U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS LEVES DE FACHADA COM LIGHT STEEL FRAME

NUNO TIAGO MACEDO DA COSTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientadora: Professora Doutora Maria Helena Corvacho

JULHO 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

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.

Conhecimento é Poder

Francis Bacon

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível graças ao apoio, incentivo e confiança de várias pessoas, a quem desejo expressar o meu profundo agradecimento.

À minha família, em especial aos meus pais, Manuel e Sameiro, agradeço por todo o amor e apoio incondicional. Sem a vossa paciência, força e compreensão, este caminho teria sido muito mais difícil. Ao meu irmão, Hélder, agradeço por estar sempre presente, pelo carinho e por tornar os dias mais leves nos momentos de maior pressão.

Aos meus amigos, agradeço pela companhia, pelas palavras de motivação e por encontrarem sempre forma de aliviar o peso deste desafio.

À professora Doutora Maria Helena Corvacho, gostaria de agradecer pela sua orientação, pela disponibilidade constante e pelo apoio prestado em todas as etapas deste trabalho. A sua paciência e tempo dedicado foram essenciais para a conclusão desta dissertação.

O meu agradecimento à Professora Eva Barreira, responsável pelo projeto i-DINSystem, no âmbito do qual se enquadra esta dissertação, pela oportunidade proporcionada, pela confiança depositada e pelo apoio disponibilizado ao longo deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos os docentes e colegas que fizeram parte do meu percurso académico e que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional. A todos, o meu sincero obrigado.

RESUMO

A presente dissertação avalia a sustentabilidade de sistemas leves de fachada em *Light Steel Framing* (LSF), articulando o desempenho higrotérmico com a avaliação ambiental das soluções construtivas. O estudo incide em quatro painéis de fachada com diferentes composições.

A metodologia desenvolvida baseia-se em duas vertentes complementares. A primeira corresponde à análise higrotérmica dos painéis através do software WUFI, recorrendo a ficheiros climáticos de Lisboa, Guimarães e Mirandela. As simulações permitiram acompanhar a evolução da temperatura, da humidade relativa e do teor de humidade nas várias camadas dos painéis, bem como avaliar o risco de condensações. Foi ainda analisado o efeito da introdução de uma barreira para-vapor e de uma caixa de ar ventilada como medidas de melhoria do comportamento higrotérmico.

A segunda vertente do trabalho consistiu na avaliação ambiental das soluções com base na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, utilizando dados provenientes de Declarações Ambientais de Produto, o que permitiu comparar o potencial de aquecimento global (GWP) dos diferentes painéis e relacioná-lo com a respetiva constituição material.

Desta forma, a presente dissertação avalia a sustentabilidade dos painéis em estudo, articulando o desempenho higrotérmico com a avaliação ambiental das soluções construtivas, de forma a minimizar o risco de condensações que comprometam a durabilidade dos painéis e a sua possível reutilização.

PALAVRAS-CHAVE: *Light Steel Framing* (LSF), Potencial de Aquecimento Global, Avaliação do Ciclo de Vida, Construção Sustentável, Declaração Ambiental de Produto.

ABSTRACT

This dissertation assesses the sustainability of lightweight façade systems in Light Steel Framing (LSF), combining hygrothermal performance analysis with the environmental evaluation of the constructive solutions. The study focuses on four façade panels with different layer compositions.

The methodology is structured into two complementary parts. The first corresponds to the hygrothermal analysis of the panels using the WUFI software and climatic files for Lisbon, Guimarães and Mirandela. The simulations allowed the assessment of the evolution of temperature, relative humidity and moisture content in the different layers of the panels, as well as the risk of interstitial condensation. The effect of introducing a vapour barrier and a ventilated air cavity was also analysed as improvement measures for the hygrothermal behaviour.

The second part of the work consists of the environmental assessment of the solutions based on Life Cycle Assessment (LCA), using data from Environmental Product Declarations (EPDs), which made it possible to compare the Global Warming Potential (GWP) of the different panels and relate it to their material composition.

In this way, the present dissertation assesses the sustainability of the panels under study, combining the hygrothermal performance with the environmental evaluation of the construction solutions, to minimise the risk of condensation that could compromise the durability of the panels and their possible reuse.

KEYWORDS: Light Steel Framing (LSF), Global Warming Potential, Life Cycle Assessment, Sustainable Construction, Environmental Product Declaration

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS I
RESUMO III
ABSTRACT V

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 ENQUADRAMENTO 1
1.2 OBJETIVOS 3
1.3 METODOLOGIA 4
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 6
2 ESTADO DE ARTE 8
2.1 SUSTENTABILIDADE 8
2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA 9
2.2.1 Conceito e fases do LCA 9
2.2.2 Variantes do LCA e limites de sistema 10
2.2.3 Categorias de impacto ambiental e aplicação a edifícios 11
2.2.4 Circularidade de Materiais e Economia Circular na Construção 12
2.3 ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS E SISTEMAS DE FACHADA 13
2.4 CONSTRUÇÃO EM AÇO LEVE 14
2.4.1 Caraterização do Sistema 14
2.4.2 Vantagens Construtivas e Ambientais 14
2.5 DESEMPENHO TÉRMICO E HIGROTÉRMICO 15
2.6 PONTES TÉRMICAS 16
2.7 LIMITAÇÕES DO LSF 17
3 METODOLOGIA 18
3.1 AVALIAÇÕES EFETUADAS 18

3.2 DEFINIÇÃO DAS SOLUÇÕES DE FACHADAS ANALISADAS 19
3.2.1 Sistema de Fachada WS1 19
3.2.2 Sistema de Fachada WS2 20
3.2.3 Sistema de Fachada WS3 21
3.2.4 Sistema de Fachada WS4 22
3.3 DADOS DE MATERIAIS 23
3.3.1 Dados Utilizados para a Avaliação do Desempenho Térmico 23
3.3.2 Dados Ambientais e Declarações Ambientais de Produto (EPDs) 23
3.3.3 Organização dos Dados 23
3.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO 25
3.4.1 Utilização do Software 25
3.4.2 Condições Climáticas 25
3.4.3 Representação dos painéis no Software WUFI 28
3.4.4 Indicadores de Desempenho Higrotérmico 29
3.5 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS SISTEMAS DE FACHADA 30
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSAO DE RESULTADOS 32
4.1 ENQUADRAMENTO 32
4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES HIGROTÉRMICAS 33
4.2.1 Resultados para o clima de Lisboa 33
4.2.1.1 Análise de Resultados do Painel WS1 33
4.2.1.2 Análise de resultados do Painel WS2 35
4.2.1.3 Análise de resultados do painel WS3 37
4.2.1.4 Análise de Resultados do Painel WS4 40
4.2.2 Resultados para o clima de Guimarães 43
4.2.2.1 Análise de resultados do painel WS1 43
4.2.2.2 Análise de resultados do painel WS2 45
4.2.2.3 Analise de resultados do painel WS3 47
4.2.2.4 Análise de resultados do painel WS4 49
4.2.3 Resultados para o clima de Mirandela 51
4.2.3.1 Analise de resultados do painel WS1 51
4.2.3.2 Analise de resultados do painel WS2 53

4.2.3.3 Analise de resultados do painel WS3.....54
4.2.3.4 Analise de resultados do painel WS4.....56
4.2.4 Comparação global dos resultados.....58
4.2.5 Solução com barreira para-vapor para o painel WS2 60
4.2.6 Solução com caixa de ar para o clima de Mirandela.....63
4.3 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO AMBIENTAL 69
4.3.1 GWP Total por Solução de Fachada.....69
4.3.2 Comparação de Desempenho Ambiental entre Soluções.....74
4.3.3 Comparação de Desempenho Ambiental Com Soluções Tradicionais 75
4.4 DISCUSSÃO INTEGRADA DE RESULTADOS 77
5 CONCLUSÕES 80
5.1 CONCLUSÕES GERAIS 80
5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS..... 83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Participação do setor de edificações e construção no consumo de energia final e nas emissões de CO2 a nível global (Global Status Report 2021) 9
Figura 2.2 - Fases de uma avaliação do ciclo de vida (ABNT 2009) 10
Figura 2.3 - Etapas do LCA (Gervasio & Dimova, 2018) 11
Figura 3.1 - Corte esquemático do painel WS1 19
Figura 3.2 - Corte esquemático do painel WS2 20
Figura 3.3 - Corte esquemático do painel WS3 21
Figura 3.4 - Corte esquemático do painel WS4 22
Figura 3.5 - Zonas climáticas de Inverno em Portugal (Diário da República) 26
Figura 3.6 – Condições de clima interior adotadas no estudo 27
Figura 4.1- *Film View* do painel WS1 ao longo do ano, em Lisboa 33
Figura 4.2 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS1, em Lisboa 34
Figura 4.3 - *Film View* do painel WS2 ao longo do ano, em Lisboa 35
Figura 4.4 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS2, em Lisboa 36
Figura 4.5 - Film View do painel WS3 ao longo do ano, em Lisboa 37
Figura 4.6 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS3, em Lisboa 38
Figura 4.7 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto 0,0019 do painel WS3, em Lisboa 39
Figura 4.8 - *Film View* do painel WS4 ao longo do ano, em Lisboa 40
Figura 4.9 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS4, em Lisboa 41
Figura 4.10 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS4, em Lisboa 42
Figura 4.11 - *Film View* do painel WS1 ao longo do ano, em Guimarães 43
Figura 4.12 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS1, em Guimarães 44
Figura 4.13 - *Film View* do painel WS2 ao longo do ano, em Guimarães 45
Figura 4.14 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS2, em Guimarães 46
Figura 4.15 - *Film View* do painel WS3 ao longo do ano, em Guimarães 47
Figura 4.16 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS3, em Guimarães 48
Figura 4.17 - *Film View* do painel WS4 ao longo do ano, em Guimarães 49

Figura 4.18 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS4, em Guimarães 50
Figura 4.19 - *Film View* do painel WS1 ao longo do ano, em Mirandela 51
Figura 4.20 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS1, em Mirandela 52
Figura 4.21 - *Film View* do painel WS2 ao longo do ano, em Mirandela 53
Figura 4.22 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS2, em Mirandela 53
Figura 4.23 - *Film View* do painel WS3 ao longo do ano, em Mirandela 54
Figura 4.24 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS3, em Mirandela 55
Figura 4.25 - *Film View* do painel WS4 ao longo do ano, em Mirandela 56
Figura 4.26 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS4, em Mirandela 56
Figura 4.27 - *Film View* do painel WS2 ao longo do ano para a solução com barreira para-vapor, em Lisboa 60
Figura 4.28 - *Film View* do painel WS2 ao longo do ano para a solução com barreira para-vapor, em Guimarães 61
Figura 4.29 - *Film View* do painel WS2 ao longo do ano para a solução com barreira para-vapor, em Mirandela 61
Figura 4.30 - Distribuição da temperatura, teor de humidade e humidade relativa no painel WS2 sem caixa de ar, Mirandela (verão) 64
Figura 4.31 - Evolução da temperatura e da humidade relativa no painel WS2 sem caixa de ar, Mirandela (verão) 65
Figura 4.32 - Distribuição da temperatura, teor de humidade e humidade relativa no painel WS2 com caixa de ar ventilada, Mirandela (verão) 66
Figura 4.33 - Evolução da temperatura e da humidade relativa no painel WS2 com caixa de ar ventilada, Mirandela (verão) 67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros de material usados na simulação WUFI 29
Tabela 4.1 - Contribuição detalhada de cada material para o Potencial de Aquecimento Global (GWP) do painel WS1 69
Tabela 4.2 - Contribuição detalhada de cada material para o Potencial de Aquecimento Global (GWP) do painel WS2 70
Tabela 4.3 - Contribuição detalhada de cada material para o Potencial de Aquecimento Global (GWP) do painel WS3 71
Tabela 4.4 - Contribuição detalhada de cada material para o Potencial de Aquecimento Global (GWP) do painel WS4 72
Tabela 4.5 - Coeficientes de transmissão térmica (U) das soluções de fachada em LSF em estudo . 75
Tabela 4.6 - Espessuras de isolamento (EPS) ajustadas e respetivo Potencial de Aquecimento Global (GWP) para a parede simples 76
Tabela 4.7-Espessuras de isolamento (EPS) ajustadas e respetivo Potencial de Aquecimento Global (GWP) para a parede dupla 76

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

LSF – *Light Steel Framing,* em inglês

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

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

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

HR – Humidade Relativa

1
INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

O setor da construção desempenha um papel determinante no desenvolvimento económico e social, mas encontra-se igualmente associado a um consumo significativo de recursos naturais, energia e matérias-primas, bem como à produção de resíduos e à emissão de gases com efeito de estufa. Perante a necessidade de reduzir os impactes ambientais dos edifícios, o desenvolvimento de soluções construtivas mais eficientes deixou de estar centrado exclusivamente na diminuição das necessidades energéticas durante a utilização. A sustentabilidade de um edifício exige também a consideração dos materiais que o constituem, dos processos associados à sua produção e da possibilidade de manutenção, desmontagem, reutilização e reciclagem dos seus componentes.

Esta perspetiva torna particularmente relevante a avaliação da envolvente dos edifícios, uma vez que as fachadas constituem a interface entre o ambiente interior e as solicitações exteriores. Para além de influenciarem as trocas térmicas e o consumo de energia associado à climatização, estas soluções devem limitar a entrada e a acumulação de humidade, assegurar condições adequadas de utilização e manter o seu desempenho ao longo do tempo. A escolha dos materiais e a respetiva disposição em camadas afetam diferentes dimensões do comportamento da fachada.

Neste contexto, os sistemas leves de fachada em Light Steel Framing (LSF) apresentam-se como uma alternativa às soluções construtivas tradicionais, geralmente associadas a elementos de maior massa, como a alvenaria e o betão. Os sistemas LSF recorrem a perfis de aço e a uma organização multicamada de revestimentos, isolamentos e materiais de acabamento. A reduzida massa dos componentes e a possibilidade de pré-fabricação favorecem a racionalização do processo construtivo, enquanto a configuração das camadas permite adaptar as soluções a diferentes exigências de desempenho. Contudo, a elevada condutibilidade térmica dos perfis metálicos, a sensibilidade de determinadas interfaces à humidade e a dependência da correta execução dos pormenores construtivos exigem uma avaliação cuidada.

O desempenho destas fachadas não depende apenas da espessura do isolamento ou do coeficiente de transmissão térmica. Importa compreender de que forma a temperatura, a humidade relativa e o teor de humidade evoluem no interior dos painéis, tendo em conta as condições climáticas exteriores e as propriedades higrotérmicas dos materiais. A eventual ocorrência de condensações pode afetar componentes sensíveis à água e comprometer a funcionalidade e a vida útil da solução, reduzindo também as possibilidades de reaproveitamento dos materiais no final da utilização.

Paralelamente, a comparação entre alternativas construtivas deve integrar uma avaliação dos impactes ambientais associados aos produtos utilizados. A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida permite enquadrar esses impactes de forma sistemática, e as Declarações Ambientais de Produto disponibilizam informação ambiental relativa a materiais de construção segundo regras de declaração harmonizadas. No presente trabalho, assume especial relevância o Potencial de Aquecimento Global (GWP), que permite comparar o contributo dos diferentes constituintes para o impacte climático incorporado nas soluções. A análise por metro quadrado de fachada facilita a comparação entre painéis com composições distintas e a identificação das camadas com maior influência no resultado global.

A conjugação destas duas perspetivas é essencial, uma vez que um menor impacte ambiental na fase de produção não garante, por si só, um desempenho adequado durante a utilização. De igual modo, uma fachada com comportamento higrotérmico favorável pode incorporar materiais com um impacte ambiental significativo. Justifica-se, por isso, estudar em simultâneo o comportamento face ao calor e à humidade e a contribuição ambiental dos materiais, procurando soluções que conciliem durabilidade, desempenho funcional e redução do carbono incorporado. É neste enquadramento que se insere a presente dissertação, dedicada à avaliação comparativa de quatro sistemas leves de fachada com LSF, designados por WS1, WS2, WS3 e WS4, com diferentes constituições materiais e soluções de revestimento e isolamento.

1.2 OBJETIVOS

A presente dissertação tem como objetivo principal avaliar a sustentabilidade de sistemas leves de fachada em Light Steel Framing (LSF), articulando a análise do seu desempenho higrotérmico com a avaliação ambiental dos materiais que constituem as soluções construtivas. Pretende-se, deste modo, contribuir para uma apreciação integrada do comportamento dos painéis, reconhecendo que a adequação de uma fachada depende simultaneamente da sua resposta às condições de utilização e dos impactes associados à sua composição.

Numa primeira vertente, procura-se caracterizar e comparar quatro painéis de fachada, identificados como WS1, WS2, WS3 e WS4, que se distinguem pela disposição e pela natureza de algumas das suas camadas, nomeadamente dos materiais de isolamento e revestimento exterior. A análise higrotérmica visa acompanhar a evolução da temperatura, da humidade relativa e do teor de humidade no interior dos painéis, de modo a reconhecer interfaces potencialmente críticas, avaliar a possibilidade de acumulação de humidade e identificar situações favoráveis à ocorrência de condensações intersticiais. Procura-se ainda compreender a influência do contexto climático na resposta das soluções, considerando as condições exteriores de Lisboa, Guimarães e Mirandela.

Complementarmente, pretende-se analisar possíveis medidas de melhoria do comportamento higrotérmico, tomando como referência o painel WS2. Para esse efeito, são avaliadas variantes que consideram a introdução de uma barreira para-vapor e a inclusão de uma caixa de ar ventilada.

Numa segunda vertente, pretende-se quantificar e comparar o Potencial de Aquecimento Global (GWP) associado aos materiais dos quatro painéis, utilizando dados de Declarações Ambientais de Produto e uma base de comparação comum correspondente a um metro quadrado de fachada. Esta avaliação procura identificar os contributos dos diferentes materiais para o resultado de cada solução e compreender a influência das opções de revestimento e isolamento no respetivo impacte ambiental. Pretende-se também enquadrar os resultados através da comparação com soluções tradicionais de parede simples e dupla, considerando níveis equivalentes de desempenho térmico, expressos pelo coeficiente de transmissão térmica.

Por fim, procura-se relacionar os resultados das duas vertentes de análise, identificando os principais compromissos entre comportamento higrotérmico e impacte ambiental. O propósito não é selecionar uma solução exclusivamente pelo menor GWP ou pelo melhor indicador térmico isolado, mas reunir elementos que apoiem uma escolha construtiva equilibrada, adequada às condições climáticas consideradas e compatível com as exigências de durabilidade e sustentabilidade.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia adotada organiza-se em etapas complementares, de modo a relacionar a caracterização das soluções construtivas, a simulação do seu comportamento higrotérmico e a avaliação dos impactes ambientais associados aos materiais. O desenvolvimento do estudo inicia-se com a definição de quatro sistemas leves de fachada em LSF, designados por WS1, WS2, WS3 e WS4. Para cada painel são identificadas as camadas constituintes, a respetiva sequência construtiva e as propriedades necessárias às análises posteriores, assegurando que os modelos utilizados refletem as diferenças relevantes entre as soluções.

A avaliação higrotérmica é efetuada com o programa WUFI Pro, através da representação dos painéis segundo a sua composição em camadas. São introduzidas propriedades dos materiais, como a condutibilidade térmica, a massa volúmica, a capacidade térmica mássica e a resistência à difusão do vapor de água, com base nos dados disponíveis nas fichas técnicas e nas informações recolhidas para o estudo. A simulação permite acompanhar a transferência de calor e de humidade e observar a evolução temporal das condições no interior dos elementos construtivos, constituindo uma ferramenta de apoio à identificação de camadas e interfaces sensíveis.

Para analisar a influência do clima, são considerados ficheiros climáticos relativos a Lisboa, Guimarães e Mirandela, representativos de contextos exteriores diferenciados. A comparação é realizada mantendo uma abordagem de modelação coerente entre as várias soluções, de forma a distinguir os efeitos da composição dos painéis dos efeitos das condições climáticas. A avaliação incide, em particular, na evolução da temperatura, da humidade relativa e do teor de humidade ao longo do período anual de simulação, com atenção aos momentos e às zonas em que possam ocorrer condições críticas de acumulação de humidade ou condensação.

A análise principal é complementada por simulações de variantes construtivas do painel WS2. Uma delas considera a introdução de uma barreira para-vapor, procurando avaliar o efeito da limitação da transferência de vapor de água através da solução. A outra inclui uma caixa de ar ventilada, estudada para o clima de Mirandela, com um regime de ventilação noturna definido no modelo. Estas análises adicionais permitem observar de que forma alterações localizadas na constituição ou no funcionamento da fachada podem modificar o respetivo comportamento higrotérmico.

A avaliação ambiental é desenvolvida a partir da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, recorrendo a dados de Declarações Ambientais de Produto (EPDs) correspondentes aos materiais utilizados. O indicador adotado é o Potencial de Aquecimento Global, expresso em quilogramas de dióxido de carbono equivalente (kg CO_2 eq.). A quantificação centra-se essencialmente nos impactes incorporados associados à produção dos materiais, em função da informação ambiental disponível, não correspondendo a uma avaliação exaustiva de todas as fases de utilização e fim de vida do edifício. Esta delimitação permite manter uma base de comparação consistente com o âmbito da análise realizada.

Como os dados ambientais dos produtos podem ser apresentados em diferentes unidades, os valores são convertidos para uma referência comum de um metro quadrado de fachada. Esta uniformização considera, conforme o material, a espessura, a massa volúmica ou a quantidade necessária por área de painel, permitindo estimar o contributo ambiental de cada camada. A agregação dos resultados fornece o GWP de cada solução e torna possível comparar diretamente os painéis, identificando os materiais responsáveis pelas principais diferenças observadas.

Numa etapa complementar, os resultados ambientais dos sistemas LSF são comparados com os de soluções tradicionais de parede simples e de parede dupla. Para reforçar a comparabilidade, considera-se o ajustamento do isolamento térmico das soluções tradicionais de modo a obter valores equivalentes do coeficiente de transmissão térmica. Finalmente, os resultados das simulações higrotérmicas e da avaliação ambiental são discutidos de forma integrada, procurando relacionar os benefícios e as limitações de cada solução e compreender a importância da seleção dos materiais e da sequência das camadas no desempenho global das fachadas.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, estruturados de modo a conduzir a análise desde a fundamentação do problema até à interpretação dos resultados e às conclusões. A organização adotada procura distinguir o enquadramento teórico e os procedimentos utilizados das observações resultantes das simulações e dos cálculos efetuados, facilitando a compreensão da abordagem integrada proposta.

