclo de vida das estruturas construídas.

O custo do ciclo de vida, em inglês, Life Cycle Cost (LCC), consiste noutro método auxiliar de decisões derivadas dos impactos dos produtos que o consumidor pretende, assumindo-se como um registo de todos os custos diretos e indiretos associados por um dado sistema ou edifício ao longo de todo o seu ciclo de vida. Consiste no cálculo total das despesas associadas ao presente e futuro de um dado produto, sendo que por vezes pode ser utilizado como complemento ao estudo da avaliação do ciclo de vida, conjugando a parte económica com a ambiental [21][22].

A avaliação do custo do ciclo de vida, em inglês Life Cycle Cost Assessment (LCCA), é uma das principais abordagens para incentivar às práticas da sustentabilidade, associadas com o parâmetro económico, bastante decisivo para tomada de decisão [23].

Esta metodologia é baseada na análise de custos nas diferentes fases do ciclo de vida em que uma construção está associada: fase de conceção, construção, operação & manutenção e demolição [22][23].

Segundo o Manual do Custo do Ciclo de Vida, a avaliação do custo do ciclo de vida é associada a um método de avaliação económica de um dado projeto, no qual se consideram todos os custos diretos e indiretos do mesmo ao longo de todo o ciclo de vida, tendo em conta os requisitos e níveis de desempenho requeridas para satisfazer as necessidades dos utilizadores do edificado [22].

A Figura 5 mostra toda a organização da avaliação do custo do ciclo de vida, sendo que esta difere do custo do ciclo de vida por se tratar um sistema mais completo e diversificado, procurando avaliar as exigências e as necessidades dos seus utilizadores além das questões económicas de todos os processos associados à construção.

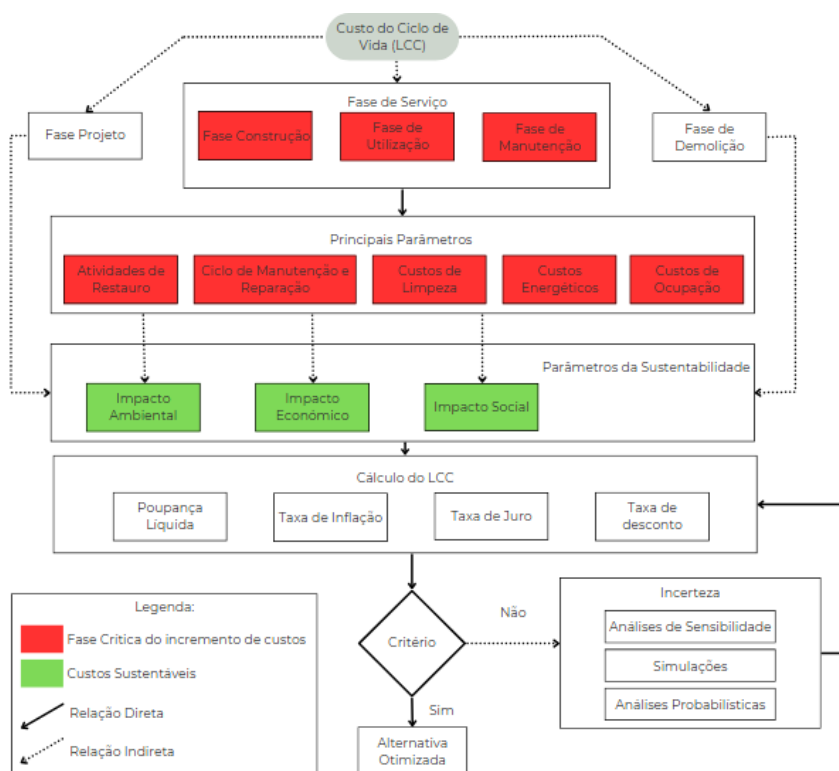


Figura 5 - Fluxo geral de trabalho para o cálculo da LCCA (adaptada de [23])

As principais técnicas de cálculo para a posterior avaliação do custo do ciclo de vida de um dado produto ou edifício são:

- Poupança Líquida (NS);
- Rácio Poupança-Investimento (SIR)
- Taxa Interna de Retorno ajustada (AIRR);
- Análise Custo-Benefício (CBA).

A Poupança Líquida, em inglês *Net-Savings* (NS), trata-se de uma variação técnica de análise custo-benefício, sendo que esta técnica se foca essencialmente na redução de futuros custos operacionais, propondo uma alteração de projeto com essas mudanças para que mais tarde se avalie a sua viabilidade comparativa.

Esta representa-se, de forma base, pela equação (2) e, caso o valor obtido seja positivo, significa que a proposta alternativa ficará mais em conta, quando comparado com o projeto inicial [22].

$$NS = LCC \text{ inicial} - LCC \text{ alternativo} \quad (2)$$

Relativamente ao Rácio Poupança-Investimento, em inglês *Savings-to-Investment Ratio* (SIR), este trata-se de uma outra técnica para medir o desempenho económico de uma alternativa de projeto que expressa a relação entre as suas poupanças e o aumento do custo de investimento através de uma razão. Consiste numa variação da razão benefício-custo, utilizada quando os benefícios ocorrem principalmente como reduções nos custos operacionais, sendo que este método implica sempre uma comparação com um projeto base [22].

Através da equação (3) é possível visualizar o cálculo simplificado desta metodologia, sendo que caso o valor obtido da razão for superior a 1.0 o projeto alternativo considera-se economicamente justificável para execução.

$$SIR = \sum_{t=0}^N \frac{St}{(1+d)^t} / \sum_{t=0}^N \frac{\Delta It}{(1+d)^t} \quad (3)$$

Sendo que:

St – poupanças, em €, associadas ao ano t em relação aos custos operacionais do caso base;

ΔIt – Custo adicional de investimento associado à solução alternativa, em €;

t – ano de ocorrência;

d – fração da percentagem de desconto associado;

N – número de anos estudados;

A Taxa Interna de Retorno Ajustada, em inglês *Adjusted Internal Rate of Return* (AIRR), consiste no cálculo do rendimento percentual anual de um dado investimento em projeto ao longo do seu ciclo de vida. Ao contrário da medida convencional da Taxa Interna de Retorno, a AIRR assume explicitamente que as poupanças geradas por um certo projeto serão reinvestidas no mesmo a partir da taxa de desconto durante o período de estudo, sendo que se esta taxa de poupanças for superior, esta não representaria o custo de oportunidade do capital, nunca sobrevalorizando o rendimento do projeto [22].

Como mostra a equação (4), esta metodologia depende do Índice de Economia para Investir (SIR), sendo que caso o valor obtido seja superior à taxa de reinvestimento, o projeto alternativo considera-se economicamente viável.

$$AIRR = (1 + r) \times (SIR)^{\frac{1}{N}} - 1 \quad (4)$$

Sendo que:

r – fração percentual da taxa de reinvestimento;

N – número de anos em estudo.

Por fim, a Análise Custo-Benefício, em inglês *Cost-Benefit Analysis* (CBA), permite verificar a viabilidade económica de dois projetos em comparação, sendo verificados os parâmetros financeiros e sociais para o seu estudo. Trata-se de uma das metodologias mais antigas e serviu como grande influência e base para a criação e adaptação de outras [24].

A equação (5) consiste assim numa comparação entre a diferença dos benefícios que lhe são atribuídos (B) com os custos associados (C) de um dado projeto de forma avaliar a sua viabilidade de execução.

$$CBA = B - C \quad (5)$$

2.4. NORMAS E REGULAMENTAÇÃO SOBRE EMISSÕES E SUSTENTABILIDADE

2.4.1. CERTIFICAÇÕES AMBIENTAIS PARA EDIFÍCIOS

Com o aumento das preocupações sobre a sustentabilidade no setor da construção, as certificações ambientais surgem como um agente duplo, uma vez que valorizam e beneficiam empresas e organizações que adotem os padrões requeridos, mas também pela importância da inserção dos padrões sustentáveis para a construção, reabilitação e manutenção de edifícios [25].

Existe uma grande diversidade de sistemas de certificações que diferem pela importância que estes dão a certos critérios relacionados com a saúde, conforto, bem-estar, tipo de edificado, fase do ciclo de vida em que se insere, entre muitos outros [25].

Segundo o World Green Building Council, em 2024, existiam cerca de 70 diferentes tipos de sistemas de certificações ambientais, sendo que este valor na globalidade pode ser ainda bastante superior devido à elevada quantidade de sistemas que não são administrados pela mesma [26].

A nível internacional destacam-se as certificações LEED (E.U.A), BREEAM (Reino Unido), DGNB (Alemanha) e LEVEL(s) (União Europeia). Esta última metodologia, desenvolvida pela Comissão Europeia, tem como objetivo avaliar e diagnosticar o desempenho sustentável de um dado edifício durante todo o seu ciclo de vida, em conformidade com os padrões e iniciativas sustentáveis promovidas pela União Europeia, oferecendo uma linguagem comum e indicadores fulcrais para compreender os impactos associados ao processo de transformação do edificado [27][28].

A metodologia LEVEL(s) baseia-se essencialmente em seis macro objetivos para uma construção sustentável para um determinado edifício, Figura 6, subdividindo-se, posteriormente, em três níveis de complexidade crescente que acompanham o faseamento da obra, Figura 7 [28].



Figura 6 - Principais macro objetivos do LEVEL(s) (adaptado de [28])

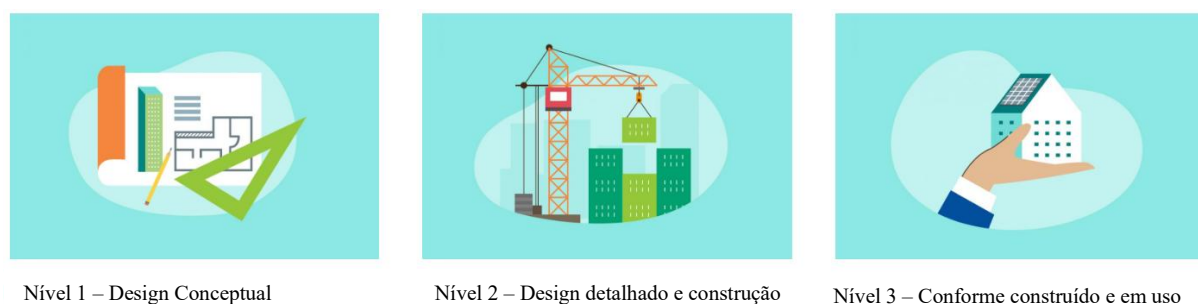


Figura 7 - Os três níveis crescentes associados a um projeto LEVEL(s) (adaptado de [28])

Para o contexto nacional, destaca-se a certificação LiderA, desenvolvida no Instituto Superior Técnico de Lisboa por Manuel Duarte Pinheiro e disponibilizada em 2005, com o foco na promoção da sustentabilidade no ambiente construído, colocando o meio ambiente como elemento central em todo o processo construtivo. Esta certificação procura a sustentabilidade do meio construído através de seis princípios descritos na Figura 8, utilizando, posteriormente, um sistema métrico bastante idêntico ao das certificações energéticas, subdividindo as classes de bom desempenho como se pode observar na Figura 9 [29].

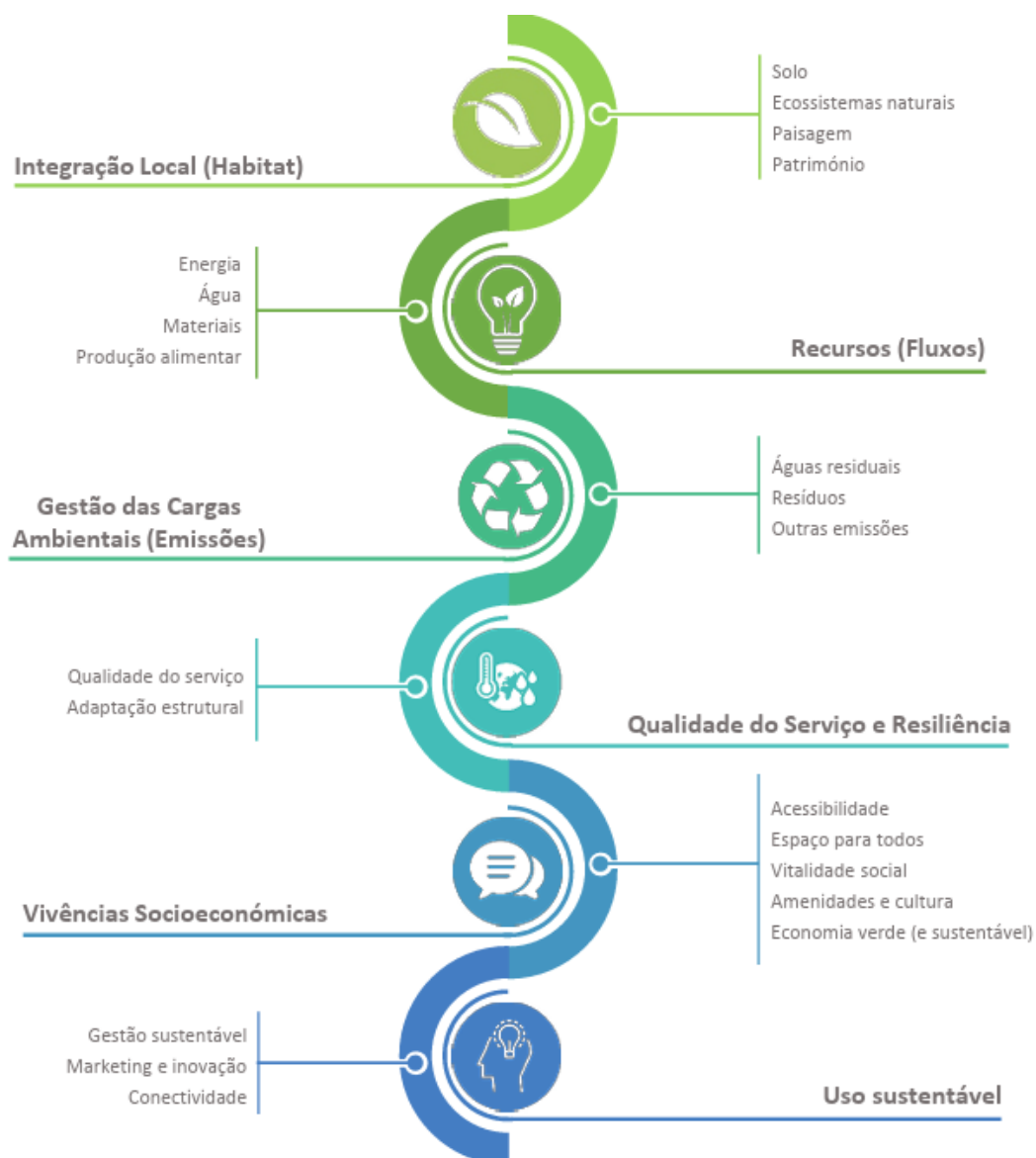


Figura 8 -Esquema de vertentes e áreas associadas à certificação LiderA [29]

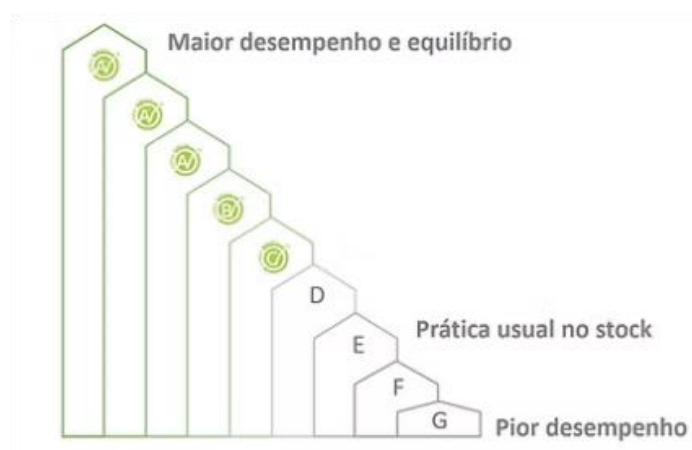


Figura 9 - Níveis de bom desempenho da certificação LiderA [29]

2.4.2. METAS INTERNACIONAIS E REGULAMENTARES

Os acordos e regulamentos internacionais focados na preservação do meio ambiente desempenham um papel essencial para fazer face à maioria dos desafios globais relacionados com a sustentabilidade. Estes definem parâmetros e metas que promovem a redução das emissões de gases de efeito estufa e impulsionam o desenvolvimento sustentável. Desta forma, conforme a Figura 10, serão mencionados alguns dos acontecimentos mais importantes no que toca à sustentabilidade ao nível internacional.

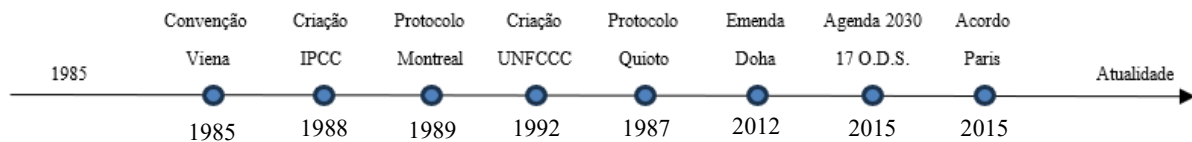


Figura 10 - Representação cronológica de alguns dos marcos internacionais em prol da sustentabilidade

Em 1985 foi dado o primeiro passo para o combate aos impactos ambientais consequentes das atividades humanas. Na Convenção de Viena foi discutida a preocupante destruição da camada de ozono e, consequentemente, propôs-se uma cooperação internacional para evitar a sua redução, ainda que as metas estabelecidas não tenham sido de carácter obrigatório para os países envolvidos [30].

Posteriormente, em 1988, foi criada a primeira organização responsável por sintetizar e divulgar conhecimentos relativos às alterações climáticas. O denominado Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, é encarregue por transmitir e reunir um conjunto de informações e estado das alterações climáticas aos governos internacionais, sendo considerada até aos dias de hoje uma das maiores referências no que toca a assuntos relacionados com o aquecimento global [31].

No ano seguinte, em 1989, ocorre uma nova convenção, que resultaria no Protocolo de Montreal, que promove a eliminação da produção e consumo de substâncias causadoras da destruição da camada de ozono, tendo sido um enorme sucesso face à redução significativa de emissões consequente destas propostas [32].

Em 1992, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, foi assinado pelos vários líderes mundiais a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, UNFCCC. A UNFCCC entraria em vigor em 1994 e tratou-se de um acordo inédito pela iniciativa global das comunidades internacionais em promover metas obrigatórias para a sua redução das alterações climáticas [33].

Em 1997, criou-se o Protocolo de Quioto, que procurou não só estender as medidas promovidas pela UNFCCC, mas também limitar de forma explícita as emissões de gases com efeito de estufa produzidos pelos países em desenvolvimento. Este tratado internacional só entraria em vigor em 2005, sendo posteriormente sucedido pela Emenda de Doha em 2012, que procurou reduzir as emissões até 18% em relação aos níveis obtidos na década de 1990 [34][35].

Em 2015 a Assembleia Geral da ONU, criou a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, que incluiu os 17 ODS, promovendo um novo rumo face às questões do desenvolvimento sustentável do planeta [5].

No mesmo ano, o Acordo de Paris, debatido na 21ª sessão anual da Conferência das Partes, COP21, tornou-se no tratado internacional mais atualizado em vigor. Este inclui compromissos para todos os países, desenvolvidos e em desenvolvimento, com o objetivo principal de não ultrapassar o aumento da temperatura global em 1,5°C até ao final do século [36].

No ramo da construção, a transição para uma economia mais verde e para um setor mais sustentável, tem sido apontada como fator prioritário quando se debatem as questões relacionadas com o ambiente construído, sendo desta forma crucial procurar incentivar todos os intervenientes a reduzir ou extinguir as suas ações impactantes.

Desta forma, introduziu-se uma série de medidas e diretivas que a promovem, incluindo a Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios, adotada em 2010 e posteriormente revista por diversas vezes, prevendo não só a introdução dos NZEB, isto é, edifícios com necessidades quase nulas de energia e, portanto baixas emissões carbónicas [37][38].

Para além disso, em 2020 estabeleceu-se o Pacto Ecológico Europeu, PEE, que, abrangendo todos os estados-membros da União Europeia, tem como principal objetivo tornar a Europa no primeiro continente-neutro em carbono até 2050. Esta iniciativa pretende implementar um leque bastante rigoroso de normas ambientais tanto para as construções novas como também para a promoção de uma renovação sustentável do património existente [39][40].

Adicionalmente, a União Europeia tornou obrigatório o regulamento de emissões de gases de efeito de estufa. O Sistema de Comércio de Licenças de Emissão da União Europeia, EU ETS, é responsável pelo acompanhamento e regulamento das licenças, quantificando as emissões produzidas pelos diversos setores industriais por cada tonelada de CO₂ emitida. Estas licenças têm como objetivo quantificar a evolução das emissões na Europa, mas também incentivar à prática de intervenções mais sustentáveis e benéficas para o meio ambiente. A Figura 11 apresenta a evolução desta quantificação ao longo dos últimos 5 anos, sendo que estes valores tendem a atualizar-se diariamente, obtendo à data atual o valor médio de 70 €/tonCO₂ emitido (março de 2025) [41][42].



Figura 11 - Evolução das Permissões de Carbono da União Europeia [42]

No panorama nacional, implementou-se em 2021 o Plano Nacional Energia e Clima 2030, PNEC 2030, servindo como principal instrumento nacional para o estabelecimento de metas para o combate às

alterações climáticas e de guia para políticas energéticas e ambientais entre os períodos de 2021-2030 face a estas questões. Este plano pretende descarbonizar as indústrias nacionais com uma transição para energias renováveis e/ou de baixas emissões e maximizar a eficiência energética nos novos edifícios e existentes, assegurando o abastecimento mínimo de energia para a perspetiva nacional, de acordo com a Figura 12 [43][44].



Figura 12 - Objetivos nacionais promovidos pelo PNEC 2030 [44]

Para além disso, medidas como o Programa Edifícios mais Sustentáveis, promovido pelo Fundo Ambiental Português, que pretende reduzir o alto consumo de energia e facilitar a adoção de tecnologias mais sustentáveis, ou Plano de Recuperação e Resiliência, PRR, financiado pela União Europeia, com o objetivo de incluir medidas específicas para a construção sustentável em Portugal, são alguns exemplos de como Portugal está empenhado em assegurar o combate às alterações climáticas e garantir uma comunidade cada vez mais sustentável [45][46][47].

2.5. PAPEL DA REABILITAÇÃO SUSTENTÁVEL

2.5.1. REABILITAÇÃO VS NOVA CONSTRUÇÃO

A decisão entre reabilitar um edifício existente ou construir uma nova estrutura depende de diversos fatores que por si só definem a sustentabilidade atual da construção. A reabilitação de edifícios é uma alternativa à construção nova e à demolição de edifícios, permitindo a recuperação de construções degradadas, preservando não só o valor cultural e a história do edifício, mas também de forma a atender às novas configurações e necessidades do seu utilizador [48][49].

Para além de tentar preservar o valor arquitetónico, a reabilitação permite ainda a utilização de recursos reduzidos quando comparado a uma obra nova, minimizando as suas emissões e resíduos produzidos ao longo de toda a empreitada.

No entanto, ao contrário do que acontece numa nova construção, a reabilitação trata-se de um tipo construtivo mais desafiante, uma vez que é menos flexível relativamente ao leque de soluções tecnológicas a adotar e do reduzido espaço disponível para a realização da obra.

A reabilitação sustentável não se limita ao restauro das funcionalidades originais do edifício ou à conservação da sua estética. Ela promove também melhorias significativas relativamente aos pilares que definem a sustentabilidade. O objetivo passa pela maximização do desempenho da edificação em todas as vertentes, de forma a garantir uma melhor qualidade de vida para o seu utilizador, reduzindo o consumo excessivo de recursos naturais para aquecimento ou arrefecimento, assim como procura minimizar a produção de resíduos e emissões de gases com efeito de estufa ao longo do seu ciclo de vida [1][50].

Desta forma, para garantir que essas metas sejam alcançadas, é essencial definir certos indicadores que possam avaliar o impacto na sustentabilidade das atividades desenvolvidas. Entre esses indicadores destaca-se o consumo energético e hídrico do edifício, a avaliação do conforto térmico, a produção de resíduos e de emissões para o exterior, a durabilidade e longevidade dos materiais e a qualidade do ar do ambiente interior [49][50][51].

Estes indicadores serão cruciais para a avaliação sustentável das ações na reabilitação, servindo ainda como suporte para muitos sistemas de certificação de edifícios internacionais, mencionados anteriormente, que contribuem para a minimização dos impactos causados por este setor no meio que o rodeia [50][52].

2.5.2. TÉCNICAS CONSTRUTIVAS SUSTENTÁVEIS

A escolha de sistemas construtivos para um certo edifício consiste num processo bastante complexo, uma vez que a ordem de prioridades económica, ambiental ou de conforto, difere entre todos os intervenientes no processo construtivo. Para além disso, a utilização de metodologias e tecnologias sustentáveis neste contexto torna-se desafiante para quem as pretende implementar, seja pela comparação de custos entre diferentes soluções, pela flexibilidade de produção, ou pela adaptabilidade de instalação no local pretendido. Muitas vezes, um ato de reabilitação estrutural, conjuga-se com a reabilitação energética, sempre que esta se justifique [50][53].

Portanto no âmbito das técnicas construtivas sustentáveis, destacam-se a utilização de materiais reciclados ou de baixo consumo de energia durante o seu processo de produção e uma maior introdução de sistemas derivados da madeira, devido ao seu valor negativo de emissões [50][54].

