

OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE UM SISTEMA INOVADOR DE ISOLAMENTO TÉRMICO DINÂMICO PARA FACHADAS ADAPTATIVAS EM LIGHT STEEL FRAMING

JOÃO TOMÁS DOS ANJOS RODRIGUES

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

Orientadora: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida

JUNHO 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.

A meus pais, irmãos, avós e namorada

Experience is the name everyone gives to their mistakes.

Oscar Wilde

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a todos os que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta jornada e contribuíram para a conclusão desta dissertação.

Um agradecimento muito especial aos meus orientadores, a Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira e o Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida. Do fundo do coração, o meu muito obrigado por toda a ajuda, orientação, constante encorajamento e por toda a partilha de conhecimento ao longo deste percurso.

À minha família, aos meus pais, ao meu irmão e à minha irmã, deixo o meu enorme obrigado por todo o apoio incondicional que me deram, especialmente nas fases em que me senti mais ansioso e sobrecarregado. Quero deixar um agradecimento muito particular ao meu irmão, por me ter ajudado na realização desta dissertação sempre que lhe foi possível.

À minha namorada, um obrigado muito especial. Sem ti, a realização desta dissertação não teria sido possível. Obrigado por me apoiares nos momentos em que estive mais em baixo, por acreditares sempre em mim e por todo o carinho e infinita paciência que tiveste para me aturar durante este período exigente.

Aos meus amigos Admiro, Alex, Diogo, Edgar, João Pinto, João Belas, Mafalda e Pedro, obrigado por estarem sempre ao meu lado e sempre presentes. Agradeço-vos por todas as brincadeiras, pelo carinho e pelos bons conselhos.

Aos amigos que me acompanharam durante estes cinco anos, deixo também a minha gratidão. Um agradecimento especial ao Matteo, por ter estado comigo durante os primeiros três anos e depois me ter "abandonado". Obrigado por todas as risadas e pelos excelentes momentos que passámos juntos nesta caminhada.

Finalmente, a todos os professores e colegas que me ajudaram a chegar onde estou hoje e a tornar-me a pessoa que sou. A todos vós, o meu sincero obrigado.

Este trabalho é financiado pelo FEDER através do COMPETE 2030 e com apoio financeiro da FCT I.P, no âmbito do projeto i-DINSystem - Sistema de isolamento térmico dinâmico e inteligente para fachadas adaptativas modulares, com o nº 15129, com o código de operação no Balcão dos Fundos COMPETE2030-FEDER-00879100 e ref.^a FCT- 2023.182257.ICDT. DOI: <https://doi.org/10.54499/2023.18255.ICDT>

RESUMO

O setor da construção enfrenta o desafio de contribuir para a mitigação das alterações climáticas, transitando para Edifícios de Emissões Nulas (ZEB) com envolventes termicamente isoladas e estanques ao ar. Contudo, esta abordagem pode conduzir ao agravamento do risco de sobreaquecimento e, conseqüentemente, ao recurso a sistemas de arrefecimento ativo. Esta situação é especialmente crítica em sistemas de baixa inércia térmica como o Light Steel Framing (LSF). Nesta tipologia, as soluções passivas convencionais, não são suficientes, exigindo soluções alternativas como as fachadas dinâmicas e responsivas.

Neste contexto, o Sistema de Isolamento Térmico Dinâmico (DTIS) surge como uma solução construtiva inovadora que ajusta a resistência térmica através da circulação forçada de ar no interior da parede. Apesar do seu potencial, a investigação existente neste domínio foca-se maioritariamente em estruturas pesadas. Verifica-se assim uma lacuna na aplicação de DTIS em sistemas de baixa inércia térmica como o LSF.

Esta dissertação tem como objetivo a avaliação e otimização do desempenho de um DTIS integrado numa fachada em LSF. A metodologia baseou-se em simulação computacional do fluxo de calor. Para o efeito, desenvolveu-se um modelo tridimensional no software *Ansys Discovery* e, avaliaram-se 248 cenários. Analisaram-se diferentes configurações geométricas para as aberturas para a entrada do ar e analisou-se o impacto de vários parâmetros, como a velocidade e temperatura do ar à entrada e a espessura da caixa de ar (30 a 60 mm). Os diferentes cenários foram comparados através de um Fator de Eficiência, proposto para quantificar o desempenho de cada cenário.

Os resultados mostraram que o melhor desempenho ocorre com velocidades do ar elevadas e temperaturas mais baixas. O aumento da espessura otimizou a convecção, reduzindo as temperaturas interiores. Em relação à geometria, as configurações com mais do que uma abertura apresentaram resultados mais interessantes do que os cenários com uma única abertura. Globalmente, os resultados provaram que este sistema tem potencial para mitigar o sobreaquecimento e promover a eficiência energética.

PALAVRAS-CHAVE: Isolamento Térmico Dinâmico, Light Steel Framing, Sobreaquecimento, Otimização Geométrica, Ansys Discovery, Simulação

ABSTRACT

The construction sector faces the challenge of contributing to the mitigation of climate change, transitioning to Zero Emission Buildings (ZEB) with thermally insulated and airtight envelopes. However, this approach can lead to the worsening of the overheating risk and, consequently, to the use of active cooling systems. This situation is especially critical in low thermal inertia systems such as Light Steel Framing (LSF). In this typology, conventional passive solutions are not sufficient, requiring alternative solutions such as dynamic and responsive façades.

In this context, the Dynamic Thermal Insulation System (DTIS) emerges as an innovative construction solution that adjusts the thermal resistance through the forced circulation of air inside the wall. Despite its potential, the existing research in this domain focuses mainly on heavy structures. There is thus a gap in the application of DTIS in low thermal inertia systems such as LSF.

This dissertation has as its objective the evaluation and optimisation of the performance of a DTIS integrated into an LSF façade. The methodology was based on computational simulation of the heat flow. For this purpose, a three-dimensional model was developed in the Ansys Discovery software and 248 scenarios were evaluated. Different geometric configurations for the air inlet openings were analysed, and the impact of various parameters was analysed, such as the inlet air velocity and temperature and the air cavity thickness (30 to 60 mm). The different scenarios were compared through an Efficiency Factor, proposed to quantify the performance of each scenario.

The results showed that the best performance occurs with high air velocities and lower temperatures. The increase in thickness optimised convection, reducing interior temperatures. Regarding the geometry, the configurations with more than one opening presented more interesting results than the scenarios with a single opening. Globally, the results proved that this system has the potential to mitigate overheating and promote energy efficiency.

Keywords: Dynamic Thermal Insulation, Light Steel Framing, Overheating, Geometric Optimisation, Ansys Discovery, Simulation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
2 DO CONFORTO INTERIOR AO ISOLAMENTO TÉRMICO DINÂMICO	5
2.1 CONTEXTO GLOBAL E BEM-ESTAR INTERIOR	5
2.1.1 Pilares Essenciais da Qualidade do Ambiente Interior (IEQ)	7
2.1.2 Impacto das Alterações Climáticas na Eficiência Energética dos Edifícios....	9
2.2 CARATERIZAÇÃO E DESEMPENHO TÉRMICO DA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS	12
2.2.1 Sistemas de Construção Pesada e Inércia Térmica	12
2.2.2 Construção Leve: o Sistema Light Steel Framing (LSF)	14
2.3 INOVAÇÃO DOS EDIFÍCIOS: FACHADAS ADAPTATIVAS	19
2.3.1 Conceitos, Tipologias e Controlo de Fachadas Adaptativas	19
2.3.2 Sistema de Isolamento Térmico Dinâmico (DTIS)	20
2.4 ANÁLISE CRÍTICA	25
3 METODOLOGIA DE MODELAÇÃO.....	29
3.1 ENQUADRAMENTO	29
3.2 AVALIAÇÃO PRELIMINAR.....	31
3.3 VALIDAÇÃO COM A LITERATURA.....	36

3.4 CENÁRIOS DE ESTUDO	44
3.4.1 Constituição e Propriedades Físicas dos Modelos Geométricos	45
3.4.2 Caracterização Geométrica	48
3.4.3 Definição das Condições de Fronteira	51
3.4.4 Indicadores-chave de Desempenho	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	57
4.2 ANÁLISE DO CASO DE ESTUDO BASE	58
4.2.1 Impacto da Velocidade e da Temperatura de Admissão do Ar	62
4.2.2 Influência da Espessura da Caixa de Ar no Desempenho Térmico	65
4.3 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS GEOMETRIAS ALTERNATIVAS	68
4.4 FATOR DE EFICIÊNCIA TÉRMICA DO SISTEMA	73
4.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS	79
5 CONCLUSÕES	83
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Inter-relação entre os vários domínios e parâmetros que definem o conforto do ocupante, adaptado de [8].	7
Fig. 2 – Variação da temperatura média global anual (relativamente a 1850-2025, de acordo com seis base de dados) [14].	9
Fig. 3 – Resultados obtidos do Conforto Térmico Interior: (a) Célula construída com o sistema LSF; (b) Célula construída em alvenaria de tijolo furado [30].	16
Fig. 4 – Síntese das etapas metodológicas desenvolvidas no Capítulo 3.	30
Fig. 5 – Interface do Modo de Modelação do <i>Ansys Discovery (AD)</i> .	33
Fig. 6 – Criação do esboço inicial do plano bidimensional (50x50 mm).	33
Fig. 7 – Superfície plana bidimensional gerada após a conversão do esboço.	34
Fig. 8 – Extrusão tridimensional da superfície através da ferramenta Pull.	34
Fig. 9 – Interface de configuração das condições de fronteira relativo ao Modo de Exploração.	35
Fig. 10 – Modelo geométrico da parede exemplo e a sua constituição [46].	37
Fig. 11 – Configuração do modelo geométrico para a simulação térmica.	42
Fig. 12 – Comparação entre os coeficientes de transmissão térmica (U) teóricos, simulados e da literatura.	44
Fig. 13 – Mapeamento dos parâmetros das condições de fronteira, geometrias simuladas e respetivos indicadores-chave de desempenho (KPIs).	45
Fig. 14 – Modelo geométrico tridimensional do sistema WS2 no <i>Ansys Discovery</i> .	47
Fig. 15 – Configuração geométrica do sistema DTIS integrado na fachada em LSF, evidenciando as aberturas na face exterior e a cavidade de ar.	49
Fig. 16 – Caracterização Geométrica dos vários cenários de estudo.	50
Fig. 17 – Temperaturas superficiais na face interior e exterior.	52
Fig. 18 – Temperatura e velocidade do ar de admissão.	52
Fig. 19 – Configuração geométrica da Caixa de Ar (30mm a 60mm).	53
Fig. 20 – Resultados gráficos brutos da Geometria Base (caixa de 30 mm): (a) distribuição de temperaturas, (b) mapeamento do fluxo de calor e (c) vetores de velocidade do escoamento do ar.	59
Fig. 21 – Comparação global entre as condições de fronteira e os resultados da simulação para diferentes espessuras da caixa de ar.	61
Fig. 22 – Evolução do Fluxo de Calor na camada interior em função da velocidade e da temperatura de admissão do ar para a caixa de 30mm.	63
Fig. 23 – Evolução da temperatura média da superfície da placa BA13 em função da velocidade e da temperatura de admissão do ar para a caixa de ar de 30mm.	64
Fig. 24 – Fluxo de calor em função da espessura da caixa de ar e da temperatura de admissão do ar para a velocidade de 0,5 m/s.	66

Fig. 25 – Temperatura média superficial da placa de gesso BA13 face à variação da espessura da caixa de ar e da temperatura de admissão do ar para a velocidade de 0,5 m/s.	67
Fig. 26 – Fluxo de calor para as diferentes geometrias e espessuras avaliadas.	69
Fig. 27 – Temperatura média superficial da placa BA13 em contacto com ar consoante a geometria das aberturas e a espessura da caixa de ar.	70
Fig. 28 – Velocidade média de saída do ar na cavidade para as diferentes configurações geométricas e espessuras.	71
Fig. 29 – Temperatura média de saída do ar na abertura em função das geometrias e das espessuras da caixa de ar.	72
Fig. 30 – Avaliação multivariável da Resistência Térmica Total (R^*) e do Fator de Eficiência (η) entre as várias caixas de ar.	75
Fig. 31 – Fator de Eficiência máximo e respetiva Resistência Térmica alcançados pela Geometria Base (30 a 60mm).	76
Fig. 32 – Comparação do Fator de Eficiência entre as geometrias alternativas para as diferentes espessuras de caixa de ar.	77
Fig. 33 – Análise termodinâmica das geometrias alternativas em um gráfico de coordenadas paralelas.	78
Fig. 34 – Mapeamento do comportamento térmico e fluidodinâmico da Geometria Base para as quatro espessuras de caixa de ar.	80
Fig. 35 – Análise comparativa de desempenho entre a Geometria Base e as soluções alternativas. .	80
Fig. 36 – Síntese global do Fator de Eficiência alcançado por todas as configurações geométricas avaliadas em função da espessura da caixa de ar.	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Sistematização das várias tipologias de isolamento dinâmico [42].	22
Tabela 2 – Propriedades físicas dos materiais integrados no sistema construtivo em LSF [46].	38
Tabela 3 – Camadas do sistema de fachada SKINIUM WS2.....	46
Tabela 4 – Propriedades Físicas dos materiais integrados no sistema de fachada WS2 [50].....	48