O primeiro capítulo apresenta o enquadramento do tema, a pertinência da avaliação da sustentabilidade de sistemas leves de fachada, os objetivos do trabalho e uma síntese da metodologia utilizada. No segundo capítulo desenvolve-se o estado de arte, com destaque para a sustentabilidade na construção, os fundamentos da Avaliação do Ciclo de Vida, a circularidade dos materiais, os sistemas de fachada em LSF e os aspetos associados ao desempenho térmico e higrotérmico, às pontes térmicas e às limitações destas soluções. Este enquadramento estabelece os conceitos necessários à interpretação das análises realizadas.

O terceiro capítulo descreve a metodologia do estudo onde são apresentadas as quatro soluções de fachada analisadas e os respetivos materiais, bem como os procedimentos de recolha e organização de dados. São igualmente descritas as condições consideradas nas simulações com o WUFI Pro, os indicadores utilizados na avaliação higrotérmica e os critérios adotados para o cálculo dos impactes ambientais a partir das Declarações Ambientais de Produto. A apresentação destes procedimentos procura assegurar a transparência das hipóteses de cálculo e da base de comparação entre os diferentes painéis.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados. A análise inicia-se com o comportamento higrotérmico dos painéis nos climas de Lisboa, Guimarães e Mirandela, prosseguindo com as variantes de melhoria estudadas para o painel WS2. Segue-se a comparação do Potencial de Aquecimento Global dos quatro sistemas, incluindo a contribuição individual dos materiais e o confronto com soluções tradicionais com desempenho térmico equivalente. O capítulo termina com uma discussão integrada, na qual são relacionados os resultados higrotérmicos e ambientais.

Por último, o quinto capítulo reúne as conclusões gerais do trabalho, salientando os principais aspetos observados na comparação das soluções e as implicações para a conceção de fachadas leves em LSF. São ainda identificadas possibilidades de desenvolvimento futuro, nomeadamente o alargamento das condições de análise, dos indicadores ambientais e das estratégias construtivas a considerar em estudos posteriores.

2
ESTADO DE ARTE

2.1 SUSTENTABILIDADE

O setor da construção civil desempenha um papel fundamental na economia global e no desenvolvimento da sociedade. No entanto, este setor também representa um dos maiores contribuintes para o consumo de recursos naturais e para as emissões de gases com efeito estufa. O crescimento da população urbana e o aumento da área construída têm intensificado a pressão sobre os sistemas energéticos e ambientais, tornando o setor da construção um dos focos nas estratégias globais de mitigação das alterações climáticas[1].

Atualmente, o setor da construção é responsável por cerca de 36% do consumo energético mundial e aproximadamente 37% das emissões de CO2 relacionadas com energia e processos industriais (figura 2.1) [2].

Estas emissões não resultam apenas do funcionamento dos edifícios, mas também dos processos associados à produção de materiais de construção, transporte, manutenção e demolição. Consequentemente, a analise dos impactos ambientais dos edifícios deve considerar todo o ciclo de vida das construções, desde a extração de matérias-primas até ao fim de vida dos componentes[1].

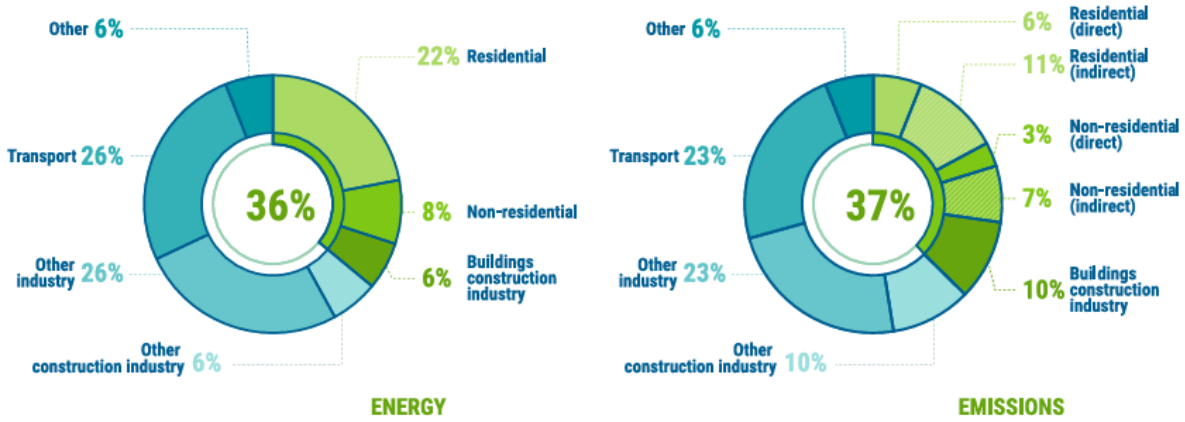


Figura 2.1 - Participação do setor de edificações e construção no consumo de energia final e nas emissões de CO2 a nível global (Global Status Report 2021)

2.2 Avaliação do Ciclo de Vida

2.2.1 Conceito e fases do LCA

A avaliação do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment* – LCA) é uma metodologia analítica internacionalmente reconhecida e definida pelas normas ISO 14040 e ISO 14044 [3], cujo objetivo é quantificar os impactos ambientais associados a um produto, sistema ou serviço durante a totalidade do seu ciclo de vida. A sua implementação segue quatro fases distintas: a definição do objetivo e âmbito, que estabelece a unidade funcional e os limites do sistema; o inventario de ciclo de vida, onde se quantificam todos os inputs e outputs do sistema; a avaliação das categorias de impacto ambiental, que converte os dados do inventário em potenciais impactos e por fim, a interpretação dos resultados, fase em que se identificam as principais origens dos impactos e se formulam recomendações (figura 2.2)[4][3].

No contexto dos edifícios, a aplicação do LCA permite uma análise sistemática dos impactes ambientais associados às várias fases do ciclo de vida da construção, incluindo a produção de materiais, o transporte, a construção, a utilização, a manutenção e o fim de vida. Esta abordagem é particularmente relevante na avaliação de sistemas construtivos, uma vez que permite comparar soluções com base numa unidade funcional comum e identificar os componentes ou fases que mais contribuem para o impacte ambiental global[3].

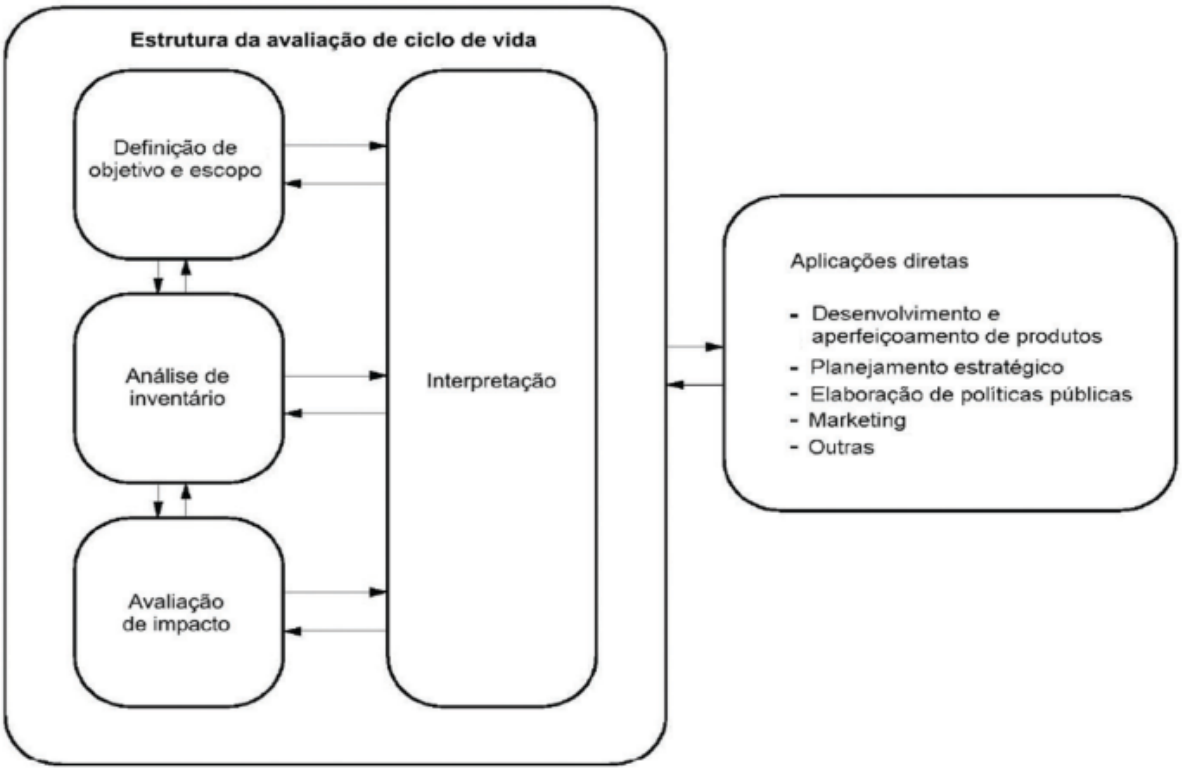


Figura 2.2 - Fases de uma avaliação do ciclo de vida (ABNT 2009)

2.2.2 Variantes do LCA e limites de sistema

Em função das fases do ciclo de vida, o LCA pode assumir três variantes principais: cradle-to-grave, que abrange desde a extração das matérias-primas até à deposição final; cradle-to-gate, que cobre apenas os processos até à saída da fábrica, sendo a base das Declarações Ambientais de Produto (EPDs); *cradle-to-cradle*, variante em que a fase final corresponde a um processo de reciclagem ou de preparação para reutilização, fechando o primeiro ciclo de vida do material e dando início a um novo ciclo de vida [3].

O LCA aplicado aos edifícios inclui tipicamente várias etapas, nomeadamente a produção de materiais (A1-A3), transporte (A4), construção (A5), fase de utilização (B1-B7) e fim de vida (C1-C4), podendo ainda incluir benefícios associados à reciclagem e reutilização (módulo D), de acordo com a norma prEN. Esta abordagem permite uma análise abrangente dos impactos ambientais, sendo importante para identificar as fases mais críticas do ciclo de vida[5][4].

Product stage			Process stage		Use stage							End-of-life stage				
A1	A2	A3	A4	A4	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport	Construction	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	Deconstruction	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-recycling-recover
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	n.a.	n.a.	x	x	x	x	x

Figura 2.3 - Etapas do LCA (Gervasio & Dimova, 2018)

Historicamente, a fase de operação dos edifícios era considerada a principal responsável pelo consumo energético e pelas emissões de carbono. No entanto, atualmente o impacto do carbono incorporado, associado à produção e transporte de materiais, tem vindo a aumentar em relevância[6].

No caso específico dos sistemas de fachada, a aplicação de metodologias LCA permite comparar diferentes soluções construtivas, como fachadas tradicionais em alvenaria e sistemas leves industrializados, incluindo soluções em aço leve. Estas análises evidenciam que embora os sistemas leves possam apresentar vantagens ao nível da redução de materiais e da eficiência construtiva, os seus impactos ambientais dependem também dos processos de fabrico e da durabilidade dos componentes[5].

2.2.3 Categorias de impacto ambiental e aplicação a edifícios

A avaliação do desempenho ambiental num edifício é realizada com base num conjunto de categorias de impacto, entre os quais se destacam: o Potencial de Aquecimento Global (GWP, em kg CO2 eq.), o Potencial de Acidificação (AP), o Potencial de Eutrofização (EP), o Potencial de Destruição da Camada de Ozono (ODP), o Potencial de Formação de Ozono Troposférico (POCP), o Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP) e a Energia Não-Renovável Incorporada (ENR)[4].

Cada uma destas categorias traduz um tipo específico de pressão ambiental. O GWP quantifica o contributo para as alterações climáticas e constitui, atualmente, um dos indicadores mais utilizados em estudos aplicados ao setor da construção, pela sua ligação direta às metas de descarbonização e à redução do carbono incorporado nos edifícios. Já o AP está associado à libertação de substâncias acidificantes para a atmosfera, o EP refere-se ao enriquecimento excessivo de nutrientes em meios aquáticos e terrestres, o ODP mede o potencial de degradação da camada de ozono e o POCP avalia a formação de ozono troposférico, frequentemente associada ao fenómeno de smog[4].

Apesar da existência de várias categorias de impacto, muitos estudos e ferramentas de avaliação aplicadas ao setor dos edifícios atribuem especial destaque ao GWP, por este constituir um indicador particularmente relevante no contexto das políticas climáticas e da transição para edifícios de baixo carbono. Ainda assim, a análise exclusiva do GWP pode ocultar outros impactes ambientais relevantes, pelo que a utilização de indicadores complementares contribui para uma apreciação mais equilibrada e tecnicamente fundamentada do desempenho ambiental das soluções construtivas[7].

2.2.4 Circularidade de Materiais e Economia Circular na Construção

A crescente preocupação com a escassez de recursos naturais e com a geração de resíduos de construção e demolição tem impulsionado a adoção dos princípios da economia circular no setor da construção, com reflexo direto como o LCA é aplicado e interpretado. A economia circular propõe a substituição do modelo linear tradicional, extrair, produzir, usar e descartar, por ciclos fechados em que os materiais são reutilizados ou reciclados, mantendo o seu valor durante o maior tempo possível. No contexto do LCA aplicado a edifícios, esta abordagem traduz-se na valorização do modulo D, que contabiliza os benefícios ambientais associados à reciclagem e reutilização dos materiais no fim de vida, permitindo considerar cenários em que os impactos incorporados na fase de produção são parcialmente compensados pela recuperação de materiais[3].

No caso específico dos sistemas em aço leve (LSF), a circularidade assume uma maior relevância, uma vez que o aço é um dos materiais de construção com maior taxa de reciclagem a nível global, podendo não apenas ser reciclado indefinidamente sem perda significativa de propriedades mecânicas como também pode ser desmontado e reutilizado. Este fator confere a este tipo de sistemas um potencial de baixo impacto ambiental quando o fim de vida é corretamente considerado na análise, distinguindo-os das soluções construtivas cujos materiais têm menor circularidade.

A avaliação da circularidade dos materiais de isolamento térmico utilizados nos painéis LSF; como a la mineral, o XPS ou o EPS; é igualmente relevante, dado que estes materiais apresentam diferenças significativas em termos de reciclabilidade, origem das matérias-primas e impacto na fase de produção, o que influencia o desempenho ambiental global da solução construtiva ao longo do ciclo de vida.

2.3 Envolvente dos Edifícios e Sistemas de Fachada

A envolvente dos edifícios desempenha um papel determinante no desempenho energético e ambiental das construções, constituindo a principal interface entre o ambiente interior e exterior. Elementos como fachadas, coberturas e envidraçados controlam as trocas térmicas, a ventilação e a entrada de radiação solar, influenciando diretamente as necessidades energéticas associadas ao aquecimento e iluminação.

No caso particular das fachadas, é possível distinguir, de forma geral, entre sistemas pesados, baseados em alvenaria ou betão, com maior inercia térmica e capacidade de armazenamento de calor, e sistemas leves, que recorrem a soluções multicamada e níveis de isolamento térmico para atingir baixos coeficientes de transmissão térmica[8].

Os sistemas em *Light Steel Framing* (LSF) enquadram-se no grupo de soluções leves, nas quais a função estrutural é assegurada por perfis de aço e o desempenho térmico depende essencialmente da configuração do isolamento térmico e das camadas de revestimento. Os painéis de fachada com LSF podem ser concebidos como elementos pré-fabricados, constituídos por uma estrutura portante em perfis metálicos, camadas de isolamento, placas de revestimento e sistemas de suporte e acabamento exterior. Esta abordagem modular permite fabricar os painéis em ambiente controlado e proceder à sua montagem em obra de forma rápida e precisa, reduzindo tempos de execução e desperdícios de materiais, o que se traduz em benefícios construtivos e ambientais relevantes[9].

Nos últimos anos, tem-se verificado uma evolução significativa no desenvolvimento de sistemas de fachada, passando de soluções estáticas tradicionais para sistemas mais avançados e integrados. As fachadas de elevado desempenho incorporam estratégias como ventilação natural, sombreamento dinâmico e integração de materiais inovadores, contribuindo para a melhoria do desempenho energético global dos edifícios. Os sistemas de envolvente dinâmica permitem ajustar o seu comportamento em função das condições ambientais, representando uma das abordagens mais promissoras no setor da construção [10].

2.4 CONSTRUÇÃO EM AÇO LEVE

2.4.1 Caraterização do Sistema

Os sistemas de construção com LSF caraterizam-se pela utilização de perfis de aço enformado a frio, combinando elevada resistência mecânica com baixo peso próprio, o que permite reduzir significativamente as cargas estruturais. Os perfis são produzidos em fábrica por quinagem ou perfilagem de chapa de aço de baixa espessura, com tratamento anti corrosão por galvanização, e posteriormente montados em obra através de ligações mecânicas por parafusos, sem recurso a argamassas ou betão.

2.4.2 Vantagens Construtivas e Ambientais

As principais vantagens dos sistemas em aço leve face à construção convencional em betão e alvenaria são a rapidez construção, redução de custos e eficiência global do processo

construtivo. A pré-fabricação dos elementos e a simplicidade de montagem em obra reduzem significativamente os tempos de execução e os custos associados à mão de obra[11].

A industrialização associada ao LSF constitui uma das principais vantagens. A produção off-site de componentes permite um elevado controlo de qualidade e precisão dimensional, reduzindo erros construtivos e desperdícios de materiais. Estudos recentes demonstram que sistemas baseados em aço leve podem reduzir o tempo de construção em até 40-50% quando comparados com métodos tradicionais[12].

2.5 DESEMPENHO TÉRMICO E HIGROTÉRMICO

O desempenho térmico dos sistemas em aço leve depende da relação entre a elevada condutibilidade térmica do aço e as camadas de isolamento e revestimento que envolvem a estrutura metálica. O desempenho térmico global das paredes em LSF é essencialmente garantido pelos materiais de isolamento e pelos revestimentos, organizados em soluções multicamada com resistências térmicas compatíveis com requisitos de conforto em diferentes climas.

Resultados obtidos em análises numéricas e experimentais mostram que a presença de isolamento contínuo no exterior dos perfis, através de mantas ou placas rígidas aplicadas sobre a estrutura, reduz significativamente o coeficiente de transmissão térmica U e atenua os efeitos das pontes térmicas associadas[13][14].

No contexto dos sistemas leves de fachada, os painéis estruturais isolados, designados por *Structural Insulated Panels* (SIP), representam uma solução alternativa que integra simultaneamente a função estrutural e o isolamento térmico num único elemento pré-fabricado. Um painel SIP é tipicamente constituído por um núcleo de material isolante rígido, intercalado entre duas placas de revestimento estrutural, habitualmente em OSB (*Oriented Strand Board*).

2.6 PONTES TÉRMICAS

As pontes térmicas em sistemas LSF assumem um papel importante no desempenho térmico global da envolvente, uma vez que a elevada condutibilidade do aço facilita a transferência de calor. Estudos focados na caracterização de pontes térmicas em edifícios com estrutura metálica leve mostram que o contributo destas descontinuidades para as perdas térmicas pode ser significativo quando não são adotadas medidas especificas de rutura térmica, como isolamento continuo exterior, desfasamento de montantes ou utilização de elementos com geometria otimizada[15].

A mitigação de pontes térmicas pode ser conseguida através de diferentes abordagens, sendo a mais eficaz a colocação de isolamento continuo no exterior dos perfis metálicos, que interrompe o caminho térmico direto através dos montantes e reduz significativamente o coeficiente de transmissão térmica efetivo da parede.

A cortiça assume um papel relevante como material de rutura térmica e de isolamento em painéis de fachada com perfis LSF, em particular quando aplicada sob a forma de aglomerado expandido de cortiça (ICB — *Insulation Cork Board*). A cortiça apresenta uma condutividade térmica na ordem de 0,040 a 0,065 W/(m·K), valores competitivos face a outros isolamentos naturais, e destaca-se pela sua elevada permeabilidade ao vapor de água, durabilidade, resistência à compressão e comportamento higroscópico favorável. A sua origem 100% natural e renovável, aliada à elevada taxa de reciclabilidade, confere à cortiça uma vantagem ambiental relevante no contexto da avaliação do ciclo de vida das soluções de fachada com LSF. Quando aplicada em camada contínua exterior nos painéis LSF, a cortiça reduz as pontes térmicas nos montantes e melhora o comportamento da fachada em termos de condensação e de conforto de verão, características particularmente importantes no clima português.

A consideração das pontes térmicas nos métodos de cálculo e nas simulações energéticas é por isso essencial para evitar a sobrestimação do desempenho térmico de paredes LSF e para apoiar o desenvolvimento de soluções construtivas que conciliem eficiência energética e redução de impactos ambientais ao longo do ciclo de vida[16].

2.7 LIMITAÇÕES DO LSF

Apesar das numerosas vantagens construtivas e ambientais dos sistemas em *Light Steel Framing*, existem limitações que devem ser cuidadosamente consideradas na fase de projeto e que condicionam o desempenho global das soluções de fachada. A principal limitação de natureza térmica está relacionada com a elevada condutividade do aço, que pode comprometer o desempenho global da envolvente nas soluções designadas de "estrutura fria", onde o isolamento se situa apenas entre os montantes sem continuidade exterior, tornando o sistema particularmente suscetível a perdas térmicas superiores às previstas pelos métodos de cálculo simplificados[17].

Por outro lado, os sistemas de paineís leves com LSF apresentam baixa inércia térmica, consequência direta da reduzida massa dos elementos construtivos que os constituem. Esta característica pode originar flutuações mais acentuadas de temperatura interior ao longo do dia, sobretudo em climas com amplitudes térmicas elevadas ou durante os meses de verão, sendo por isso necessário considerar estratégias complementares como o aumento da massa interior, a utilização de materiais de mudança de fase e uma correta orientação e proteção solar da fachada[18].

Do ponto de vista da durabilidade, os perfis em aço galvanizado podem ser afetados por processos de corrosão quando expostos a condições de humidade elevada ou em caso de falhas nas membranas de proteção, exigindo cuidados acrescidos na conceção dos detalhes construtivos e na escolha dos materiais de revestimento exterior[18].

Acresce ainda que o bom desempenho térmico dos sistemas com LSF está muito dependente da qualidade do detalhe construtivo em zonas singulares, como ligações parede-laje, encontros com vãos, fixações e remates periféricos. Nestes pontos, a descontinuidade do isolamento ou a presença de elementos metálicos passantes pode agravar significativamente as pontes térmicas lineares e pontuais, comprometendo o desempenho energético global da fachada [19].

3
METODOLOGIA

3.1 AVALIAÇÕES EFETUADAS

A presente dissertação segue uma metodologia para a avaliação de sistemas leves de fachada em *Light Steel Framing* (LSF), combinando a análise do desempenho higrotérmico com a avaliação do impacte ambiental das soluções construtivas. Esta abordagem justifica-se pelo facto de o desempenho global da envolvente não depender apenas da sua capacidade de limitar perdas térmicas e evitar patologias associadas à humidade, mas também dos impactes ambientais incorporados nos materiais e processos associados ao seu ciclo de vida.