O incentivo pela construção modular e pré-fabricada é vista com bons olhos no contexto dos pilares da sustentabilidade, uma vez que é possível alcançar uma diminuição de desperdícios e emissões face a obras convencionais, além de que diminui o tempo de execução da obra [50].

Adicionalmente, a adoção por sistemas de alto desempenho energético como fachadas do tipo ETICS ou ventiladas, a utilização de vidros de alto desempenho térmico e acústico ou a incorporação de sistemas de produção de energia renováveis, que promovem a minimização dos consumos de energia para o aquecimento e arrefecimento do espaço habitável e promovem a redução do consumo de recursos naturais [50][54].

A seleção criteriosa de materiais é fundamental para garantir a sustentabilidade na construção, uma vez que esta deve considerar o desempenho funcional e económico dos materiais, assim como os seus impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida. Neste contexto, torna-se essencial aplicar uma abordagem sistematizada e multidimensional.

Em primeiro lugar, recomenda-se a realização de uma avaliação do ciclo de vida (LCA) dos materiais, com recurso a ferramentas específicas, de forma a quantificar os impactos ambientais provenientes da extração da matéria-prima até ao fim de vida da mesma. Esta análise inclui indicadores como a pegada de carbono, o consumo energético incorporado, o uso de água e o potencial de poluição dos ecossistemas [1][8].

O local de origem dos materiais é outro fator crucial, dado que a utilização de recursos locais permite reduzir significativamente os impactos associados às emissões e do consumo de combustíveis fósseis provenientes dos transportes, promovendo paralelamente a economia regional [53][54].

A prioridade deve ser dada a materiais renováveis ou naturais, como a madeira certificada, o bambu, a cortiça ou o cânhamo, uma vez que estes possuem ciclos de regeneração curtos, baixo consumo energético no fabrico e, frequentemente, boa performance térmica e acústica. Paralelamente, o uso de materiais reciclados ou reutilizados, tais como aço reciclado, madeira recuperada ou vidro reaproveitado, contribui para a economia circular e para a redução da extração de recursos virgens e da produção de resíduos.[1][6][50]

A certificação ambiental é uma ferramenta essencial na validação da sustentabilidade dos materiais. Etiquetas como a declaração ambiental do produto, avaliação Cradle to Cradle, EU Ecolabel garantem transparência e fiabilidade na verificação da sustentabilidade das escolhas efetuadas. Outro critério relevante prende-se com a durabilidade e reduzida necessidade de manutenção dos materiais ao longo do tempo, o que influencia diretamente o seu impacto ambiental e económico em fase de utilização [1][8].

Do ponto de vista funcional, materiais com bom desempenho térmico e acústico devem ser valorizados, uma vez que contribuem para a eficiência energética do edifício e para o conforto dos ocupantes. Isolamentos de base natural, como lã de ovelha ou fibra de madeira, apresentam bons desempenhos e reduzido impacto ambiental [50][55].

Por fim, embora a sustentabilidade muitas vezes envolva custos iniciais superiores, é essencial proceder a uma análise custo-benefício que considere também os ganhos operacionais ao longo do tempo, bem como os benefícios ambientais. Esta abordagem permite justificar, de forma técnica e económica, a adoção de soluções mais responsáveis [24].

2.6. REABILITAÇÃO DE FACHADAS

2.6.1. PAPEL DA FACHADA NO EDIFÍCIO

A fachada representa a face exterior do edifício, constituído pela envolvente vertical com orientação para o exterior, desempenhando um papel essencial na proteção contra agentes atmosféricos, garantindo um bom desempenho térmico e acústico do edifício e, conferindo uma identidade estética característica que o permite distinguir dos restantes.

A composição da fachada pode, na sua maioria, incluir os seguintes elementos:

- Elementos opacos, como alvenarias, pilares e isolamentos térmicos;
- Vãos Envidraçados, como janelas, portas envidraçadas e fachadas cortinas;
- Elementos auxiliares e estéticos, como sistemas de iluminação, segurança e equipamentos HVAC;

As fachadas, por sua vez, requerem uma atenção especial no que toca ao comportamento térmico, sendo estas responsáveis por cerca de 40% das perdas energéticas totais de um dado edifício ao longo das diferentes estações climáticas [56].

Desta forma, procurou-se, ao longo dos tempos, encontrar as melhores soluções capazes de responder às necessidades dos utilizadores. Fachadas com sistemas com isolamento térmico pelo interior, a introdução do ETICS, a incorporação de sistemas de fachadas ventiladas, sistemas mistos com caixa-de-ar com isolamento incorporado e até a procura de fachadas envidraçadas com alto rendimento energético e térmico; são alguns dos tipos de envolventes se encontram, atualmente disponíveis no mercado.

2.6.2. ELEMENTOS OPACOS

Os elementos opacos de uma certa fachada são definidos como as estruturas que não permitem a passagem da luz solar para o interior do edifício, sendo estes responsáveis por assegurarem a proteção do interior do seu exterior e garantir uma boa resposta face a questões energéticas, térmicas e acústicas.

Existem diversas formas de responder a todas estas questões, destacando-se os sistemas descritos na

Tabela 2 e nas Figuras 13-17. Nesta tabela, a partir da recolha de alguns artigos e informações provenientes de sites da Internet, comparam-se os diferentes tipos de sistemas de fachada opaco que existem na atualidade, apresentando não só uma pequena introdução dos sistemas incluídos, mas também dos fatores que os caracterizam tanto a nível térmico, acústico, produtivo, de instalação, de durabilidade e económico. Para a avaliação térmica destaca-se o comportamento do sistema face transferência de calor em zona corrente, as pontes térmicas e inércia térmica dos elementos.

É importante referir que a escolha de qualquer tipo de solução é sempre subjetiva, uma vez que os diferentes utilizadores dão pesos diferentes aos diferentes fatores em função das suas preferências e necessidades específicas.

Tabela 2 - Comparação entre sistemas térmicos para fachadas [57][58][59][60][61][62][63][64][65]

Fatores Comparativos	Sistema ETICS (Figura 13)	Sistema Vetur (Figura 14)	Fachada Ventilada (Figura 15)	Parede Dupla (Figura 16)	Isolamento Pelo Interior (Figura 17)
<i>Descrição</i>	Sistema de isolamento térmico pelo exterior com revestimento final em reboco delgado, executado “in situ”	Sistema de isolamento térmico com fixação mecânica e ventilação reduzida associados à pré-fabricação	Sistema fixada ao tosco através de uma estrutura intermédia, que cria uma câmara de ar ventilada entre a fachada e o isolamento térmico	Duas paredes separadas por uma câmara de ar que pode ou não conter isolamento térmico	Isolamento aplicado no interior das paredes do edifício por colagem ou fixação mecânica
<i>Comportamento térmico</i>	Ótimo	Ótimo, mas ligeiramente inferior ao ETICS	Excelente	Ótimo, dependendo da utilização de isolamento	Médio
<i>Comportamento acústico</i>	Médio	Médio a Ótimo	Ótimo	Ótimo	Baixa a médio
<i>Proteção contra humidade</i>	Boa, mas requer manutenção adequada	Boa, pois a câmara de ar limita a humidade	Excelente, evita condensação e infiltrações	Boa, dependendo da drenagem e ventilação da câmara	Fraca, risco de condensação interna
<i>Durabilidade</i>	Boa, mas depende da manutenção do revestimento	Boa, resistente a impactos	Excelente, protege a estrutura contra agentes climáticos	Boa, desde que bem projetada	Média, risco de deterioração do isolamento
<i>Instalação</i>	Rápida e eficiente	Relativamente fácil, mas requer estrutura de fixação e mão de obra especializada	Complexa, exige estrutura adicional	Média, pode ser mais demorada	Fácil, mas reduz espaço útil interior
<i>Custo Associado</i>	Médio-baixo	Médio	Alto, devido à complexidade do sistema	Médio-alto	Baixo
<i>Aplicação recomendada</i>	Reabilitação e novas construções	Reabilitação e novas construções	Edifícios de alto desempenho energético e estéticos	Pouco utilizada	Projetos com restrições exteriores

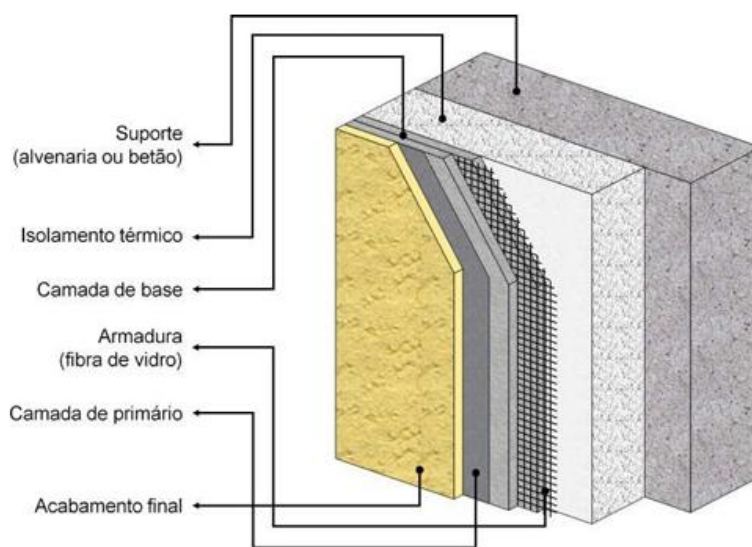
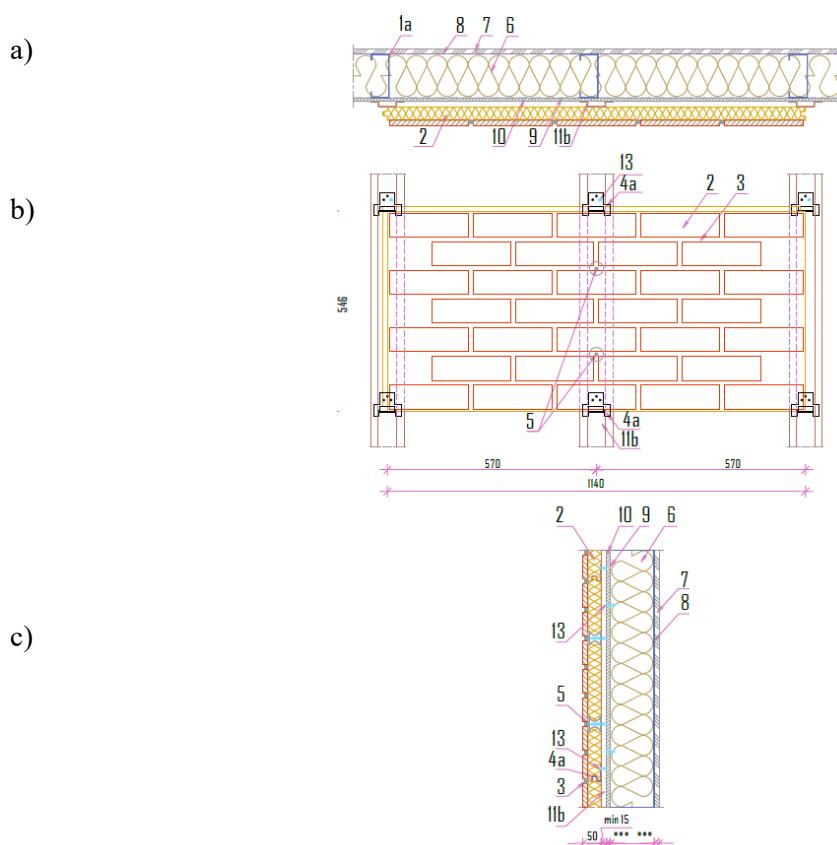


Figura 13 - Composição Esquemática 3D de um sistema ETICS [63]



1a. Timber frame	5. Stainless steel screws through sockets	10. Sheathing board min. 10mm
1b. Lightweight steel frame	6. Insulation	11a. Ventilated / drained cavity min.22mm / vertical batten min.22x45mm
2. Rake term facade panel	7. Internal lining	11b. Vertical galvanized steel top hat profile hmin. 15 mm
3. Grouting joint mortar	8. Vapour check membrane	12. Horizontal batten min 22x45 mm
4a. Stainless steel screw	9. Breather membrane	13. Stainless steel screw

Figura 14 - Representação esquemática vertical (a), frontal (b) e perfil (c) de um Vecture kit para fachadas [66]

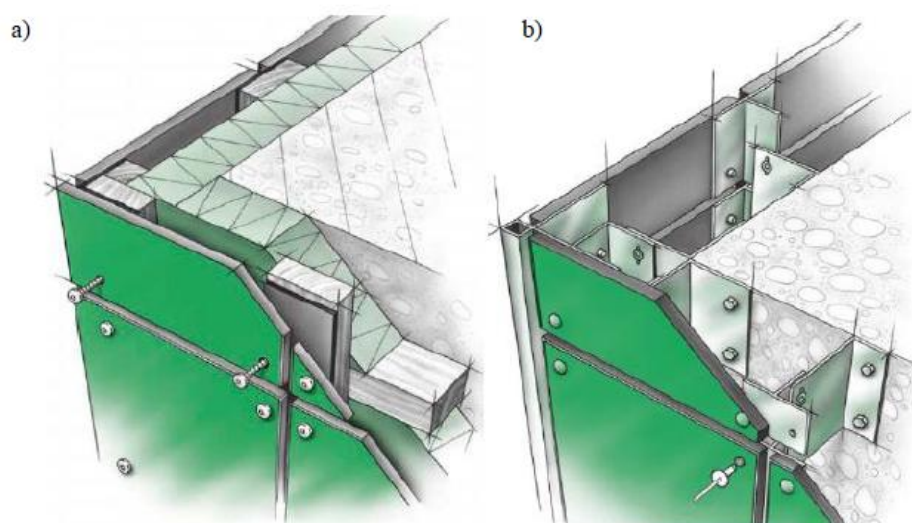


Figura 15 – Detalhes de dois tipos de soluções de fachada ventilada: a) com isolamento térmico; b) sem isolamento térmico [61]

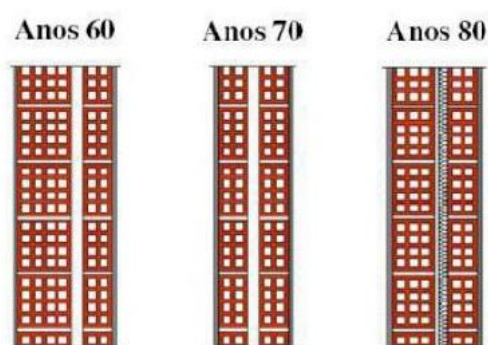


Figura 16 - Evolução esquemática dos sistemas de parede dupla. Adaptado de [67]

isolamento térmico pelo interior



Figura 17 - Esquema de tipo de aplicação de isolamento térmico pelo interior [68]

2.7.3. VÃOS ENVIDRAÇADOS

Os vãos envidraçados apresentam um papel bastante importante relativamente no desempenho energético, no conforto e na estética de um dado edifício, uma vez que representam cerca de 30% da origem das perdas energéticas de uma certa habitação [69]. Estes definem-se como sendo elementos transparentes, de várias cores, tamanhos e feitios, que permitem a entrada da luz natural para o interior do edificado, diminuindo assim a dependência de iluminação artificial para as divisões onde se localiza [62].

Relativamente ao conforto térmico e à sua eficiência energética, os vãos envidraçados regulam a entrada da radiação solar nos ambientes interiores e o fluxo de calor por condução para o exterior. Uma escolha acertada dos vãos envidraçados permite arrecadar o máximo de radiação solar para a estação de inverno, reduzindo o consumo para aquecimento e procura minimizar o sobreaquecimento da divisão envolvida na estação de arrefecimento. A procura de vidros com alto desempenho térmico, como os de baixa emissividade (Low-E), Figura 18, ou a implementação de caixilharias com corte térmico, Figura 19, são algumas das soluções sugeridas para garantir um bom desempenho térmico das janelas [69].

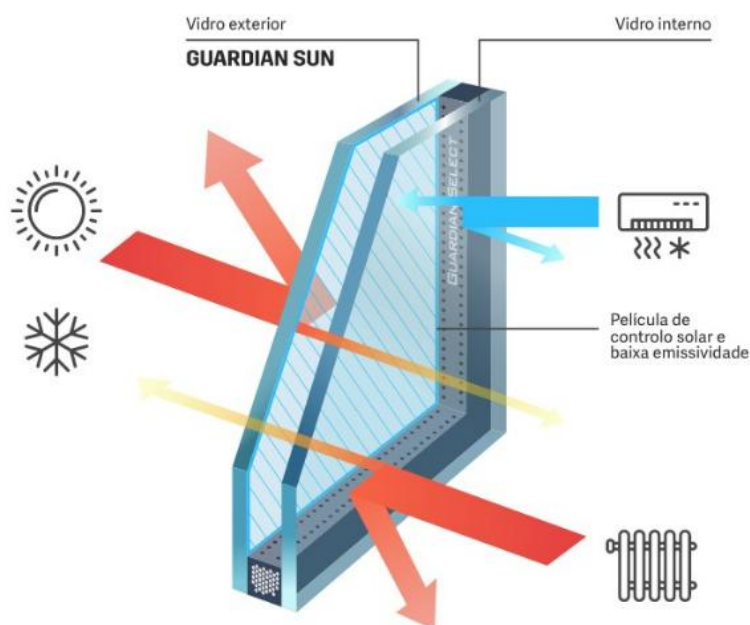


Figura 18 - Esquema do funcionamento de vidros de baixa emissividade - Low-E [70]



Figura 19 - Caixailharia em Alumínio com Corte Térmico [71]

Ao nível acústico, para se garantir a minimização a passagem do ruído produzido pelo exterior para o interior, recomenda-se a utilização de vidros duplos, triplos ou laminados, Figura 20 [69].



Figura 20 - Tipos de Vidros utilizados em Janelas [69]

Estes e outros aspetos técnicos são disponibilizados pelo Guia Técnico para Janelas Eficientes, promovido pela CLASSE+, uma iniciativa da Agência para a Energia, ADENE, que pretende incluir uma etiquetagem sustentável para os todos produtos construtivos, colmatando a falta de obrigatoriedade nas certificações de desempenho nos elementos que compõe a fachada de um edifício [69].

3

DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO

3.1. ENQUADRAMENTO

A ferramenta de cálculo desenvolvida, denominada por *FOCO₂_LCCA*, foi construída no Microsoft Excel e é constituída por um conjunto de folhas de cálculo interligadas, que permitem a introdução dos principais dados de entrada do projeto relacionados com as características construtivas, operacionais e económicas das soluções construtivas a integrar no edifício. A partir dessa informação, é possível gerar um grupo de resultados comparativos sobre o desempenho dos elementos analisados.

O principal objetivo da ferramenta consiste em apoiar a decisão do projetista na fase de planeamento de uma dada construção, sendo o seu foco principal a reabilitação de fachadas. A análise efetuada baseia-se em dois dos pilares fundamentais da sustentabilidade: o ambiental e o económico. Através desta comparação de diferentes alternativas, pretende-se identificar a solução com o melhor desempenho global, com base em critérios objetivos e quantificáveis, promovendo assim uma tomada de decisão apoiada e consciente que resultará na solução mais vantajosa para o consumidor.

Relativamente à avaliação ambiental, a ferramenta propõe a análise do Potencial de Aquecimento Global, medido em quantidade de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq.). Esta análise incide sobre as fases de produção e manufatura dos sistemas (A1-A3) e mais tarde o transporte do material para a empreitada (A4), seguindo uma lógica Cradle-to-Site, tal como descrito anteriormente. Esta abordagem permite cobrir uma parte significativa do ciclo de vida ambiental das soluções.

Na vertente económica, a ferramenta calcula um conjunto de indicadores que permitem avaliar:

- A evolução e a análise do custo do ciclo de vida ao longo do período definido;
- A viabilidade financeira de cada alternativa, com base no método da Poupança Líquida e do Valor Atualizado Líquido, considerando uma taxa de atualização anual;
- O período de retorno mínimo para o investimento;

Adicionalmente, a ferramenta inclui ainda uma componente técnica complementar, orientada para a estimativa dos consumos anuais de energia elétrica do edifício. Este módulo auxilia o projetista na seleção e dimensionamento dos sistemas construtivos através das simulações de poupança entre diferentes soluções. Desta forma, a análise final é enriquecida com dados energéticos, que ajudam a sustentar as recomendações mais eficazes.

Com esta abordagem, pretende-se contribuir para fomentar a digitalização e automatização dos processos de análise e decisão em projetos de reabilitação, promovendo soluções mais sustentáveis, fundamentadas em dados objetivos e facilmente comparáveis. A ferramenta foi concebida para ser prática, flexível

e adaptável a diferentes contextos construtivos, funcionando como um suporte técnico à escolha informada de soluções de reabilitação de fachada, facilitando a compreensão das decisões efetuadas pelo projetista por parte do consumidor.

3.2. FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO

3.2.1. CONSTITUIÇÃO DO SISTEMA

A ferramenta foi concebida como um sistema interligado de seis folhas de cálculo, organizadas de forma sequencial e funcional para facilitar a inserção de dados e posterior análise e comparação de resultados. Cada folha cumpre um propósito específico no âmbito da avaliação de soluções de reabilitação, assegurando uma estrutura lógica e intuitiva para o utilizador. Assim, a ferramenta é constituída por:

- Uma primeira folha (Figura 21) denominada *Interface*, que corresponde, como o próprio nome indica, à interface inicial do sistema desenvolvido. É nesta folha que se introduzem os dados do projeto, conforme os diferentes tipos de avaliações requerida. Para além disso, esta folha serve como ponto de partida para todo o processo analítico.

<

Figura 21 - Folha de cálculo *Interface*

- Três folhas de cálculo, representadas na Figura 22 e designadas por *Resultado "X"* (sendo "X" a designação correspondente ao número da solução estudada), que apresentam os resultados obtidos nas vertentes ambientais, técnicas e económicas, para cada tipo de solução construtiva. Note-se que o utilizador pode, em qualquer momento, escolher estudar e comparar mais ou menos sistemas de reabilitação, dependendo das suas próprias necessidades.

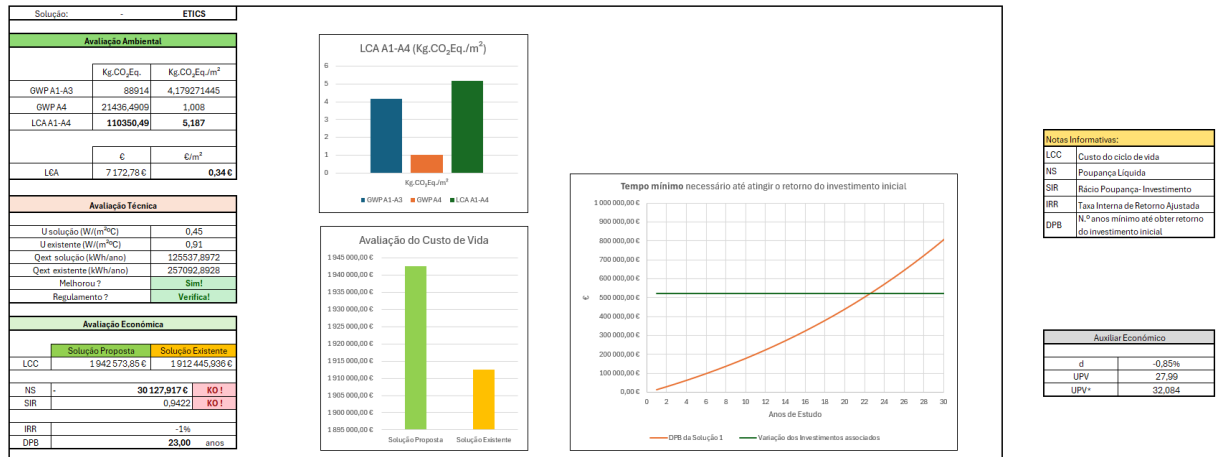


Figura 22 - Folha de cálculo *Resultado "X"*

- Uma quinta folha, visível na Figura 23, denominada por *Comparação de Resultados* e permite efetuar a comparação global de todos os parâmetros estudados referentes às soluções de reabilitação introduzidas.

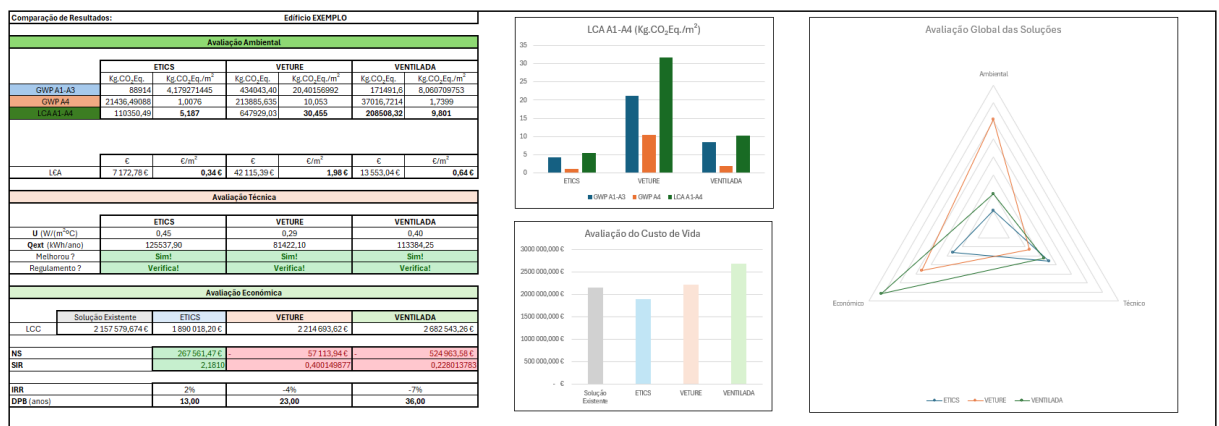


Figura 23 - Folha de cálculo *Comparação de Resultados*

- Por fim, existe ainda uma última folha, designada por *Tabelas Auxiliares*, com um cariz secundário e auxiliar, uma vez que complementa e ajuda as restantes folhas de cálculo na obtenção de resultados e auxilia na geração de gráficos ao longo de toda a plataforma. Apesar da sua importante função, esta folha fica oculta durante a utilização da ferramenta.