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

c	$[J/Kg. ^\circ C]$	Calor específico
d_j	$[m]$	Espessura da camada
e_i	$[m]$	Espessura da camada
$f_a, f_b, \dots, f_q$	$[-]$	Frações de área de cada secção
q	$[W/m^2]$	Fluxo de calor por unidade de área
ΔT	$[^\circ C]$	Diferença da temperatura entre as superfícies
η	$[\%]$	Fator de Eficiência
λ	$[W/m. ^\circ C]$	Condutibilidade térmica
$\lambda_{eq,j}$	$[W/m. ^\circ C]$	Condutibilidade térmica equivalente em relação à camada
ρ	$[Kg/m^3]$	Densidade
U	$[W/m^2. ^\circ C]$	Coeficiente de transmissão térmica
U_{sim}	$[W/m^2. ^\circ C]$	Coeficiente de transmissão térmica da parede simulada
U_T	$[W/m^2. ^\circ C]$	Coeficiente de transmissão térmica teórico
R	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica
R^*	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica total (obtida da parede com sistema DTIS)
R_{ar}	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica do ar
R_{cav}	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica da camada que contém o perfil metálico
R_i	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica da camada i
R_j	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica da camada j
R_{se}	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica superficial externa
R_{si}	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica superficial interna
R_{sim}	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica da parede simulada
R_{sim}^*	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica das simulações da parede com o sistema DTIS
$R_{sim;total}$	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica total da parede simulada
R_{simT}	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica da simulação da parede sem o sistema DTIS
R_{tot}	$[m^2. ^\circ C/W]$	Resistência térmica total

R_T	$[m^2 \cdot ^\circ C / W]$	Resistência térmica total (obtida da parede sem o sistema DTIS)
$R_{tot;a}, R_{tot;b}, \dots, R_{tot;q}$	$[m^2 \cdot ^\circ C / W]$	Resistências térmicas totais de ambiente para ambiente para cada secção
$R_{tot;lower}$	$[m^2 \cdot ^\circ C / W]$	Limite inferior da resistência térmica total
$R_{tot;upper}$	$[m^2 \cdot ^\circ C / W]$	Limite superior da resistência térmica total

<i>AD</i>	<i>Ansys Discovery</i>
<i>AIS</i>	Sistema de Isolamento Ativo (<i>Active Insulation System</i>)
<i>ASHRAE</i>	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
<i>BA13</i>	Placa de Gesso GYPTEC BA13
<i>BC</i>	Caso Base
<i>BR – CAV – BR</i>	Alvenaria dividida com cavidade de ar central
<i>CAV – BR</i>	Cavidade com alvenaria de tijolos cerâmicos
<i>CAV – CONC</i>	Cavidade com camada de betão
<i>CAV – LWBR</i>	Cavidade com betão leve
<i>CFD</i>	Dinâmicas de Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
<i>COP30</i>	Conferência das Partes
<i>DTIS</i>	Sistema de Isolamento Térmico Dinâmico (<i>Dynamic Thermal Insulation System</i>)
<i>EGR</i>	Relatório sobre o Desvio das Emissões (<i>Emissions Gap Report</i>)
<i>EPBD</i>	Diretiva sobre o Desempenho Energético dos Edifícios (<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>)
<i>FESU</i>	Elemento de fachada com isolamento comutável
<i>GEE</i>	Gases de efeito de estufa
<i>GPU</i>	Processamentos gráficos
<i>IAQ</i>	Qualidade do Ar Interior (<i>Indoor Air Quality</i>)
<i>ICB</i>	Painel ICB Amorim (<i>Insulation Cork Board</i>)
<i>IEQ</i>	Qualidade do Ambiente Interior (<i>Indoor Environmental Quality</i>)
<i>IPCC</i>	Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
<i>ISO</i>	Organização Internacional de Normalização

<i>KPIs</i>	Indicadores-chave de desempenho (<i>Key Performance Indicators</i>)
<i>LSF</i>	Light Steel Framing
<i>MFA</i>	<i>Modified Firefly Algorithm</i>
<i>NDCs</i>	Contribuições Nacionais Determinadas
<i>NZEB</i>	Edifícios com Necessidades quase Nulas de Energia (<i>Nearly Zero-Energy Buildings</i>)
<i>OSB</i>	Placas de derivados de Madeira de Frestas Orientadas (<i>Oriented Strand Board</i>)
<i>OVF</i>	Fachada Ventilada Opaca
<i>PCM</i>	Materiais de Mudança de Fase (<i>Phase Change Materials</i>)
T_{vis}	Transmissão visual
<i>VCI</i>	Isolamento em vácuo de condutância variável
<i>VIP</i>	Pressão variável em sílica pirogénica / Isolamento em vácuo
<i>VSDI</i>	Isolamento Dinâmico em Espaço Vazio
<i>WS2</i>	Referência ao sistema de fachada SKINIUM WS2
<i>ZEB</i>	Edifícios de Emissões Nulas (<i>Zero Emission Buildings</i>)

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

No contexto atual, o setor da construção tem enfrentado um paradigma complexo, estimulado pela necessidade urgente de contribuir para a mitigação das alterações climáticas e, simultaneamente, garantir a Qualidade do Ambiente Interior (IEQ) nos edifícios, fundamental para a saúde e bem-estar dos ocupantes. Com o agravamento do aquecimento global e maior frequência de fenómenos meteorológicos extremos, as exigências regulamentares europeias, especificamente através das sucessivas atualizações da *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD), têm forçado a transição do parque edificado para Edifícios de Emissões Nulas (ZEB) até 2030.

Para dar resposta a estas diretrizes de eficiência extrema, o setor da construção tem vindo a projetar os edifícios com envolventes térmicas altamente isoladas e estanques. Contudo, esta abordagem atua como uma barreira passiva que é naturalmente útil para minimizar as perdas de calor para o exterior mas que pode ser contraproducente em cenários de sobreaquecimento. Face ao aumento contínuo das temperaturas médias globais e a presença de ganhos térmicos internos, o isolamento excessivo impede a dissipação de energia, agravando significativamente o risco de sobreaquecimento dos espaços habitáveis e aumentando a dependência de sistemas de arrefecimento ativo.

Este fenómeno de sobreaquecimento torna-se um desafio particularmente crítico em sistemas de construção leve, como o Light Steel Framing (LSF). Embora o sistema LSF apresente vantagens evidentes e competitivas ao nível da sustentabilidade, do controlo da qualidade, da rapidez de execução e da redução de resíduos em obra, a sua constituição física impõe desafios termodinâmicos. A sua reduzida inércia térmica faz com que o sistema responda quase de imediato às flutuações da temperatura exterior e/ou interior.

Contudo, em oposição aos sistemas de construção pesada, que retêm a energia por longos períodos, esta mesma baixa inércia concede ao LSF a capacidade de dissipar o calor de forma muito mais rápida. As investigações recentes e as projeções climáticas demonstram que as estratégias passivas convencionais de arrefecimento serão insuficientes para induzir esta dissipação rápida e garantir o conforto térmico neste tipo de habitações a longo prazo, forçando o recurso a sistemas de arrefecimento ativo e resultando num consumo energético excessivo. O desafio é assim encontrar soluções construtivas inovadoras para dar resposta a este problema.

Perante a incapacidade das soluções tradicionais com desempenho estático, surge a oportunidade de inovar a envolvente através do conceito de fachadas adaptativas, com particular destaque para o Sistema de Isolamento Térmico Dinâmico (DTIS). Esta tecnologia permite ajustar a resistência térmica da parede em função dos estímulos térmicos, promovendo a circulação de um fluido (neste caso, o ar) numa cavidade no interior da parede. Ao forçar esta ventilação, o sistema altera as condições de isolamento, transitando a fachada de um estado isolante para um estado condutivo com maior capacidade de dissipação de calor.

Apesar do elevado potencial demonstrado por estes sistemas na redução das necessidades energéticas, a literatura atual confirma uma lacuna importante, a grande maioria dos estudos foca-se na sua aplicação em estruturas de construção pesada, ignorando a complexidade geométrica e a baixa inércia do LSF. É neste contexto que a presente dissertação se insere. O trabalho foca-se na otimização geométrica das aberturas de ventilação num sistema DTIS aplicado ao LSF, com o objetivo de perceber como geometrias alternativas da cavidade e a circulação do ar podem ser aproveitados para combater o sobreaquecimento.

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho consiste na avaliação e otimização do desempenho de um Sistema de Isolamento Térmico Dinâmico integrado numa fachada em LSF, com o intuito de maximizar a capacidade de dissipação de calor e mitigar ativamente o risco de sobreaquecimento do ambiente interior.

Para atingir este propósito global, definiram-se os seguintes objetivos parciais:

- Desenvolver e validar um modelo computacional tridimensional da fachada no software *Ansys Discovery (AD)* para avaliação da transferência de calor, assegurando a correta caracterização dos materiais e do escoamento de ar.
- Avaliar o impacto das condições de fronteira, nomeadamente a variação da velocidade de e da temperatura de admissão do ar.
- Analisar a influência da espessura da caixa de ar (30mm, 40mm, 50mm e 60mm) na circulação do fluido.
- Avaliar o efeito de diferentes configurações geométricas para as aberturas de admissão e extração de ar na parede.
- Quantificar o ganho real de desempenho de cada cenário através do cálculo de um Fator de Eficiência, de forma a identificar a configuração que proporciona a maior redução da resistência térmica e a melhor resposta térmica global.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos fundamentais, organizados de forma sequencial para conduzir o leitor desde o enquadramento teórico do problema até à apresentação e discussão metodológica dos resultados obtidos.

O Capítulo 1, estabelece o contexto da investigação, definindo o desafio associado ao sobreaquecimento causado pelas alterações climáticas e na consequente necessidade de mitigar a crescente dependência de sistemas de arrefecimento ativo. Aborda também as limitações térmicas inerentes às estruturas em LSF face a este cenário, apresentando, por fim, a motivação do estudo, os objetivos delineados e a organização estrutural do documento.

O Capítulo 2, constitui a revisão bibliográfica e o estado da arte. Este capítulo explora os pilares da Qualidade do Ambiente Interior e o impacto do clima no desempenho dos edifícios, distinguindo o comportamento térmico da construção pesada face à construção leve. De seguida, introduz o conceito de fachadas adaptativas e explora as várias tipologias de Isolamento Térmico Dinâmico, terminando numa análise crítica que demonstra a ausência de literatura científica atual e justifica a relevância da otimização geométrica.

O Capítulo 3, descreve detalhadamente o processo de preparação e simulação computacional. Inclui a fase de familiarização e validação térmica com a literatura com recurso ao software *Ansys Discovery (AD)*, bem como a constituição e caracterização dos nove modelos em estudo. Define também as restrições físicas, as condições de fronteira e os indicadores-chave de desempenho que suportam a avaliação térmica e fluidodinâmica.

O Capítulo 4, apresenta a análise dos dados recolhidos ao longo das simulações. Inicia com o estudo da Geometria Base face à variação da velocidade de injeção, da temperatura e da espessura da caixa de ar. Posteriormente, apresenta a validação comparativa direta do impacto geométrico dos modelos alternativos, finalizando com a quantificação do Fator de Eficiência para identificar e comprovar qual a configuração que garante o melhor desempenho em termos de dissipação de calor.

Por último, no Capítulo 5 é apresentada uma visão geral das principais conclusões retiradas dos capítulos anteriores. É também feita uma descrição dos trabalhos futuros a desenvolver sobre este tema.