Nessa perspetiva, o trabalho desenvolve-se em três etapas principais. Numa primeira fase, foram definidas as soluções de fachada objeto de estudo, com identificação das respetivas camadas constituintes, propriedades térmicas, espessuras e função construtiva de cada material.

Numa segunda fase, procede-se à análise higrotérmica dos painéis através do software Wufi, ferramenta amplamente utilizada para a simulação higrotérmica em elementos da envolvente, permitindo avaliar o risco de condensações, a evolução do teor de humidade e o comportamento térmico dos sistemas sob condições climáticas reais. Nesta fase foi também realizada uma análise comparativa de uma variante do painel WS2 com introdução de uma caixa de ar ventilada. Para tal, foram realizadas simulações adicionais em que se definiu uma caixa de ar na zona interior da fachada, associada a um regime de ventilação noturna com 60 renovações de ar por hora entre as 21h e as 9h, mantendo as restantes condições de fronteira e a composição de materiais idênticas às da solução base.

Numa terceira fase, é realizada a avaliação ambiental das soluções construtivas com base na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment* – LCA), de acordo com os princípios estabelecidos nas normas ISO 14040 e ISO 14044, recorrendo a dados provenientes de Declarações Ambientais de Produto (EPDs). Aqui também foi realizada uma análise comparativa do GWP das soluções dos painéis em estudo com soluções tradicionais,

3.2 Definição das Soluções de Fachadas Analisadas

3.2.1 Sistema de Fachada WS1

O painel WS1 (figura3.1), corresponde a uma solução de fachada leve em *Light Steel Framing* composta, do lado interior para o exterior, por uma placa de gesso laminado BA13 fixada a perfis metálicos LSF Thermosteel UC-150, com o espaço entre montantes totalmente preenchido por lã mineral.

No exterior da estrutura metálica é aplicada uma camada contínua de aglomerado de cortiça expandida *Gypcork Protect*. Sobre esta camada é colocada uma argamassa de colagem Mapetherm AR2, rede de reforço Mapenet P, nova camada de argamassa Mapetherm AR2 e acabamento final em argamassa decorativa Quarzolite Tonachino Plus.

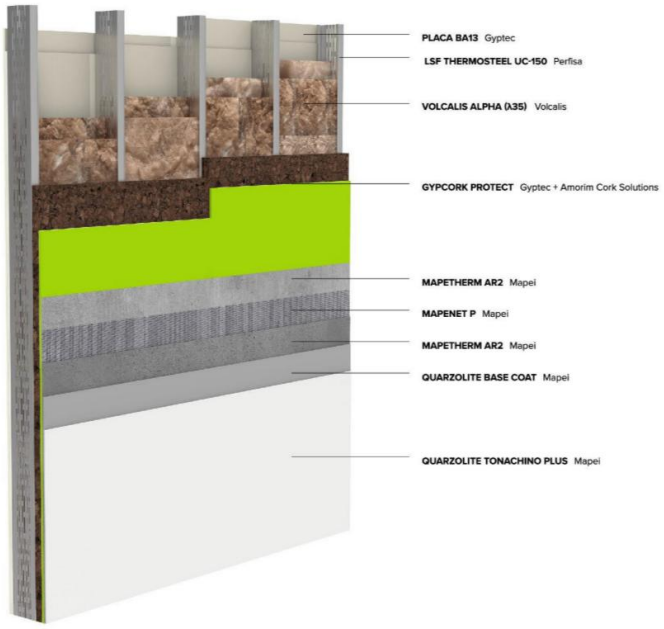


Figura 3.1 - Corte esquemático do painel WS1

3.2.2 Sistema de Fachada WS2

O painel WS2 (figura 3.2) corresponde a uma solução de fachada leve em *Light Steel Framing* composta de forma semelhante ao painel WS1.

No exterior da estrutura metálica é aplicada uma placa Protect, seguida de uma camada de argamassa de colagem Mapetherm AR2. Sobre esta camada é fixado um painel de aglomerado de cortiça expandida (ICB), complementado por fixação mecânica com buchas. A solução exterior é concluída com uma nova camada de argamassa Mapetherm AR2, rede de reforço Mapenet P, nova camada de argamassa Mapetherm AR2, primário Quarzolite Base Coat e acabamento final em argamassa decorativa Quarzolite Tonachino Plus.

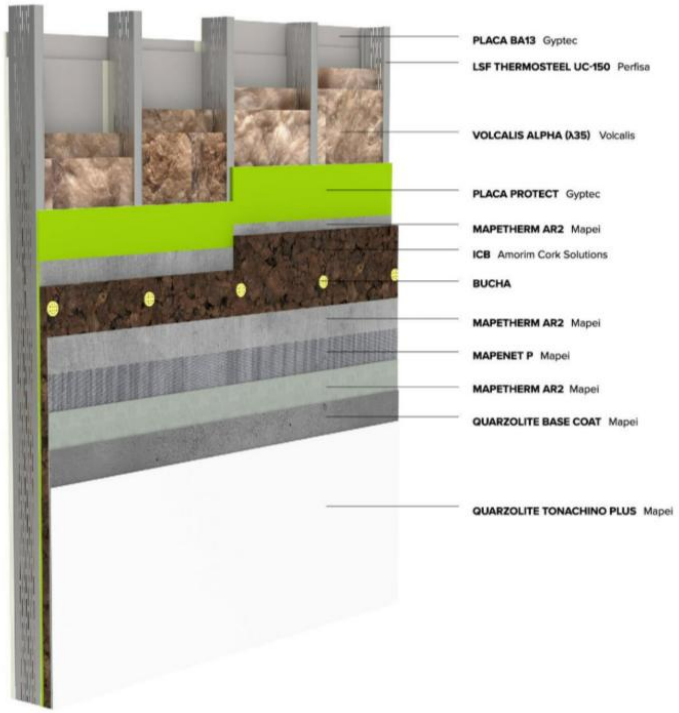


Figura 3.2 - Corte esquemático do painel WS2

3.2.3 Sistema de Fachada WS3

No painel WS3 (figura 3.3), no exterior da estrutura metálica é aplicada uma placa Protect, seguida de um sistema de revestimento composto por argamassa Mapetherm AR1, rede de reforço Mapenet P, fixação mecânica por buchas e nova camada de Mapetherm AR1, sobre o qual é colado o painel MD de fachada em aglomerado de cortiça expandida, ligado à base através de adesivo Keralastic T.

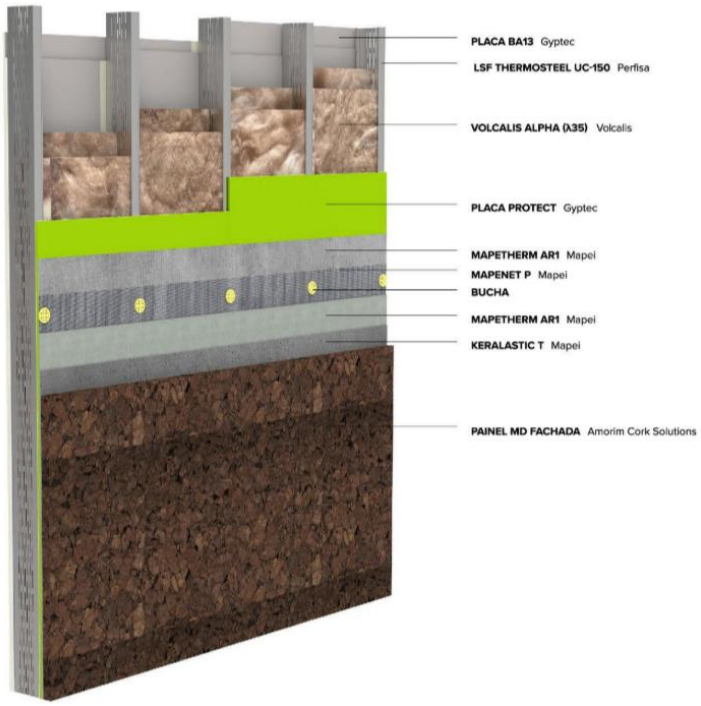


Figura 3.3 - Corte esquemático do painel WS3

3.2.4 Sistema de Fachada WS4

No painel WS4 (figura 3.4), no exterior da estrutura metálica é aplicada uma placa Protect, sobre a qual se desenvolve uma solução em cortiça em duas camadas: uma primeira camada de aglomerado de cortiça expandida (ICB) fixada com argamassa Mapetherm AR1 e buchas, seguida de uma segunda camada constituída por painel MD de fachada colado com adesivo Keralastic T. Entre o ICB e o painel MD integra-se ainda uma rede de reforço Mapenet P e argamassa Mapetherm AR1.

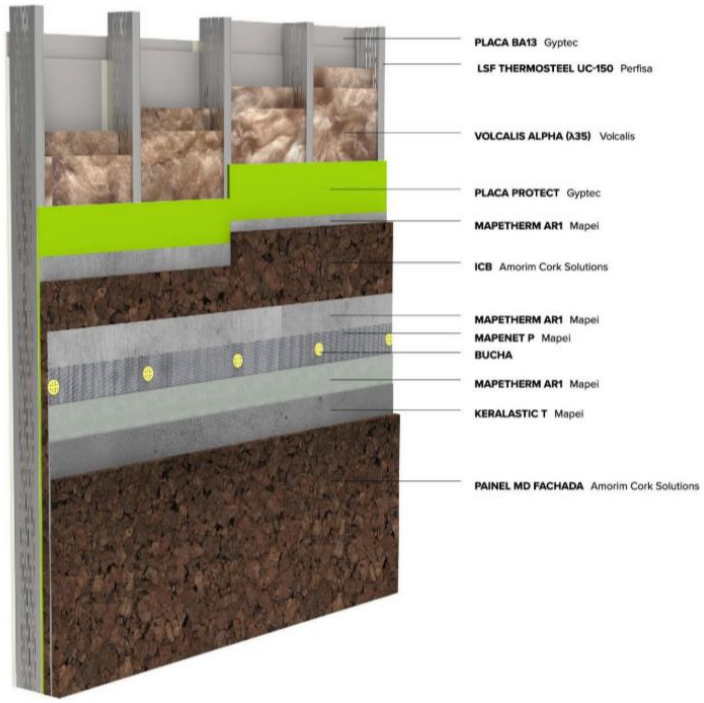


Figura 3.4 - Corte esquemático do painel WS4

3.3 DADOS DE MATERIAIS

3.3.1 Dados Utilizados para a Avaliação do Desempenho Térmico

A caracterização térmica e de comportamento face à humidade dos materiais constituintes dos painéis de fachada é um passo essencial para garantir a fiabilidade das simulações realizadas com o software escolhido. As propriedades consideradas incluem, para cada material, a condutibilidade térmica λ, a massa volúmica ρ, a capacidade térmica mássica c e o fator de resistência à difusão de vapor de água μ, bem como outros parâmetros específicos eventualmente necessários à modelação higrotérmica. Estas propriedades determinam a forma como cada camada contribui para a transferência de calor e de humidade através da envolvente, influenciando diretamente o desempenho dos painéis ao longo do tempo.

3.3.2 Dados Ambientais e Declarações Ambientais de Produto (EPDs)

A avaliação ambiental das soluções de fachada baseia-se em dados de inventário de ciclo de vida obtidos, preferencialmente, a partir de Declarações Ambientais de Produto (EPDs). Estas declarações constituem documentos verificados por terceira parte que apresentam, de forma harmonizada, os impactes ambientais associados a produtos de construção, organizados por módulos de ciclo de vida (A1–A3, A4–A5, B, C e D) e por categorias de impacto, incluindo o Potencial de Aquecimento Global (GWP).

Para cada material integrante dos painéis, tais como placas de gesso laminado, aglomerado de cortiça expandida (ICB), perfis de aço leve, placas OSB e materiais de isolamento térmico, foram recolhidos os indicadores ambientais relevantes, nomeadamente o GWP.

3.3.3 Organização dos Dados

Após a recolha das propriedades dos materiais constituintes de cada solução de fachada, procedeu-se à sua organização em duas bases de dados distintas, uma destinada ao software de desempenho higrotérmico e outra à avaliação ambiental por LCA.

No caso do software utilizado, os materiais foram organizados segundo os parâmetros exigidos para a simulação, nomeadamente a condutibilidade térmica, massa volúmica, fator de resistência à difusão de vapor de água. Estes valores recolhidos a partir de fichas técnicas e declarações ambientais foram verificados e uniformizados em termos de unidades, de forma a garantir a compatibilidade entre materiais e a coerência dos modelos numéricos. Os materiais da biblioteca fornecida pelo software foram editados com os valores dos materiais em análise de forma que a simulação seja a mais próxima da realidade possível.

Para a analise ambiental, cada produto foi registado tendo em conta a sua designação comercial, a função na solução construtiva, a espessura da camada, a unidade declarada da EPD, o valor do GWP. Uma vez que as EPDs apresentam os resultados de GWP em diferentes unidades de referência, foi necessário converter os valores para uma base comum, de forma a permitir a comparação entre materiais e a quantificação do impacte por metro quadrado de fachada.

Sempre que os dados ambientais estavam expressos por quilograma de produto, a conversão para unidade de área foi efetuada a partir da massa por metro quadrado do material. No caso de materiais contínuos, como placas, isolamentos ou membranas, essa massa foi obtida com base na massa volúmica e na espessura da camada. Já no caso de componentes não contínuos, como os perfis de aço leve da estrutura LSF, a quantificação foi feita com base numa estimativa de massa de aço por metro quadrado de painel, compatível com uma solução corrente de fachada com LSF, sendo posteriormente aplicado o fator de GWP por quilograma apresentado na respetiva EPD. Este procedimento permitiu expressar todos os contributos ambientais na unidade funcional de metro quadrado de solução de fachada.

Após a conversão dos dados, os materiais foram agrupados por painel e por camada construtiva, o que permitiu calcular o contributo individual de cada componente e o impacte ambiental total de cada solução analisada. Esta organização facilitou não apenas a comparação entre painéis com diferentes composições, mas também a identificação dos materiais com maior influência no valor final de GWP. Em simultâneo, a estruturação dos dados em folha de cálculo permitiu manter rastreabilidade entre os resultados obtidos, os valores convertidos e as fontes originais utilizadas, assegurando maior transparência e reprodutibilidade ao processo metodológico.

3.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO

3.4.1 Utilização do Software

Na avaliação das soluções de fachada consideradas nesta dissertação foi utilizada a ferramenta WUFI Pro, amplamente reconhecida como uma ferramenta de referência para a análise do comportamento higrotérmico de elementos da envolvente de edifícios sob condições climáticas reais.

A utilização deste software justifica-se pela necessidade de analisar o desempenho higrotérmico de sistemas leves de fachada em *Light Steel Framing* (LSF), cuja resposta térmica e higroscópica depende fortemente da sequência de camadas, das propriedades dos materiais e das condições climáticas exteriores.

O WUFI foi utilizado para modelar os painéis de fachada definidos anteriormente, com base na sua composição em camadas e nas propriedades térmicas dos respetivos materiais. Através desta modelação, pretende-se avaliar o comportamento dos painéis ao longo do tempo em condições de exposição reais, identificando parâmetros críticos como a evolução do teor de humidade, a humidade relativa em camadas sensíveis e o potencial risco de condensações intersticiais. Esta análise constitui uma etapa fundamental para a compreensão do desempenho global das soluções de fachada estudadas e para a sua posterior articulação com os resultados da avaliação ambiental.

O objetivo passa por avaliar o risco de condensações internas que possam comprometer a durabilidade dos painéis e que consequentemente não permitam a sua reutilização.

3.4.2 Condições Climáticas

No âmbito da presente dissertação, foram utilizados ficheiros de dados climáticos horários correspondentes às localidades de Lisboa (I1), Guimarães (I2) e Mirandela (I3), (figura3.1), com o objetivo de avaliar o desempenho dos painéis de fachada em contextos climáticos diferentes, uma vez que estas localidades se encontram em zonas climáticas de Inverno diferentes.

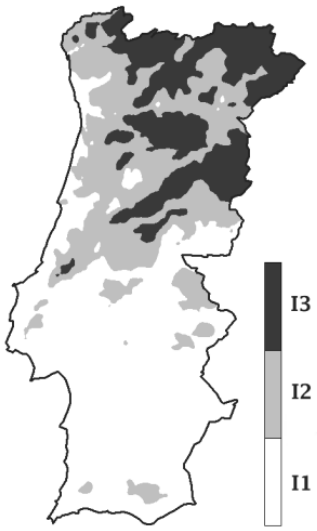


Figura 3.5 - Zonas climáticas de Inverno em Portugal (Diário da República)

A utilização de três ficheiros climáticos permitiu, assim, analisar o comportamento dos painéis em cenários diferenciados de temperatura e humidade relativa, avaliando a sensibilidade das soluções construtivas às condições exteriores. Esta abordagem é particularmente importante no caso dos sistemas em *Light Steel Framing* (LSF), cujo desempenho pode variar significativamente em função da exposição climática, da configuração das camadas e da capacidade de secagem da solução construtiva.

Na definição das condições interiores para a análise higrotérmica global, como é possível ver na figura 3.5, foi adotada uma temperatura interior constante de 15 °C, escolhida como valor de compromisso entre os períodos mais frios e mais quentes do ano. Este valor não pretende reproduzir um cenário de aquecimento intenso, mas sim uma situação equilibrada e estável, que permite avaliar o comportamento das fachadas em contacto com um ambiente interior moderado. Quanto à humidade, foi considerada a Humidity Class 3 do programa, que define uma carga de vapor variável em função da temperatura exterior, com valores mais elevados para períodos frios e uma redução progressiva nos meses mais quentes, refletindo uma ocupação residencial com produção moderada de vapor. A combinação destas condições de temperatura constante e carga de humidade dependente do clima exterior garantiu um enquadramento coerente entre os diferentes cenários climáticos estudados, permitindo comparar diretamente o desempenho higrotérmico dos vários painéis em contacto com um ambiente interior uniforme.

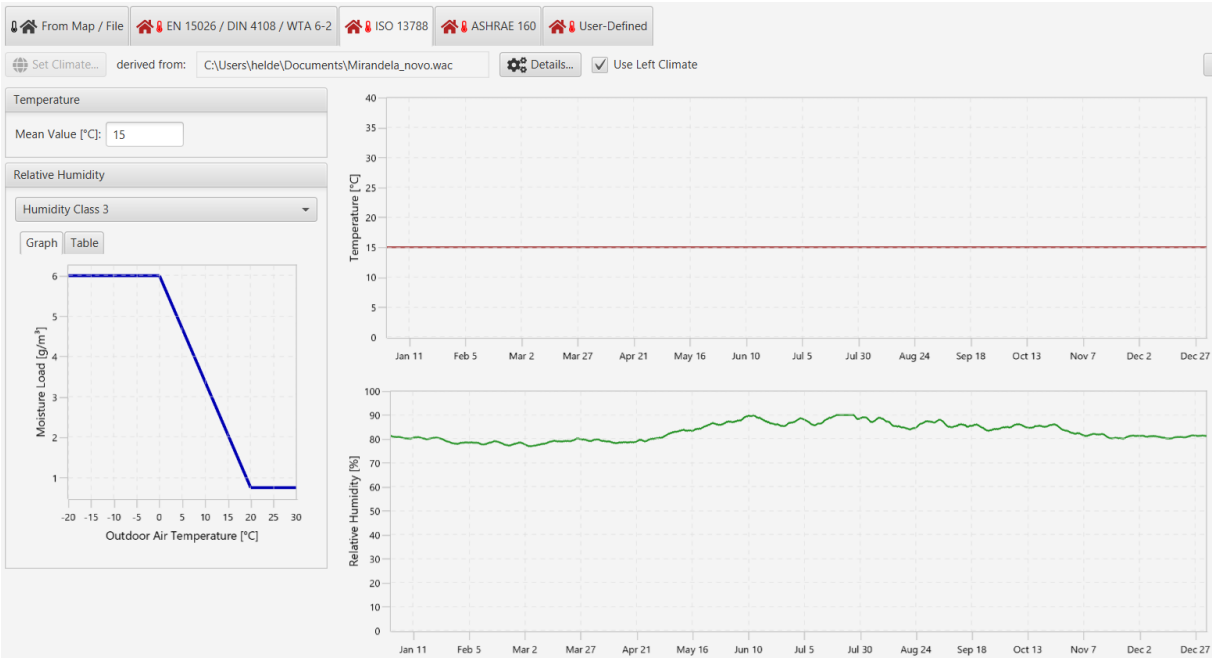


Figura 3.6 – Condições de clima interior adotadas no estudo

As simulações foram realizadas considerando a exposição dos painéis às ações climáticas exteriores constantes nos respetivos ficheiros meteorológicos e a sua resposta ao longo do tempo, permitindo avaliar variáveis como a temperatura, a humidade relativa e o teor de humidade nas diferentes camadas. A duração da simulação (período de um ano) e os critérios de leitura dos resultados foram definidos de modo a identificar eventuais situações críticas de acumulação de humidade e risco de condensação.

3.4.3 Representação dos painéis no Software WUFI

A modelação dos painéis de fachada no software WUFI foi realizada com base na sua constituição em camadas, respeitando a sequência construtiva real de cada solução, desde o lado exterior até ao lado interior. Para cada painel analisado foram introduzidas as respetivas camadas de revestimento, isolamento e acabamento interior, com as espessuras correspondentes e com as propriedades térmicas e higrotérmicas previamente recolhidas. Esta representação por camadas permitiu reproduzir, de forma simplificada, mas coerente, o comportamento do elemento construtivo face às solicitações climáticas a que se encontra sujeito.

A representação dos painéis teve ainda em conta a espessura real de cada material e a sua posição na solução construtiva, dado que pequenas alterações na ordem das camadas podem influenciar significativamente a secagem, a distribuição de temperatura e a ocorrência de condensações intersticiais.

Importa ainda referir que, na presente dissertação, foi utilizada a versão WUFI Pro, o que permitiu editar diretamente os materiais da base de dados do software e ajustar os seus parâmetros às características reais dos produtos efetivamente adotados nas soluções analisadas. Deste modo, os materiais introduzidos no modelo não correspondem apenas a materiais genéricos da biblioteca do programa, mas sim a versões adaptadas com base em valores reais recolhidos em fichas técnicas, nomeadamente no que respeita à condutibilidade térmica, massa volúmica, capacidade térmica mássica e fator de resistência à difusão de vapor de água. Este procedimento permitiu melhorar a representatividade dos modelos numéricos e assegurar maior coerência entre os painéis simulados e as soluções construtivas efetivamente estudadas.