3.2.2. GUIA DE UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO

A *FOCO₂_LCCA* foca-se no cálculo da avaliação do custo do ciclo de vida (LCCA) e da avaliação do ciclo de vida (LCA) de diferentes soluções de fachada propostas para a reabilitação de um determinado edifício.

Para a sua utilização, primeiramente, o utilizador deverá abrir a ferramenta na folha de cálculo *Interface*, composta por um conjunto de quadros informativos e de projeto, onde deverão ser inseridas todas as componentes e informações de projeto essenciais para a avaliação dos diversos parâmetros descritos acima.

O primeiro quadro, Figura 24, permite preencher informações de carácter mais básico e informativo, nomeadamente o nome do edifício/projeto, área de intervenção, área de pavimento, localização do imóvel e o respetivo valor de Graus-Dias. Para além disso, este quadro permite estabelecer os valores referência como o custo de eletricidade e o custo das licenças para as emissões carbónicas (informação disponível em publicações disponibilizadas pela União Europeia).

Quadro Informativo				
Nome do Edifício:	Edifício EXEMPLO		€/kWh	0,15 €
Área de Intervenção (m ²):	1000		€/ton.CO ₂ Eq.	65,00 €
Localização:	Porto		Área do Pavimento (m ²)	2000
Graus-Dias (GD)	1148			

Figura 24 – Exemplo de aplicação do quadro informativo da folha de cálculo *Interface*

Após a introdução desta informação, segue-se uma nova tabela, representada na Figura 25, de carácter vincadamente técnico. Aqui o utilizador deverá preencher segundo os dados relativos às características térmicas dos materiais utilizados, nomeadamente a sua condutibilidade térmica, obtida através de bases de dados como o ITE50. A partir destes valores é possível obter-se de forma automatizada o coeficiente de transmissão térmica e o fluxo de calor anual que é perdido através do elemento. Este quadro encontra-se subdividido pelos diferentes tipos de sistemas que se pretende estudar e comparar, permitindo de imediato identificar e contabilizar o impacto de cada tipo de elemento construtivo no desempenho do edifício [72].

Quadro Auxiliar - Térmica					
Sistema Atual					
Elemento Construtivo:	e (m)	λ [W/(m°C)]	R_t [(m ² °C)/W]	U [W/(m ² °C)]	Q _{ext} (kWh/ano)
revest. Exterior	0,02	1	0,020	0,90	24859,165
Alv./ Estr. Exterior - Tijolo	0,15	0,38	0,395		
Camada Isolante	0	0	0,000		
Caixa de ar	0,04	0,17	0,235		
Alv./ Estr. Interior - Tijolo	0,11	0,41	0,268		
revest. Interior	0,02	1	0,020		
ETICS					
Elemento Construtivo:	e (m)	λ [W/(m°C)]	R_t [(m ² °C)/W]	U [W/(m ² °C)]	Q _{ext} (kWh/ano)
revest. Exterior	0,02	1	0,020	0,44	12212,380
Alv./ Estr. Exterior	0,15	0,38	0,395		
Camada Isolante	0	0	0,000		
Caixa de ar	0,04	0,17	0,235		
Alv./ Estr. Interior	0,11	0,41	0,268		
revest. Interior	0,02	1	0,020		
Isolamento ETICS - EPS	0,04	0,037	1,081081081		
Fibra de Vidro + Ligante	0,01	0,15	0,066666667		

Figura 25 - Exemplo de aplicação do *Quadro Auxiliar Térmico*

Relativamente à componente ambiental, a ferramenta permite efetuar um estudo bastante rigoroso e detalhado das etapas de produção e de transporte do ciclo de vida ambiental de cada uma das soluções. Assim, a Figura 26 apresenta o quadro auxiliar com a informação necessária para o cálculo da componente ambiental, em que o utilizador terá de contabilizar os processos envolvidos no sistema escolhido e os respetivos valores indicados pelas declarações ambientais de produtos para as fases de produção em fábrica. Estes dados correspondem aos parâmetros A1-A3 da avaliação do ciclo de vida (LCA).

Quadro Auxiliar - Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) - 1.ª Parte													
ETICS		Dados A1-A3							Dados A4				
Material:	Informações de Projeto:		Base de Dados:		Peso (Kg)	Peso (%)	Emissões / kg	Kg.CO ₂ Eq.	Localização da Fábrica	Tipo de Transporte	Distância estimada (km)	Emissões / km	Kg.CO ₂ Eq.
	Valor:	Parâmetro:	Valor:	Parâmetro:									
Sistema ETICS - EPS	40	mm	12	kg/m²	12000	100%	0,725	8700	Portugal - Carregado	Camião-Rígido	300	6,99168	2097,504
						0%							
						0%							
						0%							
						0%							
						0%							
						0%							

Figura 26 - Exemplo de aplicação no Quadro Auxiliar - Avaliação do Ciclo de Vida (LCA)

Esta quantificação segue a metodologia da equação (5), que promove a quantidade total de massa, em quilogramas, de cada tipo de material utilizado (Q) e o seu respetivo fator ambiental associado [F(A1-A3)] para determinar o impacto total da componente A1-A3.

$$\text{Impacto Ambiental (A1 - A3)} = \sum [Q \times F(A1 - A3)] \quad (5)$$

Para além disso, mais à direita na tabela, existe a contabilização da componente das emissões do produto resultantes do transporte até ao local da empreitada, que corresponde à fase A4 do LCA. Neste segmento, o utilizador deverá definir o local de proveniência do produto, escolher o tipo de transporte e quantificar a distância entre os locais de partida e recolha.

A partir desta escolha e através das informações estabelecidas para o transporte do material, utilizando a metodologia apresentada na equação (6), é calculada a quantidade total de emissões associadas à fase de transportação de cada elemento do sistema, com base na quantidade total de massa, em quilogramas, de cada tipo de material utilizado (Q), na distância estabelecida (D) e o seu respetivo fator ambiental associado ao tipo de transporte definido [F(A4)].

$$\text{Impacto Ambiental (A4)} = \sum [Q \times D \times F(A4)] \quad (6)$$

Por fim, a Figura 27 apresenta um último quadro referente aos dados económicos das soluções a estudar. O utilizador pode definir o período de análise, os custos associados ao investimento inicial e de manutenção anual da solução que se propõe, bem como também introduzir valores associados à taxa de atualização que se pretende (com ou sem efeito da inflação) ou custo interventivo. Nos restantes parâmetros são contabilizados valores bases, que podem porventura ser alterados consoante o caso a analisar.

Quadro Auxiliar Económico									
Tipo de Solução	Período de Exploração	Taxa de Inflação (%)	Taxa de Juro (%)	Investimento Inicial	Custo da Energia Alternativa	Custo de Manutenção	Custo da Energia Existente	Custo Intervenção Base	Taxa de Escolamento (%)
ETICS	25	3,28%	2,40%	1 132 784,80 €	18 830,68 €	5 467,70 €	39 002,21 €	906 227,84 €	1%
VETURE	25	3,28%	2,40%	1 605 970,80 €	12 213,31 €	7 746,76 €	39 002,21 €	906 227,84 €	1%
VENTILADA	25	3,28%	2,40%	1 853 908,00 €	17 007,64 €	10 107,58 €	39 002,21 €	906 227,84 €	1%

Figura 27 - Exemplo de aplicação do Quadro Auxiliar Económico

Importa ainda destacar a presença de duas colunas de preenchimento automático associadas aos custos de energia. Estas comparam os valores de custo energético anual para os cenários antes e após a intervenção, tendo por base as perdas energéticas pela envolvente opaca do edifício, obtidas anteriormente, e o preço da eletricidade também já definidos atrás.

3.2.3. RESULTADOS ESPERADOS

Após a inserção de todos os dados de entrada, o utilizador terá acesso nas folhas seguintes aos resultados de cada um dos tipos de avaliação necessários para a análise do projeto.

Como se observa na Figura 22, a folha de cálculo *Resultados “X”* permite analisar os resultados tanto a nível ambiental como também técnico e económico. Cada uma destas folhas, terá não só um conjunto de tabelas, mas também um conjunto de gráficos de apoio e uma série de verificações que ajudam a avaliar a viabilidade de cada alternativa estudada.

Na Figura 28 pode-se observar a tabela correspondente à *Avaliação Ambiental* que permite não só analisar as quantidades, tanto totais como por metro quadrado, das emissões de CO₂eq., associadas ao caso de estudo, complementando-as com os respetivos custos resultantes das licenças de emissões de carbono.

Avaliação Ambiental		
	Kg.CO ₂ Eq.	Kg.CO ₂ Eq./m ²
GWP A1-A3	8700	4,35
GWP A4	2097,504	1,049
LCA A1-A4	10797,50	5,399
	€	€/m ²
L&A	701,84 €	0,35 €

Figura 28 - Exemplo aplicado no Quadro *Avaliação Ambiental*

Relativamente à parte técnica, a folha de cálculo apresenta também um quadro relativo a esta temática, Figura 29, cujo propósito é efetuar uma comparação antes e depois da intervenção, conferindo a compatibilidade da solução de acordo com a regulamentação atual e apresentando os valores de perdas de energia anuais da envolvente opaca nos dois cenários.

Avaliação Técnica	
U solução (W/(m ² °C))	0,44
U existente (W/(m ² °C))	0,90
Qext solução (kWh/ano)	12212,3795
Qext existente (kWh/ano)	24859,16472
Melhorou ?	Sim!
Regulamento ?	Verifica!

Figura 29 - Exemplo aplicado no Quadro *Avaliação Técnica*

Por fim, na vertente económica, a folha de cálculo apresenta uma última tabela, Figura 30, com diferentes indicadores económicos úteis na análise de investimentos. Trata-se de cinco parâmetros que permitem avaliar o custo do ciclo de vida entre um investimento base simples e o investimento associado à proposta, a rentabilidade que o sistema terá ao fim do período de análise, a percentagem de poupança que este trará e ainda qual o número de anos mínimo até que se obtenha o retorno total do investimento inicial.

Avaliação Económica		
	Solução Proposta	Solução Existente
LCC	184 590,76 €	209 637,674 €
NS	25 046,910 €	OK!
SIR	2,2019	OK!
IRR	2%	
DPB	12,00 anos	

Figura 30 - Exemplo aplicado no Quadro *Avaliação Económica*

Para complementar este quadro, disponibilizam-se ainda dois gráficos representados na Figura 31. O primeiro gráfico, localizado à esquerda da figura ilustra a avaliação dos custos do ciclo de vida, enquanto no lado oposto observa-se um gráfico que traduz o tempo mínimo necessário até se atingir o retorno do investimento inicial.

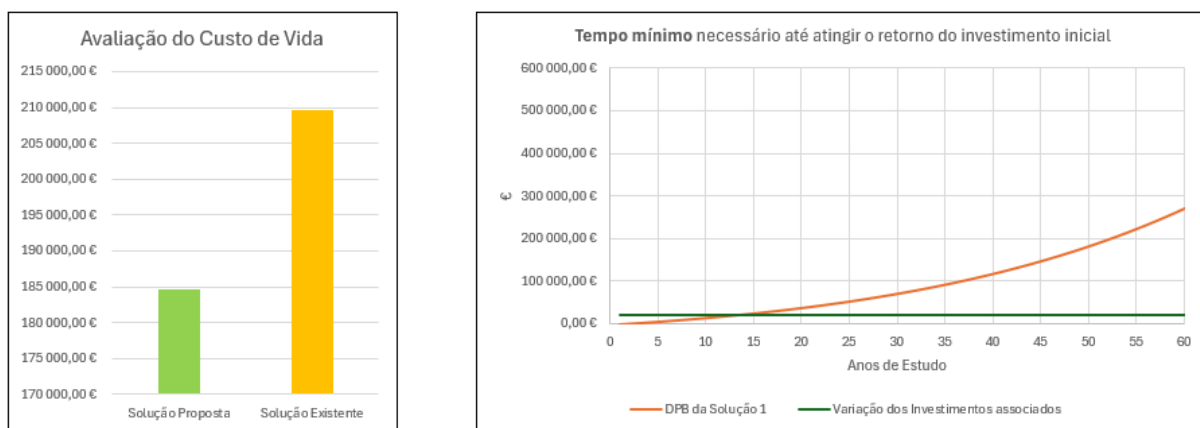


Figura 31 - Gráficos complementares à avaliação económica da solução exemplo

No que diz respeito à folha de cálculo final *Comparação de Resultados*, esta consiste na junção de todas as avaliações analisadas nas folhas de cálculo anterior, Figura 32, dando uma visão mais completa e abrangente no que toca à avaliação das vertentes económicas, técnicas e ambientais de todas as soluções estudadas.

Comparação de Resultados:			Edifício EXEMPLO			
Avaliação Ambiental						
	ETICS		VETURE		VENTILADA	
	Kg.CO ₂ Eq.	Kg.CO ₂ Eq./m ²	Kg.CO ₂ Eq.	Kg.CO ₂ Eq./m ²	Kg.CO ₂ Eq.	Kg.CO ₂ Eq./m ²
GWP A1-A3	88914	4,179271445	434043,40	20,40156992	171491,6	8,060709753
GWP A4	21436,49088	1,0076	213885,635	10,053	37016,7214	1,7399
LCA A1-A4	110350,49	5,187	647929,03	30,455	208508,32	9,801
	€	€/m ²	€	€/m ²	€	€/m ²
LCA	7 172,78 €	0,34 €	42 115,39 €	1,98 €	13 553,04 €	0,64 €
Avaliação Técnica						
	ETICS		VETURE		VENTILADA	
	U (W/(m ² °C))					
Qext (kWh/ano)	125537,90		81422,10		113384,25	
Melhorou ?	Sim!		Sim!		Sim!	
Regulamento ?	Verifica!		Verifica!		Verifica!	
Avaliação Económica						
	Solução Existente	ETICS	VETURE	VENTILADA		
	LCC	2 157 579,674 €	1 890 018,20 €	2 214 693,62 €	2 682 543,26 €	
NS		267 561,47 €	- 57 113,94 €	- 524 963,58 €		
SIR		2,1810	0,400149877	0,228013783		
IRR		2%	-4%	-7%		
DPB (anos)		13,00	23,00	36,00		

Figura 32 - Quadros de resultados ambientais, técnicos e económicos para as soluções exemplo

No mesmo sentido da folha anterior, também a *Comparação de Resultados* apresenta diversos gráficos complementares à interpretação e ponderação da escolha da melhor solução. Conforme representado na Figura 33, pode-se observar um gráfico comparativo às emissões de kg.CO₂eq./ m² de todas as soluções, um gráfico de barras que analisa os custos do ciclo de vida das mesmas e ainda um gráfico radar que tenta introduzir os conceitos de sustentabilidade de forma escolher o sistema mais sustentável.

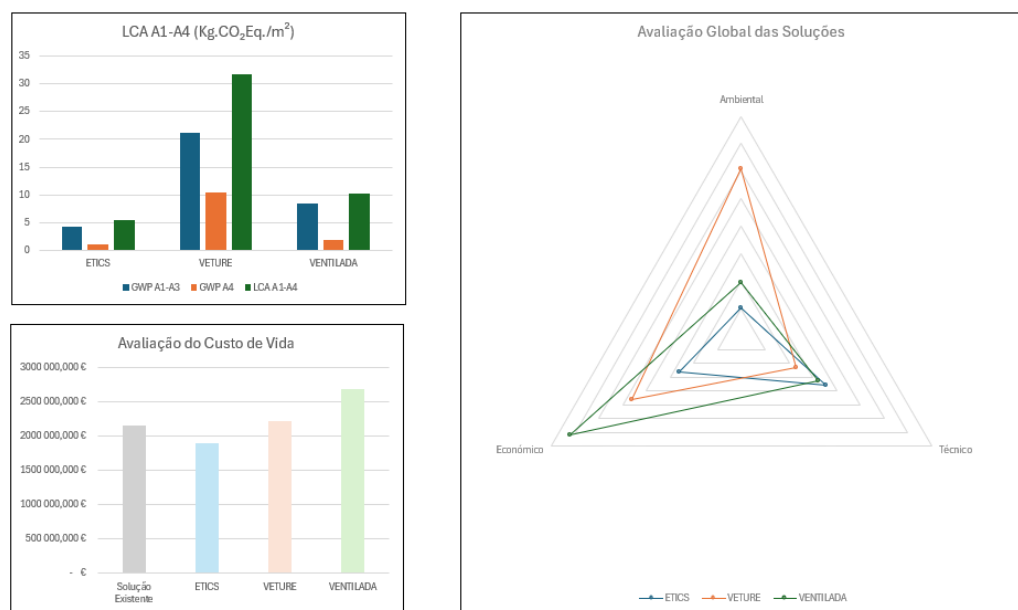


Figura 33 - Gráficos complementares à comparação das soluções exemplares

3.3. LIMITAÇÕES E PRESSUPOSTOS

A presente ferramenta foi desenvolvida com base em pressupostos técnicos, ambientais e económicos que definem os limites e as condições de utilização do sistema. Estes enquadramentos visam assegurar a conformidade com as normas e metodologias em vigor, garantindo a fiabilidade dos resultados obtidos e a coerência na comparação entre soluções.

Na vertente técnica, o sistema impõe limites de aplicação que visam assegurar a conformidade com as recomendações regulamentares portuguesas. Assim, para que a solução alternativa, que se pretende analisar seja considerada válida, ela deverá cumprir as recomendações máximas regulamentares portuguesas da Portaria n.º 138-I/2021, relativa ao desempenho térmico destes elementos. Assim, é requerido um coeficiente de transmissão térmica (U) inferior a 0,5, 0,4 ou 0,35 W/(m². °C), dependendo da respetiva zona climática da localização do edifício [72].

No domínio ambiental, a abordagem do sistema orienta-se para assegurar que as soluções de fachada avaliadas contribuam para práticas construtivas sustentáveis, favorecendo aquelas que menos emissões produzem nas diferentes etapas estudadas.

Para a contabilização das emissões carbónicas, a metodologia procura a integração das fases Cradle to Site, correspondentes aos parâmetros A1-A5 para avaliação do ciclo de vida das construções. Porém, a indisponibilidade e fraca documentação acerca da fase de instalação dos sistemas ou mesmo a sua não contabilização, levou à exclusão dos dados referentes à fase A5.

Nas fases A1-A3, o sistema calcula o peso das emissões de CO₂, que se baseia no produto entre as quantidades, em massa, de materiais contabilizados para o sistema e os respetivos fatores emitidos atribuídos pelas suas declarações ambientais dos produtos, permitindo uma avaliação detalhada dos impactos associados à produção dos materiais.

Nota que, devido à escassa disponibilidade pública de avaliações ambientais para estes elementos e conjuntos construtivos, e na inexistência de informação oficial por parte dos fornecedores, procurou-se adaptar esta contabilização para estes casos através da medição do sistema de forma separada, tornando o resultado obtido o mais próximo possível do real.

A componente A4, no mesmo sentido das fases anteriores, consiste na contabilização do peso das emissões carbónicas resultantes do transporte dos materiais, sendo necessária a quantidade de massa associada ao material transportado, da distância que o transporte percorrerá para a sua entrega e ainda definir o tipo de veículo que será utilizado neste processo. Relativamente ao último fator, foram utilizados valores médios a partir dos referenciados na *Ferramenta de Reporte GEE* para cada tipo de transporte disponibilizado para o estudo desta avaliação, conforme se pode observar na Tabela 3 [74].

Tabela 3 – Fatores de emissões utilizadas para os diferentes tipos de transporte de materiais

<i>Tipos de Transportes de Materiais</i>	<i>Fatores de Emissão (kg.CO₂eq./t.km)</i>
<i>Carrinha</i>	0.247
<i>Camião Rígido</i>	0.58264
<i>Camião articulado</i>	0.62398
<i>Comboio</i>	0.000156715
<i>Navio</i>	0.019411521
<i>Avião</i>	1.054056089

A vertente financeira engloba diversos parâmetros de referência que refletem o cenário mais recente e credível para estudo económico das soluções pretendidas. Para isso, foram atribuídos os valores de taxas de juro bancárias e de inflação médias anuais mais recentes, corresponde ao ano de 2024, de forma a uniformizar estes valores, ainda que haja a possibilidade de os alterar.

Relativamente aos custos associados para o cálculo das diferentes avaliações do custo do ciclo de vida, foram utilizadas taxas de atualização nos custos anuais de manutenção e reparação do elemento através do valor atual atualizado, UPV, e nos custos provenientes das perdas energéticas associadas à solução introduzida através do valor atual atualizado e modificado, UPV*; de forma a projetar e refletir as variações económicas anuais dos diferentes custos, para se atingir uma maior credibilidade de resultados face à comparação à realidade.

A ferramenta de cálculo, como já foi mencionado, incorpora um gráfico complementar do estilo radar, que, de forma visual e comparativa, permite sintetizar o desempenho de todas as soluções estudadas para as três diferentes vertentes que compõe a sustentabilidade no ramo da construção: ambiental, económica e social.

Este gráfico encontra-se dividido por três eixos, sendo que cada um corresponde aos indicadores anteriormente descritos, procurando a melhor solução para cada um deles através do menor valor possível obtido. Para além disso, para cada eixo foi escolhido um parâmetro daqueles que foram obtidos nos resultados, de forma a simplificar a sua disposição.

Na avaliação ambiental, o parâmetro global escolhido foi a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) nas fases A1-A4, expresso por metro quadrado (m²), uma vez que a área envolvida será igual para todos os casos, não havendo a necessidade de incluir valores bastante elevados nesta avaliação.

A avaliação económica é avaliada através do período de recuperação descontado, em inglês Discounted Payback (DPB), que indica o número mínimo de anos necessários para que o investimento inicial seja totalmente recuperado, tendo em conta o valor temporal dos investimentos [22].

Por fim, a avaliação técnica é traduzida através de uma relação entre o desempenho útil da solução com o desempenho regulamentar recomendado, equação (7), acrescentando posteriormente um fator de valor igual a 20, de forma a enquadrar os valores medidos nesta relação com as escalas das outras avaliações, resultando numa melhor leitura de todos os resultados.

$$\text{Parâmetro Técnico} = \frac{U_{\text{proposto}}}{U_{\text{referência}}} \times 20 \quad (7)$$

Sendo que:

U_{proposto} – coeficiente de transmissão térmico da intervenção proposta, em W/ (m². °C);

$U_{\text{referência}}$ – recomendação máxima do coeficiente de transmissão térmico de elementos opacos da envolvente, localizados na respetiva zona climática, em W/ (m². °C);

4

CASOS DE ESTUDO

4.1. ENQUADRAMENTO

Esta dissertação foi elaborada em ambiente empresarial, em colaboração com a empresa *FOCO – Projetos Sustentáveis*, cuja atuação se centra no desenvolvimento de soluções de projeto que aliem a viabilidade económica e responsabilidade ambiental, promovendo ao mais alto nível a sustentabilidade na construção, assim como a preservação e valorização do património arquitetónico [75].

No âmbito do desenvolvimento e validação da ferramenta proposta nesta dissertação, a aplicação num caso prático é fundamental para aferir a sua utilidade e robustez, conferindo um maior grau de credibilidade e suporte na aplicabilidade da metodologia utilizada no sistema.

Desta forma, este capítulo incide sobre a apresentação de dois casos de estudo reais, disponibilizados pela *FOCO*, que serão avaliados com recurso à ferramenta desenvolvida. Em ambos os casos, será analisado um conjunto de soluções construtivas para a envolvente opaca dos edifícios, com o objetivo de garantir uma reabilitação energética eficaz e, posteriormente, analisar as viabilidades económica e ambiental de cada um dos sistemas, de forma a identificar o cenário mais favorável à sua implementação.

O primeiro caso de estudo corresponde ao conjunto habitacional *Pinhal da Foz*, localizado na cidade do Porto. Trata-se de uma intervenção de grande escala, composta por quatro blocos de utilização majoritariamente habitacional, com alturas entre os 8 e os 11 pisos, organizados em torno de um logradouro comum. A intervenção foca-se nos três principais edifícios e tem como objetivo principal a reabilitação energética das fachadas, visando a melhoria do desempenho térmico do edificado e a adoção de soluções que conciliem eficiência e viabilidade económica.

O segundo caso de estudo incide sobre o conjunto *Estrela da Avenida*, localizado em Rio Tinto. É composto por dois edifícios que integram, no total, cinco blocos habitacionais com 11 pisos totais, sendo que estes dois conjuntos estão articulados através de um logradouro central. A intervenção tem o mesmo objetivo que no caso anterior, isto é, reforça a pertinência de estratégias de eficiência energética adequadas às necessidades térmicas locais.

A inclusão destes dois casos permite explorar diferentes tipologias de conjuntos residenciais em meio urbano, oferecendo um cenário abrangente para aplicação e teste da ferramenta. Em ambos os contextos, a complexidade técnica e a escala das intervenções exigem decisões criteriosas, com impacto direto nas dimensões ambiental, económica e energética dos projetos.