2

DO CONFORTO INTERIOR AO ISOLAMENTO TÉRMICO DINÂMICO

2.1 CONTEXTO GLOBAL E BEM-ESTAR INTERIOR

Nas últimas décadas, a procura por conforto térmico dentro das habitações intensificou-se significativamente. Este fenómeno deve-se não só ao aumento dos padrões de exigência da população e ao crescimento económico, mas também à necessidade de adaptação às alterações climáticas. Para além disso, com o surgimento do cenário de eventos meteorológicos extremos, surge a tendência de projetar habitações como “fortalezas climáticas”, capazes de lidar com a imprevisibilidade do clima atual [1]. Consequentemente ao tentar alcançar estes patamares mais elevados de performance, o setor da construção passa a ser dos setores que mais consomem energia e, portanto, dos que contribui mais para a produção de dióxido de carbono. Neste contexto, a União Europeia tem tido como prioridade adotar estratégias de poupança de energia e de eficiência energética para tentar mitigar este problema. Entre as principais políticas energéticas, destacam-se a *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD), que estabelece o quadro regulamentar para o setor através de sucessivas atualizações, desde a sua origem em 2002 [2], passando pelas reformulações de 2010 [3] e 2018 [4], até à mais recente revisão de 2024 [5]. Paralelamente a visão estratégica *A Clean Planet for all* [6], que define o caminho para a neutralidade carbónica da União Europeia até 2050.

A estratégia *A Clean Planet for all* identifica o setor da construção como uma das bases fundamentais para a descarbonização da economia europeia, estimando que as medidas de eficiência energética juntas com o recurso a tecnologias inteligentes possam reduzir o consumo de energia dos edifícios em cerca de metade face aos níveis de 2005 [6]. Mais do que incentivar e impor metas numéricas, este roteiro tem como objetivo realçar a necessidade de uma transformação do parque habitacional, promovendo a integração de soluções inovadoras na envolvente térmica que permitem a união da redução drástica da procura energética com a garantia de padrões elevados de conforto interior num clima em mudança [6].

A concretização destes objetivos energéticos têm tido um grande impacto no setor da construção, através da evolução rigorosa da EPBD, cujas atualizações sucessivas moldaram a forma como esta é implementada. A EPBD 2010, estabeleceu pela primeira vez, o marco para os edifícios com necessidades quase nulas de energia (NZEB – *Nearly Zero-Energy Buildings*), forçando a indústria a focar-se no isolamento térmico e na eficiência dos sistemas [3]. Mais tarde a EPBD 2018, introduziu e deu grande ênfase à reabilitação dos edifícios. Com este documento nasce a importância da digitalização e da flexibilidade energética, destacando-se o papel fundamental das tecnologias inteligentes (*Smart Readiness*) que permitem ao edifício adaptar-se ativamente às condições exteriores e ao comportamento dos utilizadores [4]. Atualmente na sua versão mais recente e ambiciosa, a EPBD 2024 tem como finalidade a passagem do conceito NZEB para ZEB (*Zero Emission Buildings*). Esta nova versão impõe que, a partir, de 2030, todos os novos edifícios do parque edificado apresentem emissões nulas de carbono no local, dando prioridade a estratégias que combinem a eficiência energética extrema com a capacidade de resposta dinâmica da envolvente, permitindo que os edifícios tenham uma interação inteligente com o seu contexto ambiental [5].

Contudo, a procura pela neutralidade carbónica e por uma eficiência energética extrema não pode deixar de ser associada ao principal propósito de qualquer espaço edificado: garantir o bem-estar e a saúde dos seus utilizadores [7]. À medida que as exigências da EPBD 2024 forçam a opção por edifícios mais estanques e tecnologicamente mais complexos [5], torna-se o principal objetivo assegurar que o desempenho térmico não comprometa os requisitos funcionais do ambiente interno [1]. Desta forma, a avaliação da performance de um edifício deve superar as normas desenvolvidas sobre o consumo, adotando uma visão holística centrada na escala humana [8].

É neste contexto de interdependência entre a envolvente térmica e a experiência do utilizador que assume um papel fundamental a Qualidade do Ambiente Interior (IEQ), cujos pilares fundamentais definem o equilíbrio necessário entre a sustentabilidade do edifício e o conforto dos seus ocupantes [8].

2.1.1 Pilares Essenciais da Qualidade do Ambiente Interior (IEQ)

Nos países desenvolvidos, as pessoas passam cada vez mais tempo em ambientes fechados, cerca de mais de 90% do tempo, seja trabalhando, seja em períodos de descanso ou lazer. Isto é, as condições no interior dos edifícios têm implicações vastas não só na saúde, como no estado geral do bem-estar e performance de uma pessoa [7]. Nesse sentido, a demanda pelo conforto em ambientes interiores é crucial para preservar ou melhorar a qualidade de vida humana.

A Qualidade do Ambiente Interior (IEQ) tem como principal foco o conforto do ocupante, estruturando-se essencialmente em 4 domínios principais, o Conforto Térmico, o Conforto Acústico, o Conforto Visual e a Qualidade do Ar Interior. Estes aspetos englobam os vários parâmetros que um edifício deve garantir para assegurar o bem-estar e a satisfação de quem o habita. Adicionalmente estes parâmetros têm relações entre si, mostrando que existe uma interdependência que por vezes, direta ou indiretamente, pode influenciar o desempenho dos restantes. A Fig. 1 demonstra como os 4 domínios, se relacionam com os vários parâmetros formando assim o conforto do ocupante [8].

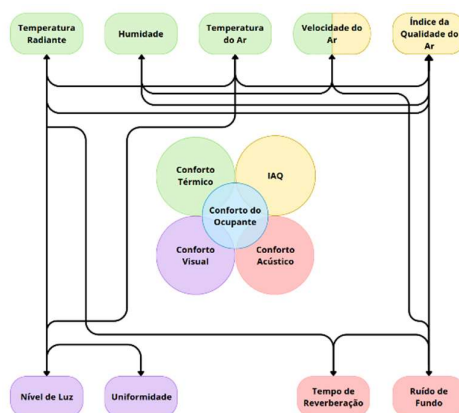


Fig. 1 – Inter-relação entre os vários domínios e parâmetros que definem o conforto do ocupante, adaptado de [8].

Dentro destas quatro áreas o Conforto Térmico é o mais crítico para o desempenho de energia do edifício e a satisfação do ocupante. De acordo com a norma ISO 7730, é definido como uma condição mental que expressa satisfação relativamente ao ambiente térmico. Este estado psicológico está fundamentalmente ligado ao equilíbrio térmico do corpo humano, que é alcançado quando a produção interna de calor no corpo iguala a perda de calor para o ambiente. Para além disso, é de notar que existem diferenças individuais que fazem com que seja impossível determinar ou especificar um ambiente térmico que satisfaça todas as pessoas. Adicionalmente este balanço é influenciado pela atividade física e pelo vestuário dos ocupantes, bem como pelos parâmetros ambientais como a temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e humidade do ar [9].

A avaliação destas condições térmicas estão especificadas pelas metodologias estabelecidas nas normas ISO 7731 e ASHRAE 55, que introduzem o modelo de Fanger, baseado na transferência de calor entre o corpo humano e o ambiente, e o modelo de Dear e Brager que sugerem um modelo adaptativo sustentado na capacidade ou habilidade do ocupante de se ajustar ao ambiente térmico através de ações individuais [9, 10]. A implementação destes modelos mencionados para a determinação do Conforto Térmico foram uma das mais importantes inovações em relação aos problemas do Conforto Térmico, que introduziram uma nova abordagem para este problema [11].

Os restantes pilares também têm um papel fundamental na perceção holística de um espaço. O Conforto Acústico é definido como um estado de satisfação referente às condições acústicas de um local [12]. Contudo, quando se refere ao termo Conforto Acústico, o objetivo é fornecer ao local um bom ambiente acústico de forma a prevenir a ocorrência de desconforto, enquanto na realidade a qualidade do som está ligada às várias propriedades físicas de um local e do próprio som. O Conforto Visual envolve a avaliação adequada de várias condições de luz, naturais ou artificiais [13]; apesar de existir uma parte psicológica para o conforto, é necessário um número de condições físicas para o ambiente visual de forma a permitir que este seja avaliado e que promova o bem-estar visual ao ocupante. Por último, a Qualidade do Ar Interior (IAQ) está relacionada principalmente com a concentração de poluentes no ar devendo existir a ventilação necessária do ambiente de forma a prevenir problemas de saúde e assegurar uma atmosfera saudável aos ocupantes [7].

Como anteriormente descrito, estas quatro áreas não agem de forma isolada. Portanto, para alcançar uma Qualidade do Ambiente Interior ótima, é necessária uma integração equilibrada de todos estes fatores, um desafio que se torna cada vez mais complexo à medida que os edifícios se tornam cada vez mais isolados e estanques.

2.1.2 Impacto das Alterações Climáticas na Eficiência Energética dos Edifícios

A procura pelo equilíbrio entre os vários domínios da Qualidade do Ambiente Interior (IEQ) representa um desafio complexo devido à sua interdependência. Esta tarefa torna-se cada vez mais dificultada devido à constante mudança do cenário climático global. Efetivamente, o ambiente edificado não pode deixar de ser associado ao contexto climático em que se insere, pois, este funciona como a principal barreira e filtro entre as condições exteriores e interiores e, consequentemente, o bem-estar dos ocupantes.

Atualmente, as alterações climáticas são uma das principais ameaças para a sustentabilidade global e para a resiliência das sociedades humanas. De acordo com o Relatório de Síntese por parte do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), a temperatura global da superfície terrestre aumentou cerca de 1,1 °C em relação à era pré-industrial, sendo que os relatórios recentes sobre o estado do clima (*State of the Global Climate*) indicam que os valores anuais já atingiram cerca de 1,42 °C, como se pode observar na Fig. 2.

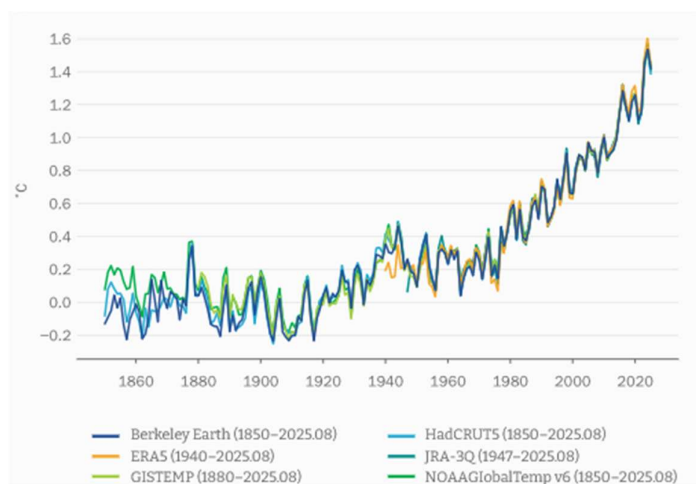


Fig. 2 – Variação da temperatura média global anual (relativamente a 1850-2025, de acordo com seis base de dados) [14].

Este aquecimento progressivo tem resultado num agravamento severo dos riscos associados a ondas de calor extremo em todas as regiões habitadas [14, 15].

Os esforços internacionais, catalisados pelo Acordo de Paris (2015), têm sido bastante importantes para o reforço ao combate às alterações climáticas, ao estabelecerem metas globais que orientam as políticas de descarbonização em diversas escalas. Como referido anteriormente, no contexto da União Europeia, este compromisso global concretizou-se na visão *A Clean Planet for all*. Adicionalmente, é sob este enquadramento que a EPBD tem evoluído, garantindo assim que o setor dos edifícios acompanha estas metas através da melhoria contínua do seu desempenho energético e da transição para edifícios com emissões nulas (ZEB).

Recentemente, realizou-se a COP30 (Conferência das Partes) com o objetivo de implementar metas muito mais rigorosas para travar o aumento da temperatura, que de acordo com o relatório EGR (*Emissions Gap Report*) 2025, com as atuais Contribuições Nacionais Determinadas (NDCs) colocam-nos numa trajetória de 2,3 °C a 2,5 °C, o que fica bem acima do objetivo de 1,5 °C. Desta forma, as emissões globais teriam de ser cortadas em cerca de 46% até 2035 em relação aos níveis de 2019, de forma que este objetivo possa ser atingido [16].