Tabela 3.1 - Parâmetros de material usados na simulação WUFI

Valores introduzidos na edição dos materiais	**Unidade**
Massa volúmica aparente	kg/m3
Porosidade	m3/m3
Calor específico	J/kgK
Condutibilidade térmica	W/mK
Fator de resistência à difusão de vapor	-

3.4.4 Indicadores de Desempenho Higrotérmico

A análise dos resultados obtidos no WUFI foi efetuada com base num conjunto de indicadores de desempenho térmico e higrotérmico considerados relevantes para a avaliação comparativa dos painéis de fachada em estudo. Estes indicadores permitiram interpretar a resposta das diferentes soluções construtivas face às condições climáticas impostas, identificando não só o seu comportamento térmico global, mas também a sua capacidade de limitar a acumulação de humidade em camadas sensíveis. Deste modo, a leitura dos resultados não incidiu apenas em valores instantâneos, mas sobretudo na evolução temporal das variáveis mais representativas do desempenho dos painéis.

Entre os principais parâmetros analisados destacam-se a temperatura e a humidade relativa no interior das diferentes camadas, bem como o teor de humidade dos materiais mais suscetíveis à absorção e retenção de água. A observação destes indicadores ao longo do período de simulação permitiu avaliar a influência da composição de cada painel na regulação higrotérmica do elemento, nomeadamente a capacidade de secagem, a estabilidade do comportamento ao longo do tempo e a eventual ocorrência de condições favoráveis ao aparecimento de condensações intersticiais.

Foram igualmente analisados os gráficos de evolução temporal disponibilizados pelo software, os quais permitem visualizar de forma contínua a resposta dos painéis às variações das condições exteriores. Estes gráficos constituem uma ferramenta particularmente útil para identificar períodos críticos do ano, compreender a interação entre temperatura e humidade nas diferentes camadas e comparar o comportamento relativo das soluções estudadas. A sua interpretação possibilita, por exemplo, verificar se determinados materiais apresentam maior propensão para acumulação de humidade, se a secagem sazonal ocorre de forma eficiente e se a posição do isolamento influencia significativamente o desempenho global da fachada.

A avaliação incidiu ainda na identificação de zonas ou camadas com maior sensibilidade higrotérmica, designadamente interfaces entre materiais com propriedades distintas ou elementos potencialmente vulneráveis à retenção de humidade. Nestes casos, a análise da humidade relativa e do teor de humidade permitiu perceber o risco de degradação do desempenho do painel e a adequação da solução construtiva em função do clima considerado. Esta abordagem é especialmente relevante em sistemas leves, como os painéis com LSF, nos quais pequenas alterações na sequência de camadas ou na capacidade de difusão de vapor podem ter influência significativa no comportamento do conjunto.

3.5 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS SISTEMAS DE FACHADA

A avaliação ambiental dos sistemas de fachada analisados nesta dissertação foi desenvolvida com base na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA), com o objetivo de quantificar e comparar os impactes ambientais associados às diferentes soluções construtivas em estudo. Esta análise incidiu sobre os materiais constituintes de cada painel de fachada, procurando identificar o contributo individual de cada camada e o desempenho ambiental global de cada solução. A adoção desta abordagem permitiu complementar a análise higrotérmica realizada com o WUFI, integrando na avaliação da envolvente não apenas o seu comportamento em serviço, mas também os impactes incorporados nos materiais utilizados.

O indicador ambiental selecionado para a comparação entre soluções foi o Potencial de Aquecimento Global (GWP), expresso em kg CO2 eq., por se tratar de uma das categorias de impacto mais relevantes na avaliação de materiais de construção e por permitir uma leitura clara do contributo de cada solução para as emissões associadas às alterações climáticas.

A comparação entre os diferentes sistemas foi efetuada com base numa unidade funcional comum, correspondente a 1 m² de fachada, o que permitiu uniformizar os resultados e assegurar a comparabilidade entre soluções com composições materiais distintas. Para esse efeito, os valores de GWP apresentados nas EPDs foram convertidos para uma base comum por metro quadrado, recorrendo à espessura das camadas, à massa volúmica dos materiais e, quando necessário, à massa estimada de determinados componentes por área de painel. Este procedimento permitiu calcular o impacte ambiental total de cada solução de fachada, bem como o contributo parcelar dos seus diferentes materiais constituintes.

Esta abordagem permitiu avaliar as diferenças de desempenho ambiental entre soluções aparentemente semelhantes do ponto de vista construtivo. Em simultâneo, a desagregação dos resultados por material permitiu identificar os elementos críticos de cada solução e apoiar uma leitura mais fundamentada dos resultados obtidos.

Foi também realizada uma comparação dos painéis em estudo com paredes tradicionais em que se calculou o U dos painéis e se comparou com soluções tradicionais com o mesmo U, permitindo assim uma comparação viável entre o GWP de cada solução.

4
APRESENTAÇÃO E DISCUSSAO DE RESULTADOS

4.1 ENQUADRAMENTO

No presente capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos no âmbito da análise das soluções leves de fachada em *Light Steel Framing* estudadas nesta dissertação. Estes resultados decorrem, por um lado, das simulações higrotérmicas realizadas com o software WUFI Pro e, por outro, da avaliação ambiental desenvolvida com base na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, recorrendo ao indicador de Potencial de Aquecimento Global (GWP). Esta abordagem permite analisar as soluções construtivas numa perspetiva integrada, considerando simultaneamente o seu comportamento em serviço e o impacte ambiental associado aos materiais que as constituem.

Numa primeira fase, são apresentados os resultados das simulações higrotérmicas para os diferentes painéis de fachada e para os climas considerados no estudo, nomeadamente Lisboa, Guimarães e Mirandela. A análise incide sobre parâmetros como a temperatura, a humidade relativa e o teor de humidade nas diferentes camadas, permitindo identificar diferenças de comportamento entre soluções e avaliar a sua sensibilidade face às condições climáticas exteriores. Nesta fase também são analisadas duas soluções, a primeira é adicionar uma barreira para-vapor e a segunda é adicionar uma caixa de ar com renovações de ar, com o objetivo de melhorar o desempenho do painel.

Numa segunda fase, são apresentados os resultados da avaliação ambiental, expressos em termos de GWP por metro quadrado de fachada, com o objetivo de comparar o impacte incorporado das diferentes soluções analisadas. Esta comparação permite identificar os materiais e componentes com maior peso no resultado, bem como perceber de que forma a composição de cada painel influencia o seu desempenho ambiental global. Foi também feita uma comparação com soluções tradicionais de forma a perceber como os painéis em estudo reduzem o impacte ambiental.

4.2 Resultados das Simulações Higrotérmicas

4.2.1 Resultados para o clima de Lisboa

4.2.1.1 Análise de Resultados do Painel WS1

A figura 4.1 mostra a evolução anual de temperatura, teor de humidade e humidade relativa nas camadas do painel WS1.

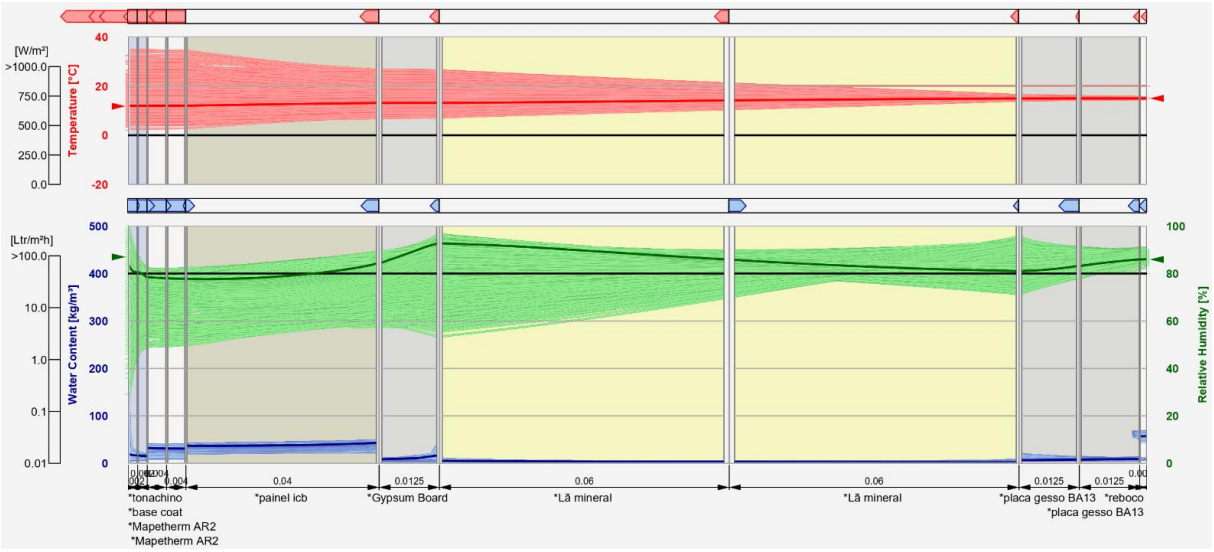


Figura 4.1- *Film View* do painel WS1 ao longo do ano, em Lisboa

A interface entre a placa de gesso mais exterior e a lã mineral é a posição mais desfavorável do painel WS1, porque ali se combinam temperaturas relativamente baixas com valores elevados de humidade relativa, criando condições propícias à condensação intersticial e à acumulação de humidade nessa zona. Sendo uma transição entre um material mais denso e higroscópico (placa de gesso) e um isolamento fibroso, esta interface tende a concentrar vapor que migra a partir do interior, enquanto arrefece significativamente no inverno, o que aproxima a humidade relativa de valores críticos.

Embora o ponto mais desfavorável se situe na interface interior entre a lã mineral e as placas de gesso, importa referir que a camada de revestimento exterior e o painel icb apresentam igualmente valores elevados de humidade relativa, em resultado da exposição direta à chuva e da absorção temporária de água. No entanto, a combinação entre a permeabilidade ao vapor da cortiça e a capacidade de secagem do revestimento exterior permite que esta humidade seja dissipada ao longo do ano, não se traduzindo, nas simulações realizadas, em risco significativo de condensação.

A figura 4.2 apresenta os perfis anuais de temperatura do ar e humidade relativa no ponto 0,0651m da espessura do painel WS1, correspondente à posição mais desfavorável identificada na análise da figura 4.1, permitindo avaliar o risco de condensações ao longo do ano.



Figura 4.2 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS1, em Lisboa

O gráfico anual de humidade relativa no ponto monitorizado mostra precisamente esse comportamento crítico: a HR inicia-se muito elevada, próxima de 90%, mantém-se acima de 80% durante grande parte do inverno e apenas desce de forma gradual para cerca de 60–65% nos meses mais quentes e secos, antes de voltar a subir para valores próximos de saturação no final do ano.

4.2.1.2 Análise de resultados do Painel WS2

A figura 4.3 mostra a evolução anual de temperatura, teor de humidade e humidade relativa nas camadas do painel WS2.

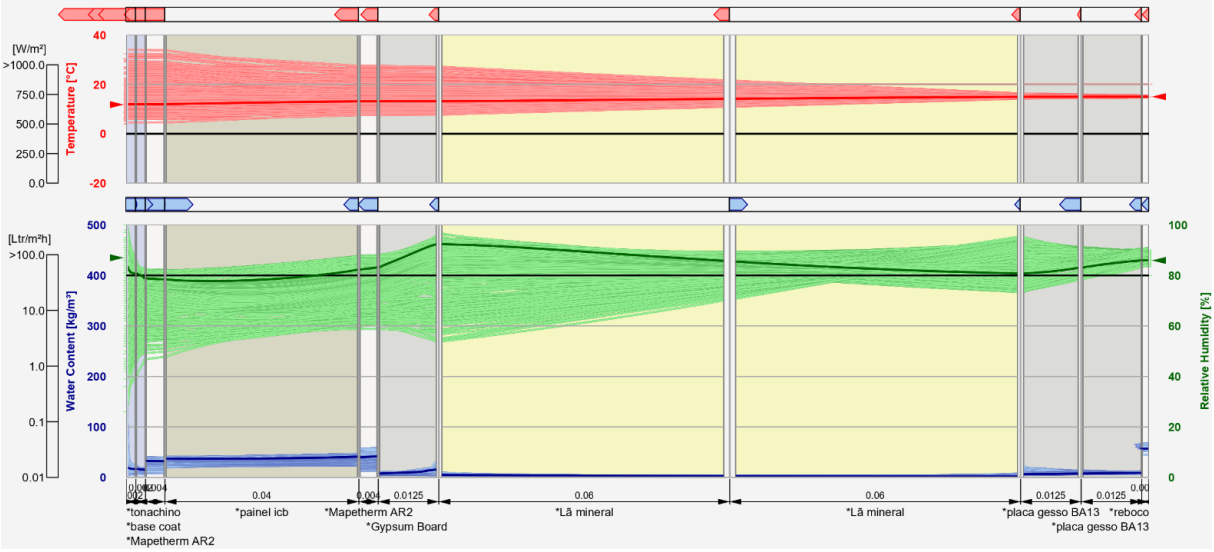


Figura 4.3 - *Film View* do painel WS2 ao longo do ano, em Lisboa

A zona mais desfavorável do painel WS2 continua a ser a interface entre a placa de gesso e a lã mineral, porque é nessa posição que se observam valores mais elevados de humidade relativa e teor de humidade ao longo do ano, indicando maior risco de condensações nas camadas interiores. Apesar da melhoria global do isolamento, esta interface mantém-se como o ponto crítico do painel.

A figura 4.4 apresenta os perfis anuais de temperatura do ar e humidade relativa no ponto 0,0651m da espessura do painel WS2, correspondente à posição mais desfavorável identificada na análise da figura 4.3, permitindo avaliar o risco de condensações ao longo do ano.



Figura 4.4 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS2, em Lisboa

No gráfico anual de HR no ponto 0,0651 m, a humidade relativa começa muito alta, perto de 90–95%, mantém-se acima de 80% durante praticamente todo o inverno e só desce de forma contínua até cerca de 60% na fase mais quente do ano. A partir do fim do verão, os valores voltam a subir, regressando rapidamente à faixa dos 80–90%, o que mostra que esta posição permanece longos períodos com humidade elevada e pouco tempo em condições realmente secas.

4.2.1.3 Análise de resultados do painel WS3

A figura 4.5 mostra a evolução anual de temperatura, teor de humidade e humidade relativa nas camadas do painel WS3.

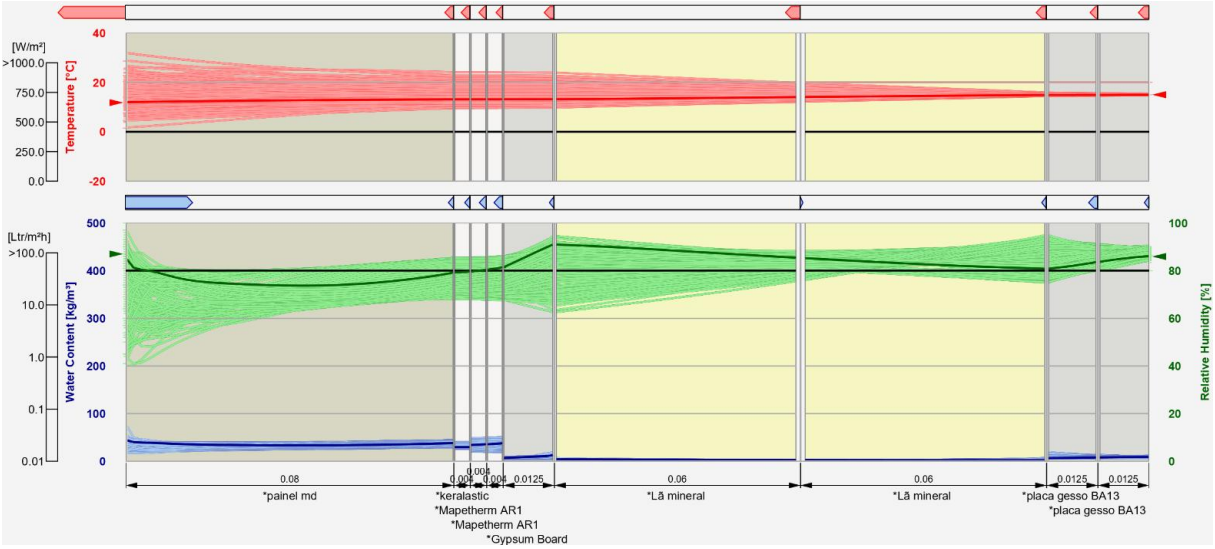


Figura 4.5 - Film View do painel WS3 ao longo do ano, em Lisboa

Tal como nos painéis WS1 e WS2, a zona mais desfavorável continua a localizar-se na região próxima da interface entre a lã mineral e a placa de gesso, onde se observam os valores mais elevados de humidade relativa e conteúdo de água ao longo do ano. No entanto, no painel WS3 essa situação apresenta menor intensidade, uma vez que, o tempo em que a humidade relativa se aproxima da saturação é mais baixo. Assim, WS3 mantém o ponto crítico higrotérmico identificado nos painéis anteriores, mas com um comportamento mais moderado, evidenciando uma melhoria do desempenho global da solução de fachada.

Neste contexto, a presença da cortiça na camada exterior revela-se particularmente relevante, uma vez que este material combina resistência à água líquida com permeabilidade ao vapor, favorecendo a secagem progressiva da fachada e reduzindo a probabilidade de acumulação persistente de humidade, mesmo quando ocorrem estados de saturação.

A figura 4.6 apresenta os perfis anuais de temperatura do ar e humidade relativa no ponto 0,1050m da espessura do painel WS3, correspondente à posição mais desfavorável identificada na análise da figura 4.5, permitindo avaliar o risco de condensações ao longo do ano.

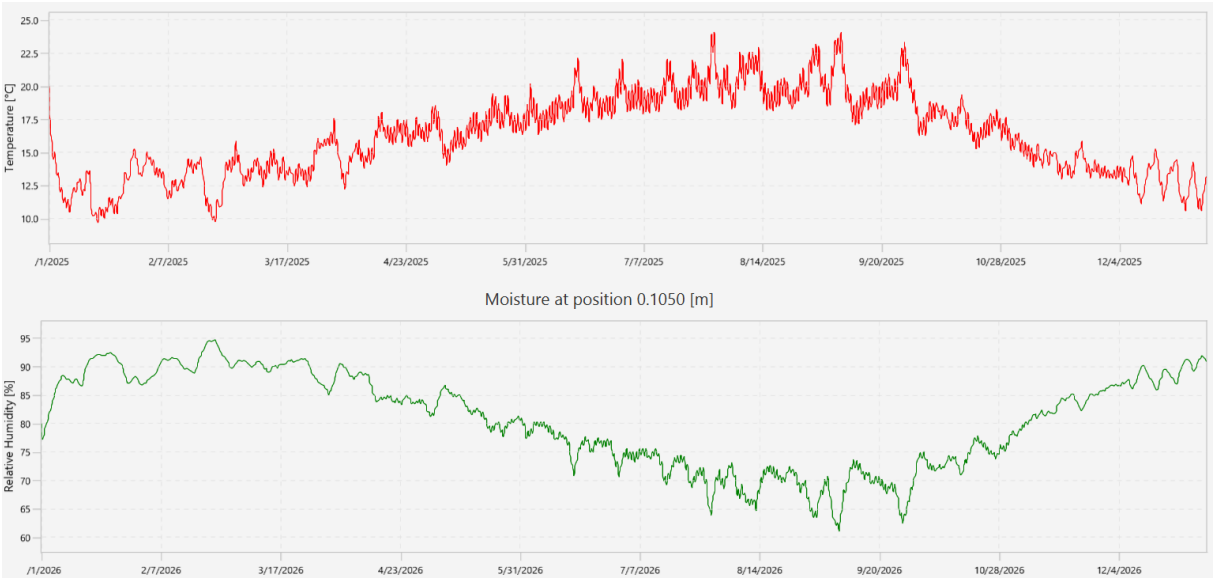


Figura 4.6 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS3, em Lisboa

Na figura 4.6 o gráfico anual de humidade relativa no ponto 0,1050m confirma este comportamento: a HR arranca muito elevada, perto de 90–95%, mantém-se na faixa dos 80–90% durante o inverno e início da primavera e só desce gradualmente até cerca de 60–65% no período mais quente. A partir do fim do verão, os valores voltam a subir de forma contínua até regressar a níveis próximos de 90%.

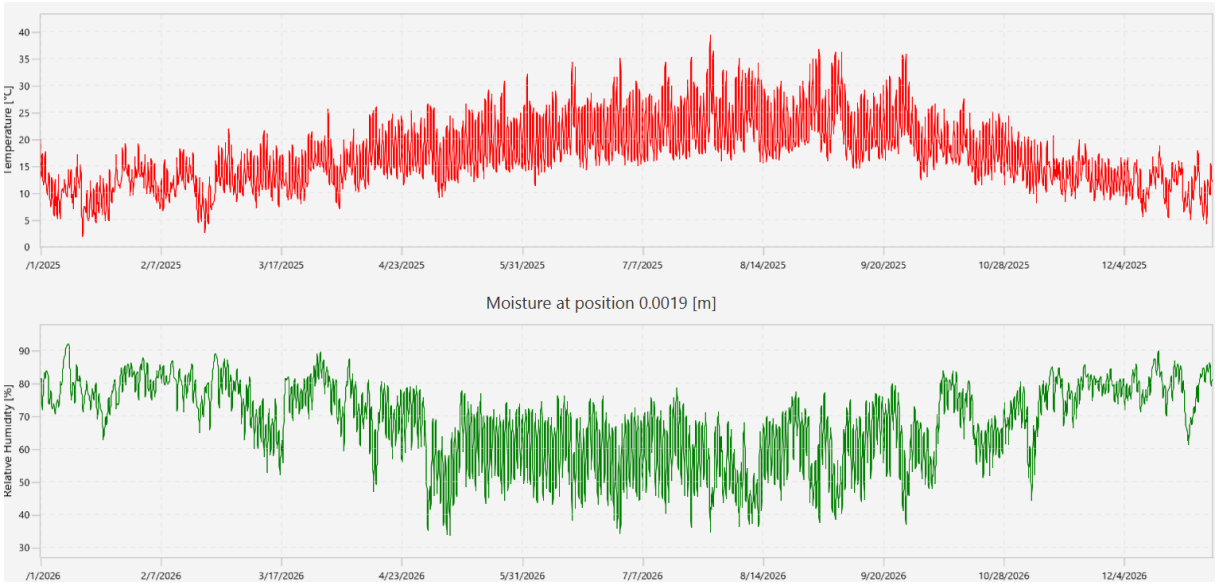


Figura 4.7 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto 0,0019 do painel WS3, em Lisboa

A figura 4.7 apresenta a evolução anual de temperatura e humidade relativa numa posição interior do painel de cortiça (0,0019 m). No que respeita à humidade relativa, os valores situam-se maioritariamente entre 50 % e 80 %, registando apenas picos pontuais superiores, sem que se observe uma aproximação prolongada à saturação. Este comportamento confirma que, apesar da exposição da camada exterior às condições climáticas, o interior do painel de cortiça apresenta um ciclo de secagem equilibrado, com boa capacidade de dissipar a humidade acumulada e reduzida propensão para a formação de condensações persistentes

4.2.1.4 Análise de Resultados do Painel WS4

A figura 4.8 mostra a evolução anual de temperatura, teor de humidade e humidade relativa nas camadas do painel WS4.