4.2. CASO DE ESTUDO: PINHAIS DA FOZ

4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

O primeiro edifício de estudo incide sobre o conjunto edificado *Pinhais da Foz*, Figura 34, situado na cidade do Porto, mais concretamente na Rua Alfredo Keil, números 114, 257, 331, 371 e 381. O edifício situa-se a 56 metros acima da linha do mar, num local com 1189 graus-dias de aquecimento, correspondentes à zona climática II. Trata-se de um complexo de utilização mista, isto é, para habitação e serviços, composto por quatro blocos construtivos, organizados em torno de um logradouro central que estabelece a ligação entre os diferentes lotes, conforme se pode observar na Figura 35.



Figura 34 - Fotografia do Conjunto Edificado *Pinhais da Foz*

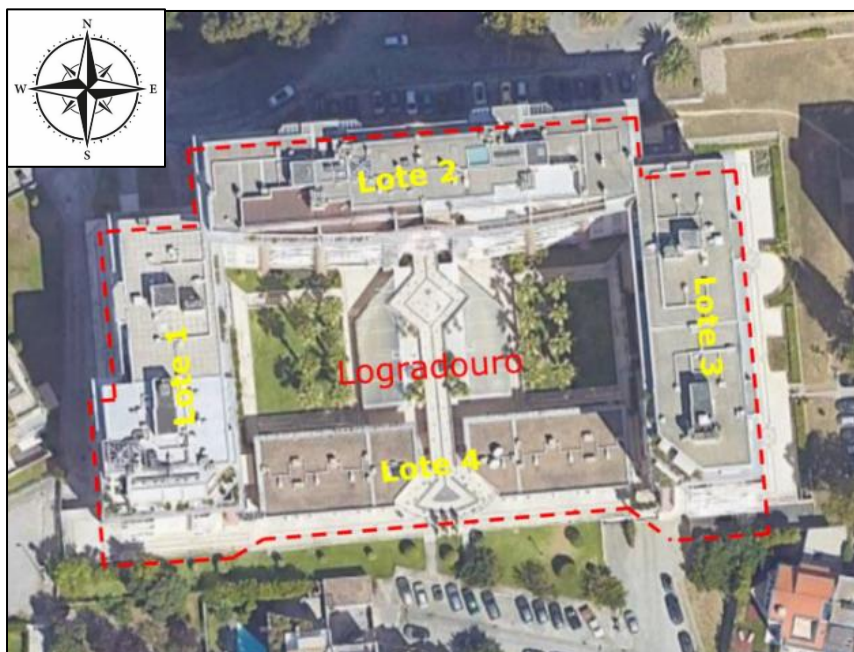


Figura 35 - Vista aérea do caso de estudo

O primeiro corpo, localizado mais a oeste, é constituído por um total de 10 pisos, sendo que oito deles são destinados exclusivamente a habitação, com uma área de construção de 6.565 m² acima do solo, correspondendo, portanto, a uma área de 656,50 m² por piso.

O segundo lote, situado a norte do conjunto edificado, apresenta uma estrutura de 13 pisos, sendo que 11 acima do solo, maioritariamente destinados a habitação, embora haja uma pequena porção destinada a serviços. A sua área de construção atinge os 10.504 m² acima do solo, correspondendo a uma média de 808 m² por piso.

O terceiro lote encontra-se mais a este de todos os outros, sendo composto por um total de 12 pisos, em que 10 deles são de uso exclusivo para habitações. Este bloco possui uma área de construção de 8.562 m², correspondendo a cerca de 714 m² por cada piso.

Relativamente ao bloco mais a sul, o Lote 4, devido à sua escala reduzida quando comparada com os restantes, não entrará no estudo tendo em conta a sua pouca relevância para a melhoria energética do conjunto.

Com isto, a área de construção dos três primeiros lotes, que constituem o objeto principal da análise, perfaz um total 25.631 m². Correspondentemente, a área de intervenção definida para este estudo, ou seja, a reabilitação energética das fachadas, contabiliza um total de 10.220 m² de parede exterior, distribuindo-se por 2.600 m², 4.250 m² e 3.370 m², nos Lote 1, 2 e 3, respetivamente.

4.2.2. SOLUÇÕES ESTUDADAS

4.2.2.1. Sistema Construtivo Existente

Uma vez que se trata de uma construção anterior à regulamentação atualmente em vigor no domínio da térmica de edifícios, é bastante importante conhecer e caracterizar detalhadamente os materiais e soluções construtivas atualmente aplicados na zona a intervir. Esta caracterização assume-se fundamental tanto para o processo de avaliação e diagnóstico das patologias e falhas existentes, como para o próprio processo de contextualização da intervenção de reabilitação (energética ou não) do conjunto.

Desta forma, sabe-se que o conjunto edificado *Pinhais da Foz* é composto por uma estrutura portificada de pilares, vigas e lajes maciças em betão armado. A sua envolvente opaca, Figura 36, é constituída por paredes em alvenaria de tijolo de pano duplo, de espessuras de 15 e 11 cm, respetivamente pelo exterior e interior do edifício, com espaço de ar não ventilado com 5 cm de espessura, localizado no seu interior. A fachada opaca é ainda rebocada em ambos os lados das paredes num total de 4 cm de espessura, sendo acabada por um revestimento monomassa pintado.

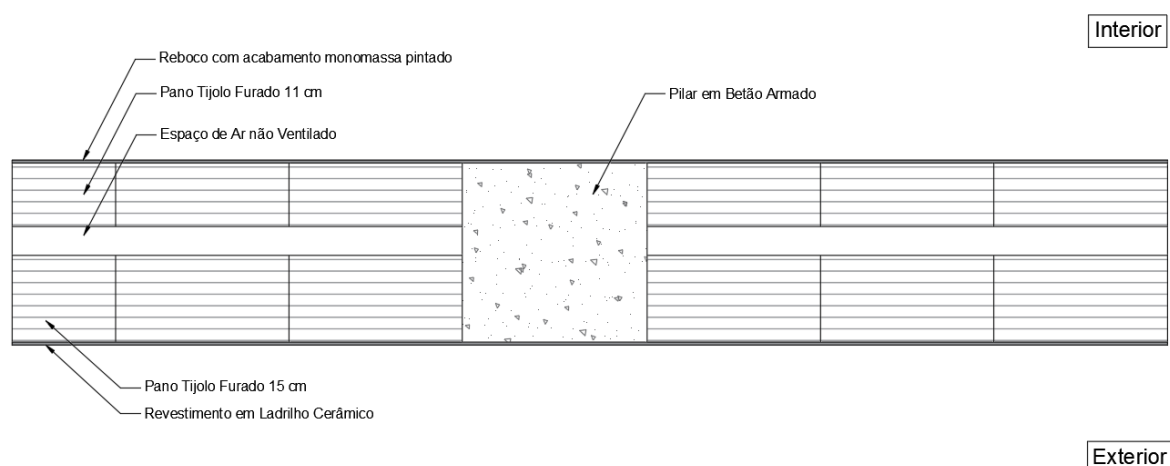


Figura 36 - Esquema construtivo horizontal da solução existente no conjunto *Pinhais da Foz*

Na Tabela 4 pode-se observar a configuração das paredes de fachada, incluindo as espessuras de cada elemento, assim como os respetivos valores de condutibilidade térmica, que permitem calcular as correspondentes resistências térmicas. Estes resultados, juntando-lhe os valores de resistência térmica superficial interna e externa, permitem determinar o coeficiente de transmissão térmica (U) e, a partir daí, verificar o desempenho térmico da constituição estudada. Neste caso de estudo, a aplicação desta metodologia resulta num valor de perdas de energia globais de 257.092,89 kWh/ano. Nota que os valores associados à condutividade térmica dos tijolos é resultado de uma aproximação entre a relação da espessura do material com a sua resistência térmica.

Tabela 4 - Constituição e Desempenho Térmico da Solução Existente

<i>Elementos da Parede de Fachada Existente</i>	<i>Espessura (m)</i>	<i>λ (W/m.°C)</i>
<i>Revestimento Exterior em reboco</i>	<i>0,02</i>	<i>1</i>
<i>Pano de Tijolo Furado Exterior</i>	<i>0,15</i>	<i>0,38 *</i>
<i>Espaço de caixa de ar não ventilado</i>	<i>0,04</i>	<i>0,18</i>
<i>Pano de Tijolo Furado Interior</i>	<i>0,11</i>	<i>0,41 *</i>
<i>Revestimento Interior em reboco</i>	<i>0,02</i>	<i>1</i>

Porém, a aplicação da metodologia proposta nesta dissertação pressupõe a existência de um cenário base de reabilitação sem foco na melhoria do desempenho térmico e energético, ou seja, apenas uma intervenção mínima de conservação e reabilitação de fachada. Assim, a Tabela 5 mostra um orçamento para este cenário, com base nos dados disponíveis no *Gerador de Preços*. Na tabela observa-se um mapa de trabalhos e quantidades geral que traduz os custos totais associados a cada fase a executar no processo desta reabilitação [65].

Tabela 5 - Mapa de Trabalhos e Quantidades para a reabilitação do sistema existente (cenário base)

<i>Tarefas</i>	<i>Unidades</i>	<i>Quantidades</i>	<i>Custos Associados</i>
<i>1. Montagem e Desmontagem do Estaleiro de obras no conjunto edificado</i>	-	-	93.404,62 €
<i>2. Lavagem integral da fachada com jatos de água</i>	m ²	10.220	158.818,80 €
<i>3. Tratamento das fissuras existentes para reboco</i>	m ²	10.220	365.160,60 €
<i>4. Limpeza geral da obra e locais adjacentes</i>	-	-	57.773,92 €

No total, o investimento necessário para a reparação exterior da fachada sem qualquer melhoria térmica traduz-se num total de 675.155,94 €. Este valor está associado apenas ao investimento inicial da reabilitação, sendo que para este caso se exclui quaisquer investimentos relativos a manutenções futuras, visto tratar-se de uma solução base, que servirá apenas para caracterizar o existente e complementar a análise económica das soluções alternativas.

4.2.2.2. Solução 1 – Sistema ETICS com EPS

Relativamente às soluções de reabilitação energética a estudar, incluíram-se apenas sistemas cuja intervenção acontece pelo exterior da fachada, ou seja, com o intuito de efetuar uma melhoria energética face à situação existente através do aumento da resistência térmica do elemento conseguida pela introdução de novas camadas pelo lado exterior.

Assim, a primeira solução-tipo considerada é, um sistema de fachada em ETICS, constituído pela estrutura de suporte original do edifício, removendo apenas a camada de reboco localizada no exterior do edifício, para que, posteriormente, se pudesse instalar todo o sistema de isolamento térmico pelo exterior aplicado por colagem ou fixação mecânica.

Trata-se de um sistema amplamente utilizado em intervenções de reabilitação energética, por se tratar uma opção bastante eficiente, facilitar a correção de pontes térmicas e apresentar um custo relativamente reduzido face a outros tipos de intervenções, razões pelas quais foi selecionado para a futura avaliação.

Conforme ilustrado na Figura 37, este tipo de aplicação inclui a colocação de uma camada de 4 cm de isolamento térmico em EPS, reforçada com uma armadura em fibra de vidro, seguida de uma camada de ligante e terminando com um acabamento em reboco monomassa pintado.

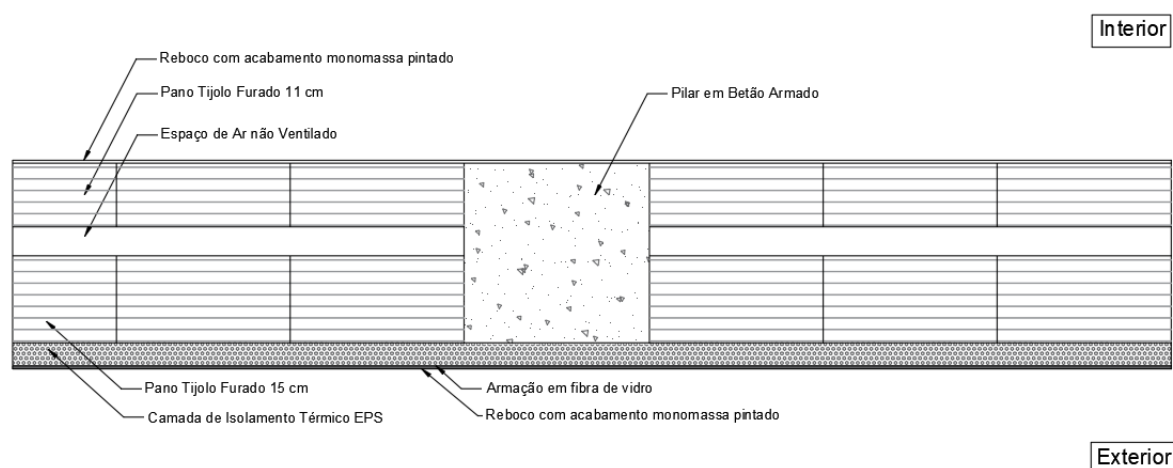


Figura 37 - Esquema construtivo horizontal da solução em ETICS com EPS

Na Tabela 6, podemos verificar a nova configuração da parede resultante da intervenção de reabilitação com este tipo de solução, em ETICS. Esta configuração permitiu reduzir em mais de metade das perdas anuais obtidas do sistema existente, obtendo um valor global perdas de energia de 125.537,897 kWh/ano. Nota que os valores associados à condutividade térmica dos tijolos é resultado de uma aproximação entre a relação da espessura do material com a sua resistência térmica.

Tabela 6 – Configuração e Desempenho Térmico da configuração da Solução 1

<i>Elementos da Parede de Fachada Existente</i>	<i>Espessura (m)</i>	<i>λ (W/m.°C)</i>
<i>Revestimento Exterior em reboco</i>	<i>0,02</i>	<i>1</i>
<i>Camada de Fibra de Vidro com ligante hidráulico</i>	<i>0,01</i>	<i>0,15</i>
<i>Camada de isolamento térmico para sistema ETICS em EPS</i>	<i>0,04</i>	<i>0,037</i>
<i>Pano de Tijolo Furado Exterior</i>	<i>0,15</i>	<i>0,38 *</i>
<i>Espaço de caixa de ar não ventilado</i>	<i>0,04</i>	<i>0,18</i>
<i>Pano de Tijolo Furado Interior</i>	<i>0,11</i>	<i>0,41 *</i>
<i>Revestimento Interior em reboco</i>	<i>0,02</i>	<i>1</i>

Para a componente ambiental, uma vez que se trata de uma obra de reabilitação, apenas se contabilizará as emissões associadas ao acréscimo e modificação da configuração da parede, sendo neste caso a medição da adição do sistema ETICS.

Sabe-se que todo o material necessário para a reabilitação consiste num grupo de materiais englobados fornecidos através do sistema ETICS, com camada de isolamento EPS de 4 cm. Sendo contabilizado como um todo, obtém-se uma quantia total de 122.640 kg para a sua instalação, correspondente a 12 kg/m².

Relativamente ao transporte do material, escolheu-se o camião rígido para a realização deste trabalho, sendo que do local da fábrica seria do Carregado, em Portugal, e a deslocação estimada pelo transporte até ao local da empreitada rondaria os 300 km de distância.

Por fim, na vertente financeira, com base num orçamento disponibilizado pelo *Gerador de Preços*, na Tabela 7 observa-se um mapa de trabalhos e quantidades geral estabelecido para esta empreitada, de maneira a dar a conhecer não só os processos associados à sua instalação, mas também os custos agregados dos mesmos, fornecendo assim um valor de custos global inicial para a sua colocação [65].

Tabela 7 - Mapa de Trabalhos e Quantidades da Solução 1

<i>Tarefas</i>	<i>Unidades</i>	<i>Quantidades</i>	<i>Custos Associados</i>
1. Montagem e Desmontagem do Estaleiro de obras no conjunto edificado	-	-	93.402,62 €
2. Preparação do paramento de suporte	m ²	10.220	396.944,80 €
3. Aplicação de Sistema ETICS	m ²	10.220	648.663,40 €
4. Limpeza geral da obra e locais adjacentes	-	-	57.773,92 €

No total, o investimento inicial requerido para a intervenção da fachada com a aplicação da solução 1 traduz-se num total de 1.196.784,74 €, um incremento de cerca de 77% face ao custo sugerido para a reabilitação da envolvente sem qualquer melhoria energética a incorporar.

Adicionalmente, conforme o *Gerador de Preços*, prevê-se um investimento em manutenção necessário para que exista a melhor otimização e preservação possível do sistema de 5.058,90 € para toda a envolvente com este sistema [65].

4.2.2.3. Solução 2 – Sistema VETTURE

A segunda sugestão de projeto é, sistema Vecture, constituída pela combinação de uma camada de isolamento térmico com revestimento exterior em ladrilho, apoiada por uma subestrutura de suporte, permitindo a sua instalação por via mecânica na envolvente estudada.

Trata-se de um tipo de solução bastante inovadora e pouco usual comparativamente às existentes no mercado português, sendo que esta permite culminar a melhoria energética e térmica do edifício, com a possibilidade de uma apresentação diversificada relativamente ao tipo de revestimento utilizado, assegurando que a sua escolha está de acordo com as necessidades do consumidor para o edifício.

Conforme ilustrado na Figura 38, este tipo de aplicação inclui a colocação de uma camada mista de 8 cm totais de isolamento térmico em EPS e de revestimento em ladrilho cerâmico, sendo estes painéis apoiados numa subestrutura de suporte, com um espaço de ar interior de 5 cm de espessura.

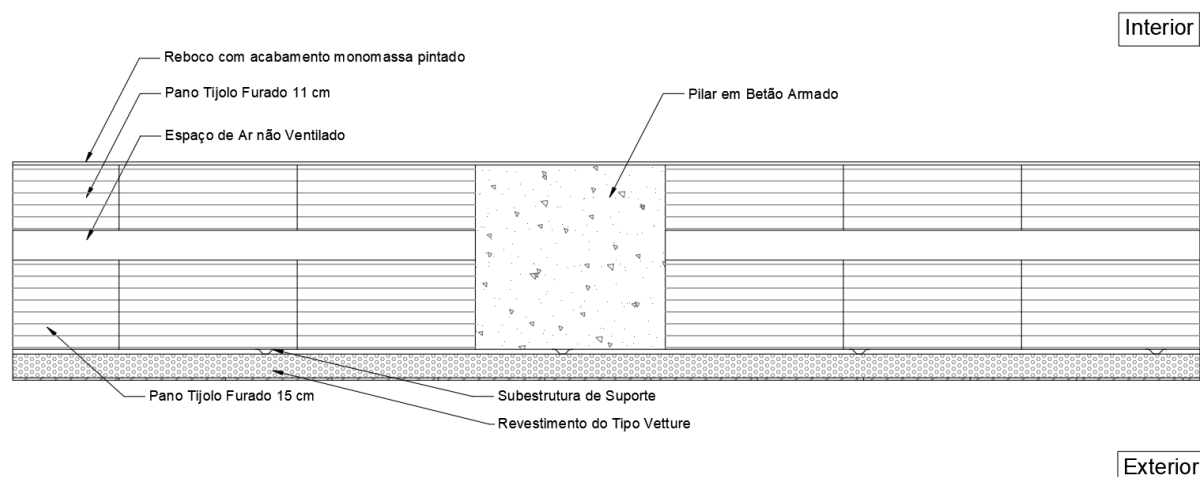


Figura 38 - Esquema construtivo horizontal da solução em sistema Vettore

Para a componente ambiental, subdividiu-se a contabilização das suas emissões carbónicas pelo conjunto de sistema subestrutura montante e pelo painel combinado com a camada de isolamento térmico, colada com o revestimento para a fachada. Assim, para os painéis em Vettore Kit com 8 cm de espessura serão necessários 214.620 kg de material para a sua instalação, obtendo uma quantia de cerca de 21 kg/m². Para a subestrutura de suporte, são contabilizados 23.506 kg do material, que por sua vez correspondem a 2,3 kg/m².

Relativamente ao transporte do material, escolheu-se o camião rígido e o navio cargueiro para o transporte do sistema Vettore e da subestrutura de suporte, respetivamente. Sendo contabilizados 2700 e 4000 km, estes são ainda provenientes da República Checa e Suécia, respetivamente.

A Tabela 8 representa a nova configuração da parede resultante desta intervenção de reabilitação, com este tipo de solução, em Vettore Kit, permitindo reduzir mais de $\frac{3}{4}$ das perdas anuais obtidas do sistema existente, obtendo um valor global de 81.422,1 kWh/ano. Nota que os valores associados à condutividade térmica dos tijolos é resultado de uma aproximação entre a relação da espessura do material com a sua resistência térmica.

Tabela 8 - Configuração e Desempenho Térmico da Solução 2

<i>Elementos da Parede de Fachada Existente</i>	<i>Espessura (m)</i>	<i>λ (W/m.°C)</i>
<i>Painel Sistema Vettore em EPS</i>	0,08	0,038
<i>Espaço de ar entre revestimento e subestrutura de suporte</i>	0,05	0,18
<i>Pano de Tijolo Furado Exterior</i>	0,15	0,38 *
<i>Espaço de caixa de ar não ventilado</i>	0,04	0,18
<i>Pano de Tijolo Furado Interior</i>	0,11	0,41 *
<i>Revestimento Interior em reboco</i>	0,02	1

Por fim, para a vertente financeira, com base num orçamento disponibilizado pelo *Gerador de Preços*, na Tabela 9 observa-se um mapa de trabalhos e quantidades geral da solução proposta, de maneira a dar

a conhecer não só os processos associados à sua instalação, mas também os custos agregados dos mesmos, fornecendo assim um valor de custos global inicial para a sua colocação [65].

Tabela 9 - Mapa de Trabalhos e Quantidades da Solução 2

<i>Tarefas</i>	<i>Unidades</i>	<i>Quantidades</i>	<i>Custos Associados</i>
<i>1. Montagem e Desmontagem do Estaleiro de obras no conjunto edificado</i>	-	-	93.402,62 €
<i>2. Fornecimento e Montagem do Sistema de Subestrutura de Suporte + Fixação de Painéis do Sistema Veture em EPS com 8 cm de espessura</i>	m ²	10.220	1.186.746,60 €
<i>3. Limpeza geral da obra e locais adjacentes</i>	-	-	57.773,92 €

No total, o investimento inicial requerido para a intervenção da fachada com a aplicação da solução 2 traduz-se num total de 1.337.922,94 €, um incremento de cerca de 98% face ao custo sugerido para a reabilitação da envolvente sem qualquer melhoria energética a incorporar, isto é, o dobro do investimento face ao restauro do existente.

Adicionalmente, conforme o *Gerador de Preços*, prevê-se um investimento em manutenção necessário para que exista a melhor otimização e preservação possível do sistema de 5.457,60 € para toda a envolvente com este sistema [65].

4.3. CASO DE ESTUDO: ESTRELA D'AVENIDA

4.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

O segundo edifício de estudo incide-se no conjunto edificado *Estrela d'Avenida*, Figura 39, situado em Rio Tinto, mais concretamente na Avenida Doutor Domingos Gonçalves de Sá, n.º 132. O edifício situa-se a 96 metros acima do nível do mar, num lugar com 1253 graus-dias de aquecimento, correspondentes à zona climática II. Trata-se de um conjunto de utilização habitacional, composto por dois grandes edifícios, Figura 40, denominados por edifício A e B, organizados em cinco blocos habitacionais distintos e cuja articulação exterior é efetuada por um logradouro central comum.



Figura 39 - Fotografia de um dos edifícios do conjunto *Estrela d'Avenida*



Figura 40 - Vista aérea do caso de estudo

O Edifício A, localizado a noroeste, é composto por 2 blocos, com um total de 11 pisos cada um, dos quais 8 são acima da cota do arruamento e cuja função é destinada para habitações, apresentando uma área de implantação correspondente a um total de 8.140 m², portanto, a uma área de 740 m² por cada piso existente.

O Edifício B, localizado a sudeste, é composto por 3 blocos, também com um total de 11 pisos e com funcionalidade para habitação, apresentando uma área de implantação corresponde a um total de 5.940 m², correspondendo a uma média de 540 m² por cada piso existente.

Assim, a área correspondente à construção total dos pavimentos do conjunto edificado satisfaz um valor de 14.080 m². Para além disso, a área de intervenção definida para este estudo contabiliza um total de 7.200 m², dividindo-se entre 4.000 m² e 3.200 m² pelos respetivos edifícios A e B.

4.3.2. SOLUÇÕES ESTUDADAS

4.3.2.1. Solução Existente

Uma vez que também o Edifício *Estrela d'Avenida* possui uma construção anterior face regulamentação atualmente em vigor no domínio da térmica de edifícios, é bastante importante conhecer e caracterizar detalhadamente os materiais e soluções construtivas atualmente aplicadas na região em que se pretende intervir. Esta caracterização assume-se fundamental tanto para as fases preliminares de avaliação e diagnóstico das patologias e defeitos existentes, como para o próprio processo de contextualização da intervenção de reabilitação (energética ou não) do conjunto.

Desta forma, sabe-se que este conjunto edificado possui uma estrutura portificada de pilares, vigas e lajes maciças em betão armado. A sua envolvente opaca, Figura 41, à semelhança do caso de estudo anterior, também é composta por paredes em alvenaria de tijolo de pano duplo, de espessuras 15 e 11 cm, respetivamente pelo exterior e interior do edifício. Apresenta um espaço de ar não ventilado com 4 cm de espessura no seu interior e é rebocada com acabamento monomassa pintado de 2 cm de espessura pelo seu interior. Esta distingue-se da envolvente dos edifícios *Pinhais da Foz* pelo seu revestimento exterior, sendo acabadas com um revestimento em ladrilho cerâmico de 1 cm de espessura.