Como resultado os vários setores são obrigados a reduzir a emissão de gases de efeito de estufa (GEE), implementando várias medidas urgentes de mitigação. Dentro destes, os setores residencial e da construção dos edifícios têm um papel crítico na emissão de GEE e no consumo de energia. Estes setores são responsáveis por cerca de 35% da emissão de GEE em todo o mundo e 40% do consumo global de energia. Com o objetivo de resolver esta questão, várias estratégias de descarbonização do parque edificado são necessárias, não comprometendo o conforto e o bem-estar dos ocupantes [17].

No domínio das tecnologias de construção, têm sido feitos vários progressos nos sistemas, dando um ênfase crescente ao desempenho das fachadas. Como barreira principal entre o edifício e o meio envolvente, a fachada é um elemento crítico que garante a estabilidade térmica no interior perante a volatilidade climática. Atualmente, duas estratégias são consideradas para o design de fachadas de alto desempenho, sendo o método convencional a abordagem estática e a mais recente a abordagem dinâmica, que constitui o objeto de estudo da presente dissertação.

Embora as abordagens estáticas permitam reduzir o consumo energético através de envolventes altamente isoladas e estanques, estas funcionam como barreiras passivas que, frequentemente, promovem uma desconexão entre o edifício e o seu ambiente. A implementação desta abordagem, limita a capacidade de resposta ao comportamento dinâmico do clima e as preferências do ocupante, fazendo com o que risco de sobreaquecimento no interior seja maior, limitando os potenciais benefícios das fontes de energia naturais [17].

Numa análise mais detalhada, o aumento progressivo das temperaturas globais, que já atingiram anomalias de 1,42 °C acima dos níveis pré-industriais, traduzir-se-á em duas consequências negativas relativas às tendências do consumo de energia do edificado. Por um lado, verifica-se uma diminuição progressiva no consumo de aquecimento, de acordo com o estudo de Campagna e Fiorito [18], o valor mediano da variação diminui de -18,6% relativamente a 2020 para -48,5% em 2080. Este fenómeno indica que, à medida que a temperatura média vai aumentando e os edifícios vão ficando cada vez mais dotados de envolventes mais isoladas, a procura de energia para o aquecimento torna-se menos dominante, uma vez que o desconforto térmico em períodos frios é minimizado.

Por outro lado, observa-se uma variação positiva e crítica relativamente ao arrefecimento, com aumentos previstos de 28,8% em 2020 para 60,9% em 2080. Estes dados corroboram a evidência de que a volatilidade climática terá um impacto significativo no setor residencial, agravando os desafios de eficiência energética e mitigação de GEE. Como resultado, estima-se que o consumo geral de energia no setor aumente gradualmente de 2,6% em 2020 para 12,0% em 2080. Esta trajetória reforça a urgência de transitar de soluções de isolamento estáticas para sistemas dinâmicos que previnam o risco de sobreaquecimento e otimizem o desempenho do edifício ao longo de todo o ano [18].

Perante a necessidade de soluções que ofereçam o carácter dinâmico às variações térmicas externas, torna-se essencial que os sistemas construtivos respondam a estas pressões ambientais. Desta forma, a eficácia de uma estratégia adaptativa na envolvente térmica está profundamente conectada à capacidade de armazenamento de calor da estrutura, o que acaba por ser fundamental para a distinção entre o comportamento térmico dos sistemas de construção pesada e o dos sistemas de construção leve.

2.2 CARATERIZAÇÃO E DESEMPENHO TÉRMICO DA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS

As alterações climáticas são um fator de agravamento do risco de sobreaquecimento nos edifícios, uma vez que as propriedades térmicas dos elementos da envolvente permanecem constantes, impedindo uma resposta adaptativa face às flutuações do clima exterior [18]. Esta falta de flexibilidade das soluções convencionais justifica o estudo e desenvolvimento de soluções inteligentes que venham mitigar este obstáculo.

A eficácia de um sistema adaptativo térmico inserido na envolvente de um edifício está profundamente associada à capacidade de armazenamento de calor da estrutura [17]. De acordo com Hong *et al.* (2023) [19], edifícios com elevada massa térmica respondem de forma muito mais lenta às variações térmicas do que estruturas leves. Deste modo, para que seja compreendido o potencial de aplicação dos sistemas de isolamento dinâmico, torna-se fundamental distinguir o comportamento térmico dos sistemas de construção pesada perante os sistemas de construção leve.

2.2.1 Sistemas de Construção Pesada e Inércia Térmica

A construção pesada é constituída por materiais com elevada densidade e calor específico, o que lhes confere uma grande capacidade de armazenamento de energia. A massa térmica refere-se à capacidade de um material absorver, armazenar e, eventualmente, libertar calor, funcionando como um amortecedor térmico [20]. Para tal, materiais com elevada massa térmica têm tendência a absorver calor durante o dia, quando a temperatura é elevada e libertam-na lentamente à noite, quando a temperatura desce [19].

A avaliação do desempenho térmico destes sistemas é quantificada através de dois indicadores fundamentais: o atraso térmico (*time lag*) e o fator de decremento (*decrement factor*). O atraso térmico é definido como o intervalo de tempo necessário para que uma onda de calor se propague da superfície exterior até à interior, enquanto o fator de decremento expressa a razão entre a amplitude térmica interior e exterior, refletindo a eficácia do sistema na atenuação das flutuações térmicas. Materiais típicos da construção pesada, devido às suas propriedades termofísicas, tais como a capacidade térmica e a condutibilidade térmica, apresentam elevados tempos de atraso e baixos fatores de decremento, o que traduz numa elevada inércia térmica [21].

Estudos demonstram que a eficácia da inércia é intensificada quando esta é combinada com outras medidas de poupança, como por exemplo o controlo solar e a ventilação noturna [20]. De acordo com Aste *et al.* (2009), em climas continentais como o da cidade de Milão, a utilização de paredes de elevada inércia pode reduzir a necessidade de aquecimento em cerca de 10% [22].

Em períodos de calor extremo e ondas de calor, a massa térmica da construção pesada pode desempenhar um papel fundamental no conforto dos ocupantes. Num estudo realizado por Kuczyński e Staszczuk (2020) [23], foram analisados dois edifícios geometricamente idênticos, mas com sistemas construtivos distintos, o edifício B1, de construção pesada (alvenaria tradicional), e o edifício B2, de construção leve. Ambas as estruturas encontram-se localizadas numa região de clima temperado, caracterizada por verões quentes.

Os resultados obtidos mostraram que relativamente a ondas de calor e temperaturas quentes durante vários dias seguidos, a substituição de uma estrutura leve por uma estrutura pesada permite reduzir a temperatura média interior em cerca de 2,8 °C. Este fenómeno pode ser mais acentuado nos momentos de maior radiação solar, onde a diferença de temperatura entre os sistemas pode chegar a atingir os 3,4 °C. Para além disso, a eficiência da construção pesada não se reflete apenas na estabilidade das temperaturas interiores, também se traduz numa redução drástica das necessidades de arrefecimento relativamente à construção leve. Verificou-se então, que entre os edifícios B1 e B2, o aumento da inércia térmica (edifício B1) permitiu uma redução da necessidade de energia para arrefecimento entre 67% e 75% [23].

Para além do conforto imediato que este tipo de sistemas fornece, este aumenta a resiliência térmica do edifício, isto é, a capacidade de um edifício se preparar e planear, absorver, recuperar e adaptar-se com maior sucesso a eventos adversos [19].

Em cenários de falha de energia durante eventos climáticos extremos, a elevada capacidade de armazenamento da estrutura permite manter condições mais adequadas na habitação por períodos de tempo mais longos [19].

No entanto, contrariando a visão convencional, o estudo de Reilly e Kinnane (2017) [24] revela que a ocupação intermitente altera o impacto da inércia térmica no consumo energético. Nestes cenários, o calor utilizado para aquecer estruturas pesadas é usualmente desperdiçado ao ser libertado após o período de permanência dos ocupantes. Por consequência, a eficácia destes sistemas não é universal, sendo bastante penalizada por períodos de aquecimento descontínuo, onde a inércia acaba por assumir um papel de “consumidor” de energia [25].

Em suma, a construção pesada mostra-se uma solução de elevada performance para a estabilização do ambiente interior, tirando partido da sua inércia térmica. A eficácia destes sistemas é validada por elevados valores de atraso térmico e baixos fatores de decremento, que garantem o conforto térmico durante ondas de calor.

Contudo, no contexto atual com o agravamento das alterações climáticas, o risco de sobreaquecimento torna-se uma preocupação crescente. Embora a construção pesada apresente benefícios superiores à construção leve num regime convencional, a evolução das condições climáticas e o surgimento de novas soluções podem comprometer a eficácia destes sistemas, tornando-os menos eficientes perante as solicitações térmicas e os perfis atuais de utilização dos edifícios.

Assim torna-se imperativo analisar sistemas que, ao contrário da construção pesada, deem ênfase à rapidez de resposta e a otimização do isolamento, como será abordado de seguida.

2.2.2 Construção Leve: o Sistema Light Steel Framing (LSF)

Nos últimos anos, o setor da construção tem registado uma transição progressiva no sentido da utilização de métodos industrializadas, que têm vindo a ganhar mais visibilidade e relevância, sendo um exemplo desta alternativa o Light Steel Framing (LSF). Este sistema construtivo tem sido utilizado principalmente em edifícios residenciais de baixa altura [26].

Comparativamente aos métodos de alvenaria tradicional, o sistema LSF oferece benefícios bastante competitivos que atualmente respondem à rapidez de execução e desafios de sustentabilidade. Este sistema apresenta diversas vantagens como a rapidez de construção, a reduzida necessidade de espaço na obra e uma menor necessidade de mão-de-obra [26, 27].

A essência do sistema permite um elevado controlo de qualidade em fábrica, fora das instalações da obra, para além de ter uma fácil pré-fabricação, resultando numa rápida montagem no local da obra. Estruturalmente, o LSF destaca-se por ser excecionalmente resistente em relação ao seu peso [26-28].

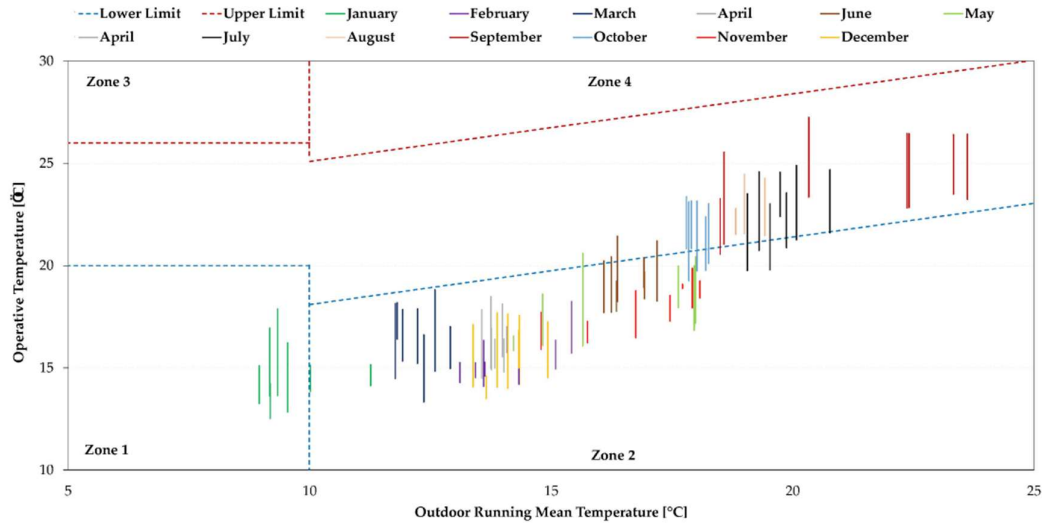
Do ponto de vista da sustentabilidade e eficiência, o sistema garante um menor consumo de água e redução de resíduos de construção e demolição. Além disso oferece um elevado potencial de recuperação, reciclagem e reutilização dos materiais usados. Por fim, estas características são ainda acompanhadas por uma elevada facilidade de adaptabilidade arquitetónica e eficiência de custos [26, 28].

Porém, apesar de todas as vantagens mencionadas anteriormente, a baixa inércia do sistema LSF acaba por impor desafios quanto ao seu desempenho térmico em climas mais quentes. Neste contexto, de acordo com o estudo desenvolvido por Rodrigues *et al.* (2013) [29], foram analisadas vários cenários de uma habitação com soluções e tecnologias inovadoras, com o objetivo de avaliar o risco de sobreaquecimento.