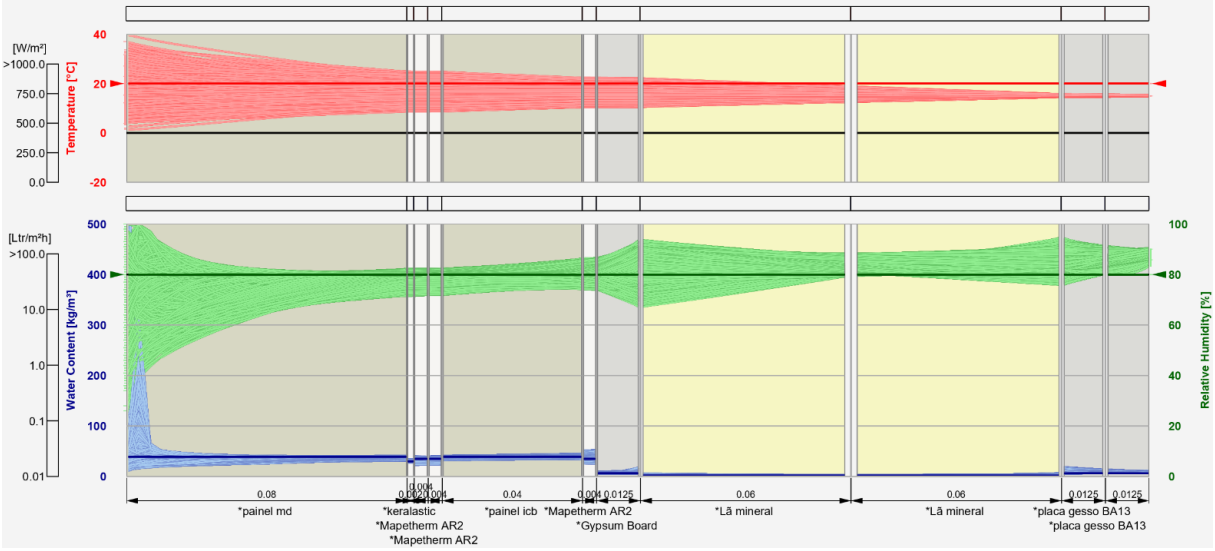


Figura 4.8 - *Film View* do painel WS4 ao longo do ano, em Lisboa

No painel WS4, a posição mais desfavorável localiza-se na zona exterior do painel de cortiça, onde o *film view* mostra valores relativamente elevados de humidade relativa ao longo da espessura, atingindo a saturação na superfície exterior e numa pequena espessura adjacente.

A figura 4.9 apresenta os perfis anuais de temperatura do ar e humidade relativa no ponto 0,1472m da espessura do painel WS4, correspondente à posição entre a lã mineral e o gesso.



Figura 4.9 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS4, em Lisboa

Na figura 4.9 o gráfico anual de humidade relativa no ponto 0,1472 m mostra um comportamento semelhante aos painéis anteriores, mas ligeiramente menos extremo: a HR começa acima de 85–90%, mantém-se na faixa dos 80% durante o inverno e início da primavera e desce lentamente até cerca de 60–65% nos meses mais quentes. No fim do verão e outono, os valores voltam a subir para a gama dos 80–90%, indicando que, também aqui, a interface gesso/lã mineral passa grande parte do ano com humidade elevada e apenas um período relativamente curto em condições mais secas.

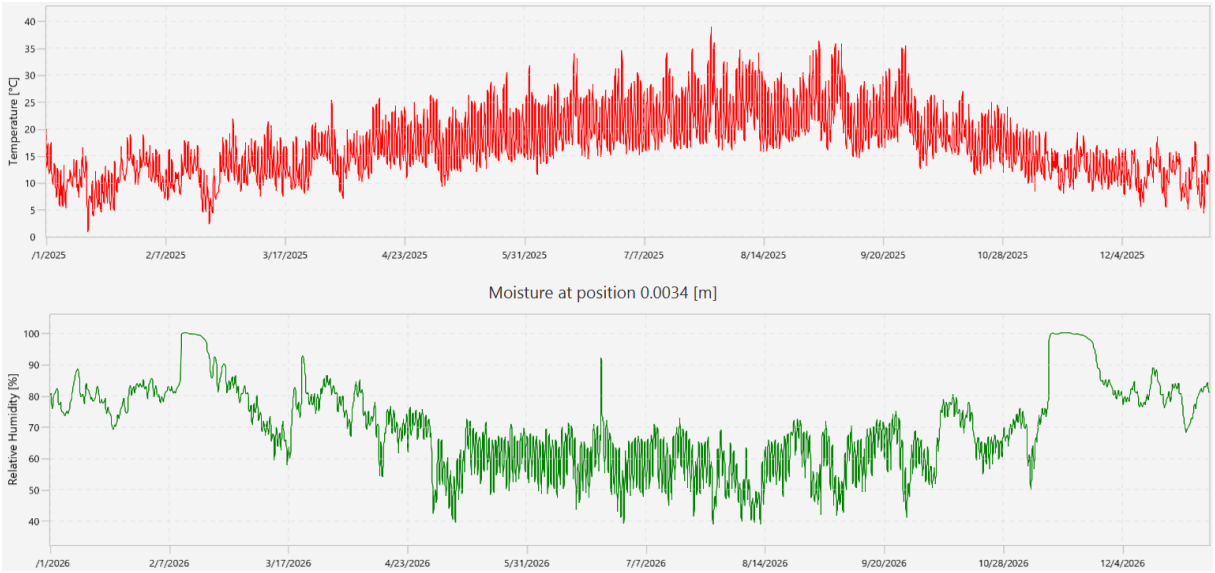


Figura 4.10 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS4, em Lisboa

Na figura 4.10 confirma que esta zona corresponde claramente ao ponto mais crítico do painel WS4. A humidade relativa oscila entre aproximadamente 40 % e 90 %, com episódios pontuais em que atinge valores de 100 %, evidenciando fases de vários dias em que se verificam condensações. Estas oscilações rápidas e os picos de humidade, demonstram que é nesta zona interior do painel de cortiça que se concentram as condições mais desfavoráveis do ponto de vista higrotérmico, justificando a identificação desta posição como o ponto crítico do WS4 na avaliação do comportamento da solução de fachada.

4.2.2 Resultados para o clima de Guimarães

4.2.2.1 Análise de resultados do painel WS1

A figura 4.11 mostra a evolução anual de temperatura, teor de humidade e humidade relativa nas camadas do painel WS1 para o clima de Guimarães.

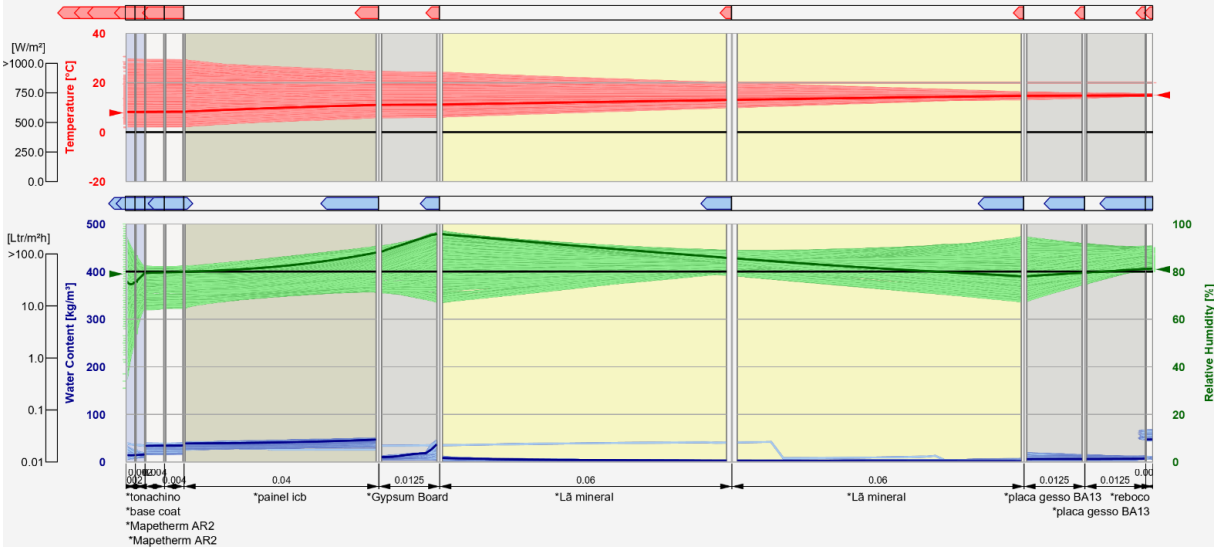


Figura 4.11 - *Film View* do painel WS1 ao longo do ano, em Guimarães

Tal como no caso do clima de referência anterior, a zona mais desfavorável continua a localizar-se na interface entre a placa de gesso laminado e a lã mineral, onde se observam valores mais elevados de humidade relativa ao longo do ano. Comparando os resultados para Lisboa e Guimarães, observa-se que, embora a interface entre a placa de gesso e a lã mineral se mantenha como ponto crítico, a banda de humidade relativa para o clima de Guimarães é ligeiramente mais fina, o que indica uma variação menos intensa da humidade relativa. Este comportamento resulta da interação entre as condições exteriores específicas de cada clima e a configuração das camadas do painel, podendo reduzir marginalmente a duração dos períodos em que a humidade relativa se aproxima da saturação, sem eliminar o risco de condensações.

A figura 4.12 apresenta os perfis anuais de temperatura do ar e humidade relativa no ponto 0,0651m da espessura do painel WS1, correspondente à posição mais desfavorável identificada na análise da figura 4.9, permitindo avaliar o risco de condensações ao longo do ano.



Figura 4.12 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS1, em Guimarães

Na figura 4.12, o gráfico anual de humidade relativa no ponto 0,0651 m confirma o comportamento crítico identificado para o painel WS1 em Guimarães. A HR inicia-se em valores muito elevados, próximos de 90%, e permanece maioritariamente na faixa dos 80–90% durante o inverno e o início da primavera, indicando um risco significativo de condensações na zona interior do painel. Durante o período mais quente verifica-se uma descida gradual para cerca de 60–65%, reduzindo temporariamente esse risco, antes de os valores voltarem a subir no final do verão e outono, aproximando-se novamente da saturação.

4.2.2.2 Análise de resultados do painel WS2

A figura 4.13 mostra a evolução anual de temperatura, teor de humidade e humidade relativa nas camadas do painel WS2 para o clima de Guimarães.

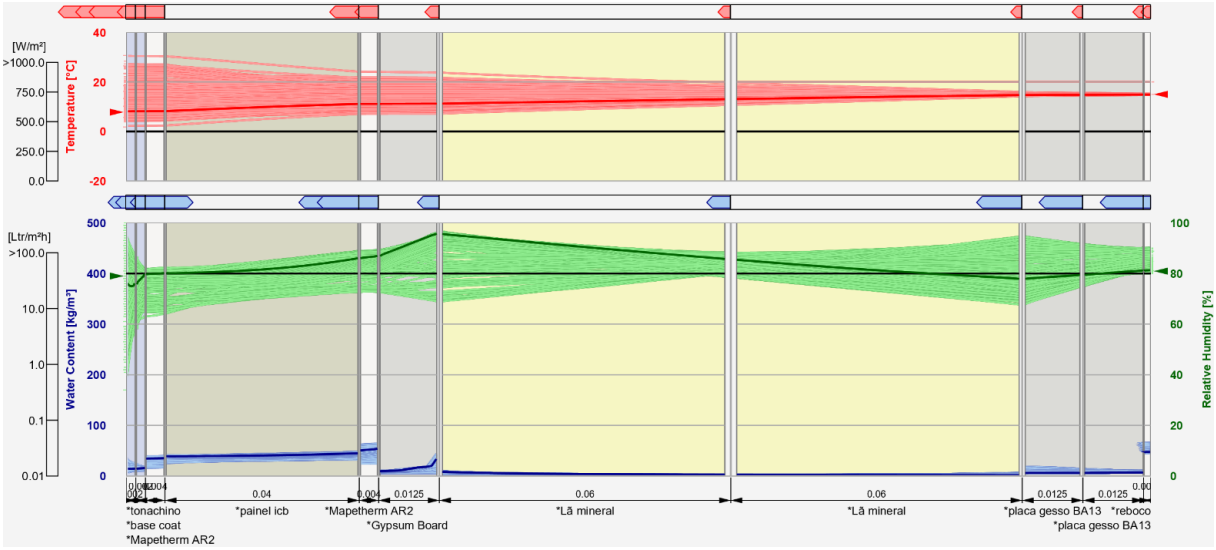


Figura 4.13 - *Film View* do painel WS2 ao longo do ano, em Guimarães

Tal como no clima de Lisboa, a posição mais desfavorável volta a localizar-se na interface entre a placa de gesso laminado e a lã mineral, onde se concentram os valores mais elevados de humidade relativa ao longo do ano. No entanto, para o clima de Guimarães a banda de humidade relativa apresenta uma ligeira redução de espessura em comparação com Lisboa, o que indica uma variação menos intensa da humidade relativa.

A figura 4.14 apresenta os perfis anuais de temperatura do ar e humidade relativa no ponto 0,0651m da espessura do painel WS2, correspondente à posição mais desfavorável identificada na análise da figura 4.13, permitindo avaliar o risco de condensações ao longo do ano.



Figura 4.14 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS2, em Guimarães

Na figura 4.14, o gráfico anual de humidade relativa no ponto 0,0651 m confirma o comportamento crítico identificado para o painel WS2 no clima de Guimarães. A HR inicia-se em valores muito elevados, próximos de 90–95%, e mantém-se maioritariamente na faixa dos 80–90% durante o inverno e o início da primavera, indicando um risco significativo de condensações intersticiais na interface entre a placa de gesso e a lã mineral.

Tal como no painel WS1, este padrão evidencia uma tendência de acumulação de humidade ao longo do ano neste ponto crítico, embora com ligeiras diferenças na intensidade da variação em função da configuração específica do painel WS2.

4.2.2.3 Analise de resultados do painel WS3

A figura 4.13 mostra a evolução anual de temperatura, teor de humidade e humidade relativa nas camadas do painel WS3 para o clima de Guimarães.

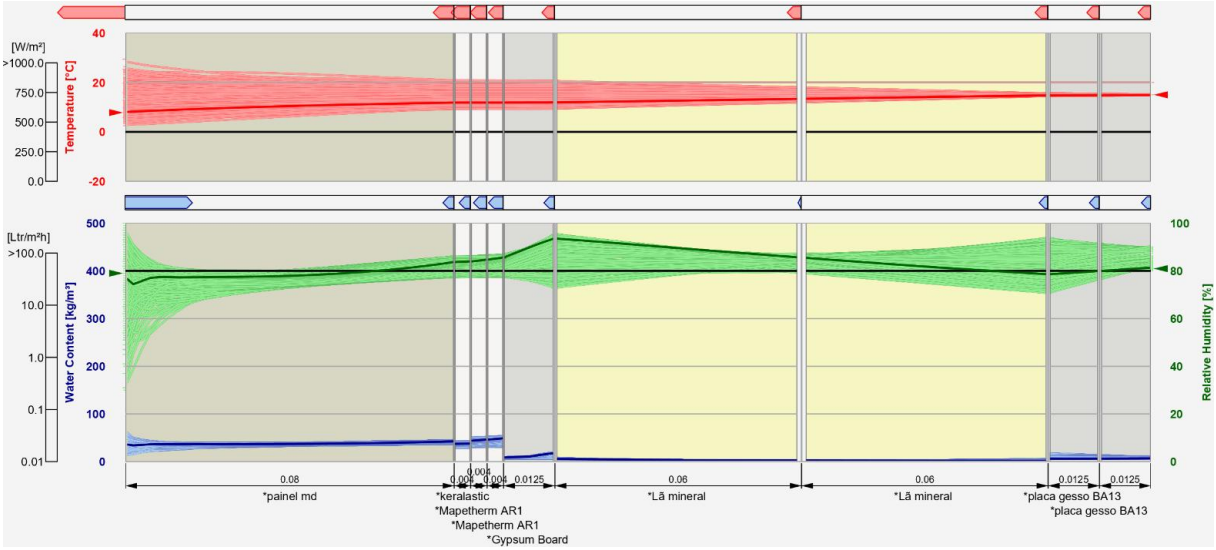


Figura 4.15 - *Film View* do painel WS3 ao longo do ano, em Guimarães

No *film view* correspondente ao painel WS3 para o clima de Guimarães observa-se que a distribuição de humidade relativa ao longo da espessura da fachada continua a evidenciar um máximo na zona interior, entre a lã mineral e as placas de gesso. Nesta região, os valores de humidade relativa mantêm-se elevados durante praticamente todo o ano, com bandas próximas de 90 %.

No *film view* do WS3 é importante realçar que o comportamento em Guimarães resulta de condições climáticas diferentes das consideradas para Lisboa, em particular no que respeita à chuva. Enquanto o ficheiro climático de Lisboa incluía dados de precipitação, permitindo simular explicitamente a ação da chuva sobre a camada exterior da fachada, o ficheiro utilizado para Guimarães não contém essa informação, pelo que a molhagem da envolvente é representada apenas pelos fluxos de vapor e pelas condições de humidade do ar exterior.

A figura 4.16 apresenta os perfis anuais de temperatura do ar e humidade relativa no ponto 0,1050m da espessura do painel WS3, correspondente à posição mais desfavorável identificada na análise da figura 4.15, permitindo avaliar o risco de condensações ao longo do ano.

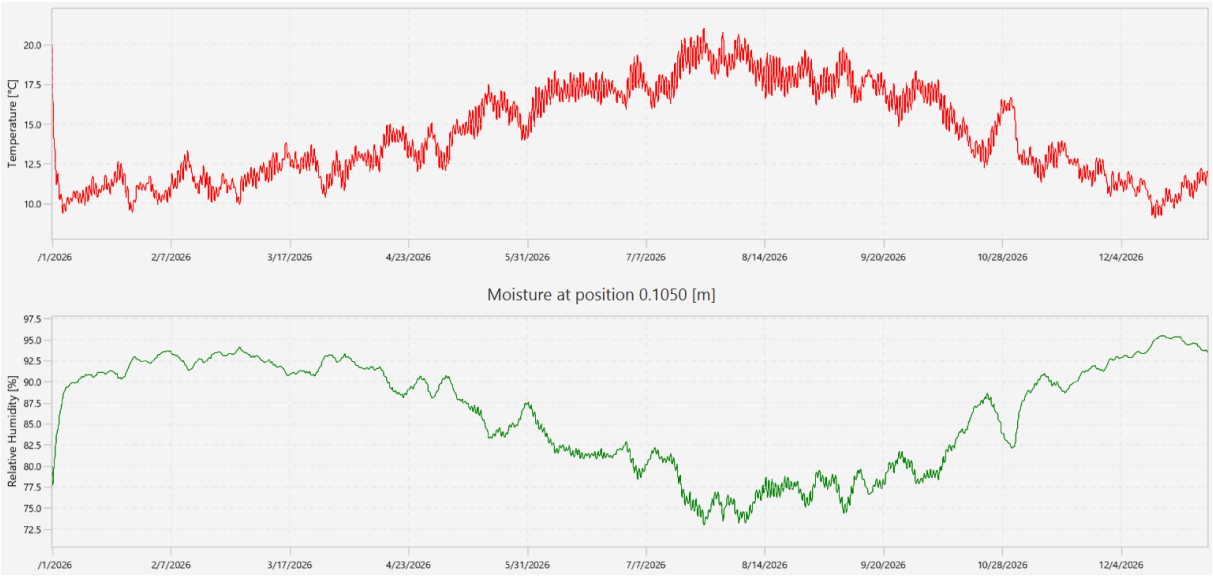


Figura 4.16 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS3, em Guimarães

A humidade relativa permanece muito elevada, situando-se maioritariamente entre 85 % e 95 % durante o período frio e apenas descendo para valores da ordem dos 75–80 % nos meses de verão, antes de voltar a subir no final do ano. Este gráfico confirma que esta posição trabalha próxima da saturação durante grande parte do ano, reforçando a identificação da zona interior do WS3 como ponto crítico de funcionamento em clima húmido.

4.2.2.4 Análise de resultados do painel WS4

A figura 4.17 mostra a evolução anual de temperatura, teor de humidade e humidade relativa nas camadas do painel WS4 para o clima de Guimarães.

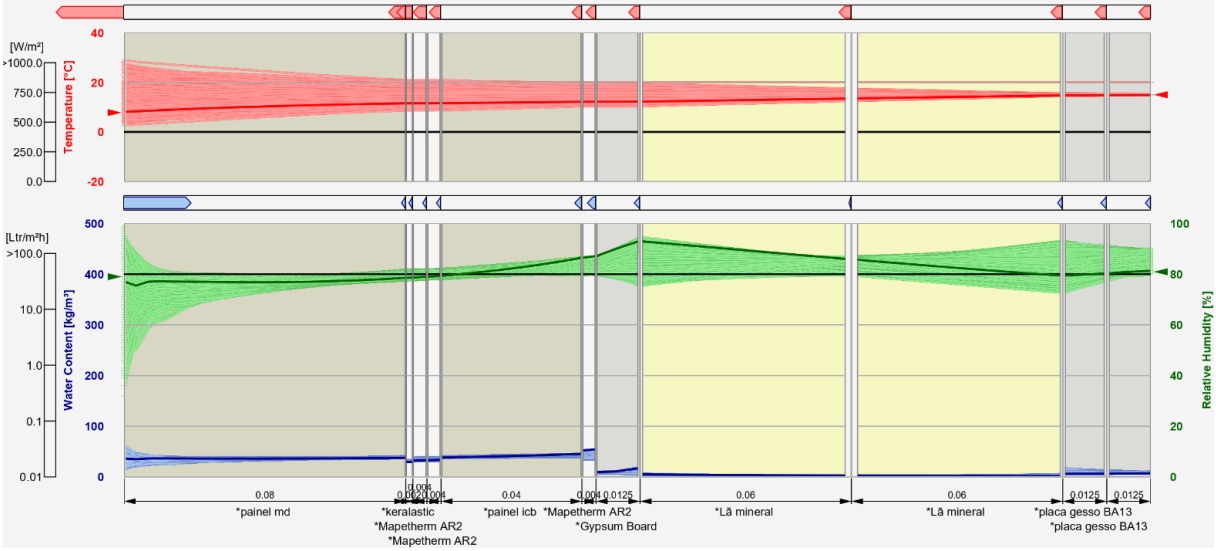


Figura 4.17 - *Film View* do painel WS4 ao longo do ano, em Guimarães

Na figura 4.17 observa-se que a humidade relativa se mantém semelhante ao WS3 evidenciando um ponto crítico entre a lã mineral e a placa de gesso.