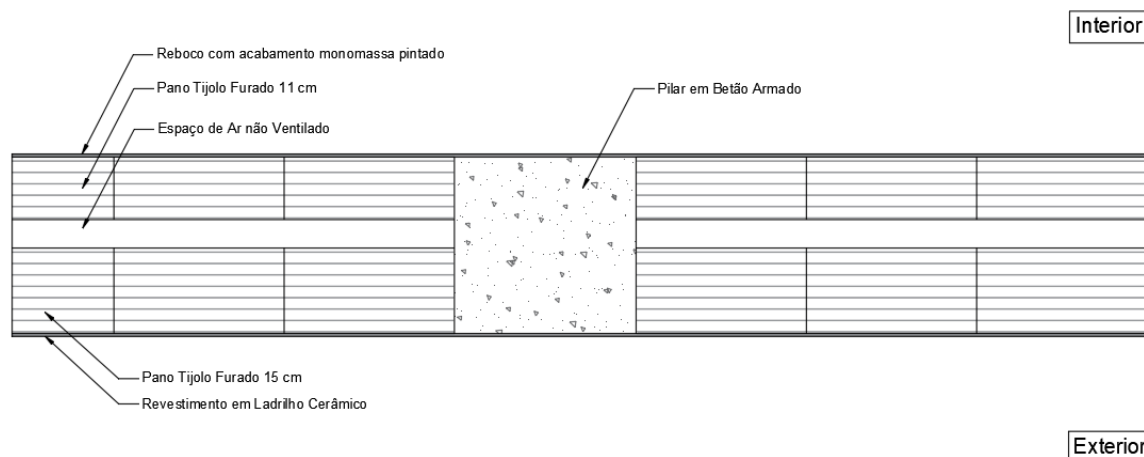


Figura 41 - Esquema construtivo da fachada existente no *Estrela d'Avenida*

Na Tabela 10 observa-se a configuração térmica das paredes, incluindo as espessuras de cada elemento, assim como os respetivos valores de condutibilidade térmica, que permitem calcular as correspondentes resistências térmicas. Estes resultados, juntando-lhe os valores de resistência térmica interna e externa,

permitem determinar o coeficiente de transmissão térmica do elemento (U) e, a partir daí, verificar o desempenho térmico da constituição estudada. Neste caso de estudo, a aplicação desta metodologia resulta num valor de perdas de energia globais de 183.180,65 kWh/ano. Nota que os valores associados à condutividade térmica dos tijolos é resultado de uma aproximação entre a relação da espessura do material com a sua resistência térmica.

Tabela 10 – Configuração e Desempenho Térmico da Solução Existente

<i>Elementos da Parede de Fachada Existente</i>	<i>Espessura (m)</i>	<i>λ (W/m.°C)</i>
<i>Revestimento Exterior em Ladrilho Cerâmico</i>	<i>0,01</i>	<i>1,3</i>
<i>Pano de Tijolo Furado Exterior</i>	<i>0,15</i>	<i>0,38 *</i>
<i>Espaço de caixa de ar não ventilado</i>	<i>0,04</i>	<i>0,18</i>
<i>Pano de Tijolo Furado Interior</i>	<i>0,11</i>	<i>0,41 *</i>
<i>Revestimento Interior em reboco</i>	<i>0,02</i>	<i>1</i>

Porém, a aplicação da metodologia proposta nesta dissertação pressupõe a existência de um cenário base de reabilitação sem foco na melhoria do desempenho térmico e energético, ou seja, apenas uma intervenção mínima de conservação e reabilitação de fachada. Assim, a Tabela 11 mostra um orçamento para este cenário, com base nos dados disponíveis no *Gerador de Preços*. Na tabela observa-se um mapa de trabalhos e quantidades geral que traduz os custos totais associados a cada fase a executar no processo desta reabilitação [65].

Tabela 11 - Mapa de Trabalhos e Quantidades para a reabilitação do sistema existente (cenário base)

<i>Tarefas</i>	<i>Unidades</i>	<i>Quantidades</i>	<i>Custos Associados</i>
<i>1. Montagem e Desmontagem do Estaleiro de obras no conjunto edificado</i>	-	-	<i>65.802,24 €</i>
<i>2. Limpeza a jato de água</i>	<i>m²</i>	<i>7.200</i>	<i>111.888 €</i>
<i>3. Remoção pontual do Ladrilho Cerâmico das Fachadas</i>	-	-	<i>31.176 €</i>
<i>4. Reparação de fissuras em alvenaria</i>	-	-	<i>288.000 €</i>
<i>5. Aplicação de novo Revestimento Cerâmico</i>	-	-	<i>335.700 €</i>
<i>6. Limpeza geral da obra e locais adjacentes</i>	-	-	<i>20.291,33 €</i>

No total, o investimento necessário para a reparação exterior da fachada sem qualquer melhoria térmica, preservando a estética originalmente exposta, traduz-se num total de 852.857,57€. Este valor está associado apenas ao investimento inicial da reabilitação, sendo que para este caso se exclui quaisquer investimentos relativos a manutenções futuras, visto tratar-se de uma solução base, que servirá apenas para caracterizar o existente e complementar a análise económica das soluções alternativas.

4.3.2.2. Solução 1 – Sistema ETICS com Cortiça

Relativamente às soluções de reabilitação energética a estudar, incluíram-se apenas sistemas cuja intervenção acontece pelo exterior da fachada, ou seja, com o intuito de efetuar uma melhoria energética face à situação existente através do aumento da resistência térmica do elemento conseguida pela introdução de novas camadas pelo lado exterior.

Assim, a primeira solução-tipo considerada é, um sistema de fachada em ETICS, constituído pela estrutura de suporte original do edifício, removendo apenas a camada de reboco localizada no exterior do edifício, para que, posteriormente, se pudesse instalar todo o sistema de isolamento térmico pelo exterior aplicado por colagem ou fixação mecânica.

Este sistema, comparativamente com o aplicado no caso anterior (ETICS em EPS), tem particularidade de apresentar uma camada de isolamento térmico em aglomerado de cortiça expandido, promovendo as emissões negativas de carbono associadas à origem do material aplicado. Trata-se de uma opção de reabilitação mais sustentável e amiga do ambiente, mantendo o desempenho e eficiência do ETICS normalmente utilizado, razões suficientes para futura avaliação.

Conforme ilustrado na Figura 42, este tipo de aplicação inclui a colocação de uma camada de 6 cm de isolamento térmico em aglomerado de cortiça, reforçada com uma armadura em fibra de vidro, seguida de uma camada de ligante e terminando com um acabamento em reboco monomassa pintado.

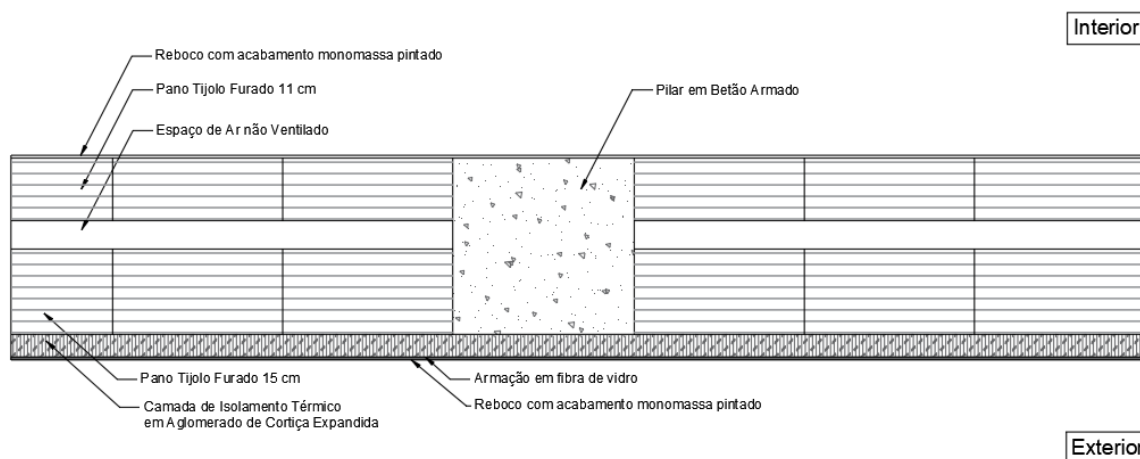


Figura 42 - Esquema construtivo horizontal da solução em ETICS com aglomerado de cortiça

Para a componente ambiental, uma vez que se trata de uma obra de reabilitação, apenas se contabilizará as emissões associadas ao acréscimo e modificação da configuração da parede, sendo neste caso a medição da adição do sistema ETICS.

Sabe-se que todo material necessário para a reabilitação consiste num só grupo de materiais englobados fornecidos através do sistema ETICS, com camada de isolamento em cortiça de 6 cm. Sendo contabilizado como um todo, obtém-se uma quantia total de 43.560 kg para a sua instalação, correspondente a cerca de 6 kg/m².

Relativamente ao transporte do material, escolheu-se o camião rígido para a realização deste trabalho, sendo que do local da fábrica seria do Carregado, em Portugal, e a deslocação estimada pelo transporte até ao local da empreitada rondaria os 300 km de distância.

Na Tabela 12, podemos verificar a nova configuração da parede resultante desta intervenção de reabilitação, com este tipo de solução, em ETICS. Esta configuração permitiu reduzir em mais de metade das

perdas anuais obtidas do sistema existente, obtendo um valor global de 79.500,76 kWh/ano. Nota que os valores associados à condutividade térmica dos tijolos é resultado de uma aproximação entre a relação da espessura do material com a sua resistência térmica.

Tabela 12 - Configuração Térmica da Solução em ETICS com Aglomerado de Cortiça

<i>Elementos da Parede de Fachada Existente</i>	<i>Espessura (m)</i>	<i>λ (W/m.°C)</i>
<i>Revestimento Exterior em reboco</i>	<i>0,02</i>	<i>1</i>
<i>Camada de Fibra de Vidro com ligante hidráulico</i>	<i>0,01</i>	<i>0,15</i>
<i>Camada de isolamento térmico para sistema ETICS em Aglomerado de Cortiça</i>	<i>0,06</i>	<i>0,037</i>
<i>Pano de Tijolo Furado Exterior</i>	<i>0,15</i>	<i>0,38 *</i>
<i>Espaço de caixa de ar não ventilado</i>	<i>0,04</i>	<i>0,18</i>
<i>Pano de Tijolo Furado Interior</i>	<i>0,11</i>	<i>0,41 *</i>
<i>Revestimento Interior em reboco</i>	<i>0,02</i>	<i>1</i>

Por fim, para a vertente financeira, com base num orçamento disponibilizado pelo *Gerador de Preços*, na Tabela 13 observa-se um mapa de trabalhos e quantidades geral da solução proposta, de maneira a dar a conhecer não só os processos associados à sua instalação, mas também os custos agregados dos mesmos, fornecendo assim um valor de custos global inicial para a sua colocação [65].

Tabela 13 - Mapa de Trabalhos e Quantidades Geral da instalação do Sistema ETICS em Cortiça

<i>Tarefas</i>	<i>Unidades</i>	<i>Quantidades</i>	<i>Custos Associados</i>
<i>1. Montagem e Desmontagem do Estaleiro de obras no conjunto edificado</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>65.802,24 €</i>
<i>2. Remoção do Ladrilho Cerâmico das Fachadas</i>	<i>m²</i>	<i>7.200</i>	<i>57.960 €</i>
<i>3. Preparação do paramento de suporte</i>	<i>m²</i>	<i>7.200</i>	<i>279.648 €</i>
<i>4. Fornecimento e aplicação do sistema ETICS em cortiça</i>	<i>m²</i>	<i>7.200</i>	<i>617.688 €</i>
<i>5. Limpeza geral da obra e locais adjacentes</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>20.291,33 €</i>

No total, o investimento inicial requerido para a intervenção da fachada com a aplicação da solução 1 traduz-se num total de 1.041.389,57 €, um incremento de cerca de 22% face ao custo sugerido para a reabilitação da envolvente sem qualquer melhoria energética a incorporar, apesar de se trata de um sistema menos complexo relativamente à sua instalação quando comparado com o restauro da tipologia existente.

Adicionalmente, conforme o *Gerador de Preços*, prevê-se um investimento em manutenção necessário para que exista a melhor otimização e preservação possível do sistema de 4.816,80 € para toda a envolvente com este sistema [65].

4.3.2.3. Solução 2 – Sistema Fachada Ventilada

A segunda sugestão de projeto é, em Fachada Ventilada, constituída pela incorporação por um revestimento exterior em painéis madeira-cimento, apoiadas por uma subestrutura de suporte, permitindo a sua instalação por via mecânica na envolvente estudada. Para além disso, esta apresenta o incremento da camada de isolamento térmico, com a introdução de lã mineral entre a subestrutura de suporte e o pano em alvenaria existente.

Esta solução, embora tecnicamente mais exigente no processo de instalação e convencionalmente mais cara que as restantes, oferece elevados benefícios a médio e longo prazo, nomeadamente pela sua durabilidade, elevada resistência à humidade e excelente desempenho térmico e acústico. A inclusão de um espaço de ar ventilado permite a melhoria da ventilação natural da fachada, contribuindo para a redução dos ganhos térmicos no verão e minimizando a condensação intersticial.

O sistema proposto, conforme a Figura 43, inclui a fixação de 5 cm de lã mineral como isolamento térmico entre placas de madeira OSB, suportado por uma subestrutura metálica, seguida de um espaço de ar ventilado de 5 cm e um revestimento final em painéis de madeira-cimento com 12 mm de espessura.

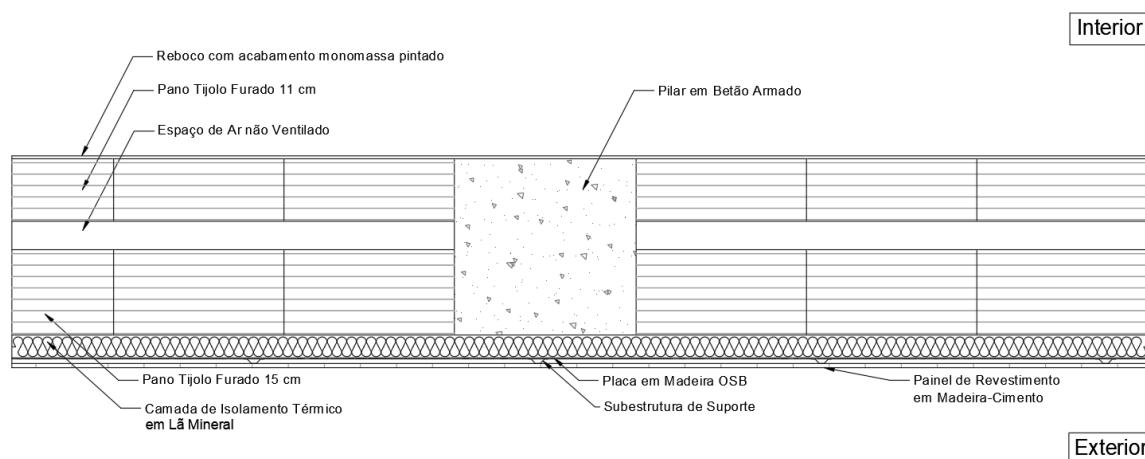


Figura 43 - Esquema construtivo horizontal da solução em sistema Fachada Ventilada

Para a componente ambiental, a análise considerou o fornecimento a partir da seguinte subdivisão: camada de isolamento, placas de madeira OSB, subestrutura montante e o revestimento em madeira-cimento. A lã mineral de 5 cm de espessura, com baixa condutibilidade térmica e propriedades acústicas superiores, foi contabilizada em 43.560 kg para a aplicação em toda a superfície da envolvente, correspondendo aproximadamente a 0.15 kg/m², enquanto as placas de madeira em OSB que protegem a camada isolante contabilizam um total de 107.136 kg. Relativamente à subestrutura montante, esta representa um valor de 16.560 kg totais, enquanto os painéis de madeira-cimento totalizaram cerca de 116.640 kg, resultando numa média de 16 kg/m².

O transporte dos materiais foi estimado com recurso a camião rígido para o isolamento térmico, placas de madeira OSB e o revestimento da envolvente, partindo respetivamente de Vila das Aves, Aveiro e Setúbal, estimando percursos entre 40 e 350 km de distância até à obra. Por outro lado, o transporte escolhido para a subestrutura montante foi o navio cargueiro, proveniente da Suécia, e estima-se que a sua deslocação seja de 4000 km.

A Tabela 14 apresenta a nova configuração da nova parede exterior resultante da implementação do sistema ventilado, permitindo uma redução significativa das perdas anuais obtidas do sistema base,

atingindo um valor global de perdas de energia de 79.879,32 kWh/ano. Nota que os valores associados à condutividade térmica dos tijolos é resultado de uma aproximação entre a relação da espessura do material com a sua resistência térmica.

Tabela 14 - Configuração e Desempenho Térmico da Fachada Ventilada

<i>Elementos da Parede de Fachada Existente</i>	<i>Espessura (m)</i>	<i>λ (W/m.°C)</i>
<i>Revestimento Exterior em painéis Madeira-Cimento</i>	<i>0,012</i>	<i>0,22</i>
<i>Espaço de caixa de ar entre revestimento e isolamento térmico</i>	<i>0,05</i>	<i>0,18</i>
<i>Camada de isolamento térmico em Lã Mineral de 5 cm de espessura</i>	<i>0,05</i>	<i>0,034</i>
<i>Pano de Tijolo Furado Exterior</i>	<i>0,15</i>	<i>0,38 *</i>
<i>Espaço de caixa de ar não ventilado</i>	<i>0,04</i>	<i>0,18</i>
<i>Pano de Tijolo Furado Interior</i>	<i>0,11</i>	<i>0,41 *</i>
<i>Revestimento Interior em reboco</i>	<i>0,02</i>	<i>1</i>

Por fim, na vertente financeira, com base num orçamento disponibilizado pelo *Gerador de Preços*, na Tabela 15 observa-se um mapa de trabalhos e quantidades geral da solução proposta, de maneira a dar a conhecer não só os processos associados à sua instalação, mas também os custos agregados dos mesmos, fornecendo assim um valor de custos global inicial para a sua colocação [65].

Tabela 15 - Mapa de Trabalhos e Quantidades Geral da instalação da Fachada Ventilada

<i>Tarefas</i>	<i>Unidades</i>	<i>Quantidades</i>	<i>Custos Associados</i>
<i>1. Montagem e Desmontagem do Estaleiro de obras no conjunto edificado</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>65.802,24 €</i>
<i>2. Remoção do Ladrilho Cerâmico das Fachadas</i>	<i>m²</i>	<i>7.200</i>	<i>57.960 €</i>
<i>3. Fornecimento e Aplicação de Isolamento Térmico em Lã Mineral de 5 cm</i>	<i>m²</i>	<i>7.200</i>	<i>140.040 €</i>
<i>4. Fornecimento e Montagem do Sistema de Subestrutura de Suporte + Fixação de Painéis Madeira-Cimento de 12 mm de espessura</i>	<i>m²</i>	<i>7.200</i>	<i>635.184 €</i>
<i>5. Limpeza geral da obra e locais adjacentes</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>20.291,33 €</i>

No total, o investimento inicial requerido para a intervenção da fachada com a aplicação da solução 1 traduz-se num total de 919.277,57 €, abaixo do valor de investimento da primeira solução, contando com um incremento de cerca de 8 % face ao custo sugerido para a reabilitação da envolvente sem qualquer melhoria energética a incorporar, apesar de se tratar de um sistema menos complexo relativamente à sua instalação quando comparado com o restauro da tipologia existente.

Adicionalmente, conforme o *Gerador de Preços*, prevê-se um investimento em manutenção necessário para que exista a melhor otimização e preservação possível do sistema de 7.120,80 € para toda a envolvente com este sistema [65].

5

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. ENQUADRAMENTO

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos com a ferramenta de cálculo desenvolvida, que pretende avaliar diversos parâmetros ambientais, económicos e técnicos de diferentes alternativas de reabilitação da envolvente de edifícios.

Desta forma, os subcapítulos seguintes estão organizados dividindo a avaliação de cada tipo de solução estudada para o respetivo caso de estudo, analisando o desempenho e verificando a sua viabilidade financeira, ambiental e regulamentar.

No final, apresenta-se um subcapítulo final que disponibiliza todos os resultados das propostas de intervenções em cada caso de estudo, propiciando uma comparação das possíveis intervenções.

5.2. RESULTADOS DAS SOLUÇÕES PARA O CASO *PINHAIS DA FOZ*

5.2.1. SOLUÇÃO 1 – SISTEMA ETICS COM EPS

Com a proposta da solução 1 para o caso de estudo *Pinhais da Foz*, foi possível perceber, que na sua generalidade, trata-se de uma solução bastante interessante considerando cada um dos diferentes parâmetros em análise. O sistema ETICS com camada de isolamento em EPS traduz-se numa melhoria do desempenho térmico e energético do edifício. Relativamente ao conforto térmico transmitido ao edificado, anteriormente visualizada na apresentação do valor de perdas de energia anuais para elementos opacos do edifício.

O valor do coeficiente de transmissão térmica, $U = 0,45 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, confirma a melhoria energética na envolvente do edifício, uma vez que esta solução apresenta um valor bastante inferior comparativamente ao do sistema base [$0,91 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$], consequente da introdução da camada de isolamento térmico pelo exterior.

Para além disso, uma vez que o valor de coeficiente de transmissão térmica é inferior ao valor máximo regulamentar, isto é, abaixo de $0,5 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, então, confirmamos que a proposta de solução 1 cumpre com o regulamento atualmente em vigor.

Para a componente ambiental, a Tabela 16 e a Tabela 17 mostram as contabilizações referentes às emissões carbónicas para as fases de produção (A1-A3) e transporte (A4) da solução, evidenciando as respetivas avaliações do ciclo de vida do sistema construtivo proposto. São ainda apresentadas, as quantidades globais do sistema construtivo proposto.

Tabela 16 - Avaliação do Ciclo de Vida total do Sistema ETICS em EPS

<i>Material Utilizado</i>	<i>Quantidade de Material (kg)</i>	<i>Fase de Produção A1-A3 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>Fase de Transportação A4 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>LCA A1-A4 (Kg.CO₂eq.)</i>
<i>Sistema ETICS em EPS</i>	122.640	88.914	21.436,49	110.350,49

Tabela 17 - Avaliação do Ciclo de Vida do Sistema ETICS em EPS por m²

<i>Material Utilizado</i>	<i>Quantidade de Material (kg)</i>	<i>Fase de Produção A1-A3 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>Fase de Transportação A4 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>LCA A1-A4 (Kg.CO₂eq.)</i>
<i>Sistema ETICS em EPS</i>	12	4,179	1,008	5,187

Com base nos valores obtidos com a avaliação do seu ciclo de vida e utilizando os valores das licenças de emissões carbónicas estabelecidas para a União Europeia, é possível perceber que este tipo de intervenção, face às suas emissões produzidas nas fases descritas, atingiria um valor total de 7.172,78 €, correspondente a cerca de 0,34 €/m² de área construída do edificado.

Relativamente à componente financeira, com base nos valores apresentados anteriormente e conforme se pode observar na Figura 44, verificamos que para um período de análise de 25 anos, a solução proposta tem um custo de ciclo de vida global de 1.942.573,85 €, superior ao custo total associado a uma intervenção mínima, ou seja, a recuperação do sistema existente, 1.912.445,94 €. Em síntese a solução 1 tem uma diferença de 30.127,92 € face à alternativa base.



Figura 44 - Avaliação do Custo de Vida do Sistema ETICS em EPS, comparado com o restauro do existente

Por fim, ainda na análise financeira da solução 1, pode-se verificar que o rácio Poupança-Investimento aponta para valores pouco interessantes em termos de investimento, uma vez que esta relação não ultrapassa o valor unitário, obtendo-se um resultado de 0,942. Para além disso, a escolha deste sistema necessita de um período de retorno de 23 anos (Figura 45).

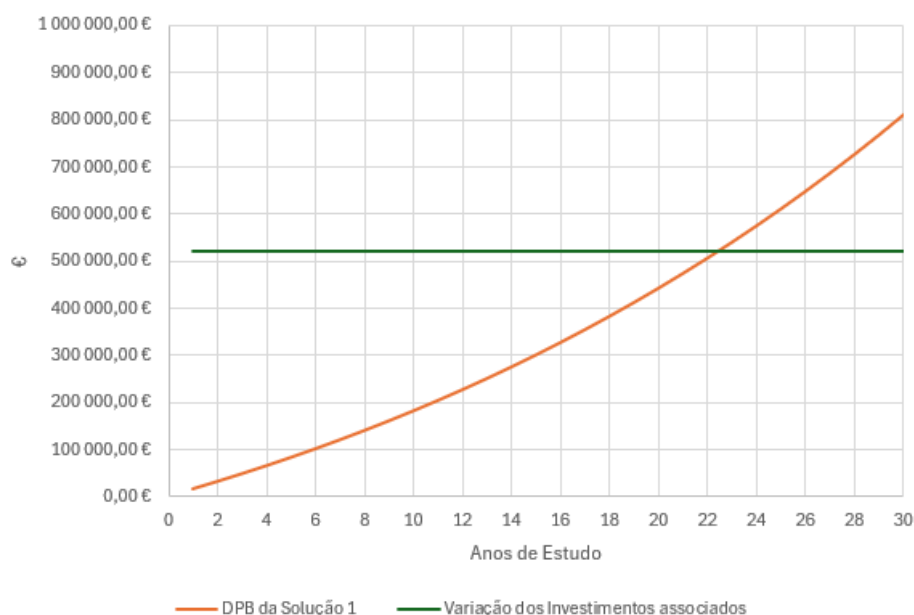


Figura 45 - Tempo mínimo necessário até que o Sistema ETICS com EPS atinja o retorno do investimento inicial

5.2.2. SOLUÇÃO 2 – SISTEMA VETURE

Para a segunda proposta de intervenção, é também notório o bom desempenho do sistema Vetur e nos fatores estabelecidos, traduzindo uma melhoria significativa do desempenho térmico e energético do edifício. O valor do coeficiente de transmissão térmica, $U = 0,29 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, confirma a melhoria energética na envolvente do edifício, uma vez que sistema apresenta um valor bastante inferior comparativamente com a solução base [$0,91 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$], consequente da introdução da camada de isolamento térmico colada com o revestimento exterior.