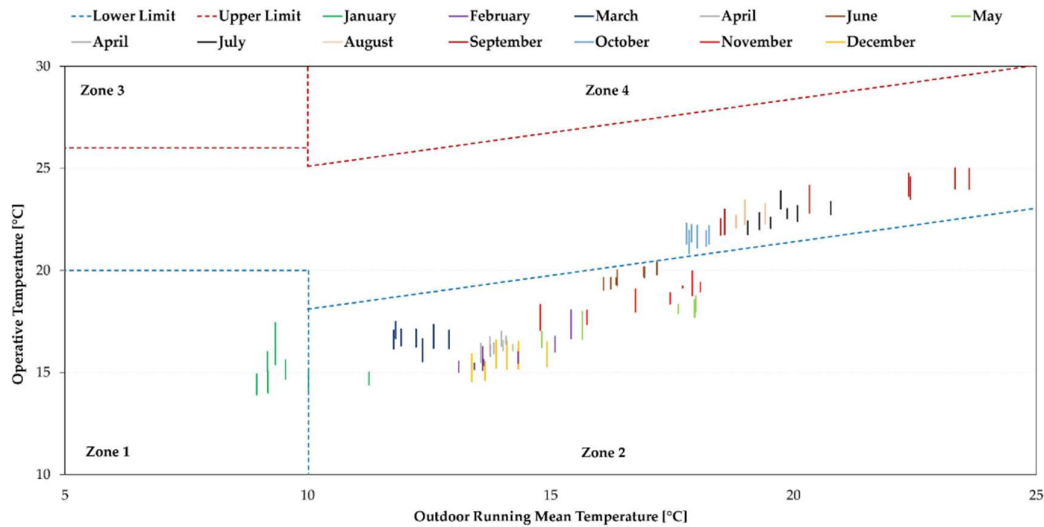
Para tal, a investigação estabeleceu um modelo de simulação que distingue o desempenho atual da habitação e de cenários futuros projetados para os anos de 2020, 2050 e 2080. A metodologia foi estruturada em três sets distintos, o primeiro set estabelece a comparação entre os Caso Base (BC) e Caso 0, o segundo set simula o impacto de diversas estratégias de mitigação de sobreaquecimento (Caso 1 a Caso 4) e o terceiro set analisa a magnitude deste fenómeno em cenários climáticos futuros, considerando o impacto das alterações climáticas (Caso 5 a Caso 7) [29]. Os resultados mostram que, a habitação de construção com sistema leve em relação às temperaturas e ao tempo atuais demonstrou riscos de sobreaquecimento aceitáveis. Contudo, a transição para construção pesada utilizando materiais com elevada inércia térmica, reduziria significativamente este risco. Para além disso, mesmo utilizando tecnologias passivas de arrefecimento, seria insuficiente para que este problema não ocorresse, piorando com os vários cenários climáticos previstos no futuro [29].

Mais recentemente, o estudo realizado por Roque *et al.* (2021) foi desenvolvido de forma a tentar compreender o conforto térmico interior em sistemas de LSF. Para tal, foram construídas duas células de teste idênticas, mas com sistemas construtivos diferentes, um sendo o sistema tradicional de alvenaria de tijolo furado e betão armado e o outro com o sistema de construção LSF.

A monitorização decorreu durante um ano, sob a influência do clima mediterrânico de Albergaria-a-Velha, em Portugal. Os resultados relativamente ao conforto térmico encontram-se ilustrados na Fig. 3 [30].



(a)



(b)

Fig. 3 – Resultados obtidos do Conforto Térmico Interior: (a) Célula construída com o sistema LSF; (b) Célula construída em alvenaria de tijolo furado [30].

Na análise efetuada, foram consideradas quatro zonas de desconforto: a Zona 1 e Zona 2, relacionadas com as zonas de desconforto abaixo do limite inferior do conforto (sobreaquecimento) e a Zona 3 e Zona 4 correspondem a zonas de desconforto acima do limite superior definido (sobreaquecimento). Observou-se que ambas as células registaram períodos de sobreaquecimento, mostrando que nos meses de verão este acaba por ter menos relevância. Apesar de ambas apresentarem um conforto térmico interior geral confortável durante os meses mais quentes, a célula com o sistema LSF ainda mostrou uma aproximação aos níveis de desconforto superiores, indicando possíveis problemas de sobreaquecimento. Este comportamento mostrou uma vulnerabilidade ao sobreaquecimento que poderá ser agravada com a presença dos ganhos térmicos internos, mesmo estes tendo um impacto positivo na redução do sobreaquecimento [30].

Os resultados mostram que a percentagem de tempo fora da zona de conforto em ambas as células é idêntica durante os meses mais frios e a época de transição e é significativamente diferente durante os meses mais quentes. Sendo o sistema LSF mais propenso a sobreaquecimento, fazendo com que sejam necessárias estratégias passivas de arrefecimento [30].

Assim, o foco principal passa por mitigar os problemas de conforto térmico interior nestes sistemas que acabam por resultar da sua baixa inércia térmica. Para corrigir este problema, a integração de Materiais de Mudança de Fase (PCM) tem sido alvo de amplo estudo. Este tipo de materiais demonstram grande potencialidade pois a partir da sua capacidade de armazenamento de calor latente, conseguem redistribuir a energia de forma adequada, reduzindo transferências de calor e diminuindo a amplitude térmica das variações de temperatura [31, 32].

Outro problema bastante comum neste sistema, é a existência de pontes térmicas induzidas pela estrutura de metal que passa pela parede. Estas são percursos preferenciais de calor que passam pela envolvente e que têm um impacto significativo sobre o desempenho térmico de edifícios altamente isolados construídos em LSF. As pontes térmicas também podem influenciar as temperaturas superficiais dos vários componentes da envolvente, devido à sua baixa resistência térmica podendo ocorrer alguns problemas de condensação e aparecimento de bolores [33].

A mitigação destas pontes térmicas pode ser influenciada pela posição do isolamento térmico. Neste contexto, as soluções construtivas em LSF são classificadas em três categorias principais, de acordo com a localização do isolamento: estrutura fria (*cold frame*), estrutura quente (*warm frame*) e estrutura híbrida (*hybrid frame*) [33].

Na estrutura fria, o material isolante é colocado no interior da parede preenchendo o espaço entre os perfis de aço. Portanto, esta solução em climas mais frios está mais suscetível à ocorrência de condensações intersticiais, isto devido à baixa temperatura que os perfis atingem. Além disso, uma vez que os perfis metálicos atravessam a camada isolante as pontes térmicas acabam por ser mais expressivas, o que resulta em maiores perdas ou ganhos de calor indesejados [33].

A solução híbrida surge como um compromisso, onde o isolamento térmico é distribuído entre a superfície exterior e a cavidade interna entre os perfis. Para que esta seja eficaz na mitigação das pontes térmicas, recomenda-se que um terço ($1/3$) da resistência térmica total do elemento construtivo seja posicionada pelo lado exterior da cavidade da parede [33].

Quanto à estrutura quente, o isolamento térmico é colocado pelo exterior da estrutura de aço. Esta configuração oferece o melhor desempenho térmico, contudo, esta solução resulta em paredes de maior dimensão, o que pode levar a uma ligeira redução da área útil do edifício [33].

Em suma, o sistema LSF apresenta-se como uma solução construtiva de elevada precisão e rapidez de execução, oferecendo vantagens ao nível da sustentabilidade e da reabilitação. Contudo, os problemas atuais que apresenta, como a baixa inércia térmica e as pontes térmicas constituem um desafio para o conforto interior em climas como o mediterrânico onde ocorrem grandes amplitudes térmicas. Estas limitações motivam a procura de soluções construtivas inovadoras.

2.3 INOVAÇÃO DOS EDIFÍCIOS: FACHADAS ADAPTATIVAS

2.3.1 Conceitos, Tipologias e Controlo de Fachadas Adaptativas

A fachada é o elemento principal na regulação energética de um edifício. Dado que estabelece a separação entre o exterior e o interior, é a responsável por grande parte das trocas térmicas que determinam o desempenho do edifício e, consequentemente, o conforto dos seus ocupantes. A fachada e os seus constituintes, a envolvente superior (cobertura/teto) e o pavimento são os principais elementos onde ocorrem mais perdas de calor para o exterior, sendo que 60% são devido à fachada, 25% devido à envolvente superior e 15% ao pavimento. Para combater estes problemas, tradicionalmente os edifícios são constituídos por uma envolvente altamente isolada e estanque. Porém, como discutido anteriormente, estas soluções não garantem um comportamento otimizado em relação ao conforto dos ocupantes e à eficiência energética nas situações de potencial sobreaquecimento [34].

Sendo assim, atualmente as fachadas necessitam de responder a várias questões relacionadas quer com o design, quer com o seu desempenho geral. Para tal é necessário ter em consideração diversos parâmetros como, o controlo dos ganhos solares, ventilação natural, luz natural vs. luz artificial, conforto visual, controlo do calor relativos à troca de energia entre o interior e exterior, controlo da humidade e desempenho acústico [34].

Como resposta a estes requisitos complexos, tem havido uma vasta pesquisa relativamente a fachadas adaptativas, definidas como sistemas multifuncionais de elevada adaptabilidade, em que o separador físico entre o ambiente interior e exterior consegue adaptar as suas funções, características e comportamento de forma a responder aos vários estímulos exteriores, com o objetivo de melhorar o desempenho do edifício [35].

A evolução no estudo destas fachadas deu origem a diversas tipologias, mostrando o impacto que a pesquisa científica tem no desenvolvimento de soluções inovadoras. A sua classificação constitui um desafio, sendo geralmente classificadas com base na sua adaptabilidade e controlo tecnológico. Foram identificadas as seguintes tipologias: fachadas ativas, passivas, biomiméticas, cinéticas, inteligentes, interativas, móveis, responsivas, *smart* e comutáveis [36, 37].

A eficácia destas tipologias tem sido analisada através de estudos comparativos que utilizam simulação avançada e otimização computacional. De acordo com Bui *et al.* (2020) [38], o uso de fachadas adaptativas em edifícios de escritórios pode reduzir o consumo de energia entre 14% e 29% quando comparando com fachadas estáticas convencionais.

Especificamente, o desempenho varia de acordo com a tecnologia e a estratégia de controlo adotada. Neste contexto, o desenvolvimento de abordagens de otimização computacional como o *Modified Firefly Algorithm* (MFA), permite maximizar este desempenho ao definir os vários valores de U (coeficiente de transmissão térmica) e T_{vis} (transmissão visual) da fachada em tempo real, para depois serem usados como guia para a realização do sistema adaptativo [38].

Esta otimização é bastante relevante quando aplicada a tecnologias de controlo solar e térmico. Os Sistemas de Sombreamento Dinâmico e Vidros Electrocrómicos, são identificados como um dos sistemas que mais contribui para eficiência energética, permitindo uma redução anual de energia térmica entre 26,3% e 31,3%. Sendo o impacto mais considerável relativamente à necessidade de arrefecimento, onde as reduções podem atingir entre 44,7% e 54,4%. Já as fachadas de ventilação ativa (cavidade fechada), embora apresentem uma redução menor no consumo total entre 7,9% e 18,2%, continuam a ser sistemas altamente eficazes na redução das cargas de aquecimento em climas frios, com poupanças de cerca de 27,9% a 30% [39].

Por último, os resultados indicam que estes sistemas devem ser escolhidos de acordo com as condições climáticas, uma vez que alguns sistemas são mais indicados para a mitigação do sobreaquecimento e outros mais indicados para o sobrearrefecimento.

2.3.2 Sistema de Isolamento Térmico Dinâmico (DTIS)

A introdução desta tecnologia marca uma mudança importante na transição de isolamento térmico estático para o dinâmico. Tradicionalmente, estes sistemas são projetados com o objetivo de funcionarem como barreiras passivas, ou seja as propriedades físicas permanecem constantes, limitando a capacidade de resposta mais adequada face às flutuações do clima exterior. Esta falta de flexibilidade aumenta o risco de sobreaquecimento, uma vez que não consegue adaptar o seu desempenho real aos estímulos ambientais.