A figura 4.18 apresenta os perfis anuais de temperatura do ar e humidade relativa no ponto 0,1472m da espessura do painel WS4, correspondente à posição mais desfavorável identificada na análise da figura 4.17, permitindo avaliar o risco de condensações ao longo do ano.

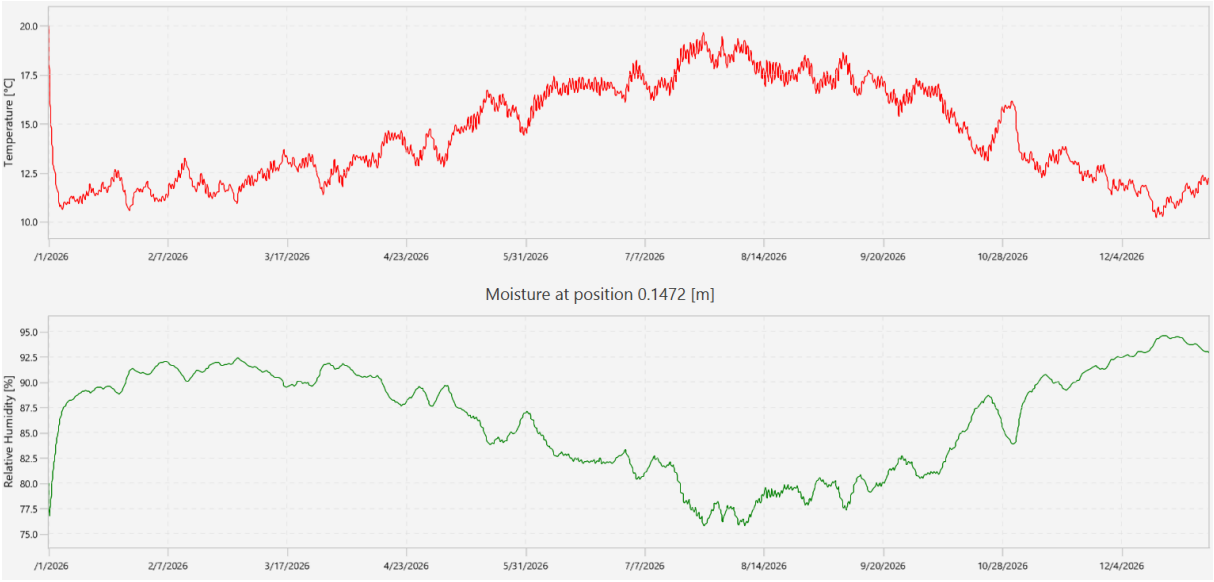


Figura 4.18 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS4, em Guimarães

Na figura 4.18 observa-se que a humidade relativa mantém-se maioritariamente entre cerca de 80 % e 95 %, com valores mais próximos da saturação durante o inverno e o final do período de simulação, descendo apenas para cerca de 75–80 % nos meses mais quentes. Esta evolução é relativamente suave, sem picos bruscos, o que indica que a humidade nesta zona resulta do carácter húmido do clima de Guimarães e da difusão de vapor através da solução. Em termos de avaliação higrotérmica, o gráfico confirma que esta posição continua a ser sensível, pela permanência prolongada em níveis elevados de humidade relativa, embora não se evidenciem estados de saturação persistente que agravem de forma crítica o risco de condensações.

4.2.3 Resultados para o clima de Mirandela

4.2.3.1 Analise de resultados do painel WS1

A figura 4.19 mostra a evolução anual de temperatura, teor de humidade e humidade relativa nas camadas do painel WS1 para o clima de Mirandela.

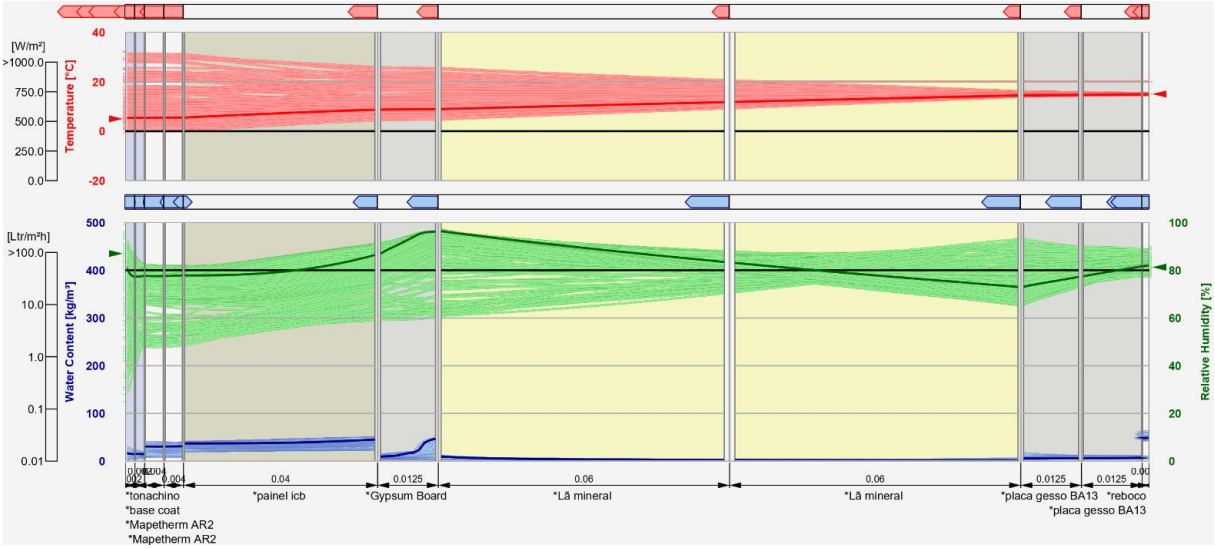


Figura 4.19 - *Film View* do painel WS1 ao longo do ano, em Mirandela

Na figura 4.19, nas bandas de humidade relativa é possível observar que no clima de Mirandela temos os valores mais altos da humidade relativa na interface entre o isolamento e a placa de gesso exterior.

A figura 4.20 apresenta os perfis anuais de temperatura do ar e humidade relativa no ponto 0,0651m da espessura do painel WS1, correspondente à posição mais desfavorável identificada na análise da figura 4.19, permitindo avaliar o risco de condensações ao longo do ano.



Figura 4.20 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS1, em Mirandela

Na figura 4.20 é possível ver que o gráfico de humidade relativa na posição 0,0651 m para Mirandela evidencia um ciclo sazonal claro. No início do ano, a humidade relativa é muito elevada, próxima de 95–100 %, mas vai diminuindo de forma gradual até atingir valores mínimos na ordem dos 55–60 % durante o verão, voltando depois a subir no final do período de simulação.

4.2.3.2 Analise de resultados do painel WS2

A figura 4.21 mostra a evolução anual de temperatura, teor de humidade e humidade relativa nas camadas do painel WS2 para o clima de Mirandela.

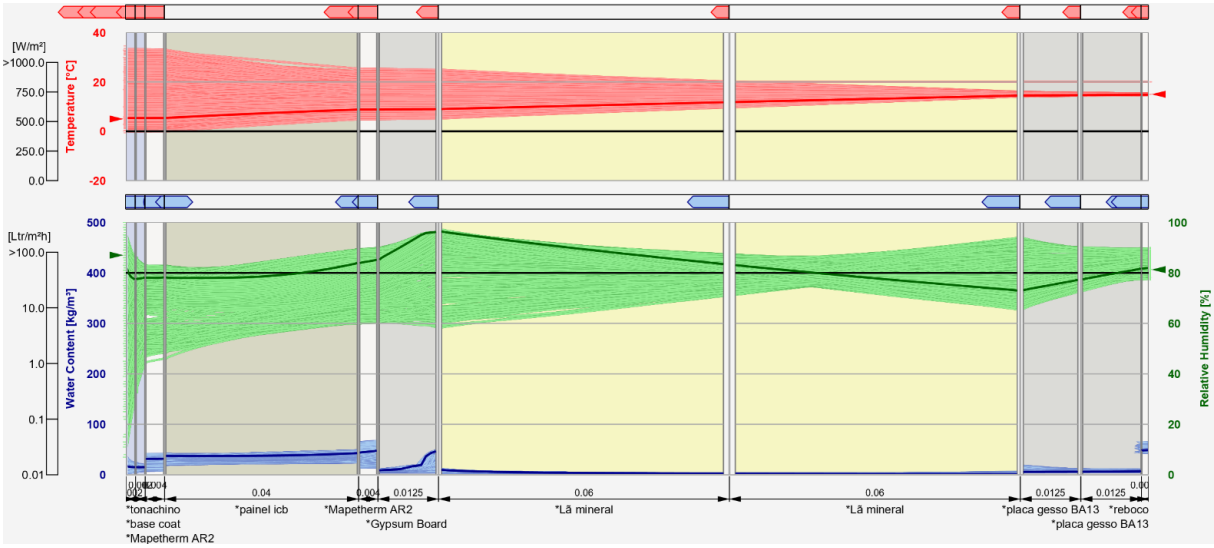


Figura 4.21 - *Film View* do painel WS2 ao longo do ano, em Mirandela



Figura 4.22 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS2, em Mirandela

Na figura 4.22 é possível analisar que no início do ano, a humidade relativa está próxima da saturação, com valores entre 95 % e 100 %, indicando uma fase inicial bastante húmida. À medida que a temperatura exterior aumenta, a HR vai diminuindo de forma contínua até atingir mínimos na ordem dos 55–60 % durante o verão, o que evidencia uma boa fase de secagem da camada analisada. No final do período de simulação, a humidade volta a subir, regressando a valores próximos de 95–100 %.

4.2.3.3 Analise de resultados do painel WS3

A figura 4.23 mostra a evolução anual de temperatura, teor de humidade e humidade relativa nas camadas do painel WS3 para o clima de Mirandela.

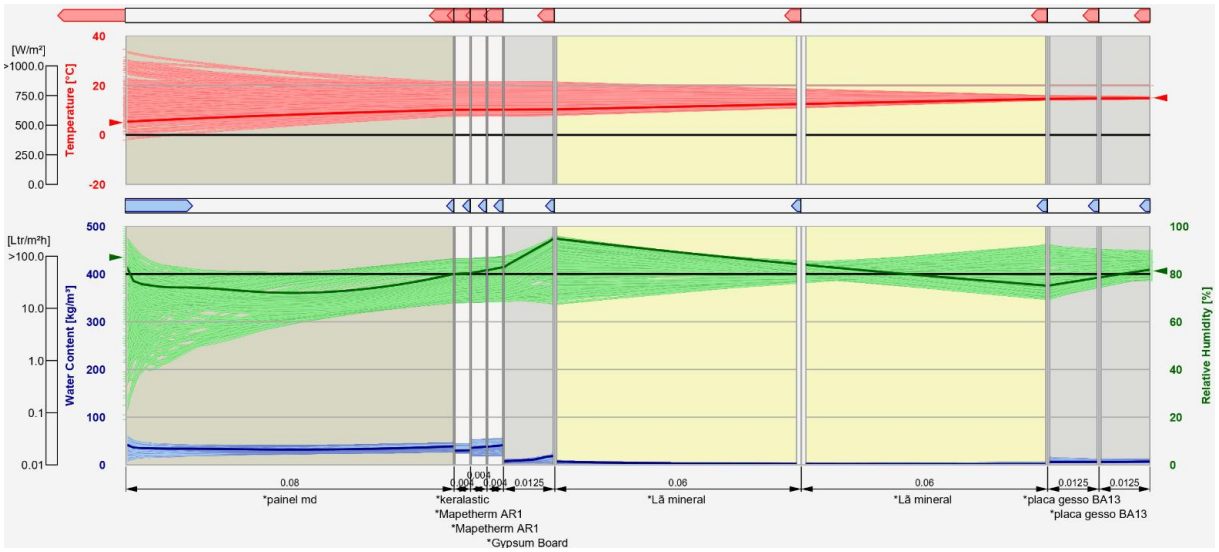


Figura 4.23 - *Film View* do painel WS3 ao longo do ano, em Mirandela

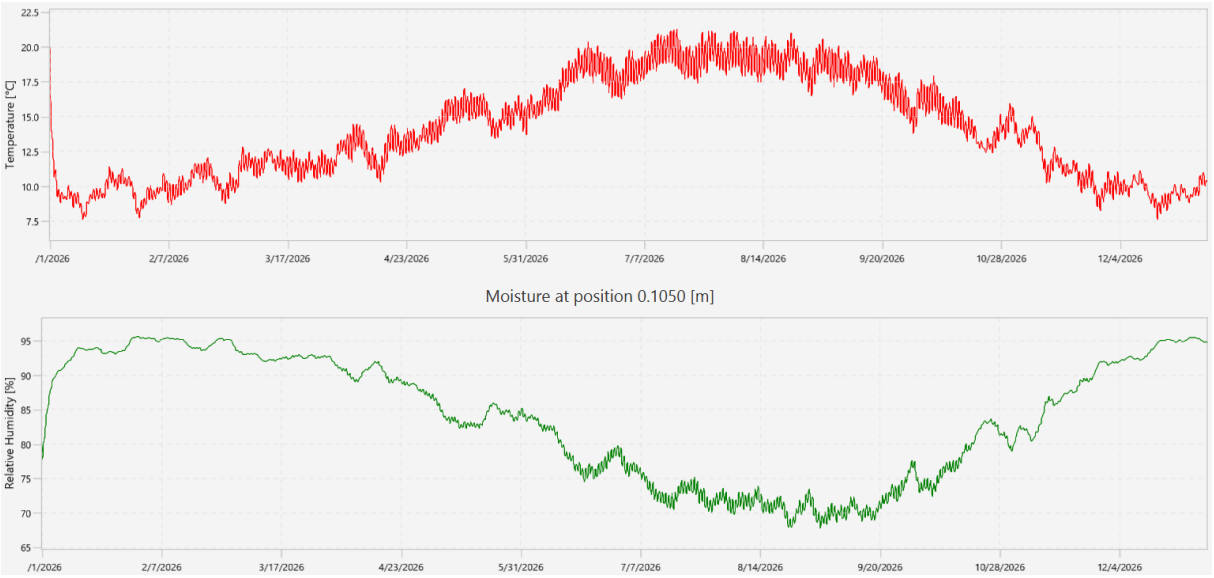


Figura 4.24 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS3, em Mirandela

Na figura 4.24 a humidade relativa começa o ano muito elevada, próxima de 95 %, mantendo-se acima de 85–90 % durante o período frio, mas diminui de forma gradual até valores mínimos na ordem dos 65–70 % durante o verão, antes de voltar a subir para cerca de 90–95 % no final da simulação. Este ciclo indica que, em Mirandela, a zona interior do WS3 continua a ser bastante húmida no inverno, mas beneficia de uma fase de secagem mais marcada nos meses quentes.

4.2.3.4 Analise de resultados do painel WS4

A figura 4.25 mostra a evolução anual de temperatura, teor de humidade e humidade relativa nas camadas do painel WS4 para o clima de Mirandela.

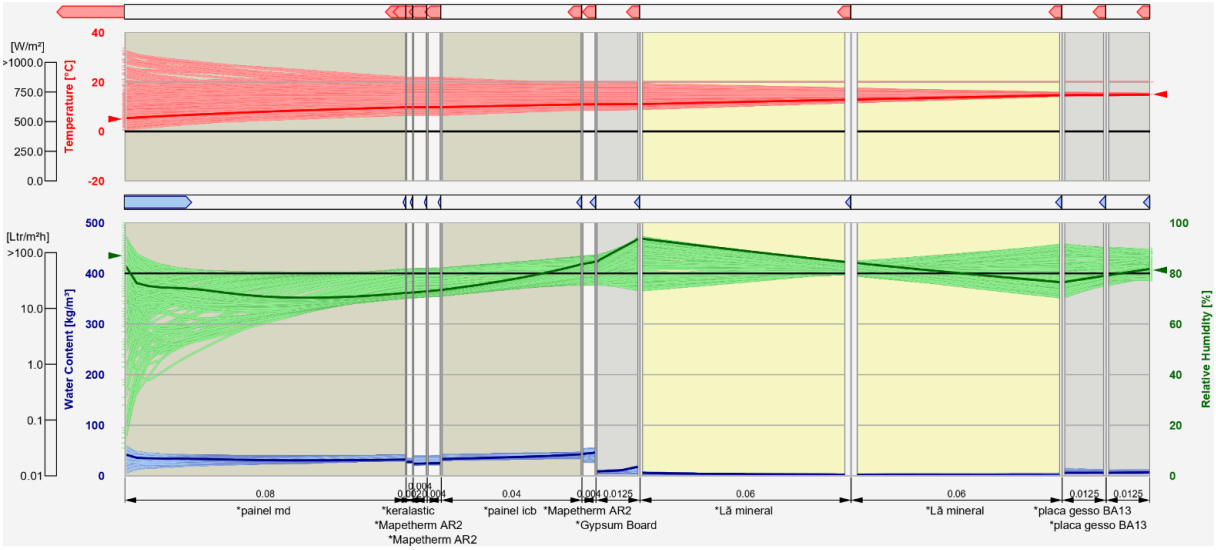


Figura 4.25 - *Film View* do painel WS4 ao longo do ano, em Mirandela

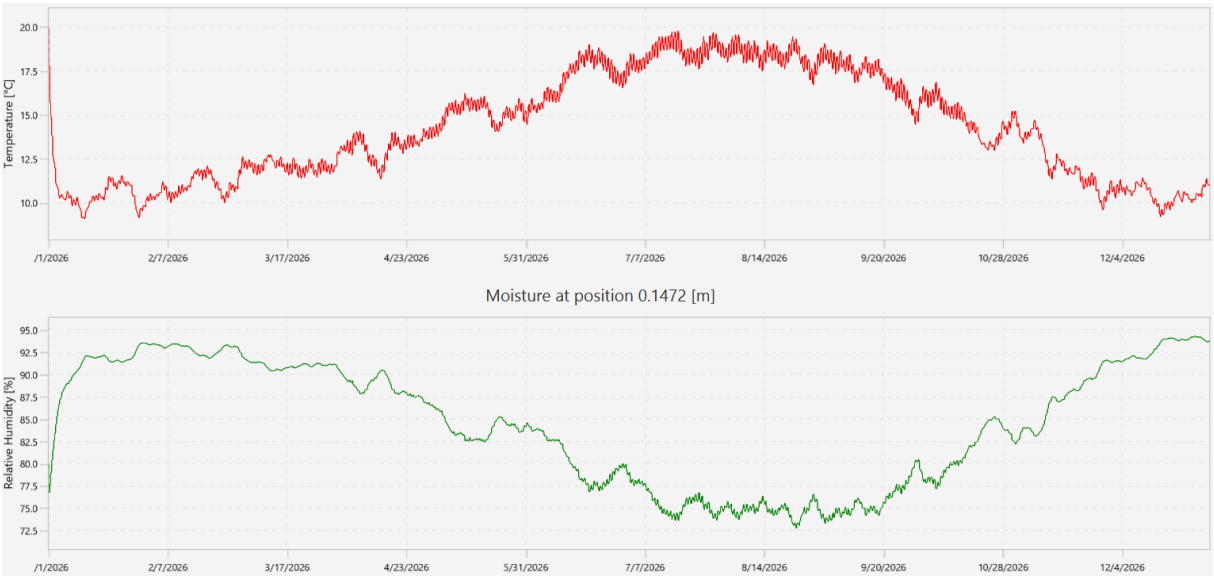


Figura 4.26 - Variação anual de temperatura e humidade relativa no ponto crítico do painel WS4, em Mirandela

Na figura 4.26 a humidade relativa começa o ano muito elevada, próxima de 90–95 %, mas desce de forma gradual até valores mínimos na ordem dos 70–75 % durante o verão, antes de voltar a subir para cerca de 90–95 % no final da simulação. Este ciclo evidencia que, em Mirandela, a zona interior do WS4 continua húmida no inverno, mas usufrui de uma fase de secagem significativa nos meses quentes, semelhante ao WS3, beneficiando adicionalmente da presença da cortiça exterior, que ajuda a estabilizar ainda mais o comportamento higrotérmico global da fachada.

4.2.4 Comparação global dos resultados

De forma geral, os resultados da avaliação do desempenho higrotérmico mostram que todos os painéis apresentam zonas críticas localizadas nas interfaces entre materiais de natureza distinta, em particular entre as placas de gesso e as camadas de isolamento, onde se combinam temperaturas relativamente baixas com valores elevados de humidade relativa durante uma parte significativa do ano. Nos diferentes climas considerados, estas interfaces tendem a ser os pontos mais desfavoráveis, já que acompanham a descida da temperatura ao longo da espessura do painel, mantendo simultaneamente níveis de humidade que se aproximam com frequência de valores elevados, o que se traduz numa situação de maior risco de ocorrência de condensações internas e consequente degradação do painel.

A única exceção foi o painel WS4 para o clima de Lisboa onde o ponto crítico está localizado perto da face exterior do painel de cortiça. De importante referir que este foi o único painel que apresentou valores de 100% de humidade relativa em zonas interiores dos seus materiais.

A análise dos gráficos de temperatura ao longo do ano evidencia que os painéis conseguem atenuar de forma consistente as amplitudes térmicas diárias, mas revelam diferenças na forma como cada solução gere esse amortecimento e no nível médio de temperatura nas camadas interiores.

Nos gráficos de humidade relativa, verifica-se em todos os painéis um padrão comum: valores muito elevados no início do período de simulação, seguidos de uma descida gradual durante a fase mais quente e seca, com novo aumento à medida que se regressa às condições de outono e inverno. A diferença entre soluções traduz-se sobretudo na rapidez com que a humidade relativa desce para intervalos mais moderados e nos valore mínimos atingidos no Verão.