Para além disso, uma vez que o valor de coeficiente de transmissão térmica é inferior ao valor máximo regulamentar, isto é, abaixo de $0,5 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, então, confirma-se que a segunda sugestão de intervenção cumpre com o regulamento atualmente em vigor.

Para a componente ambiental, a Tabela 18 e a Tabela 19 mostram as quantificações de emissões carbónicas para as fases de produção (A1-A3) e transporte (A4) da solução, evidenciando as respetivas avaliações do ciclo de vida do sistema construtivo proposto. São ainda apresentadas as quantidades globais do sistema construtivo proposto.

Tabela 18 - Avaliação do Ciclo de Vida total do Sistema em Vetur e

<i>Material Utilizado</i>	<i>Quantidade de Material (kg)</i>	<i>Fase de Produção A1-A3 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>Fase de Transportação A4 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>LCA A1-A4 (Kg.CO₂eq.)</i>
<i>Painel do Tipo Vetur e</i>	214.620	93.727,62	337.624,7	431.352,32
<i>Sistema Subestrutura de Suporte</i>	23.506	59.991,40	1825,15	61.816,55

Tabela 19 - Avaliação do Ciclo de Vida do Sistema em Vetre por m²

<i>Material Utilizado</i>	<i>Quantidade de Material (kg)</i>	<i>Fase de Produção A1-A3 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>Fase de Transportação A4 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>LCA A1-A4 (Kg.CO₂eq.)</i>
<i>Painel do Tipo Vetre</i>	21	4,406	15,870	20,275
<i>Sistema Subestrutura de Suporte</i>	2,3	2,820	0,086	2,906

Desta forma, a solução 2 conta com uma contabilização global de emissões igual a 493.168,90 kg.CO₂eq., correspondendo a uma quantia de 23,181 kg.CO₂eq./m².

Com base nos valores obtidos com a avaliação do seu ciclo de vida e utilizando os valores das licenças de emissões carbónicas estabelecidas para a União Europeia, é possível perceber que este tipo de intervenção, face às suas emissões produzidas, atingiria um valor total de 32.055,98 €, correspondente a cerca de 1,51 €/m² de área construída do edificado.

Relativamente à componente financeira, com base em valores apresentados anteriormente e através da Figura 46, verificamos que para um período de análise de 25 anos, a solução proposta tem um custo de ciclo de vida global de 1.882.561,08 €, inferior ao custo total associado a uma intervenção mínima, ou seja, a recuperação do existente sem qualquer melhoria energética, 1.912.445,94 €. Em síntese a solução 2 tem uma diferença de 29.884,86 € face à alternativa base.

Por fim, ainda na análise financeira da Fachada Vetre, pode-se verificar que o rácio Poupança-Investimento aponta para valores viáveis, uma que o seu resultado ultrapassa o valor unitário (1,045). No entanto, a escolha deste sistema necessita de um período de retorno de 17 anos (Figura 47).

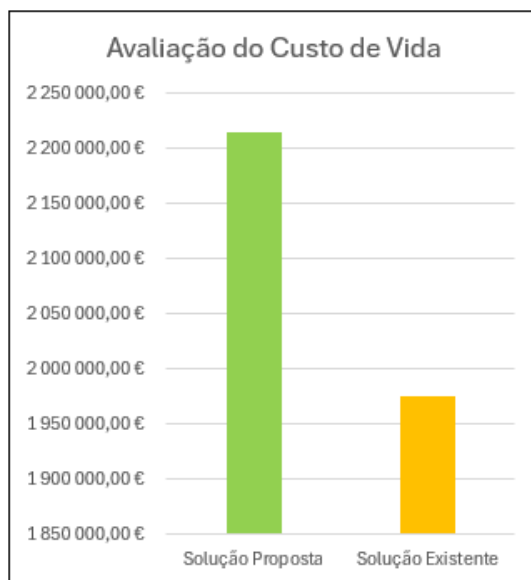


Figura 46 - Avaliação do Custo de Vida do Sistema Vetre, comparado com o restauro do existente

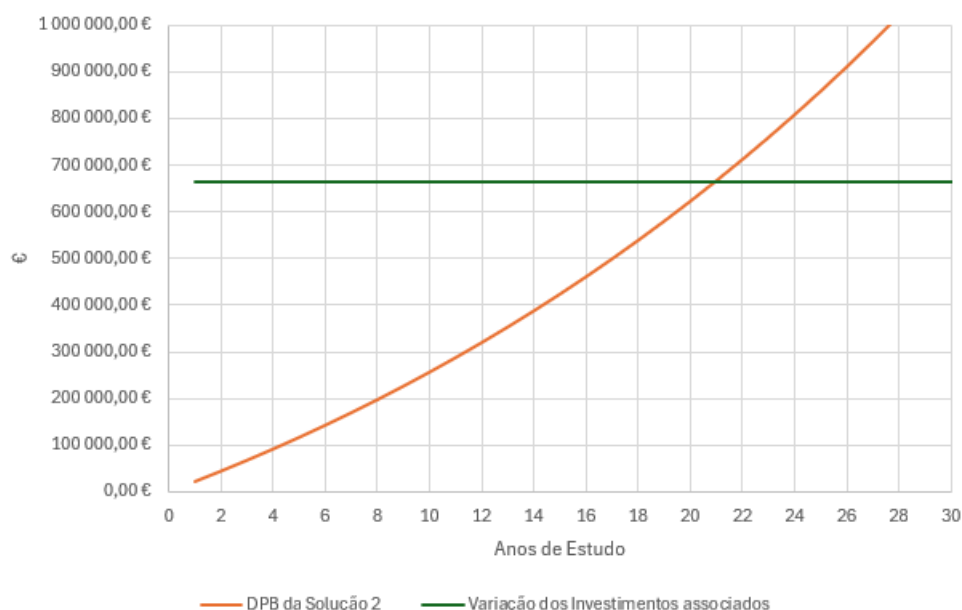


Figura 47 - Tempo mínimo necessário até que o Sistema do Tipo Vetur atinja o retorno do investimento inicial

5.3. RESULTADOS DAS SOLUÇÕES PARA O CASO ESTRELA D'AVENIDA

5.3.1. SOLUÇÃO 1 - SISTEMA ETICS COM CORTIÇA

Com a proposta da primeira solução para o caso de estudo *Estrela d'Avenida*, foi possível perceber que se trata de uma solução bastante interessante considerando cada um dos diferentes parâmetros em análise. O sistema ETICS com camada de isolamento em aglomerado de cortiça expandida traduz-se a uma melhoria significativa relativamente ao conforto térmico transmitido ao edificado.

O valor do coeficiente de transmissão térmica, $0,40 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, confirma a melhoria energética na envolvente do edifício, uma vez que este valor é inferior comparativamente ao mesmo obtido para o cenário base [$0,92 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$], consequente da introdução da camada de isolamento térmico pelo exterior.

Para além disso, uma vez que o valor de coeficiente de transmissão térmica é inferior ao valor máximo regulamentar, isto é, abaixo de $0,5 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, confirma-se que a primeira sugestão de intervenção cumpre com o regulamento atualmente em vigor.

Para a componente ambiental, a Tabela 20 e a Tabela 21 mostram as quantificações das emissões carbónicas referentes às fases de produção (A1-A3) e transporte (A4) da solução, que contabiliza um total de $3.214,38 \text{ kg.CO}_2\text{eq.}$ para a sua avaliação do ciclo de vida, dando uma média de $0,228 \text{ kg.CO}_2\text{eq./m}^2$.

Tabela 20 - Avaliação do Ciclo de Vida total do Sistema ETICS em Aglomerado de Cortiça Expandida

Material Utilizado	Quantidade de Material (kg)	Fase de Produção A1-A3 (Kg.CO ₂ eq.)	Fase de Transportação A4 (Kg.CO ₂ eq.)	LCA A1-A4 (Kg.CO ₂ eq.)
Sistema ETICS em Aglomerado de Cortiça Expandida	43.560	-4.399,56	7.613,94	3.214,38

Tabela 21 - Avaliação do Ciclo de Vida do Sistema ETICS em Aglomerado de Cortiça Expandida por m²

<i>Material Utilizado</i>	<i>Quantidade de Material (kg)</i>	<i>Fase de Produção A1-A3 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>Fase de Transportação A4 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>LCA A1-A4 (Kg.CO₂eq.)</i>
<i>Sistema ETICS em Aglomerado de Cortiça Expandida</i>	6,05	-0,312	0,541	0,228

Com base nos valores obtidos com a avaliação do seu ciclo de vida e utilizando os valores das licenças de emissões carbónicas estabelecidas para a União Europeia, é possível perceber que este tipo de intervenção, face às suas emissões produzidas, atingiria um valor total de 208,93 €, correspondente a cerca de 0,01 €/m² de área construída do edifício.

Relativamente à componente financeira, com base em valores apresentados anteriormente e através da Figura 48, verificamos que para um período de análise de 25 anos, a solução proposta tem um custo de ciclo de vida global de 1.558.841,94 €, inferior ao custo total associado a uma intervenção mínima, ou seja, a recuperação do existente sem qualquer melhoria energética, 1.708.576,16 €. Em síntese a solução 1 tem uma diferença de 149.734,23 € face à alternativa base.

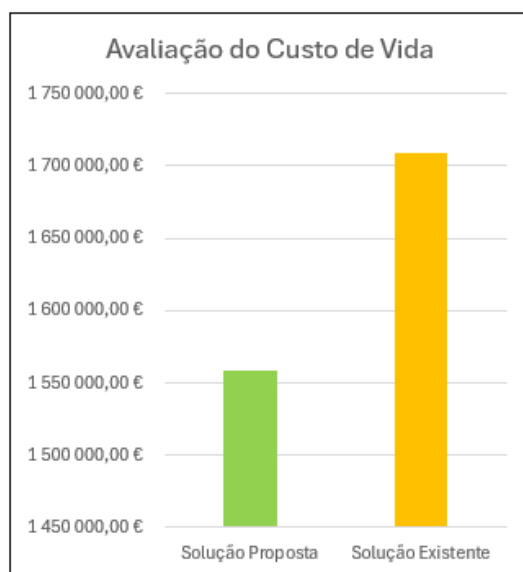


Figura 48 - Avaliação do Custo de Vida do Sistema ETICS com Cortiça, comparado com o restauro do existente

Por fim, ainda na análise financeira da fachada ETICS, pode-se verificar que esta solução atinge valores viáveis no que diz respeito ao seu rácio Poupança-Investimento, uma vez que este resultado ultrapassa o valor unitário (1,698). Para além disso, a escolha deste sistema permitirá, para o mesmo período, atingir cerca de 1% de retorno associados à poupança do investimento do projeto, necessitando de um período de retorno de 15 anos (Figura 49).

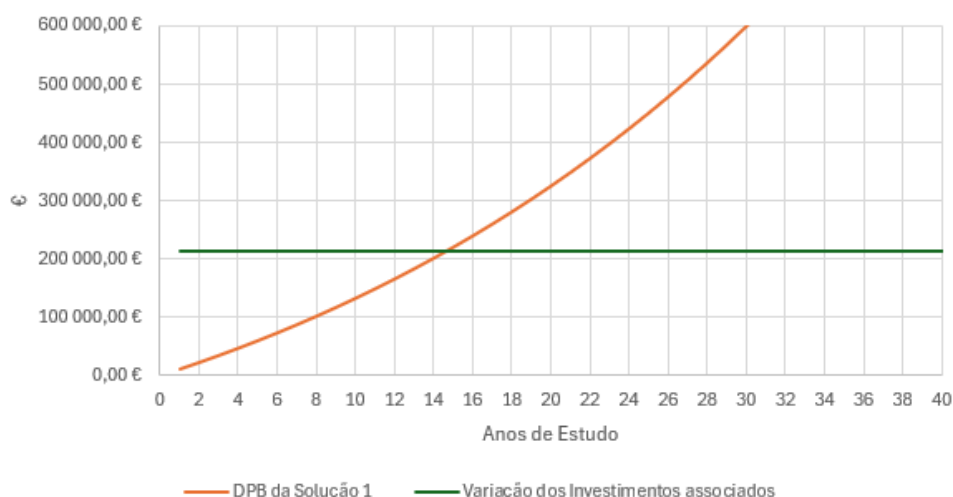


Figura 49 - Tempo mínimo necessário até que o Sistema ETICS com cortiça atinja o retorno inicial

5.3.2. SOLUÇÃO 2 - SISTEMA FACHADA VENTILADA

Para a segunda proposta de intervenção, é também notório o bom desempenho da Fachada Ventilada nos fatores estabelecidos, traduzindo uma melhoria significativa do desempenho térmico e energético do edifício. O valor do coeficiente de transmissão térmica, $0,40 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, confirma a melhoria energética na envolvente do edifício, uma vez que este valor é inferior comparativamente ao mesmo obtido para o cenário base [$0,92 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$], consequente da introdução da camada de isolamento térmico pelo exterior.

Para além disso, uma vez que o valor de coeficiente de transmissão térmica é inferior ao valor máximo regulamentar, isto é, abaixo de $0,5 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, confirma-se que a segunda sugestão de intervenção cumpre com o regulamento atualmente em vigor.

Para a componente ambiental, a Tabela 22 e a Tabela 23 mostram as quantificações das emissões carbónicas para as fases de produção (A1-A3) e transporte (A4) da solução, evidenciando as respetivas avaliações do ciclo de vida do sistema construtivo proposto. São ainda apresentadas as quantidades globais do sistema construtivo proposto.

Tabela 22 - Avaliação do Ciclo de Vida total do Sistema Fachada Ventilada

<i>Material Utilizado</i>	<i>Quantidade de Material (kg)</i>	<i>Fase de Produção A1-A3 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>Fase de Transportação A4 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>LCA A1-A4 (Kg.CO₂eq.)</i>
<i>Camada de Isolamento Térmico em Lã Mineral</i>	<i>43.200</i>	<i>2.520</i>	<i>1.006,8</i>	<i>3.526,8</i>
<i>Painel OSB</i>	<i>107.136</i>	<i>-156.672</i>	<i>6.242,17</i>	<i>-150.430</i>
<i>Sistema Subestrutura de Suporte</i>	<i>16.560</i>	<i>42.264</i>	<i>1.285,82</i>	<i>43.549,82</i>
<i>CBP – Painel em Madeira-Cimento</i>	<i>116.640</i>	<i>76.032</i>	<i>23.785,7</i>	<i>99.817,7</i>

Tabela 23 - Avaliação do Ciclo de Vida do Sistema Fachada Ventilada por m²

<i>Material Utilizado</i>	<i>Quantidade de Material (kg)</i>	<i>Fase de Produção A1-A3 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>Fase de Transportação A4 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>LCA A1-A4 (Kg.CO₂eq.)</i>
<i>Camada de Isolamento Térmico em Lã Mineral</i>	3,068	0,179	0,072	0,250
<i>Painel OSB</i>	7,609	-11,127	0,443	-10,684
<i>Sistema Subestrutura de Suporte</i>	1,176	3,001	0,091	3,093
<i>CBP – Painel em Madeira-Cimento</i>	8,284	5,4	1,689	7,089

Desta forma, a Fachada Ventilada contabiliza um total de -3.496,34 kg.CO₂eq., correspondente a uma média de -0,248 kg.CO₂eq./m².

Com base nos valores obtidos com a avaliação do seu ciclo de vida e utilizando os valores das licenças de emissões carbónicas estabelecidas para a União Europeia, é possível perceber que este tipo de intervenção, face às suas emissões produzidas, beneficia da isenção de taxas ambientais, uma vez que obtém uma redução de custos de 227,26 €, correspondente a cerca de 0,02 €/m² de área construída do edificado.

Relativamente à componente financeira, com base em valores apresentados anteriormente e através da Figura 50, verificamos que para um período de análise de 25 anos, a solução proposta tem um custo de ciclo de vida global de 1.502.991,92 €, inferior ao custo total associado a uma recuperação do existente sem qualquer melhoria energética, 1.708.576,16 €. Em síntese a solução 2 tem uma diferença de 205.584,24 € face à alternativa base.

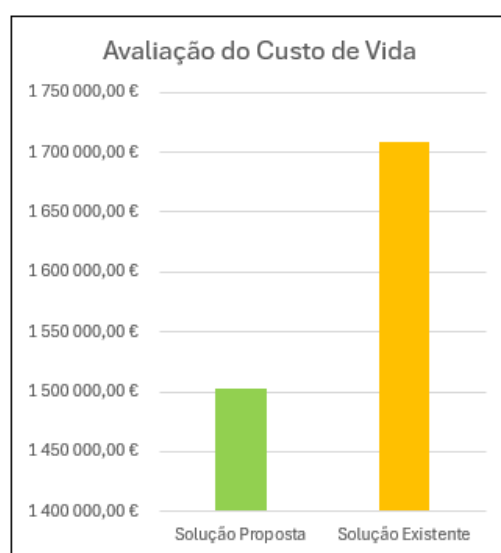


Figura 50 - Avaliação do Custo de Vida da Fachada Ventilada, comparado com o restauro do existente

Por fim, ainda na análise financeira da Fachada Ventilada, pode-se verificar que esta intervenção atinge valores viáveis no que diz respeito ao rácio Poupança-Investimento, uma vez que o seu resultado ultrapassa o valor unitário (3,229). Para além disso, a escolha deste sistema permitirá, para o mesmo período, uma

poupança de 4% face ao investimento do projeto, sendo necessário um período de retorno de 9 anos (Figura 51).

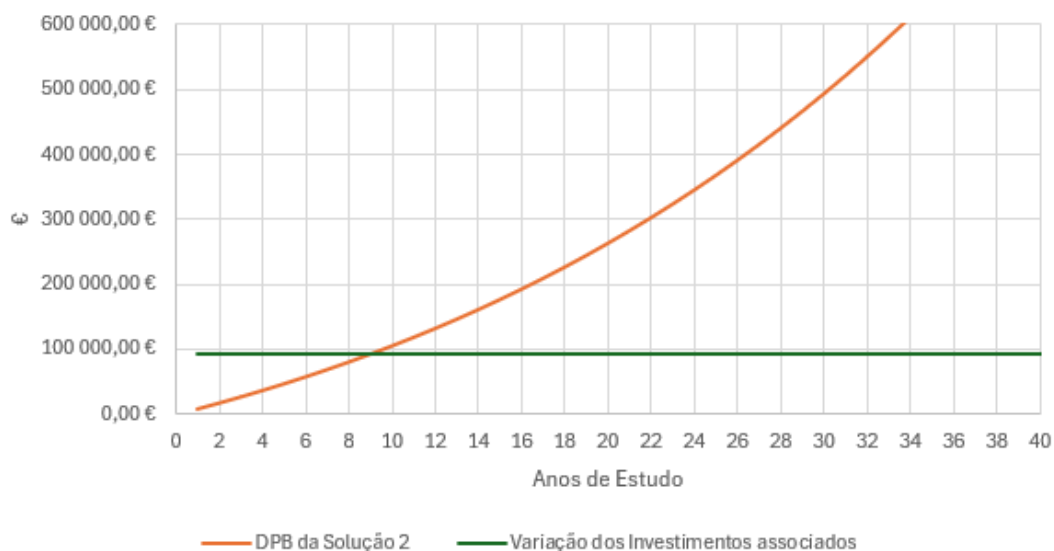


Figura 51 - Tempo mínimo necessário até que a Fachada Ventilada atinja o retorno do investimento inicial

5.4. RESUMO DE RESULTADOS

5.4.1. AVALIAÇÃO DO CASO DE ESTUDO – PINHAIS DA FOZ

Com base nas avaliações individuais de cada uma das alternativas de intervenção para o conjunto *Pinhais da Foz*, discute-se neste a sua viabilidade, de forma a perceber qual garante o melhor desempenho de forma mais sustentável.

Para a componente técnica foi confirmado que ambas as soluções analisadas cumprem o regulamento atualmente em vigor e garantem uma melhoria significativa face à situação existente. Conforme se pode observar na Tabela 24, os valores dos coeficientes de transmissão térmica (U) diferem entre si, em resultado dos elementos que constituem cada um dos sistemas. A solução 2, correspondente ao sistema do tipo Vature, apresenta o melhor desempenho térmico energético com um valor de $U = 0,29 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, inferior ao valor apresentado pela solução em ETICS [$U = 0,40 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$]. Esta diferença deve-se principalmente à maior espessura de isolamento térmico incorporada na segunda solução (Vature). Este resultado reflete-se nas perdas anuais de energia, onde a solução do tipo em Vature apresenta uma redução de cerca de 44.116 kWh/ano face à primeira alternativa, tornando-se no sistema mais eficiente energeticamente entre os dois.

Tabela 24 - Avaliação técnica das propostas de intervenção para o conjunto *Pinhais da Foz*

	Solução 1 Sistema ETICS em EPS	Solução 2 Sistema do tipo Vature	Diferença entre Soluções
$U \text{ (W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$	0,40	0,29	0,19
$Q_{ext} \text{ (kWh/ano)}$	125.537,897	81.422,1	44.115,797

Relativamente à componente ambiental, a Tabela 25 permite concluir que a solução em ETICS apresenta um menor impacto ambiental nas fases de produção e transporte da sua avaliação do ciclo de vida (A1-A4). Este conjunto regista emissões totais a rondar os 11.350 kg.CO₂eq., valor significativamente inferior ao obtido pela solução 2 (493.168,9 kg.CO₂eq.), apresentando uma diferença global de aproximadamente 0,383 toneladas de CO₂eq.

Tabela 25 - Avaliação Ambiental total das propostas de intervenção para o conjunto *Pinhais da Foz*

	<i>Fase de Produção A1-A3 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>Fase de Transportação A4 (Kg.CO₂eq.)</i>	<i>LCA A1-A4 (Kg.CO₂eq.)</i>
<i>Solução 1 - Sistema ETICS em EPS</i>	88.914	21.436,49	110.350,49
<i>Solução 2 - Sistema do tipo Vature</i>	153.719,02	339.449,88	493.168,90
<i>Diferença entre Soluções</i>	-64.805,02	-318.013,39	-382.818,41

Seguindo a mesma tendência, a Tabela 26 analisa os valores de desempenho ambiental referentes às emissões por metro quadrado de cada solução estudada, onde, novamente, a solução 1 se demonstra mais vantajosa neste campo, quer na fase de produção, quer no transporte.

Tabela 26 - Avaliação Ambiental, por m², das propostas de intervenção para o conjunto *Pinhais da Foz*

	<i>Fase de Produção A1-A3 (Kg.CO₂eq. m²)</i>	<i>Fase de Transportação A4 (Kg.CO₂eq. m²)</i>	<i>LCA A1-A4 (Kg.CO₂eq. m²)</i>
<i>Solução 1 - Sistema ETICS em EPS</i>	4,179	1,008	5,187
<i>Solução 2 - Sistema do tipo Vature</i>	7,225	15,955	23,181
<i>Diferença entre Soluções</i>	-3,046	-14,947	-17,994

A partir da Tabela 27 pode analisar o estudo económico de ambas as soluções, reunindo todos os parâmetros económicos estudados para a sua avaliação. O sistema do tipo Vature destaca-se na maioria dos fatores, revelando-se a solução mais rentável a longo prazo, permitir a obtenção de uma melhoria energética mais significativa, que resulta numa redução dos gastos associados à energia e, é a proposta que mais rapidamente atinge o retorno do investimento feito.

Tabela 27 - Avaliação Económica das propostas de intervenção para o conjunto *Pinhais da Foz*

	<i>Solução 1</i> <i>Sistema ETICS em EPS</i>	<i>Solução 2</i> <i>Sistema do tipo Vature</i>
<i>Custo do Ciclo de Vida - LCC</i>	1.942.573,85 €	1.882.561,08 €
<i>Poupança Líquida - NS</i>	- 30.127,92 €	29.884,86 €
<i>Rácio Poupança- Investimento - SIR</i>	0,942	1,045
<i>Taxa Interna de Retorno Ajustado - IRR</i>	- 1%	- 1%
<i>Tempo Mínimo até ao Retorno Total do Investimento Inicial - DPB</i>	23 anos	21 anos

No entanto, a comparação global entre as soluções mostra que nenhuma delas se destaca isoladamente em todos os domínios apresentados. A Figura 52 traduz essa análise global, mostrando que a solução do tipo Vature apresenta um desempenho técnico superior, uma vez que apresenta uma classificação de 11,57 comparativamente com a outra intervenção que obtém 17,83. Para além disso, esta solução também apresenta um melhor resultado na avaliação económica, uma vez que alcança mais rapidamente o retorno do investimento inicial (21 anos), comparativamente com a solução em ETICS (23 anos). No entanto, o sistema em ETICS destaca-se na componente ambiental, uma vez que apresenta um menor impacto associado às emissões carbónicas, 5,18 kg.CO₂eq./m², comparativamente com a solução do tipo Vature (23,18 kg.CO₂eq./m²).