Em contrapartida, as fachadas adaptativas como mencionado anteriormente representam uma das tecnologias mais promissoras em relação à eficiência energética do setor construtivo. Dentro destas, os sistemas de isolamento dinâmico apresentam uma elevada diversidade, uma vez que não existe uma definição estabelecida para este conceito na literatura internacional. No entanto, estas soluções partilham uma característica em comum, a capacidade de ajustar a sua resistência térmica de acordo com as condições exteriores, regulando as trocas de calor entre o ambiente interno e o ambiente externo [40].

Com este propósito foi possível determinar quatro categorias deste tipo de tecnologias, sistemas passivos (dependentes exclusivamente de fontes naturais e sem auxílio mecânico para alterar a performance), híbridos (combinam fontes naturais com automação simples ou complexa), sistemas ativos (requerem consumo de energia ou componentes mecânicos para forçar a alteração das propriedades térmicas) e sistemas não especificados (de classificação ambígua) [40].

Complementarmente, as diversas estruturas de isolamento dinâmico também podem ser categorizadas em função do tipo do fluido e do regime de circulação adotado. Embora possam ser usados fluidos como a água e líquidos de refrigeração, o uso do ar é o mais comum no setor da construção. O objetivo fundamental é a introdução de um fluido em movimento de forma que o seu comportamento seja alterado [41]. De modo a estruturar o estado atual do conhecimentos destas tecnologias, Koenders *et al.* (2018) [42] apresentaram os diversos sistemas de isolamento dinâmico, fazendo uma caracterização de acordo com o seu funcionamento e indicadores de desempenho. Como se pode observar na Tabela 1, as tecnologias de isolamento dinâmico podem ser agrupadas em diferentes tipologias.

Neste contexto de utilização do ar como fluido regulador, o estudo de Karanfti e Theodosiou (2024) [43] apresenta uma investigação detalhada sobre uma Fachada Ventilada Opaca (OVF) que foi combinada com o conceito de isolamento dinâmico. A inovação deste sistema consiste na criação de um percurso do fluxo de ar que contorna o isolamento térmico assim fazendo com que haja um arrefecimento direto no núcleo da parede, em vez de apenas travar as transferências de calor, como acontece nas configurações convencionais.

Tabela 1 – Sistematização das várias tipologias de isolamento dinâmico [42].

Mecanismo	Descrição	Intervalo do fluxo dinâmico			Método de Simulação	Indicador de desempenho
		λ [W/m.K]	U [W/m².K]	R [m².K/W]		
Convecção (ar)	Parede Parietodinâmica – Isolamento Dinâmico em Espaço Vazio (VSDI)	–	0,092-0,20	5,00-10,87	Solidworks Flow Simulation	–
	Parede Permeodinâmica (Parede respirante)	–	0,01-0,21	4,75-100,00	1D Modelo Analítico	Emissões de CO ₂ [kgCO ₂ /m²] 1) Consumo total de energia [kWh/(m².ano)] 2) Ultrapassagem da temperatura operativa
	Sistema de Isolamento Dinâmico Translúcido: Elemento de fachada com isolamento comutável (FESU)	–	0,70-1,90	0,53-1,43	TRNSYS	
	Componentes da envolvente do edifício permeáveis ao ar com ventilação	–	–	–	Modelo próprio em Matlab recorrendo ao FDM	Temperatura interior
Convecção (líquido)	Termodifusão bidirecional	0,062-0,360	0,62-3,60	0,28-1,61	Modelo analítico de transferência de calor	–
	Depósitos de fluido de baixa e alta condutividade	0,018-0,640	0,90-3,23	0,31-1,11	Modelo analítico de transferência de calor	–
Pressão variável (gás)	Isolamento em vácuo de condutância variável (VCI)	0,020-0,188	1,00-9,40	0,11-1,0	–	–
	Adsorção/Dessorção de hidrogénio	0,003-0,170	0,15-8,50	0,12-6,67	Modelo térmico 1-D de fachadas solar-ar	Ganhos de energia solar [kWh/m²]
	Pressão variável em manta de aerogel	0,011-0,017	–	–	Simulação computacional	Consumo de energia ponderado [kWh/m²]
	Pressão variável em sílica pirogénica (VIP)	0,007-0,019	–	–	Simulação computacional	Consumo de energia ponderado [kWh/m²]
Interação superficial variável (gás)	Variação do número de camadas de ar	0,032-1,769	0,14-7,69	0,13-7,2	–	–
Variação do livre percurso médio	Alteração da temperatura para variar a orientação de nanotubos de carbono em suspensão líquida	0,400-1,200	–	–	–	–
Isolamento Móvel	Thermocollect: painel de isolamento móvel	–	–	–	Modelo de simulação próprio	Necessidade de aquecimento/arrefecimento [kWh/ano]

Para avaliar o desempenho das tecnologias combinadas foram simuladas quatro configurações de parede representativas do clima mediterrâneo, todas ajustadas para manter o mesmo valor de U [43]. As tipologias analisadas foram as seguintes:

- CAV-BR – Composta por uma camada de alvenaria de tijolos cerâmicos perfurados de 20 cm, onde a cavidade do ar se localiza entre o isolamento térmico exterior e o tijolo;
- BR-CAV-BR – Caracteriza-se por dividir a camada de alvenaria em duas camadas de 10 cm, posicionando a cavidade de ar no centro da parede;
- CAV-CONC – Utiliza uma camada de betão de 25 cm no lado interno, fazendo com que a cavidade de ar fique entre o isolamento térmico exterior e o betão;
- CAV-LWBR – Constituída da mesma maneira que a CAV-CONC mas diferindo só na camada interna, esta sendo de betão leve de 20 cm.

De acordo com os resultados o sistema de isolamento dinâmico é mais eficaz quando a massa térmica é dividida, como na configuração BR-CAV-BR, que atingiu uma maior eficiência face à dissipação de calor (155%). Por outro lado, a parede CAV-LWBR apresentou o desempenho mais baixo (111%), comprovando que materiais com maior massa térmica limitam a capacidade de libertação do calor durante o período mais favorável, este sendo o período noturno. De forma global, os resultados mostraram que com a implementação destas duas tecnologias permite uma eficiência de remoção de calor entre 2,1 a 2,6 vezes superior à de uma OVF convencional, especialmente quando as aberturas permanecem abertas durante a noite para maximizar o arrefecimento passivo [43].

Adicionalmente a estas estratégias mencionadas anteriormente, surge o conceito de Sistema de Isolamento Ativo (*Active Insulation System* - AIS) em circuito fechado. Isto é, ao contrário das fachadas ventiladas tradicionais que trocam o ar com o exterior, este utiliza condutas de ar internas e ventiladores de baixa voltagem, de forma a fazer o ar circular em torno da camada isolante contornando a resistência térmica do isolamento.

No estudo efetuado por parte de Koenders *et al.* (2018) [42], a parede estudada foi caracterizada em estados distintos de funcionamento. No Modo Estático (Off), o ar no interior das condutas não circula, permanecendo estagnado, fazendo com que tenha um comportamento tradicional com um valor de U de 0,185 (W/m².K). Já no Modo Ativo (On), com o movimento do ar induzido pelos ventiladores promove a troca de calor entre as faces interna e externa da parede, elevando o valor de U para 1,657 (W/m².K).

A eficácia deste mecanismo está, ligada à configuração da massa térmica da fachada. Os resultados demonstraram que o sistema atinge o seu desempenho ideal em estruturas com uma camada exterior leve e uma interior pesada. Pelo contrário, utilizando camadas pesadas exteriores torna a resposta do sistema mais demorada, devido à maior retenção de calor por parte dos materiais [42].

Ao avaliar a aplicabilidade do AIS em diferentes contextos climáticos europeus, esta revelou-se capaz de reduzir a necessidade de aquecimento em até 22%, utilizando cerca de 75% menos energia auxiliar do que os sistemas de ventilação noturna, demonstrando que pode vir a ser uma alternativa viável face aos sistemas de arrefecimento ativo em cidades como Amsterdão, Helsínquia e Estugarda, sendo que em Lisboa ainda seria necessário o uso de arrefecimento ativo por ainda haver um tempo considerável de desconforto [42].

Para além disso, também é importante ter em conta a influência da geometria da cavidade e as condições de escoamento do fluido (ar). O estudo realizado por Zhang *et al.* (2023) [44], sobre a combinação de um sistema de isolamento dinâmico com Materiais de Mudança de Fase (PCM) demonstra que a resistência térmica aparente pode ser alterada através da variação entre a convecção natural e a maneira como o ar se move dentro da cavidade através da convecção forçada por parte dos ventiladores. Nestas configurações, o regime de convecção forçada permite que a parede não tenha tanta dificuldade a dissipar o calor uma vez que esta atinge valores de resistência térmica aparente mais baixo.

Além disso, o desempenho térmico está estritamente relacionado com parâmetros geométricos de cavidade. Demonstrou-se que uma razão altura/comprimento elevada e um aumento na altura da cavidade, induzem fluxos de ar mais intensos e aumentam o tempo de contacto entre o fluido e o material, o que favorece as transferências de calor entre as várias camadas da envolvente [44].

A velocidade de escoamento do ar desempenha ainda um papel duplo no desempenho térmico do sistema, uma vez que o principal objetivo é fazer com que o PCM mude de estado sólido para líquido de forma a introduzir uma maior dissipação de energia [44].

De acordo com os resultados, caudais de ar mais elevados (velocidade próximas de 1,0 m/s) maximizam a taxa global de dissipação de calor para o exterior mas como não existe tanto tempo de contacto entre o ar e o material, este não consegue mudar de estado tão eficientemente. Por outro lado, velocidade de escoamento mais baixo (como 0,05 m/s) resulta num tempo de contacto maior, o que promove a antecipação do processo de fusão do PCM [44].

Em síntese, a transição de sistemas de isolamento estáticos para soluções dinâmicas e adaptativas representa um avanço crucial relativamente à eficiência energética no setor da construção. A análise dos estudos apresentados demonstra que a eficácia destes sistemas não depende apenas do sistema de isolamento, mas da interação estratégica entre a massa térmica, a geometria da cavidade de ar e a velocidade de escoamento do fluido (ar). Desta forma, o isolamento dinâmico torna-se numa das principais ferramentas capaz de transformar a envolvente dos edifícios de uma barreira passiva para um sistema ativo de gestão térmica.

2.4 ANÁLISE CRÍTICA

A trajetória regulamentar europeia, fixada através de várias revisões da EPBD, tem imposto exigências cada vez mais significativas ao setor da construção, fazendo uma transição dos edifícios NZEB para o conceito de ZEB estabelecido pela EBPB 2024. Esta evolução impõe que, a partir de 2030, todos os novos edifícios apresentem emissões de carbono nulas no local. No entanto, a implementação destas metas tem sido centrada em torno de estratégias de isolamento térmico e estanquidade ao ar extremos, o que pode gerar uma incoerência física e funcional face aos estímulos dinâmicos que os edifícios estão sujeitos.

De acordo com a literatura, verifica-se que uma abordagem exclusivamente focada no cumprimento de normas de consumo tem como tendência ignorar a complexidade da Qualidade do Ambiente Interior (IEQ). Ao projetar envolventes como “fortalezas climáticas”, os edifícios acabam por funcionar como barreiras passivas que proporcionam uma desconexão entre o interior e o contexto ambiental exterior.

Com anomalias na temperatura global média, a volatilidade climática e a frequência das ondas de calor extremo intensificam-se. Neste contexto o isolamento estático pode ser problemático, embora reduzindo a necessidade de energia para o aquecimento, acaba por limitar a capacidade de o edifício dissipar o calor, aprisionando os ganhos térmicos solares e internos no seu interior. Isto acaba por resultar num aumento progressivo do risco de sobreaquecimento, forçando o recurso a sistemas de arrefecimento ativo, consequentemente, elevando o consumo energético global.

Esta suscetibilidade das envolventes estanques e estáticas torna-se notória quando analisamos sistemas construtivos como o LSF. Embora tenham ganho uma crescente relevância no setor residencial devido à sua rapidez de execução e sustentabilidade, a constituição física destes sistemas introduz um desafio em relação ao seu desempenho térmico (a baixa inércia térmica).

Ao contrário dos sistemas de construção pesada, que utilizam materiais que conduzem a uma elevada inércia térmica e que permitem amortecer as flutuações da temperatura através do armazenamento de calor, o sistema LSF é caracterizado apresentar uma resposta quase imediata por parte do sistema.