Comparando as quatro soluções analisadas podemos ver que apresentam um comportamento higrotérmico globalmente semelhante entre si, mas cujo desempenho efetivo difere significativamente em função das especificidades de cada clima. A grande exceção a esta tendência ocorreu no painel WS4 para o clima de Lisboa, que foi a única solução em todo o estudo a registar a ocorrência de condensações intersticiais (atingindo pontualmente 100% de humidade relativa). Este fenómeno justifica-se pelo facto de o ficheiro climático de Lisboa utilizado nas simulações possuir o registo de precipitação, parâmetro ausente nos ficheiros de Guimarães e Mirandela, o que, aliado à composição material mais sensível do painel WS4 nas camadas exteriores, conduziu à saturação. De uma forma geral o painel com um melhor desempenho foi o WS3, uma vez que apresenta um comportamento mais controlado dos valores de humidade ao longo de todos os climas analisados. Assim, comprova-se que a viabilidade destas soluções de fachada não se prende apenas com a organização interna das camadas, estando fortemente dependente das condições exteriores a que são expostos.

4.2.5 Solução com barreira para-vapor para o painel WS2

Neste capítulo aprofunda-se o estudo do desempenho higrotérmico do painel WS2 através da introdução de uma barreira para-vapor aplicada pelo lado interior da solução de fachada, entre as placas de gesso. O objetivo principal desta modificação é perceber até que ponto adicionar esta barreira vai diminuir os valores de humidade relativa e de que forma o painel se vai comportar. Para avaliar a eficácia da barreira para-vapor, foram realizadas novas simulações numéricas para os diferentes climas considerados anteriormente para o painel WS2. A comparação entre os resultados com e sem barreira permite verificar em que medida esta solução contribui para diminuir o risco de condensações e melhorar a durabilidade do painel.

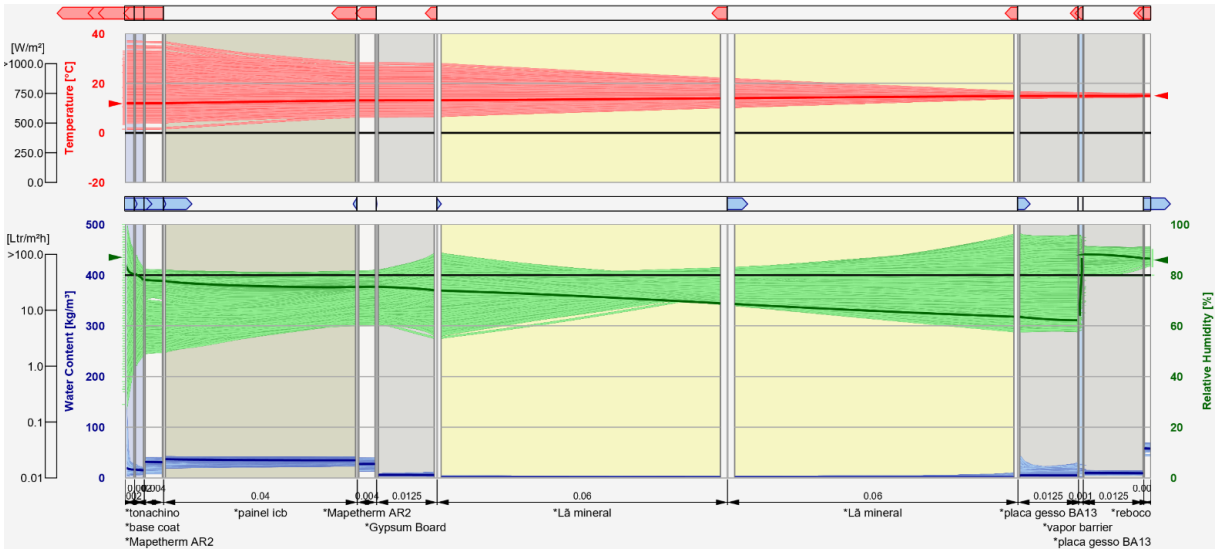


Figura 4.27 - *Film View* do painel WS2 ao longo do ano para a solução com barreira para-vapor, em Lisboa

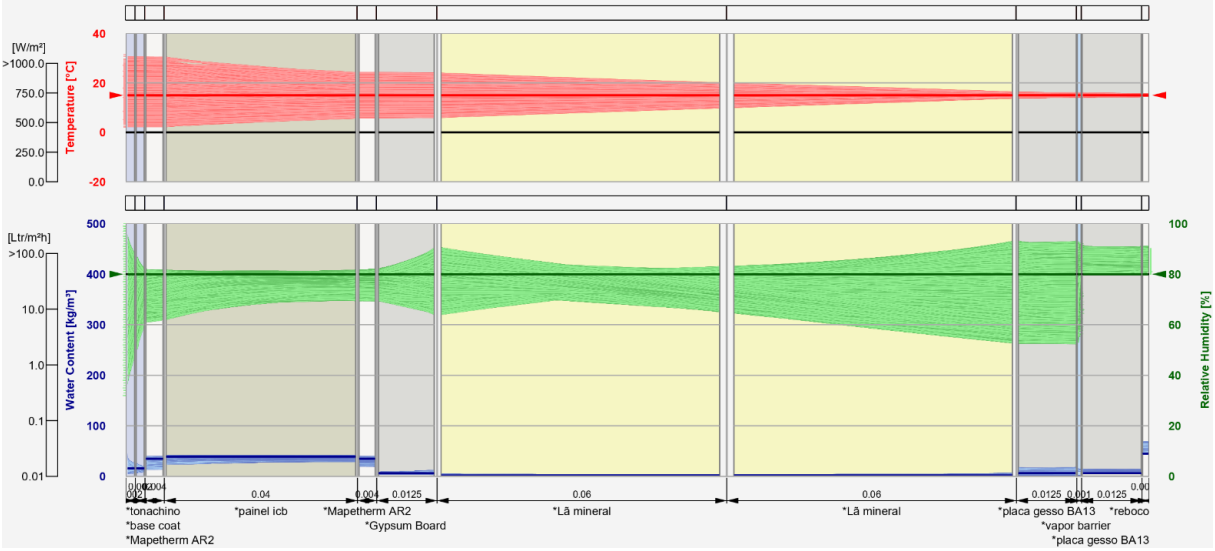


Figura 4.28 - *Film View* do painel WS2 ao longo do ano para a solução com barreira para-vapor, em Guimarães

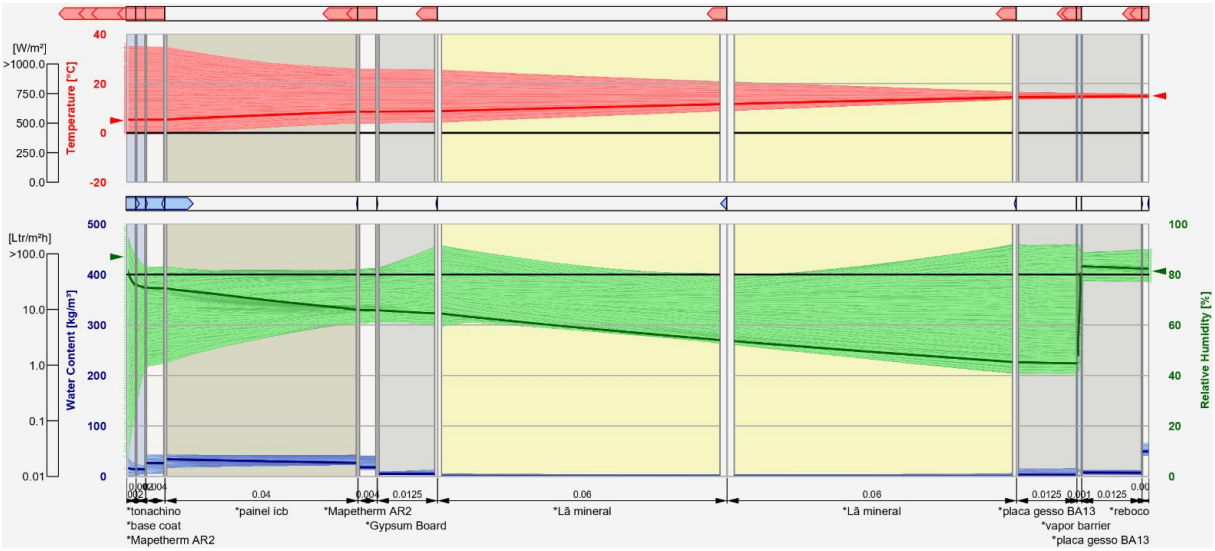


Figura 4.29 - *Film View* do painel WS2 ao longo do ano para a solução com barreira para-vapor, em Mirandela

A introdução da barreira para-vapor no painel WS2 revelou-se eficaz na redução dos níveis de humidade relativa nas zonas mais críticas da parede para os três climas estudados. Em Lisboa, Guimarães e Mirandela observa-se, nos *film views*, uma diminuição clara dos valores máximos de HR, bem como um estreitamento das faixas de variação ao longo do ano na maioria dos materiais, sendo a placa de gesso do lado esquerdo da barreira para-vapor a única exceção uma vez que aí existe um aumento controlado dos valores de HR.

De forma global, os resultados mostram que a barreira para-vapor cumpre o objetivo de limitar a difusão de vapor proveniente do ambiente interior, reduzindo o risco de condensações internas no painel WS2 sem penalizar o desempenho térmico da solução. Assim, esta medida constitui uma melhoria para todos os cenários climáticos considerados, contribuindo para uma maior durabilidade e segurança higrotérmica do painel WS2.

4.2.6 Solução com caixa de ar para o clima de Mirandela

Para além da análise das soluções-base de fachada, considerou-se importante encontrar estratégias complementares que possam melhorar o comportamento térmico dos painéis em condições climáticas mais exigentes, em particular durante o período de verão, do dia 1 de junho a 31 de agosto. Neste contexto, este capítulo apresenta uma análise adicional aplicada ao painel WS2 para o clima de Mirandela, procurando avaliar o efeito da introdução de uma caixa de ar e de um regime de ventilação noturna controlada no desempenho da solução.

A opção por esta abordagem resulta da necessidade de compreender até que ponto pequenas alterações construtivas, sem modificar os materiais constituintes do painel, podem contribuir para arrefecer o painel no verão, contribuindo para evitar o sobreaquecimento do ambiente interior. Para esse efeito, foi simulada uma variante do painel WS2 em que se introduziu uma caixa de ar associada a um ficheiro de ventilação, admitindo a abertura de grelhas de ventilação entre as 21h e as 9h, com uma taxa de 60 renovações por hora, e o seu encerramento durante o período diurno. Foi também considerado para clima interior uma variação sinusoidal da temperatura interior com um mínimo de 24º e um máximo de 28º.

A análise incide, assim, na comparação entre duas configurações do mesmo painel e para as mesmas condições climáticas: uma solução com caixa de ar ventilada apenas durante a noite e outra sem caixa de ar e sem renovações de ar. Pretende-se, deste modo, avaliar se esta estratégia apresenta potencial para melhorar o comportamento de verão do sistema, nomeadamente ao nível da evolução da temperatura e da humidade relativa e discutir a relevância da sua eventual aplicação no desenvolvimento futuro de soluções LSF mais adaptadas a contextos climáticos severos. Este estudo foi feito no âmbito de um projeto que estuda a introdução do conceito de isolamento dinâmico em paredes e painéis de fachada.

A figura 4.30 é a vista em *film view* da solução WS2 sem caixa de ar, mostrando a distribuição da temperatura, do teor de humidade e da humidade relativa ao longo da espessura da fachada em condições de verão em Mirandela.

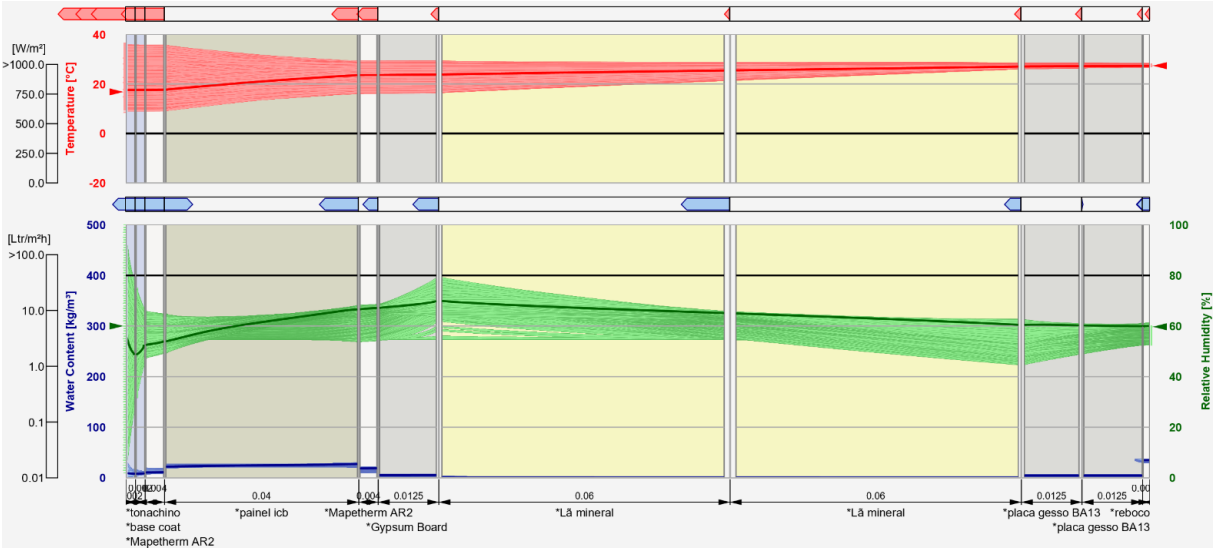


Figura 4.30 - Distribuição da temperatura, teor de humidade e humidade relativa no painel WS2 sem caixa de ar, Mirandela (verão)

A figura 4.31 consiste na representação temporal, ao longo do período de verão, da temperatura e da humidade relativa na parte interior da solução de fachada WS2, na configuração sem caixa de ar e sem renovações de ar.

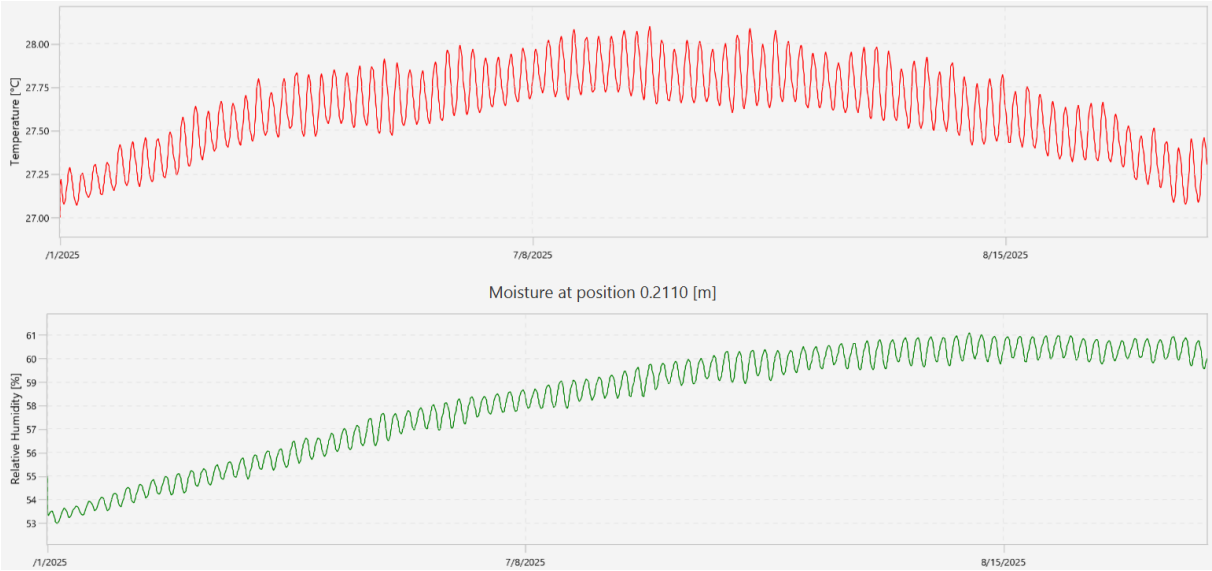


Figura 4.31 - Evolução da temperatura e da humidade relativa no painel WS2 sem caixa de ar, Mirandela (verão)

A figura 4.32 apresenta a vista em *film view* da solução WS2 com caixa de ar ventilada, mostrando a distribuição da temperatura, do teor de humidade e da humidade relativa ao longo da espessura da fachada em condições de verão em Mirandela.

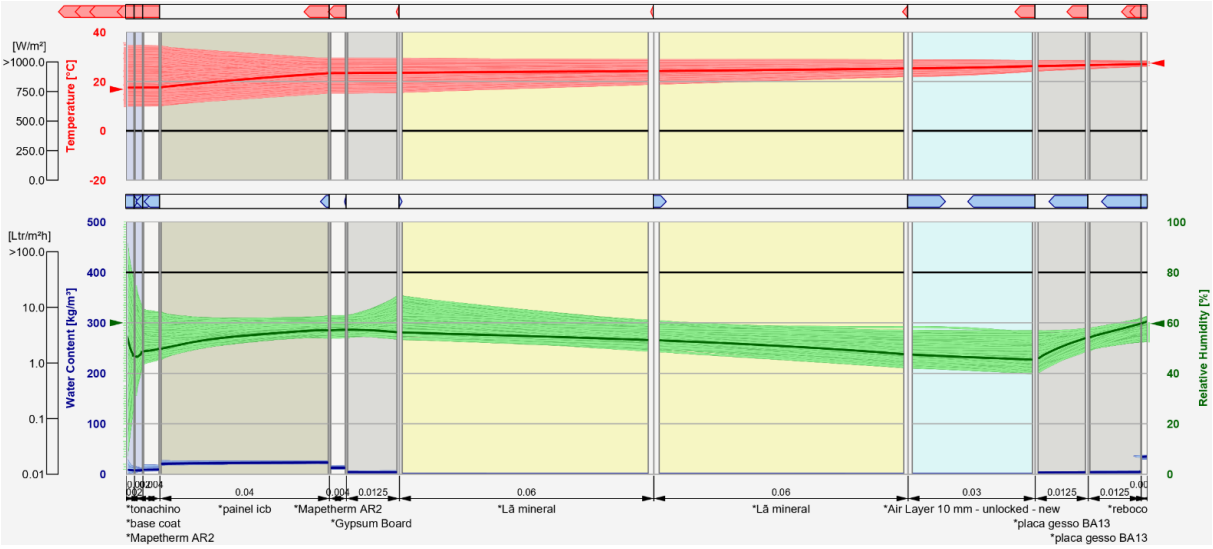


Figura 4.32 - Distribuição da temperatura, teor de humidade e humidade relativa no painel WS2 com caixa de ar ventilada, Mirandela (verão)

A figura 4.33 consiste na representação temporal, ao longo do período de verão, da temperatura e da humidade relativa na parte interior da solução de fachada WS2, na configuração com caixa de ar e com renovações de ar.



Figura 4.33 - Evolução da temperatura e da humidade relativa no painel WS2 com caixa de ar ventilada, Mirandela (verão)

No cenário do painel sem caixa de ar, a temperatura na face interna da placa de gesso cartonado apresenta uma oscilação diária relativamente reduzida. Devido à forte espessura de isolamento térmico contínuo (120 mm de lã mineral e 40 mm de cortiça expandida ICB), o calor gerado no ambiente interno, modelado sob um cenário exigente de variação sinusoidal entre 24 °C e 28 °C, fica retido na massa do gesso. Sem uma via de dissipação, a superfície interna permanece aquecida de forma quase contínua, estabilizando no pico do verão (meses de julho e agosto) no limite superior de 28,0 °C e com patamares mínimos noturnos que raramente descem abaixo dos 27,25 °C.

Com a integração da caixa de ar e a ativação do perfil de ventilação noturna de 60 Rph, a dinâmica térmica da face interna altera-se, registando-se um aumento da amplitude térmica diária (alargamento vertical do gráfico da figura 4.34). Durante a noite, a introdução forçada do ar exterior de Mirandela (mais frio) na caixa de ar remove o calor acumulado na placa de gesso por convecção. Este fenómeno permite que a temperatura mínima da superfície interna baixe de forma cíclica para valores entre os 26,50 °C e os 27,25 °C, gerando um ganho real de arrefecimento noturno na ordem dos 0,5 °C a 1 °C durante todo o verão.

Em suma, a comparação dos modelos demonstra que a adição de uma caixa de ar associada a um perfil de renovações horárias noturnas é uma solução tecnicamente viável e recomendável para o sistema LSF no clima de verão de Mirandela. Embora o isolamento trave um arrefecimento profundo de todo o núcleo da parede, a estratégia é eficaz para o aumento do conforto do utilizador, uma vez, que reduz a temperatura da face interior do painel.

4.3 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO AMBIENTAL

4.3.1 GWP Total por Solução de Fachada

Tabela 4.1 - Contribuição detalhada de cada material para o Potencial de Aquecimento Global (GWP) do painel WS1

Painel WS1	**Gwp (kg CO_2-eq/m²)**
Quarzolite tonachino plus	1,72
Quarzolite base coat	1,74
Mapetherm AR2	2,83
Mapenet P	2,92
Mapetherm AR2	2,83
Gypcork protect	-5,47
Lã mineral	1,43
Lã mineral	1,43
Gyptec BA13	0,867
Gyptec BA13	0,867
Reboco	0,7
Aço Leve	5,3
Total	**17,17**

Tabela 4.2 - Contribuição detalhada de cada material para o Potencial de Aquecimento Global (GWP) do painel WS2

Painel WS2	**Gwp (kg CO_2-eq/m²)**
Quarzolite tonachino plus	1,72
Quarzolite base coat	1,74
Mapetherm AR2	2,83
Mapenet P	2,92
Painel ICB	-7,92
Mapetherm AR2	2,83
Gyptec protect	2,45
Lã mineral	1,43
Lã mineral	1,43
Gyptec BA13	0,867
Gyptec BA13	0,867
Reboco	0,7
Aço Leve	5,3
Total	**17,17**

Tabela 4.3 - Contribuição detalhada de cada material para o Potencial de Aquecimento Global (GWP) do painel WS3

Painel WS3	**Gwp (kg CO_2-eq/m²)**
Painel md	-15,84
keralastic	3,75
Mapetherm AR1	1,54
Mapenet P	2,92
Mapetherm AR1	1,54
Gyptec protect	2,45
Lã mineral	1,43
Lã mineral	1,43
Gyptec BA13	0,867
Gyptec BA13	0,867
Reboco	0,7
Aço Leve	5,3
Total	**6,96**

Tabela 4.4 - Contribuição detalhada de cada material para o Potencial de Aquecimento Global (GWP) do painel WS4

Painel WS4	**Gwp (kg CO_2-eq/m²)**
Painel md	-15,84
keralastic	3,75
Mapetherm AR1	1,54
Mapenet P	2,92
Painel ICB	-7,92
Mapetherm AR1	1,54
Gyptec protect	2,45
Lã mineral	1,43
Lã mineral	1,43
Gyptec BA13	0,867
Gyptec BA13	0,867
Reboco	0,7
Aço Leve	5,3
Total	**-0,96**

Observa-se que os produtos de revestimento exterior (por exemplo, *Quarzolite Tonachino Plus*, *Quarzolite Base Coat* e *Mapetherm AR2*) contribuem cada um com cerca de 1,7–2,8 kg CO_2 eq./m², representando uma parcela relevante do GWP total, enquanto a camada *Mapenet P* apresenta um contributo superior a 2,9 kg CO_2 eq./m². Em conjunto, estas camadas assumem um papel significativo no valor final, evidenciando a importância dos produtos de revestimento na avaliação ambiental de painéis de fachada.