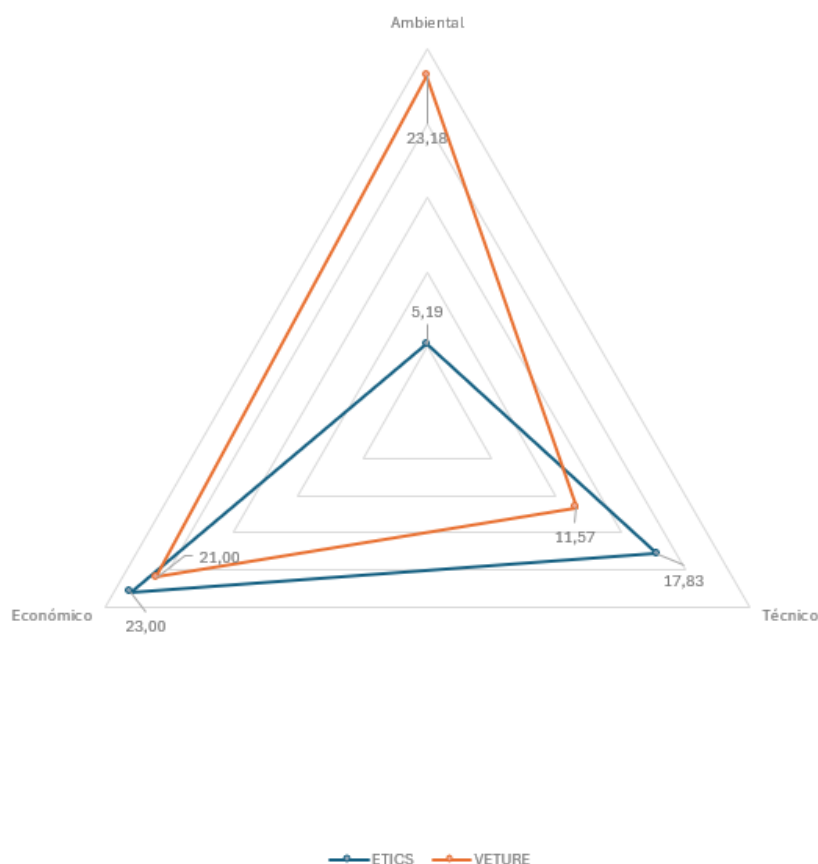


Figura 52 - Avaliação Global das Soluções Propostas para o conjunto *Pinhais da Foz*

5.4.2. AVALIAÇÃO DO CASO DE ESTUDO – ESTRELA D'AVENIDA

Acompanhando o seguimento das comparações globais do caso de estudo anterior, passamos à análise comparativa do conjunto edificado *Estrela d'Avenida*, debatendo a viabilidade sustentável de cada uma das alternativas propostas, de forma a entender qual delas garante o melhor desempenho de forma mais sustentável.

Para a componente técnica foi confirmado que ambas as soluções analisadas cumprem o regulamento atualmente em vigor e garantem uma melhoria significativa face à situação existente. Conforme se pode observar na Tabela 28, os valores dos coeficientes de transmissão térmica (U) não diferem entre si, em função dos elementos que constituem cada um dos sistemas. Neste caso de estudo, propôs-se a introdução de dois sistemas com desempenhos térmicos similares, apresentando em ambas um valor aproximado de $U = 0,40 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$. No entanto, as diferenças técnicas entre ambas as tecnologias são visíveis nas suas perdas de energia anuais, sendo que a solução em ETICS se destaca por apresentar um valor inferior (79.500,76 kWh/ano) comparativamente com a Fachada Ventilada (79.879,32 kWh/ano), demonstrando ser a solução energeticamente mais eficiente.

Tabela 28 - Avaliação técnica das propostas de intervenção para o conjunto *Estrela d'Avenida*

	<i>Solução 1</i> Sistema ETICS em Cortiça	<i>Solução 2</i> Fachada Ventilada	<i>Diferença</i> <i>entre Soluções</i>
U (W/m² · °C)	0,40	0,40	-
Q_{ext} (kWh/ano)	79.500,76	79.879,32	378,56

Relativamente à componente ambiental, a Tabela 29 permite concluir que o sistema ETICS apresenta uma melhor resposta ambiental na fase de transporte do sistema até à obra (A4), existindo uma diferença de 24.706,55 kg.CO₂eq. em relação ao impacto emitido. No entanto, a Fachada Ventilada apresenta uma melhor resposta na fase de produção (A1-A3), registando uma diferença de 31.417,27 kg.CO₂eq. comparativamente com a solução 1. Apesar de ambos os sistemas se destacarem em fases de estudo diferentes, a Fachada Ventilada destaca-se por apresentar um valor da sua avaliação do ciclo vida menor comparativamente com a solução em ETICS, obtendo uma diferença global de 6 710,72 kg.CO₂eq.

Tabela 29 - Avaliação Ambiental total das propostas de intervenção para o conjunto *Estrela d'Avenida*

	<i>Fase de Produção</i> A1-A3 (Kg.CO₂eq.)	<i>Fase de Transporte</i> A4 (Kg.CO₂eq.)	LCA A1-A4 (Kg.CO₂eq.)
Solução 1 - Sistema ETICS em Aglomerado de cortiça	-4399,56	7613,94	3.214,38
Solução 2 – Fachada Ventilada	-35816,83	32320,49	-3.496,34
Diferença entre Soluções	31 417,27	-24 706,55	6 710,72

A Figura 53 mostra a evolução ambiental em ambas as alternativas propostas, por metro quadrado, onde, como se viu anteriormente, a segunda solução se demonstra melhor relativamente à fase de produção (A1-A3), enquanto o sistema em ETICS traz um menor impacto associado ao transporte do material (A4).

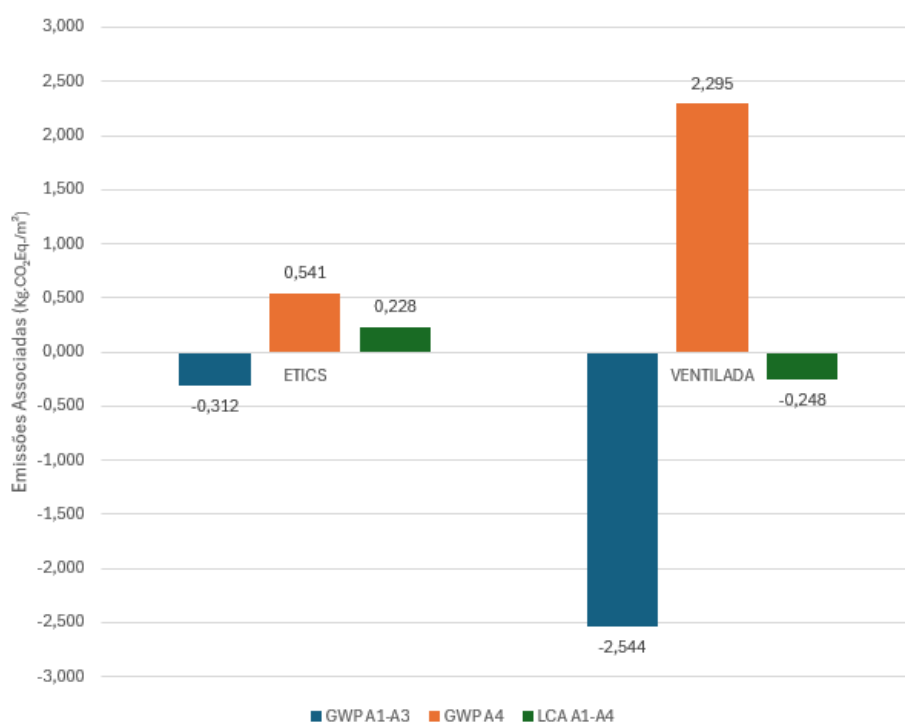


Figura 53 - Avaliação do ciclo de vida, por m², das intervenções proposta ao conjunto *Estrela d'Avenida*

A partir da Tabela 30 pode-se analisar o estudo económico de ambas as soluções, reunindo todos os parâmetros económicos estudados para a sua avaliação. A Fachada Ventilada destaca-se em todos os fatores estudados, revelando-se a solução mais barata a longo e curto prazo, apresentando o melhor rácio poupança-investimento, uma percentagem de poupança maior e um menor período até à obtenção do investimento gasto, com o apoio de um reinvestimento das poupanças.

Tabela 30 - Avaliação Económica das propostas de intervenção para o conjunto *Estrela d'Avenida*

	Solução 1 <i>Sistema ETICS em Cortiça</i>	Solução 2 <i>Fachada Ventilada</i>
<i>Custo do Ciclo de Vida - LCC</i>	1.558.841,94 €	1.502.991,92 €
<i>Poupança Líquida - NS</i>	149 734,23 €	205 584,24 €
<i>Rácio Poupança- Investimento - SIR</i>	1,698	3,229
<i>Taxa Interna de Retorno Ajustado - IRR</i>	1 %	4 %
<i>Tempo Mínimo até ao Retorno Total do Investimento Inicial - DPB</i>	15 anos	9 anos

Com a análise de ambas as intervenções estudadas, percebe-se que nenhuma dela se destaca isoladamente para todos os domínios apresentados. A Figura 54 traduz essa análise global, fomentando que o sistema ETICS em cortiça apresenta um desempenho técnico ligeiramente superior, uma vez que apresenta uma classificação de 16,03 comparativamente com a Fachada Ventilada que obtém 16,11. No entanto, a Fachada Ventilada obtém melhores resultados para a avaliação económica, tratando-se da solução mais rentável, visto que necessita de menos tempo até ao retorno do investimento inicial (9

anos), comparativamente com o sistema ETICS em cortiça (15 anos). Por fim, a solução 2 destaca-se ainda na componente ambiental por apresentar um menor impacto de emissões carbónicas por metro quadrado, - 0,248 kg.CO₂eq./m², comparativamente com a solução 1 (0,228 kg.CO₂eq./m²).

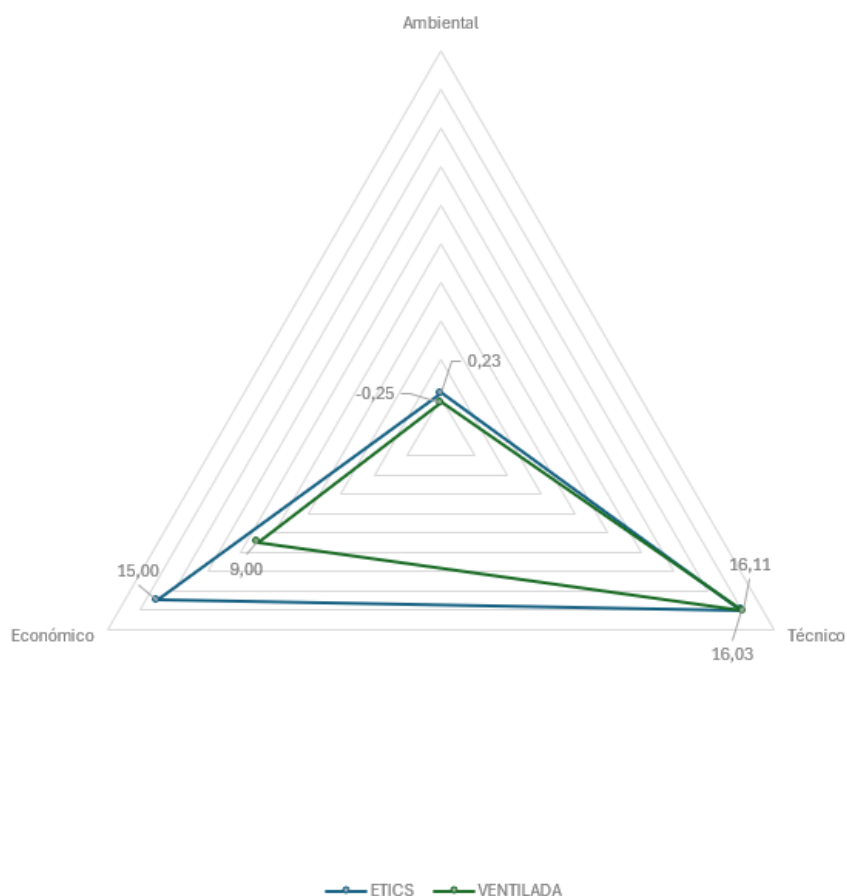


Figura 54 - Avaliação Global das Soluções Propostas para o conjunto *Estrela d'Avenida*

6

CONCLUSÕES

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o estudo desenvolvido nesta dissertação produziu-se uma ferramenta que se designou como *FOCO₂ LCCA*, que permite uma avaliação integrada e comparativa entre os diversos fatores de sustentabilidade associados às intervenções em fachadas opacas com vista à melhoria do seu desempenho térmico e energético. A ferramenta foi testada em dois casos de estudo. Esta abordagem permitiu evidenciar as vantagens e desvantagens de cada uma das alternativas de reabilitação propostas, não só sob o ponto de vista ambiental e económico, mas também no que toca à coerência entre ambas as dimensões, essencial para uma verdadeira construção sustentável.

No que diz respeito à análise ambiental, constatou-se que a escolha criteriosa dos materiais nas soluções de reabilitação tem naturalmente um impacto significativo em todas as fases do ciclo de vida do edifício, desde o momento da extração das matérias-primas e produção da solução em fábrica (A1-A3). A escolha de soluções que priorizam materiais leves e que permitam conjugar ou integrar inteiramente uma origem vegetal ou de madeira revelou-se bastante vantajosa para o estudo, visto facultar a minimização dos impactos ambientais associados às emissões carbónicas.

No entanto, fatores como a distância de transporte e o tipo de transporte utilizado para levar as soluções à obra, mostram-se determinantes e, portanto, com impacto relevante na contabilização das emissões referentes à fase de transporte do material (A4), podendo mesmo comprometer soluções aparentemente ambiental mais favoráveis do ponto de vista ambiental. Assim, realça-se a importância de uma análise de ciclo de vida global que considere contextos logísticos e regionais específicos, promovendo uma visão mais realista e contextualizada da sustentabilidade, incorporando todos os parâmetros influenciadores ambientais a que as soluções estão sujeitas, sem que nenhuma das fases prejudique a outra.

Relativamente à análise económica, verifica-se que soluções que conduzem a uma melhor resposta térmica nas envolventes do edifício contribuem para uma redução significativa dos consumos energéticos a longo prazo, promovendo assim uma diminuição dos custos operacionais dos edifícios. Contudo, esta poupança a longo prazo nem sempre é evidente numa análise puramente baseada no custo inicial, tornando assim crucial considerar o custo do ciclo de vida (LCC) como uma das ferramentas de apoio à decisão, uma vez que permite avaliar o investimento na sua globalidade considerando um período temporal de análise definido em linha com as necessidades do decisor. Outro grande aspeto a considerar é a subjetividade em redor da avaliação financeira, resultante das diferentes expectativas e necessidades que um dado utilizador final pode definir, tornando-se evidente a particularidade das prioridades que o próprio deseja para a própria intervenção: se este pretende priorizar os custos a curto, médio ou longo

prazo, quantos anos pretende amortizar até que consiga obter retorno total ou qual a poupança que uma determinada solução é capaz de proporcionar comparativamente com uma outra.

Para além destas comparações, é importante destacar que apesar das dificuldades encontradas na procura por documentação ambiental, da utilização de emissões aproximada de algumas soluções para a sua quantificação e do uso de valores de custos aproximados à realidade existente, a ferramenta conseguiu fornecer uma resposta suficientemente robusta e próxima da atualidade, assumindo um papel de apoio prático bastante relevante para as decisões preliminares do projeto, promotoras de uma construção ambientalmente responsável e economicamente consciente.

Assim, com a conjugação entre as viabilidades ambientais e económicas, complementadas com as confirmações regulamentares técnicas, a ferramenta de cálculo não deve ser encarada como uma avaliação isolada de resultados para cada um dos campos estudados, mas sim como uma oportunidade para identificar e procurar um equilíbrio nas sugestões de intervenção, de forma a contribuírem para uma construção mais eficiente, de menor custos e alinhada com a minimização dos impactos ambientais associados no setor.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas limitações identificadas durante o estudo deste documento, surgem diversas possibilidades que aprofundariam e expandiriam a temática relacionada com a sustentabilidade na construção, permitindo enquadrar a ferramenta noutros cenários.

Uma dessas possibilidades consiste no desenvolvimento de bases de dados específicas, devidamente sustentadas em declarações ambientais de produtos e valores técnicos de desempenho, expandindo assim a ferramenta de cálculo com a integração, de forma estruturada, de informações térmicas, ambientais e económicas pertinentes para o estudo. Esta base de dados permitiria uma redução da dependência de estimativas e generalizações para o cálculo de alguns elementos construtivos, garantindo uma maior precisão e representatividade nos resultados. Para além disso, um alargamento do estudo da avaliação do ciclo de vida dos sistemas propostos, incluindo fases relacionadas com a utilização, manutenção, fim de vida e reciclagem dos materiais, permitiria um aumento da precisão da análise ambiental do sistema, tornando-a mais completa e próxima da realidade atual, considerando a sua durabilidade e comportamento ao longo do tempo.

Outra vertente promissora prende-se com a utilização e aplicação da inteligência artificial na otimização de soluções construtivas, utilizando métodos evolutivos e sistemas em algoritmos do tipo de *Machine Learning*, de forma a promover automatizações e otimizações de soluções construtivas em todos os indicadores na sustentabilidade da reabilitação de edifícios. Esta sugestão permitiria ajustar a objetivos específicos para as sugestões de intervenção, culminando um misto entre a menor pegada ambiental, um melhor desempenho térmico e um menor custo associado ao seu ciclo de vida útil.

Relativamente à viabilidade económica, seria pertinente adicionar novos parâmetros financeiros na análise do custo do ciclo de vida (LCCA), associados os custos de manutenção corretiva e preventiva, custos de fim de vida e possíveis benefícios fiscais associados à eficiência energética, permitindo obter um panorama financeiro mais abrangente e alinhado com a realidade dos investimentos para a reabilitação e construção sustentável.

Por fim, como últimas recomendações, propõe-se ainda a utilização de casos de estudo mais complexos, analisando diferentes tipos de estruturas construtivas além dos elementos opacos da fachada, como pavimentos, coberturas e vãos envidraçados. A conjugação de todos os sistemas de reabilitação do edifício permitiria a introdução de certificados energéticos reais, com o objetivo de obter uma resposta mais

abrangente e robusta dos resultados fornecidos pela ferramenta, possibilitando uma comparação mais integrada e completa de todos os parâmetros analisados, aumentando assim a utilidade da ferramenta nas diferentes fases de projeto.

Estas possibilidades não só contribuiriam para a consolidação da ferramenta desenvolvida neste estudo, como também responderiam a desafios reais para o setor da construção, promovendo uma transição mais eficaz para práticas verdadeiramente sustentáveis, informadas e alinhadas com os objetivos globais de neutralização carbónica e de maior eficiência dos edifícios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kibert, C. J. *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2016.
- [2] Brundtland, G. H. *Our Common Future*. United Nations, World Commission on Environment and Development, 1987.
- [3] Elkington, J., *25 Years Ago I Coined the Phrase “Triple Bottom Line”. Here’s Why It’s time to Rethink It*. Sítio da Internet (<https://hbr.org/2018/06/25-years-ago-i-coined-the-phrase-triple-bottom-line-heres-why-im-giving-up-on-it>). Data de acesso: 15 de março de 2025.
- [4] Sítio da Internet (<https://2wecobank.com.br/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-tripe-da-sustentabilidade/>). Data de acesso: 15 de março de 2025.
- [5] Sítio da Internet (<https://ods.pt/ods/>). Data de acesso: 15 de março de 2025.
- [6] Teixeira, J. P., Pereira, M., Teixeira, J. A., Konstantinovas, B., Bento, N. V., & Sanches, T. *Economia Circular no Setor da Construção Civil I - Ciclo dos materiais*. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo, Lisboa, 2019. ISBN: 978-972-8872-42-7.
- [7] Abdallah, Thomas, environmental impact, *Sustainable Mass Transit: Challenges and Opportunities in Urban Public Transportation*. pág.45-49, Elsevier, 2017.
- [8] UNEP. *Relatório de Status Global para Edificações e Construção*. Sítio da Internet (<https://www.unep.org/pt-br/resources/relatorios/relatorio-de-status-global-para-edificacoes-e-construcao?utm>). Data de acesso: 17 de março de 2025.
- [9] CICCOPN. *A Economia Circular no Setor da Construção*. Sítio da Internet (https://www.ciccopn.pt/downloads/Apresentacao_Economia_Circular.pdf). Data de acesso: 17 de março de 2025.
- [10] APA. *Gestão de Resíduos de Construção & Demolição*. Sítio da Internet (https://www.ccdr-a.gov.pt/wp-content/uploads/2018/10/Protocolo_EUR-RCD.pdf). Data de acesso: 18 de março de 2025.
- [11] Sítio da Internet (<https://science.nasa.gov/climate-change/faq/what-is-the-greenhouse-effect/>). Data de acesso: 20 de março de 2025.
- [12] European Environment Agency. *Glossary, based on: European Commission. Climate change: Glossary of common terms and acronyms*. Sítio da Internet ([https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Global-warming_potential_\(GWP\)](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Global-warming_potential_(GWP))). Data de acesso 20 de março de 2025.
- [13] IPCC. *Updated AR6 values from IPCC Global Warming Potential Values*. Sítio da Internet (<https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf>). Data de acesso: 20 de março de 2025.
- [14] European Environment Agency. *Glossary, based on: IPCC Third Assessment Report*. Sítio da Internet (https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon_dioxide_equivalent). Data de acesso: 20 de março de 2025.
- [15] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 2021.

- [16] Cabeza, L. F., Rincón, L. V., Vilariño, V., Pérez, G., Castell, A. *Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the built environment – A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 29, 23/9/2013, 394-416, Lleida e Buenos Aires
- [17] República portuguesa. *Decreto-Lei n.º 176/2008, de 5 de setembro, Regime Geral da Gestão de Resíduos*. Diário da República, Lisboa, 2008.
- [18] APA. *Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2030*. Sítio da Internet (<https://participa.pt/contents/consultationdocument/PNGR%202030.pdf>). Data de acesso: 23 de março de 2025.
- [19] Fahlstedt, O., Rasmussen, F.N., Temeljotov-Salaj, A., Huang, L., Bohne, R.A. *Building renovations and life cycle assessment – A scoping literature review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 203 (2024) 114774, 29/07/2024, 1-17, Trondheim e Gjøvik.
- [20] Pulgrossi, L.M., Silva, V.G. *Influência de regras de corte de inventário nos resultados de ACV de edificações*. Pesquisa em Arquitetura e Construção (2020), 18/12/2020, e020026-1- e020026-22, Campinas.
- [21] Kambanou, M.L., Sakao, T. *Using life cycle costing (LCC) to select circular measures: A discussion and practical approach*. Resources, Conservation and Recycling 155 (2020), 08/01/2020, 1-13, Linköping.
- [22] Kneifel, J., Webb, D. *Life Cycle Cost Manual for the Federal Energy Management Program*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2020.
- [23] Altaf, M., Alaloul, W.S., Musarat, M.A., Qureshi, A.H. *Life cycle cost analysis (LCCA) of construction projects. Sustainability perspective*. Environment, Development and Sustainability 25, 30/07/2022, 12071-12118, Tronoh, Perak.
- [24] Soares, L.V.B.d.S. *Análise Custo-Benefício de Construção de um novo Pavilhão para o Clube Infante Sagres*. Dissertação de Mestrado, Católica Porto Business School, 2019.
- [25] Cabovská, B., Teli, D., Ekberg, L. *Building certification schemes—A way towards better IAQ and thermal comfort in schools? A critical review of schemes used in Northern European countries*. Building and Environment 275, 01/03/2025, 1-13, Göteborg.
- [26] Sítio da Internet (<https://worldgbc.org/about-us/our-mission/>). Data de acesso: 18 de março de 2025.
- [27] Sítio da Internet (https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels_en). Data de acesso: 28 de março de 2025.
- [28] Sítio da Internet (https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels/quick-introduction-levels_en). Data de acesso: 28 de março de 2025.
- [29] Pinheiro, M.D., *LiderA – Sistema voluntário para a sustentabilidade dos ambientes construídos*. Sítio da Internet (https://www.lidera4all.com/files/ugd/a7dea0_6370843b36e14eb78e9b3347194d473f.pdf). Data de acesso: 28 de março de 2025.
- [30] UNEP. *Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer*. UNEP, Nairobi, 1985.
- [31] Sítio da Internet (<https://www.ipcc.ch/about/history/>). Data de acesso: 30 de março de 2025.
- [32] UNEP. *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. UNEP, Nairobi, 1987.
- [33] United Nations. *Report of the United Nations Conference on Environment and Development (Rio de Janeiro, 3-14 June 1992)*. United Nations, New York, 1992.