O estudo realizado por Roque *et al.* (2021) [30], que monitorizou duas células teste em Portugal, provou experimentalmente, que apesar de ambos os sistemas LSF e alvenaria tradicional apresentarem desempenhos semelhantes durante os meses frios, a diferença é bastante significativa na época de calor. A célula construída em LSF demonstrou uma aproximação muito mais rápida aos níveis de desconforto térmico superior (sobreaquecimento), o que sugere uma maior vulnerabilidade aos ganhos térmicos internos do que a construção pesada.

Este problema torna-se bastante mais importante quando projetada a longo prazo. A investigação de Rodrigues *et al.* (2013) [29] sobre o potencial de sobreaquecimento em habitações de estrutura de aço leve revela um cenário preocupante face às alterações climáticas. Enquanto no contexto atual os riscos possam ser considerados aceitáveis, as simulações para os anos de 2050 e 2080 demonstram uma degradação severa do conforto interior. O ponto mais crítico reside principalmente de que as estratégias passivas convencionais de arrefecimento, como o sombreamento e a ventilação natural, não terão efeito ou serão insuficientes para mitigar estes riscos.

Perante a incapacidade das soluções passivas em responder aos desafios climáticos futuros no sistema LSF, a literatura aponta para novas soluções como as fachadas adaptativas. Dentro delas destacam-se os Sistema de Isolamento Térmico Dinâmico (*Dynamic Thermal Insulation System* - DTIS) e Ativo (AIS). Estes sistemas, que permitem um ajuste da resistência térmica da envolvente em função das condições interiores e exteriores, apresentam resultados promissores. Contudo, observa-se uma tendência clara na investigação atual em que, a vasta maioria dos estudos de isolamento térmico dinâmico se foca em estruturas de construção pesada. Esta preferência justifica-se pela possibilidade de maior parte da construção atualmente, ser com este tipo de solução.

Este vazio na investigação torna-se ainda mais evidente quando tentamos reduzir estes resultados ao sistema LSF. Existe uma falta de dados em como integrar eficazmente condutas de ar, e se for o caso, ventiladores de baixa voltagem numa estrutura que é menos robusta e mecanicamente mais complexa que as soluções pesadas. Para além disso, estas paredes são marcadas pela presença de pontes térmicas induzidas pelos perfis metálicos que podem comprometer o desempenho de qualquer camada isolante. Assim sendo, dentro da literatura disponível não existe uma resposta clara para a seguinte pergunta: de que forma a geometria e tipologia da parede LSF, seja ela estrutura fria, quente ou híbrida, condicionam o fluxo do ar e a eficácia do isolamento térmico dinâmico?

É neste contexto que a otimização geométrica dos sistemas de isolamento térmico dinâmico assume relevância. Como demonstrado no estudo realizado por Zhang *et al.* (2023) [44], parâmetros como a razão entre a altura e o comprimento, a altura total da cavidade e as características do escoamento do ar são determinantes para o desempenho geral deste sistema. Ignorar estes fatores pode resultar em sistemas ineficientes, que acabam por falhar na dissipação de calor ou até consumir energia auxiliar através dos ventiladores sem gerar um benefício térmico que justifique esse gasto.

Em suma, esta análise crítica revela que o futuro do LSF num clima em mudança pode ser mais promissor se tiver a capacidade de se tornar termicamente adaptativo. No entanto, essa adaptabilidade exige de um design geométrico otimizado e de precisão.

O presente trabalho surge, portanto, para apresentar uma nova abordagem sobre a influência da configuração geométrica no desempenho de um Sistema de Isolamento Térmico Dinâmico, apresentando simultaneamente uma solução inovadora aplicada ao sistema LSF, fazendo uma transição de uma envolvente tradicionalmente passiva para um sistema ativo, capaz de mitigar eficazmente os riscos de sobreaquecimento.

3

METODOLOGIA DE MODELAÇÃO

3.1 ENQUADRAMENTO

O presente estudo centra-se na avaliação e otimização do desempenho de um sistema de isolamento térmico dinâmico (DTIS) integrado numa solução construtiva LSF, com vista à mitigação do risco de sobreaquecimento. Neste contexto, um dos principais parâmetros que influencia bastante o desempenho deste sistema é a geometria da abertura por onde o ar entra. Logo, é importante trabalhar para a sua otimização através de uma análise detalhada tendo em conta as várias variáveis que impactam no desempenho, nomeadamente, as temperaturas interior e exterior, a espessura da caixa de ar, e a temperatura e velocidade de admissão do ar.

Para tal, foi usado o software *Ansys Discovery (AD)* [45] para simular a transferência de calor no sistema relativamente aos vários cenários geométricos que foram estabelecidos. Para fazer simulações dentro do *AD*, primeiramente foram desenvolvidas nove geometrias para a fachada em estudo, sendo uma delas o caso de estudo base para se utilizar como referência e as outras oito para comparar os resultados entre as várias geometrias. Foram ainda analisados os cinco parâmetros anteriormente mencionados (temperaturas exterior e interior, espessura da caixa de ar, temperatura e velocidade do ar) de forma a caracterizar as condições de fronteira de cada simulação, permitindo assim avaliar o comportamento térmico do sistema em diferentes contextos. No total, foram considerados 216 cenários para o caso de estudo base e mais 32 cenários para as restantes oito geometrias da parede para perceber o impacto destas. Os resultados deste conjunto de simulações foram posteriormente analisados e tratados, encontrando-se a respetiva discussão detalhada no Capítulo 4.

Nesse sentido, foram realizadas várias etapas, desde a fase inicial de aprendizagem do software e o desenvolvimento dos modelos geométricos até à realização das simulações e respetiva análise dos resultados, nomeadamente:

- Familiarização e aprendizagem do software *Ansys Discovery (AD)*;
- Realização da avaliação preliminar e validação com a literatura;
- Modelação geométrica dos cenários em estudo;
- Definição dos parâmetros e condições de fronteira essenciais às simulações;
- Execução das simulações para os 248 cenários delineados;
- Extração e sistematização dos resultados obtidos;
- Tratamento dos resultados com base nos indicadores-chave de desempenho (KPIs);
- Comparação crítica e discussão dos resultados com o intuito de evidenciar o comportamento térmico e o desempenho de cada geometria.

A metodologia adotada neste trabalho está sintetizada na Fig. 4 e será detalhada nas secções seguintes.

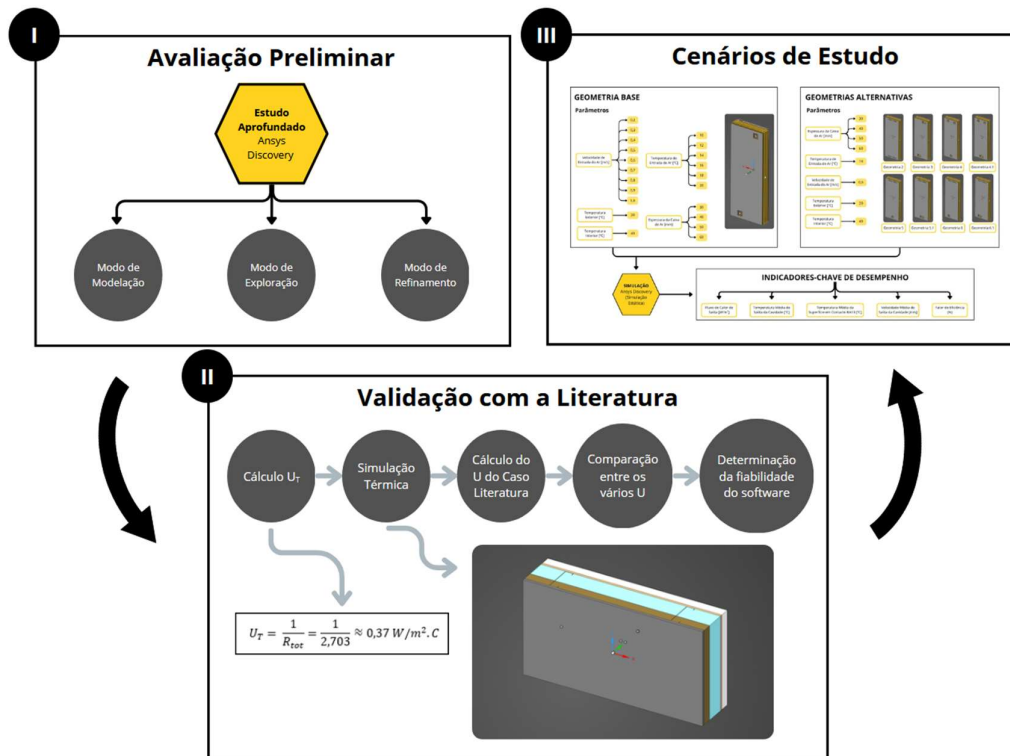


Fig. 4 – Síntese das etapas metodológicas desenvolvidas no Capítulo 3.

3.2 AVALIAÇÃO PRELIMINAR

Para dar início ao estudo, realizou-se primeiro uma avaliação preliminar do programa de simulação a partir de dados disponíveis na literatura. O principal objetivo desta fase foi a familiarização com o software utilizado, facilitando assim o posterior estudo dos casos já apresentados. Desta forma, foram realizadas as primeiras simulações teste com recurso a uma parede exemplo, que será descrita com mais pormenor posteriormente no subcapítulo 3.3.

Numa análise mais detalhada, o *Ansys Discovery (AD)* é uma plataforma computacional avançada de modelação e simulação tridimensional. Através deste ambiente é possível realizar múltiplos estudos, designadamente análises térmicas, estruturais, de otimização topológica e de dinâmicas de fluidos computacional (CFD). A sua principal inovação reside na integração da modelação geométrica direta com *solvers* numéricos de elevado desempenho baseados em processamentos gráficos (GPU), o que permite a execução das análises mencionadas de forma quase instantânea e interativa. Adicionalmente, o software está estruturado em três modos de trabalho sequenciais que serão também mais aprofundados: o Modo de Modelação (*Model Stage*), o Modo de Exploração (*Explore Stage*) e o Modo de Refinamento (*Refine Stage*) [45].

O Modo de Modelação constitui a fase inicial no fluxo de trabalho no *AD*. O seu principal propósito é a criação de geometrias tridimensionais, através de ferramentas concebidas de forma a simplificar, corrigir e parametrizar o modelo geométrico, garantindo que este se encontra apto para as fases de simulação seguintes. Relativamente às ferramentas presentes neste modo, o processo inicia-se com as funcionalidades de posicionamento espacial e desenho bidimensional. Esta etapa estabelece as referências geométricas antes da geração de volumes tridimensionais. Desta forma, as funcionalidades constituintes do Modo de Modelação dividem-se em duas categorias fundamentais:

1. Ferramentas Fundamentais de Preparação e Esboço:

- Modo de Esboço (*Sketch Mode*) – É este o ambiente onde se desenvolvem os perfis bidimensionais de referência, através de instrumentos de desenho geométrico como Linhas (*Lines*), Retângulos (*Rectangles*), Círculos (*Circles*), entre outros. Estes estabelecem os contornos iniciais da geometria.

- Planos de Referência (*Reference Planes*) – Este instrumento permite a criação de planos auxiliares em qualquer coordenada do espaço tridimensional ou a partir de faces já existentes. A partir destes planos é possível desenhar novas geometrias, permitindo modelar de forma precisa vários componentes que sejam necessários na geometria em execução.
- Ferramentas de Medição e Dimensionamento (*Measure & Dimension*) – Utilizadas para verificar distâncias, ângulos e áreas de forma imediata.

2. Ferramentas de Modelação Direta e Edição Volumétrica:

- Ferramenta *Pull* (Arrastar/Extrudir) – Ao selecionar uma face ou contorno, realizado na fase anterior, e arrastá-lo dinamicamente ao longo de um eixo, o software executa automaticamente uma extrusão, convertendo um plano num sólido tridimensional. Adicionalmente ainda existem várias funções dentro desta ferramenta que consoante a intenção do utilizador e a direção do movimento, esta adapta-se e executa-as, sendo as funções *Revolve*, *Sweep*, *Draft* e *Blend*.
- Ferramenta *Move* (Mover) – Permite mover ou rodar faces, arestas, superfícies ou sólidos inteiros com base num referencial de coordenadas tridimensional.
- Ferramenta *Combine* (Combinar) – Esta ferramenta é essencial para a gestão de múltiplas geometrias. Permite realizar três operações booleanas fundamentais, tais como a operação Unir (*Merge*), que funde uma ou mais geometrias num único volume contínuo, Subtrair (*Subtract*), que utiliza uma geometria como instrumento de corte para remover o volume de outra e Intersetar (*Intersect*), que retém apenas o volume comum às geometrias sobrepostas.
- Ferramenta *Fill* (Preencher) – É altamente direcionada para a simplificação das geometrias, permitindo selecionar todo o tipo de componentes existentes nesta e eliminá-los instantaneamente.