Por outro lado, os produtos Gypcork Protect (placa de gesso de alto desempenho com isolamento em aglomerado de cortiça expandida) e o painel ICB (painel de aglomerado de cortiça expandida) apresentam um valor de GWP negativo de cerca de –5,47 kg CO_2 eq./m² e –7,92 kg CO_2 eq./m², respetivamente. Este contributo negativo compensa parcialmente os impactes positivos das restantes camadas, reduzindo o GWP total do painel WS1. As camadas de isolamento em lã mineral e os elementos de revestimento interior em placas de gesso (Gyptec BA13) contribuem com valores mais modestos; na ordem de 1,43 kg CO_2 eq./m² para cada camada de lã mineral e cerca de 0,87 kg CO_2 eq./m² por placa de gesso, enquanto a estrutura em LSF acrescenta aproximadamente 5,3 kg CO_2 eq./m² ao resultado global.

4.3.2 Comparação de Desempenho Ambiental entre Soluções

A comparação ambiental entre as quatro soluções de fachada evidencia diferenças muito significativas no respetivo potencial de aquecimento global por metro quadrado, permitindo identificar com clareza quais os sistemas mais favoráveis do ponto de vista das emissões incorporadas. As soluções WS1 e WS2 apresentam os valores totais mais elevados, ambos na ordem de 17,17 kg CO_2 eq./m², o que demonstra que estas composições concentram os maiores impactes ambientais entre os sistemas analisados. Este resultado decorre sobretudo da contribuição relevante das camadas de acabamento e revestimento exterior, bem como do peso próprio mais elevado, cujos contributos positivos de carbono não são suficientemente compensados pelos materiais com menor impacte presentes na solução.

Em contrapartida, as soluções WS3 e WS4 revelam um desempenho ambiental claramente mais favorável, apresentando valores totais substancialmente inferiores aos das duas primeiras soluções. No caso da WS3, o valor global situa-se em aproximadamente 6,96 kg CO_2 eq./m², refletindo já uma redução muito expressiva do impacte ambiental total. No entanto, é a solução WS4 que se destaca como a mais favorável do conjunto analisado, apresentando o menor valor total, estimado em -0,96 kg CO_2 eq./m², valor negativo que significa que não contribui para o aquecimento global, mas sim para a sua mitigação. Este valor negativo significa que, ao longo do seu ciclo de vida, esta solução retém mais carbono (principalmente devido à cortiça e a outros materiais de base biogénica) do que aquele que é emitido nos processos de produção, transporte, aplicação e fim de vida. Por este motivo, o painel WS4 apresenta o melhor desempenho ambiental global entre todas as soluções de fachada analisadas.

A superioridade ambiental da solução WS4 está diretamente associada à maior incorporação de materiais à base de cortiça, nomeadamente o painel de cortiça expandida e outros componentes com contributo carbónico reduzido ou mesmo negativo. A presença mais significativa destes materiais permite compensar de forma mais eficaz os impactes das restantes camadas do sistema, reduzindo o valor final de GWP por metro quadrado e tornando esta solução particularmente vantajosa numa perspetiva de sustentabilidade.

Em termos comparativos, os resultados confirmam que a escolha dos materiais de revestimento e isolamento tem uma influência decisiva no desempenho ambiental global da fachada, sendo possível obter reduções muito significativas nas emissões incorporadas sem alterar substancialmente a lógica construtiva base do sistema. Neste contexto, a solução WS4 assume-se como a alternativa ambientalmente mais vantajosa, constituindo a opção preferencial entre as quatro soluções analisadas quando o critério de decisão privilegia a minimização do impacte climático associado aos materiais de construção.

4.3.3 Comparação de Desempenho Ambiental Com Soluções Tradicionais

Com o objetivo de contextualizar o desempenho ambiental dos painéis em estudo (WS1 a WS4), foi realizada uma análise comparativa com soluções construtivas tradicionais vulgarmente aplicadas em Portugal. A Tabela 4.5 apresenta os valores do coeficiente de transmissão térmica obtidos para os quatro painéis de estudo.

Tabela 4.5 - Coeficientes de transmissão térmica (U) das soluções de fachada em LSF em estudo

	U (W/m2.ºC)	GWP (kg CO_2-eq/m²)
WS1	0,24	17,17
WS2	0,24	17,17
WS3	0,20	6,96
WS4	0,17	-0,96

As soluções tradicionais adotadas para efeitos de comparação incluem uma configuração de parede simples e outra de parede dupla, baseadas num documento de referência (Bragança et al.). Para que estas soluções atingissem os mesmos patamares de exigência térmica (U) dos painéis LSF, foi necessário calcular e ajustar a espessura da camada de isolamento térmico (EPS – Poliestireno Expandido) a adicionar a cada parede convencional. As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam as espessuras de EPS requeridas e o consequente Potencial de Aquecimento Global (GWP) para as configurações de parede simples e dupla, respetivamente.

Tabela 4.6 - Espessuras de isolamento (EPS) ajustadas e respetivo Potencial de Aquecimento Global (GWP) para a parede simples

U (W/m2.ºC)	EPS (cm)	GWP (ajustado) (kg CO_2-eq/m²)
0,24	14	56,21
0,20	17	58,07
017	20,5	60,25

Tabela 4.7-Espessuras de isolamento (EPS) ajustadas e respetivo Potencial de Aquecimento Global (GWP) para a parede dupla

U (W/m2.ºC)	EPS (cm)	GWP (ajustado) (kg CO_2-eq/m²)
0,24	12,5	101,82
0,20	15,5	103,68
017	19	105,85

A análise destes resultados evidencia uma diferença muito acentuada no desempenho ambiental entre as soluções com LSF em estudo e as soluções construtivas pesadas tradicionais.

Observa-se que, para assegurar o mesmo nível de desempenho térmico as soluções tradicionais requerem um GWP consideravelmente superior. Por exemplo, para um valor de U, a parede simples atinge um GWP na ordem dos 56,21 kg CO_2-eq/m², e a parede dupla agrava significativamente este valor para cerca de 101,82 kg CO_2-eq/m², muito por culpa da duplicação da camada pesada de alvenaria.

Num contraste acentuado, as soluções com LSF (WS1 e WS2) atingem o mesmo desempenho térmico de 0,24 W/(m²·°C) com um impacto ambiental muito menor. À medida que a exigência térmica aumenta, a disparidade mantém-se evidente: o aumento necessário da espessura de EPS nas soluções tradicionais faz escalar o seu GWP, enquanto as soluções WS3 e WS4 conseguem melhorar a sua resposta térmica introduzindo cortiça, material cujo impacto ambiental é muito benéfico.

Conclui-se assim que os sistemas leves de fachada com LSF, em particular as configurações WS3 e WS4, que contêm isolamentos de base mineral e natural (cortiça), são consideravelmente mais eficientes do ponto de vista da sustentabilidade. Estas soluções permitem cumprir elevados padrões de exigência térmica ao mesmo tempo que apresentam um GWP significativamente menor quando comparado com as tipologias de construção tradicionais.

4.4 Discussão Integrada De Resultados

A análise integrada dos resultados obtidos permite concluir que o desempenho global das soluções leves de fachada em Light Steel Framing não deve ser avaliado apenas com base num único critério, uma vez que o comportamento higrotérmico e o desempenho ambiental não evoluem necessariamente no mesmo sentido. Neste trabalho, a utilização conjunta das simulações realizadas com o WUFI e da avaliação ambiental baseada no indicador GWP permitiu comparar as diferentes soluções de fachada numa perspetiva mais abrangente, considerando simultaneamente o risco de condensações e o impacte carbónico incorporado dos materiais.

A comparação entre os diferentes climas reforça igualmente a importância do contexto de exposição na avaliação das soluções. Embora o padrão global de comportamento se mantenha semelhante entre Lisboa, Guimarães e Mirandela, os climas mais frios ou com menor capacidade de secagem sazonal tendem a prolongar os períodos com humidade relativa elevada nas interfaces interiores dos painéis. Isto significa que uma solução construtiva que apresente um comportamento aceitável num determinado clima pode tornar-se mais vulnerável quando sujeita a condições exteriores mais severas, o que evidencia a necessidade de compatibilizar a escolha dos materiais com o enquadramento climático específico da aplicação.

Do ponto de vista ambiental, os resultados da avaliação LCA mostraram diferenças ainda mais expressivas entre as soluções estudadas. As soluções WS1 e WS2 apresentaram os valores de GWP mais elevados, enquanto WS3 e WS4 o reduzem. Esta evolução resulta sobretudo da substituição de materiais com maior impacte incorporado por materiais com contributos mais reduzidos ou mesmo negativos, em particular os produtos à base de cortiça, como o painel ICB e a placa Gypcork Protect, que introduzem benefícios ambientais relevantes no balanço final da solução. O painel WS4, em particular, alcança um GWP quase nulo face a todas as outras alternativas, o que o torna muito bom do ponto de vista da mitigação das alterações climáticas e mais sustentável. Apesar disto, o painel WS4 revelou uma falha crítica de desempenho higrotérmico no clima de Lisboa, sendo a única solução do estudo a registar situações pontuais de saturação (100% de humidade relativa), o que revela ocorrência de condensações.

Face aos resultados obtidos, verifica-se que a redução do impacte ambiental não deve ser analisada isoladamente, uma vez que a seleção de materiais e a configuração das camadas devem também assegurar um comportamento higrotérmico adequado às condições locais. Embora o painel WS4 apresente o menor GWP, a ocorrência de condensação no clima de Lisboa evidencia a importância de considerar a exposição à precipitação e à humidade exterior.

Neste contexto, o painel WS3 apresenta-se como a solução mais equilibrada entre as analisadas. Esta solução combina um impacte ambiental reduzido, associado à incorporação de cortiça, com um comportamento higrotérmico estável, não tendo sido registadas condensações nos três climas estudados. Assim, o WS3 demonstra ser uma alternativa adequada quando se pretende conciliar a redução do carbono incorporado com a segurança e durabilidade da fachada.

As soluções adicionais analisadas, nomeadamente a introdução de uma barreira para-vapor e de uma caixa de ar ventilada, demonstraram que a alteração da constituição do painel pode contribuir para melhorar o desempenho e conforto higrotérmico do painel.

Estes resultados confirmam que a seleção de materiais e a configuração das camadas têm influência decisiva no desempenho global dos sistemas leves de fachada em LSF. A substituição de componentes convencionais por materiais de origem renovável e com melhor desempenho térmico e higroscópico pode permitir ganhos simultâneos em duas dimensões fundamentais da sustentabilidade: a redução do carbono incorporado e a melhoria do comportamento em serviço. Assim, a presente dissertação evidencia que a otimização de sistemas de fachada em LSF deve

ser conduzida através de uma abordagem multicritério, em que os indicadores higrotérmicos e ambientais sejam analisados em conjunto, de modo a apoiar escolhas construtivas mais robustas, duráveis e sustentáveis.

5
CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados obtidos ao longo da presente dissertação permitem concluir que a avaliação de sistemas leves de fachada com *Light Steel Framing* deve ser realizada numa perspetiva integrada, em que o desempenho higrotérmico e o desempenho ambiental são analisados em simultâneo, e não de forma isolada. A aplicação conjunta das simulações com o WUFI Pro e da análise ambiental baseada no indicador de Potencial de Aquecimento Global permitiu identificar tendências consistentes entre as diferentes soluções estudadas, evidenciando que a configuração material dos painéis influencia de forma decisiva quer o risco de acumulação de humidade e condensações intersticiais, quer o impacto ambiental associado aos materiais incorporados na fachada.

A análise dos diferentes climas permitiu igualmente concluir que o comportamento higrotérmico das soluções não depende apenas da composição do painel, mas também da severidade do contexto climático em que este se insere. A comparação entre Lisboa, Guimarães e Mirandela evidenciou diferenças no padrão anual de humidade relativa e na duração dos períodos críticos, reforçando a importância de adaptar as soluções construtivas às condições climáticas específicas do local de implantação. Esta conclusão é especialmente relevante para sistemas leves, em que pequenas variações nas condições exteriores podem amplificar os efeitos associados à baixa inércia térmica e à sensibilidade das interfaces interiores.

No domínio ambiental, os resultados da análise LCA demonstraram que as diferenças entre painéis são ainda mais expressivas do que no plano higrotérmico. A decomposição do GWP por material mostrou que os impactos mais desfavoráveis se encontram, de forma geral, associados ao aço leve, aos revestimentos e a alguns materiais de isolamento e acabamento, enquanto determinados materiais de origem renovável ou com capacidade de armazenamento de carbono, como a cortiça expandida e a placa Gypcork Protect, apresentaram contributos ambientais muito favoráveis. Esta diferença refletiu-se diretamente no GWP total dos painéis, permitindo distinguir soluções ambientalmente menos vantajosas, como WS1 e WS2, de soluções significativamente mais eficientes, como WS3 e, sobretudo, WS4.

A comparação com as soluções tradicionais de alvenaria simples isolada pelo exterior e parede dupla com isolamento térmico na caixa de ar, com a espessura de isolamento ajustada para garantir coeficientes de transmissão térmica equivalentes, reforçou de forma clara a vantagem ambiental dos painéis leves com LSF. Quando comparadas soluções com o mesmo valor de U, verificou-se que os painéis WS1 e WS2, apesar de menos otimizados do ponto de vista material, apresentam já valores de GWP bastante inferiores aos das paredes tradicionais. Esta diferença torna-se muito mais expressiva nos painéis WS3 e WS4, que, para níveis de desempenho térmico equivalentes ou superiores, registam impactes ambientais muito reduzidos e, no caso de WS4, próximos da neutralidade carbónica. Estes resultados indicam que a adoção de materiais renováveis e de soluções multicamada bem otimizadas permite aos sistemas com LSF alcançar simultaneamente elevado desempenho térmico e reduzido carbono incorporado.

A análise integrada dos resultados mostra, portanto, que a solução globalmente mais equilibrada não é necessariamente aquela que apresenta apenas o menor U ou apenas o menor GWP, mas sim a que consegue compatibilizar desempenho higrotérmico robusto com reduzido impacto ambiental. Nesta perspetiva, o painel WS3 destaca-se como a solução mais promissora, uma vez que conjuga melhorias significativas do comportamento higrotérmico relativamente às soluções iniciais com uma redução muito marcada do GWP. O painel WS4 evidencia, por sua vez, o potencial dos materiais de base biológica na diminuição da pegada carbónica das fachadas leves, embora a ocorrência de condensações no clima de Lisboa torne necessária a adoção de medidas adicionais de controlo da humidade para garantir a sua plena viabilidade em contextos climáticos mais exigentes.

As análises complementares efetuadas para o painel WS2 com a inclusão de uma barreira de para-vapor e a introdução de uma caixa de ar ventilada mostrou que pequenas adaptações construtivas podem contribuir para melhorar o comportamento higrotérmico da fachada sem alterar substancialmente a solução base.

A presença da barreira limitou a difusão de vapor proveniente do ambiente interior, diminuindo o risco de condensações. Estes resultados reforçam a importância de uma correta definição das camadas funcionais na conceção de fachadas leves com LSF, sobretudo em climas com maiores níveis de humidade

A introdução de uma caixa de ar com ventilação noturna, na ordem das 60 Rph, causou tanto alterações no regime de temperaturas como uma ligeira redução dos picos de humidade relativa e da duração dos períodos em condições mais severas, o que sugere uma melhoria do desempenho higrotérmico do painel. Esta análise demonstra que, para além da escolha de materiais, o desempenho dos painéis pode também ser otimizado através da introdução de estratégias de ventilação.

Em síntese, os resultados desta dissertação confirmam que os sistemas leves de fachada com LSF constituem uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente muito competitiva face às soluções tradicionais, desde que sejam corretamente concebidos ao nível da sequência de camadas, da mitigação das pontes térmicas, da gestão do vapor de água e da seleção de materiais. A articulação entre simulação higrotérmica e avaliação ambiental revelou-se, assim, essencial para uma apreciação mais completa da sustentabilidade destas soluções, permitindo identificar não apenas os seus benefícios, mas também os seus pontos críticos e margens de otimização.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Apesar dos resultados obtidos permitirem retirar conclusões relevantes acerca do comportamento higrotérmico e ambiental dos sistemas de fachada estudados, o trabalho desenvolvido abre igualmente várias possibilidades de aprofundamento futuro. Em primeiro lugar, seria importante expandir a análise higrotérmica a um conjunto mais alargado de condições de fronteira, incluindo diferentes orientações solares, níveis de exposição à chuva batida, regimes interiores de ocupação e cenários de ventilação natural ou mecânica. Esta ampliação permitiria avaliar de forma mais abrangente a sensibilidade das soluções a diferentes contextos de utilização e melhorar as conclusões obtidas.

No domínio da avaliação ambiental, seria igualmente pertinente alargar o estudo para além do indicador GWP e considerar outras categorias de impacto, como acidificação, eutrofização, depleção de recursos abióticos e energia incorporada não renovável. Embora o GWP seja particularmente relevante no contexto atual da descarbonização, uma análise multicritério permitiria uma visão mais equilibrada do desempenho ambiental das soluções e poderia revelar trade-offs entre categorias de impacto que não são visíveis quando se considera apenas o carbono incorporado.

Outro aspeto que merece desenvolvimento futuro é o alargamento dos limites do sistema da análise LCA. Na presente dissertação, a comparação incidiu sobretudo no estágio *cradle-to-gate*, dada a disponibilidade de dados provenientes de EPDs. No entanto, uma avaliação mais completa deveria incluir fases adicionais do ciclo de vida, nomeadamente transporte, manutenção, substituição de componentes, fim de vida e potenciais benefícios do módulo D associados à reciclagem e reutilização de materiais. Esta ampliação seria particularmente importante no caso dos sistemas em LSF, dado o elevado potencial de circularidade do aço e a possibilidade de valorização de vários componentes no fim de vida.

Seria igualmente interessante aprofundar a análise da comparação entre soluções leves e soluções tradicionais recorrendo a uma correspondência mais detalhada entre requisitos térmicos, construtivos e funcionais. Embora nesta dissertação tenha sido assegurada a comparação com base em valores equivalentes de coeficiente de transmissão térmica, futuros trabalhos poderiam integrar também critérios de desempenho acústico, resistência ao fogo, durabilidade, manutenção e custo do ciclo de vida, de forma a construir uma avaliação multicritério mais próxima das decisões reais de projeto.

A análise complementar do painel WS2 com caixa de ar ventilada evidenciou também uma possibilidade de desenvolvimento futuro no domínio das fachadas adaptativas. A introdução de cavidades ventiladas com operação sazonal ou controlada em função da temperatura e humidade poderá constituir uma estratégia interessante para melhorar o comportamento de verão sem comprometer o desempenho de inverno. Trabalhos futuros poderão explorar diferentes localizações da caixa de ar, taxas de ventilação, horários de funcionamento e mecanismos automáticos de abertura e fecho, de forma a avaliar com maior rigor o potencial destas soluções na adaptação das fachadas a climas diversos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] United Nations Environment Programme, «*GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*», Paris, 2020. https://www.iea.org/reports/globalabc-roadmap-for-buildings-and-construction-2020-2050

[2] United Nations Environment Programme, «*Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*», 2021. https://www.unep.org/resources/report/2021-global-status-report-buildings-and-construction

[3] Luís Bragança e Ricardo Mateus, «*Avaliação do ciclo de vida dos edifícios: Impacte Ambiental de Soluções Construtivas*», iiSBE Portugal, Guimarães, 2011.

[4] H. Gervasio e S. Dimova, «*Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings*», 2018. doi: 10.2760/10016.

[5] L. F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez, e A. Castell, «*Renewable and Sustainable Energy Reviews*», 2014. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.037.

[6] T. Ramesh, R. Prakash, e K. K. Shukla, «*Energy and Buildings*», 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.05.007.

[7] M. Jang, T. Hong, e C. Ji, «*Environmental Impact Assessment Review*», 2015, doi: 10.1016/j.eiar.2014.09.010.

[8] P. Santos, C. Martins, e L. Simões Da Silva, «*Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems*», 2014, doi: 10.1051/metal/2014035.

[9] Q. Zhan, V. Pungercar, F. Musso, H. Ni, e Y. Xiao, «*Hygrothermal investigation of lightweight steel-framed wall assemblies in hot-humid climates: Measurement and simulation validation*», *Journal of Building Engineering*, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103044.

[10] R. C. G. M. Loonen, M. Trčka, D. Cóstola, e J. L. M. Hensen, «*Climate adaptive building shells*», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.04.016.

[11] B. N. Cabaci e A. İhsan, «*Evaluation of Lightweight Steel Construction Systems as an Alternative to Conventional Construction Systems*», 2025. https://doi.org/10.31462/icearc2025_a_aen_405

[12] E. Roque e P. Santos, «*The effectiveness of thermal insulation in lightweight steel-framedwalls with respect to its position*», *Buildings*, 2017, doi: 10.3390/buildings7010013.

[13] C. Martins, N. Rosa, e P. Santos Luís Simões da Silva, «*Desempenho Térmico de Paredes com Estrutura Leve em Aço Enformado a Frio*», 2015. Universidade de Coimbra

[14] H. Artur De Souza, L. Roquete, A. Adriano, e P. Gomes, «*Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico*», 2005. Doi: 10.1590/S1678-86212011000400009

[15] E. de Angelis e E. Serra, *«Light Steel-frame Walls: Thermal Insulation Performances and Thermal Bridges»*, *Energy Procedia*, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.039.

[16] H. Artur de Souza, Adriano Gomes «Método de Avaliação do Desempenho Térmico de Edifícios Comerciais e Residenciais em Light Steel Framing», 2012. Universidade Federal de Ouro Preto

[17] A. P. Gomes, H. A. de Souza, e A. Tribess, «*Impact of thermal bridging on the performance of buildings using Light Steel Framing in Brazil*», *Appl. Therm. Eng.*, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.11.015.

[18] American Iron and Steel Institute, *«Durability of Cold-Formed Steel Framing Members»*, Washington, D.C., 2004.

[19] L. Kempton, G. Kokogiannakis, A. Green, e P. Cooper, *«Evaluation of thermal bridging mitigation techniques and impact of calculation methods for lightweight steel frame external wall systems»*, *Journal of Building Engineering*, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102893.