- [34] UNFCCC. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. UNFCCC Secretariat, Bonn, 1997.
- [35] UNFCCC. *Doha Amendment to the Kyoto Protocol*. UNFCCC Secretariat, Bonn, 2012.
- [36] UNFCCC. *Paris Agreement*. UNFCCC Secretariat, Bonn, 2015.
- [37] European Union. *Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings*. European Union, Brussels, 2010.
- [38] União Europeia. *Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 30 de maio de 2018*. União Europeia, Bruxelas, 2018.
- [39] European Commission. *The European Green Deal*. European Commission, Brussels, 2019.
- [40] European Commission. *A Renovation Wave for Europe - Greening our buildings, creating jobs, improving lives*. European Commission, Brussels, 2020.
- [41] European Commission. *EU Emissions Trading System (EU ETS)*. European Commission, Brussels, 2015.
- [42] Trading Economics. *Permissões de Carbono da EU – Preços*. Sítio da Internet (<https://pt.tradingeconomics.com/commodity/carbon>). Data de acesso: 21 de março de 2025.
- [43] República portuguesa. *Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020, de 10 de julho*. Diário da República, Lisboa, 2020.
- [44] Sítio da Internet (https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/20241118_pnec2030_para_aprov_ar.pdf). Data de acesso: 21 de março de 2025.
- [45] Fundo Ambiental. *Programa de Apoio a Edifícios Mais Sustentáveis*. Fundo Ambiental, Lisboa, 2021.
- [46] República portuguesa. *Decreto-Lei n.º 50/2010, Apoios à Eficiência Energética*. Diário da República, Lisboa, 2021.
- [47] República portuguesa. *Plano de Recuperação e Resiliência de Portugal*. Diário da República, Lisboa, 2021.
- [48] Alba-Rodríguez, M.D., Martínez-Rocamora, A., González-Vallejo, P., Ferreira-Sánchez, A., Marrero, M. *Building rehabilitation versus demolition and new construction: Economic and environmental assessment*. Environmental Impact Assessment Review 66, 10/07/2017, 115-126, Sevilla e Concepción.
- [49] Oliveira, A.M.C.P., Lanzinha, J.C.G., Kern, A.P. *Building Rehabilitation: A Sustainable Strategy for the Preservation of the Built Environment*. Sustainability MDPI, 09/01/2024, 1-15, Covilhã e São Leopoldo.
- [50] AICCOPN. *Manual de Inovação e Sustentabilidade – Os Desafios e as Soluções na Reabilitação Urbana 4.0*. Sítio da Internet (<https://ruis.aiccopn.pt/wp-content/uploads/sites/3/2022/08/Manual-de-Inovacao-e-Sustentabilidade-versao-integral.pdf>). Data de acesso: 3 de abril de 2025.
- [51] Mateus, R., Bragança, L., Costa, R.J.G., Bezerra, J.C. *Avaliação do custo vs. benefício na introdução de medidas de sustentabilidade na reabilitação de edifícios antigos – estudo de caso*. Sustentabilidade na Reabilitação, julho de 2015, 26-29, Guimarães.
- [52] Lee, W.L., Burnett, J. *Benchmarking energy use assessment of HK-BEAM, BREAM and LEED*. Building and Environment 43, 15/11/2007, 1882-1891, Hong Kong.

- [53] Mateus, R., Bragança, L. *Avaliação da Sustentabilidade da Construção: Desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação da sustentabilidade de soluções construtivas*. Congresso sobre Construção Sustentável (2004), outubro de 2004, 1-10, Guimarães.
- [54] Freitas, A.F.M.d.C.S., *Arquitetura Bioclimática e Sustentabilidade Ambiental no Revestimento de Fachadas*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2008.
- [55] Beheshti, M.H., Firoozi, A., Jafarizaveh, M., Tabrizi, A. *Acoustical and Thermal Characterization of Insulating Materials Made from Wood and Sugarcane Bagasse*. Journal of Natural Fibers 20, 24/07/2023, 1-12, Gonabad.
- [56] Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., Monticelli, C. *The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture*. Procedia Engineering 155, 2016, 275-284, Milão.
- [57] Mazzarella, L. *Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view*. Energy and Buildings 95, 04/11/2014, 23-31, Milão.
- [58] Kolaitis, D.I., Malliotakis, E., Konteorgos, D.A., Mandilara, I., Katsourinis, D.I., Founti, M.A. *Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings*. Energy and Buildings 64, 14/04/2013, 123-131, Atenas.
- [59] Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Schiavoni, S. *A review fo unconventional sustainable building insulation materials*. Sustainable Materials and Technologies 4, 05/06/2015, 1-17, Perugia.
- [60] Ciampi, M., Leccese, F., Tuoni, G. *Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings*. Solar Energy 75, 02/09/2003, 491-502, Pisa.
- [61] Baciú, I. R., Isopescu, D. N., Lupu, M. L., Maxineasa, S. G., Pruna, L., Dan, S. *Ventilated façade solutions*. Sítio da Internet (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1242/1/012002>). Data de acesso: 27 de março de 2025.
- [62] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C. *A review on buildings energy consumption information*. Energy and Buildings 40, 12/03/2007, 394-398, Sevilla e Watford.
- [63] Freitas, V.P., *Isolamento térmico de fachadas pelo exterior. Reboco delgado armado sobre poliestireno expandido – ETICS – relatório HT191A/02*, Porto, Portugal, dezembro de 2002.
- [64] EOTA. *Veture Kits – Prefabricated units for external wall insulation and their fixing devices*. Sítio da Internet (https://www.eota.eu/download?file=/2017/17-04-0914/ead%20for%20ojeu/ead%20040914-00-0404_ojeu2020.pdf). Data de acesso: 29 de março de 2025.
- [65] Sítio da Internet (<https://geradordeprecos.info/>). Data de acesso: 1 de abril de 2025.
- [66] Sítio da internet (<https://rake.ee/wp-content/uploads/2021/01/Raketerm-Cladding-System-2020.pdf>). Data de acesso: 1 de abril de 2025.
- [67] Silva, L.M., Martins, A., Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., *Paredes de Alvenaria de Fachada: Soluções e sugestões de melhorias construtivas*. Seminário Reabilitação de Fachadas, Vasconcelos&Lourenço (eds.), 20/10/2016, 103-126, Guimarães.
- [68] Sítio da Internet (<https://www.umseisum.com/2023/11/12/isolamento-termico-ii/>). Data de acesso: 1 de abril de 2025.

- [69] CLASSE+. *Guia Técnico para Janelas Eficientes*. Sítio da Internet (<https://www.classe-mais.pt/classemais/conhecer/guia-tecnico-para-janelas-eficientes-pdf/>). Data de acesso: 1 de abril de 2025.
- [70] Sítio da Internet (<https://www.guardiansun.pt/os-nossos-vidros/guardian-sun-2>). Data de acesso: 1 de abril de 2025.
- [71] Sítio da Internet (<https://joti.pt/corte-termico-e-porque-as-janelas-de-aluminio-o-usam/>). Data de acesso: 1 de abril de 2025.
- [72] Pina dos Santos, C. A., Matias, L. *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios - ITE50*, LNEC, Lisboa, 2006.
- [73] República portuguesa. *Portaria n.º 138-I/2021*. Diário da República, Lisboa, 2021.
- [74] *Greenhouse gas reporting: conversion factors 2025*. Sítio da Internet (<https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2025>). Data de acesso: 21 de maio de 2025.
- [75] Sítio da Internet (<https://www.foco.pt/foco-ps>). Data de acesso: 25 de maio de 2025.

ANEXOS

A1

APLICAÇÃO DA $FOCO_2$ LCCA NO CONJUNTO *PINHAIS DA FOZ*

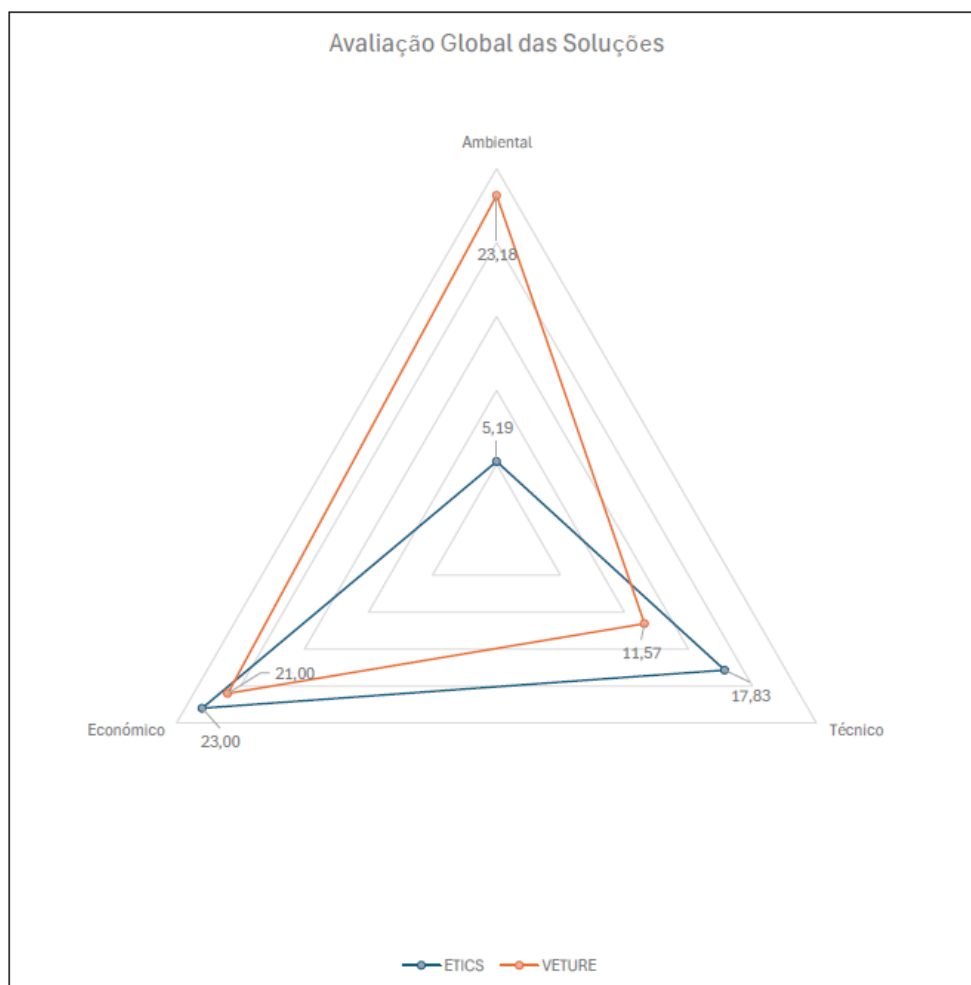
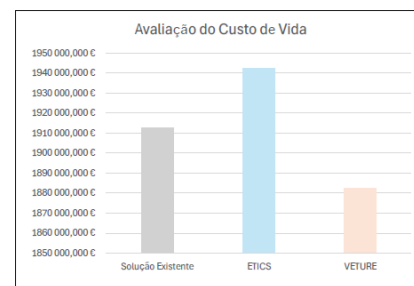
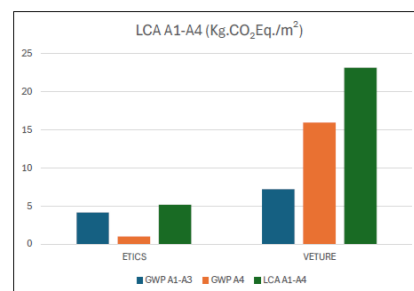
ANÁLISE TÉCNICA, ECONÓMICA E AMBIENTAL DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE ELEMENTOS OPACOS DE FACHADAS

Quadro Informativo									
Nome do Edifício:	Pilha da Foz	CADIN	0,15 €						
Área de Intervenção (m²):	18206	Urbaniz. CO2eq	65,00 €						
Localização:	Porto	Área de Pavimento (m²)	21275						
Grupo Solar (SW):	1148								
Quadro Auxiliar - Termico									
ETICS									
Elemento Construtivo:	■ (m)	■ (W/m²°C)	■ (m²/2°C/W)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)
revest. Exterior	0,02	1	0,020						
Alu./Estr. Exterior	0,15	0,38	0,395						
Camada Isolante	0	0	0,000						
Cabote de ar	0,04	0,18	0,222						
revest. Interior	0,01	0,41	0,268						
revest. Interior	0,02	1	0,020						
ETICS									
Elemento Construtivo:	■ (m)	■ (W/m²°C)	■ (m²/2°C/W)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)
revest. Exterior	0,02	1	0,020						
Alu./Estr. Exterior	0,15	0,38	0,395						
Camada Isolante	0	0	0,000						
Cabote de ar	0,04	0,18	0,222						
revest. Interior	0,01	0,41	0,268						
revest. Interior	0,02	1	0,020						
Isolamento ETICS - EPS	0,04	0,092	1,081081081						
Fibra de Vidro A-Lanite	0,01	0,19	0,066666667						
VETURE									
Elemento Construtivo:	■ (m)	■ (W/m²°C)	■ (m²/2°C/W)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)
revest. Exterior	0	1	0,000						
Alu./Estr. Exterior	0,15	0,38	0,395						
Camada Isolante	0	0	0,000						
Cabote de ar	0,04	0,18	0,222						
revest. Interior	0,01	0,41	0,268						
revest. Interior	0,02	1	0,020						
Isolamento ETICS - EPS	0,04	0,092	1,081081081						
Fibra de Vidro A-Lanite	0,01	0,19	0,066666667						
G									
Elemento Construtivo:	■ (m)	■ (W/m²°C)	■ (m²/2°C/W)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)	■ (W/m²°C)
revest. Exterior	0,02	1	0,020						
Alu./Estr. Exterior	0,15	0,38	0,395						
Camada Isolante	0,06	0,094	1,471						
Cabote de ar	0,04	0,18	0,222						
revest. Interior	0,01	0,41	0,268						
revest. Interior	0,02	1	0,020						
Isolamento ETICS - EPS	0,04	0,092	1,081081081						
Fibra de Vidro A-Lanite	0,01	0,19	0,066666667						

Quadro Auxiliar - Avaliação do Custo de Vida (LCA) - 1ª Parte									
ETICS									
Distrito A1-A3									
Distrito A4									
VETURE									
Distrito A1-A3									
Distrito A4									
G									
Distrito A1-A3									
Distrito A4									

Quadro Auxiliar - Avaliação do Custo de Vida (LCA) - 2ª Parte									
ETICS									
VETURE									
G									

Comparação de Resultados: <i>Pinhais da Foz</i>						
Avaliação Ambiental						
	ETICS		VETURE			
	Kg.CO ₂ Eq.	Kg.CO ₂ Eq./m ²	Kg.CO ₂ Eq.	Kg.CO ₂ Eq./m ²	Kg.CO ₂ Eq.	Kg.CO ₂ Eq./m ²
GWP A1-A3	88914	4,179271445	153719,02	7,22533584	0	0
GWP A4	21436,49088	1,0076	339449,880	15,955	0	0,0000
LCA A1-A4	110350,49	5,187	493168,90	23,181	0,00	0,000
LCA	€	€/m ²	€	€/m ²	€	€/m ²
	7 172,78 €	0,34 €	32 055,98 €	1,51 €	- €	- €
Avaliação Técnica						
	ETICS		VETURE			
	U (W/(m ² °C))					
Qext (kWh/ano)	125537,90		81422,10			
Melhorou ?	Sim!		Sim!			
Regulamento ?	Verifica!		Verifica!			
Avaliação Económica						
	Solução Existente	ETICS	VETURE			
LCC	1 912 445,936 €	1 942 573,85 €	1 882 561,08 €			
NS	-	30 127,92 €	29 884,86 €			
SIR	-	0,9422	1,045091044			
IRR	-1%	-1%	-1%			
DPB (anos)	23,00		21,00			



A2

APLICAÇÃO *FOCO₂ LCCA* NO CONJUNTO *ESTRELA D'AVENIDA*

Quadro Informativo						
Nome do Edifício:		Estimativa Arredada		CW _{ext}	0,15 °C	
Área de Intervenção (m²)		7290		Cham.CO ₂	65,00 °C	
Localização:		Póvoa		Área de Pavimento (m²)	14089	
Graus-Daui (GD)		1148				
Quadro Auxiliar - Termos						
Sistema Ativo						
Elemento Construtivo:	± (m)	A (W/m²·°C)	R (lm²·°C/W)	U (W/m²·°C)	Q _{ext} (W/m²)	
revest. Exterior	0,01	5,8	0,009			
Alu./Estr. Exterior - Tijolo	0,15	0,38	0,395			
Camada Isolante	0	0	0,000			
Calafateio	0,04	0,88	0,222	0,92	183,80	654
Alu./Estr. Interior	0,11	0,41	0,268			
revest. Interior	0,02	1	0,020			
ETICS						
Elemento Construtivo:	± (m)	A (W/m²·°C)	R (lm²·°C/W)	U (W/m²·°C)	Q _{ext} (W/m²)	
revest. Exterior	0,02	3	0,020			
Alu./Estr. Exterior	0,15	0,38	0,395			
Camada Isolante	0	0	0,000			
Calafateio	0,04	0,88	0,222	0,40	79,00	756
Alu./Estr. Interior	0,11	0,41	0,268			
revest. Interior	0,02	1	0,020			
Isolamento ETICS - Cortiça	0,06	0,40	1,331			
Fibra de Vidro + Ligante	0,01	0,15	0,687			
VENTILADA						
Elemento Construtivo:	± (m)	A (W/m²·°C)	R (lm²·°C/W)	U (W/m²·°C)	Q _{ext} (W/m²)	
revest. Interior	0,02	1	0,020			
Alu./Estr. Exterior	0,15	0,38	0,000			
Camada Isolante - Lã Mineral	0,08	0,09	1,471	0,40	796,79	216
Calafateio	0,04	0,88	0,222			
Alu./Estr. Interior	0,11	0,41	0,268			
revest. Exterior - Madeira-Cortiça	0,022	0,22	0,055			
Especie de	0,05	0,18	0,278			

Formação do Cálculo - FOCO, LOCA

Quadro Auxiliar - Termos

Sistema Ativo

Elemento Construtivo:

revest. Exterior

Alu./Estr. Exterior - Tijolo

Camada Isolante

Calafateio

Alu./Estr. Interior

revest. Interior

ETICS

Elemento Construtivo:

revest. Exterior

Alu./Estr. Exterior

Camada Isolante

Calafateio

Alu./Estr. Interior

revest. Interior

Isolamento ETICS - Cortiça

Fibra de Vidro + Ligante

VENTILADA

Elemento Construtivo:

revest. Interior

Alu./Estr. Exterior

Camada Isolante - Lã Mineral

Calafateio

Alu./Estr. Interior

revest. Exterior - Madeira-Cortiça

Especie de

Quadro Auxiliar - Termos

Sistema Ativo

Elemento Construtivo:

revest. Exterior

Alu./Estr. Exterior - Tijolo

Camada Isolante

Calafateio

Alu./Estr. Interior

revest. Interior

ETICS

Elemento Construtivo:

revest. Exterior

Alu./Estr. Exterior

Camada Isolante

Calafateio

Alu./Estr. Interior

revest. Interior

Isolamento ETICS - Cortiça

Fibra de Vidro + Ligante

VENTILADA

Elemento Construtivo:

revest. Interior

Alu./Estr. Exterior

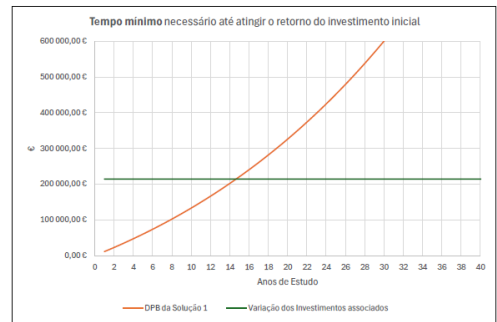
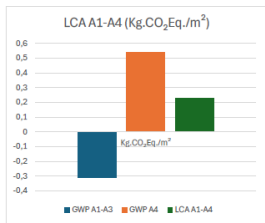
Camada Isolante - Lã Mineral

Calafateio

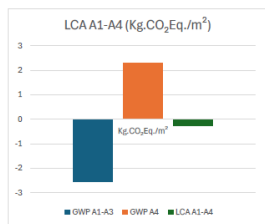
Alu./Estr. Interior

revest. Exterior - Madeira-Cortiça

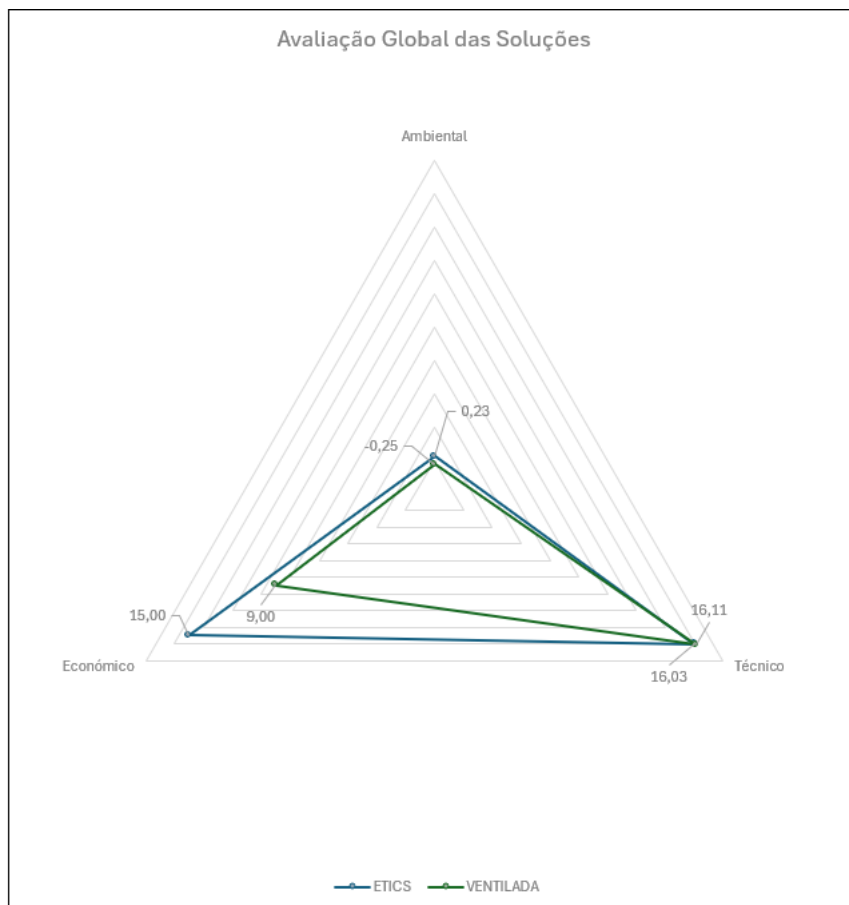
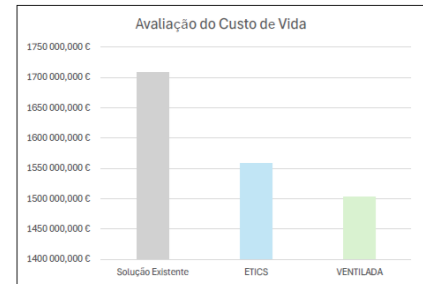
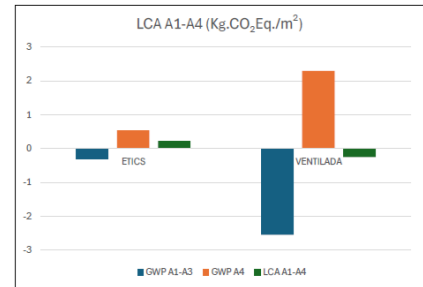
Especie de



Solução:		- VENTILADA	
Avaliação Ambiental			
	Kg CO ₂ /Eq.	Kg CO ₂ /Eq./m ²	
GWP A1-A3	-35816,832	-2,543809091	
GWP A4	32320,48835	2,295	
LCA A1-A4	-3496,34	-0,248	
	€	€/m ²	
LCA	- 227,26 €	0,02 €	
Avaliação Técnica			
U solução (W/(m ² °C))	0,40		
U existente (W/(m ² °C))	0,32		
Qext solução (kWh/ano)	79679,316		
Qext existente (kWh/ano)	183180,6538		
Melhorou ?	Sim!		
Regulamento ?	Verificar!		
Avaliação Económica			
	Solução Proposta	Solução Existente	
LCC	1 502 991,92 €	1 708 576,162 €	
NS	205 584,241 €		OK!
SIR	3,229280429		OK!
IRR	4%		
DPB	9,00 anos		



Comparação de Resultados: Estrela d'Avenida							
Avaliação Ambiental							
	ETICS				VENTILADA		
	Kg CO ₂ Eq.	Kg CO ₂ Eq./m ²	Kg CO ₂ Eq.	Kg CO ₂ Eq./m ²	Kg CO ₂ Eq.	Kg CO ₂ Eq./m ²	
GWP A1-A3	-4399,56	-0,31246875	0,00	0	-35816,832	-2,543809091	
GWP A4	7613,93952	0,5408	0,000	0,000	32320,48835	2,2955	
LCA A1-A4	3214,38	0,228	0,00	0,000	-3496,34	-0,248	
LCA	€	€/m ²	€	€/m ²	€	€/m ²	
	208,93 €	0,01 €	- €	- €	227,26 €	- €	0,02 €
Avaliação Técnica							
	ETICS				VENTILADA		
	U (W/(m ² °C))						
Qext (kWh/ano)	79500,76				79879,32		
Melhorou ?	Sim!				Sim!		
Regulamento ?	Verifica!				Verifica!		
Avaliação Económica							
	Solução Existente	ETICS			VENTILADA		
LOC	1 708 576,162 €	1 558 841,94 €	- €		1 502 991,92 €		
NS		149 734,23 €			205 584,24 €		
SIR		1,6984			3,229280429		
IRR		1%			4%		
DPB (anos)		15,00			9,00		



A3

DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTOS UTILIZADAS

DAP 001:2016

DAP 001:2019

DAP 011:2022

EPD ATALAS ETICS

EPD-KRO-20230157-CBA1-EN

GlobalEPD EN 16783 - 001

S-P-00782

S-P-01850

S-P-05614

S-P-07807

S-P-08738

S-P-09133