Para complementar a descrição técnica e facilitar a compreensão da interface do *AD*, a Fig. 5 mostra o posicionamento destes comandos e as Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8 apresentam a caracterização e modelação passo a passo de uma geometria simples através da utilização de algumas das ferramentas descritas anteriormente.

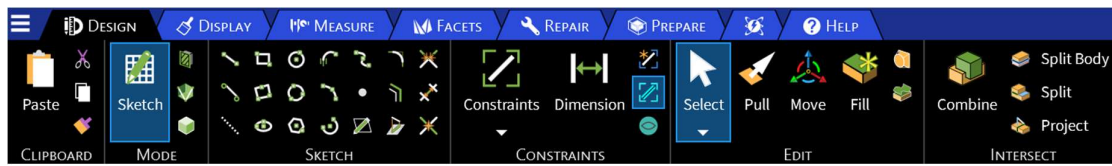


Fig. 5 – Interface do Modo de Modelação do *Ansys Discovery (AD)*.

Para dar início à modelação no Modo de Esboço, utilizou-se o desenho geométrico retângulo para criar um perfil bidimensional com as dimensões de 50x50 mm². A Fig. 6 ilustra o esboço gerado e as opções de ferramenta seleccionada para a sua execução.

De seguida, após estar desenhada a forma geométrica, o software apenas reconhece este como quatro linhas conectadas. Ao premir a tecla D (atalho de conversão automático de curvas em superfícies), o *AD* executa simultaneamente duas ações, a geração de uma superfície plana bidimensional, preenchendo o espaço interior delimitado pelas quatro linhas conectadas, e a ativação da modelação direta. Esta transição retira o utilizador do Modo de Esboço transferindo-o para o ambiente tridimensional, onde se tornam acessíveis as ferramentas de edição volumétrica.

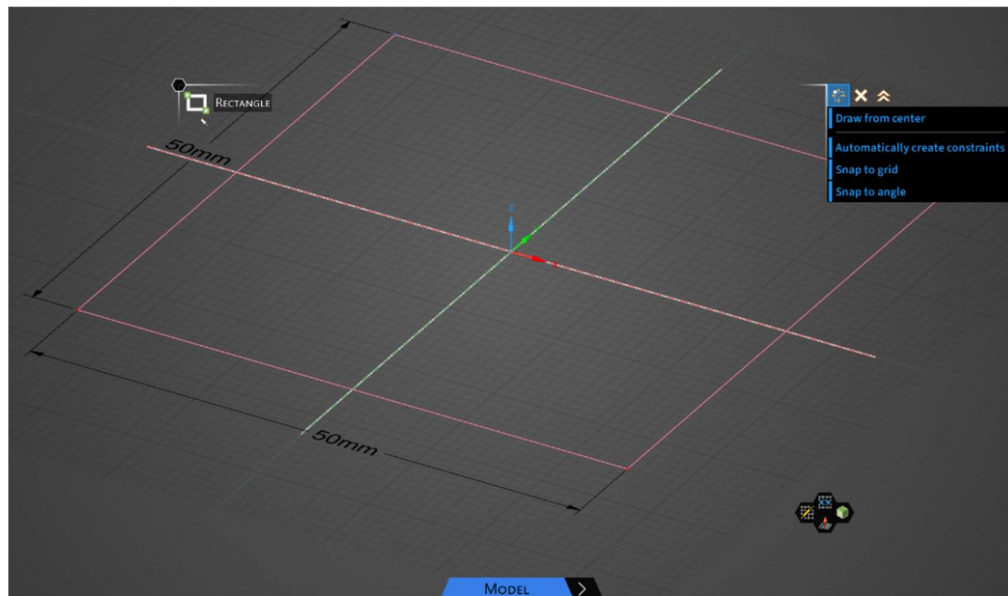


Fig. 6 – Criação do esboço inicial do plano bidimensional (50x50 mm).

A Fig. 7 demonstra a superfície plana já criada e preparada para a etapa seguinte.

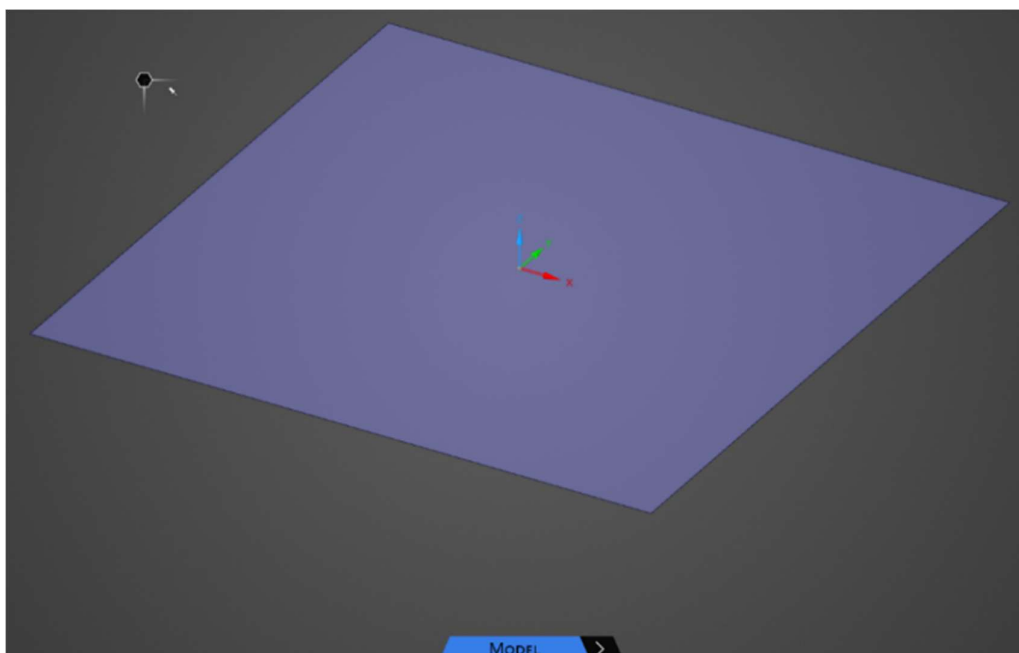


Fig. 7 – Superfície plana bidimensional gerada após a conversão do esboço.

Com a superfície gerada, utilizou-se a ferramenta Pull para efetuar a extrusão do perfil. Ao selecionar a face da superfície e arrastá-la dinamicamente no sentido ascendente, promoveu-se a geração do volume. Neste caso, definiu-se uma altura de 50mm para a geometria, observando-se a mesma finalizada na Fig. 8.

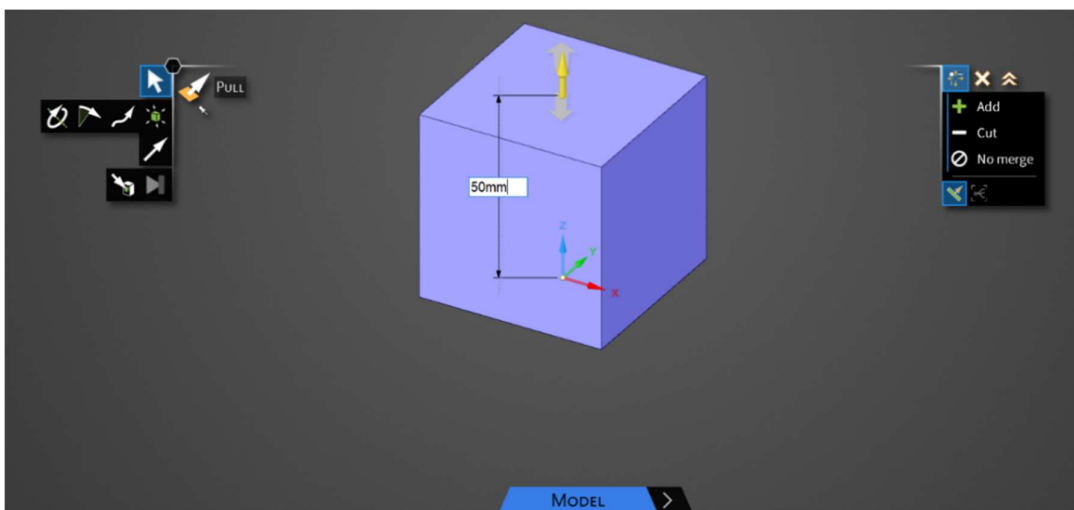


Fig. 8 – Extrusão tridimensional da superfície através da ferramenta Pull.

Finalizada a geometria, o Modo de Exploração constitui a segunda fase do processo de trabalho do *AD*. O seu principal objetivo é permitir a avaliação física imediata dos conceitos geométricos desenvolvidos na etapa anterior. Para tal, primeiramente é necessário fazer a configuração das condições de fronteira e a parte física do modelo. Notando que nesta etapa se definem as variáveis ambientais e operacionais que atuam na simulação, aplicando de forma direta as grandezas físicas necessárias para a caracterização do cenário em estudo.

Neste âmbito, a primeira ação a desenvolver será a especificação do tipo de material de cada componente da geometria. Este passo estabelece a base para a definição do comportamento referente aos parâmetros fundamentais oferecidos pelo Modo de Exploração, os quais abrangem a determinação das condições estruturais, de escoamento, térmicas do sólido e de excitação eletromagnética. Como exemplos deste tipo de condições destacam-se a aplicação de temperaturas fixas superficiais, fluxos de calor, velocidade de entrada de fluidos e pressões de saída, temperatura de entrada de fluidos, entre outros parâmetros. Após esta caracterização, torna-se possível avançar para a execução das simulações.

A monitorização dos resultados é efetuada através de ferramentas gráficas que indicam os diferentes parâmetros de saída pretendidos. O Modo de Exploração serve, então, para simplificar a análise comparativa entre os vários casos de estudo, permitindo identificar as soluções menos eficientes antes de avançar para a próxima etapa de refinamento numérico. A Fig. 9 ilustra a interface disponível para a definição destes parâmetros.

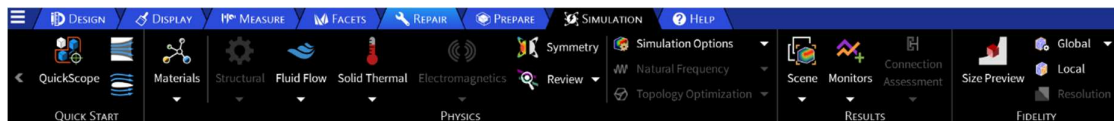


Fig. 9 – Interface de configuração das condições de fronteira relativo ao Modo de Exploração.

Finalmente, o Modo de Refinamento constitui a terceira e última fase do fluxo de trabalho, sendo direcionado para a validação final e simulação de alta precisão. Isto é, através de ferramentas que permitem ao utilizador controlar a densidade e tamanho da malha dos elementos, torna-se possível obter resultados com maior exatidão e rigor.

Este objetivo é alcançado através do refinamento local e da otimização do custo computacional. O primeiro (refinamento local) aplica uma malha mais densa e detalhada em zonas críticas onde se preveem resultados não tão rigorosos porque a malha não consegue detetar a geometria. Enquanto a segunda (otimização do custo computacional) mantém uma malha mais “económica” em regiões de comportamento linear, em que a elevada precisão não é tão necessária, mantendo um equilíbrio ideal entre o tempo de processamento e a precisão numérica. Adicionalmente, este modo assegura a transição direta para os algoritmos de cálculo mais potentes e de maior fidelidade do *Ansys*. Através desta integração, o ambiente aciona dois *solvers* mais consagrados e validados, o *Ansys Fluent*, direcionado para a dinâmica de fluidos computacional, e o *Ansys Mechanical*, responsável pela análise térmica e estrutural.

Uma vez concluído o processo, as ferramentas de extração de dados permitem exportar relatórios detalhados, tabelas de dados brutos e gráficos de desempenho baseados nos indicadores-chave de desempenho (KPIs) definidos.

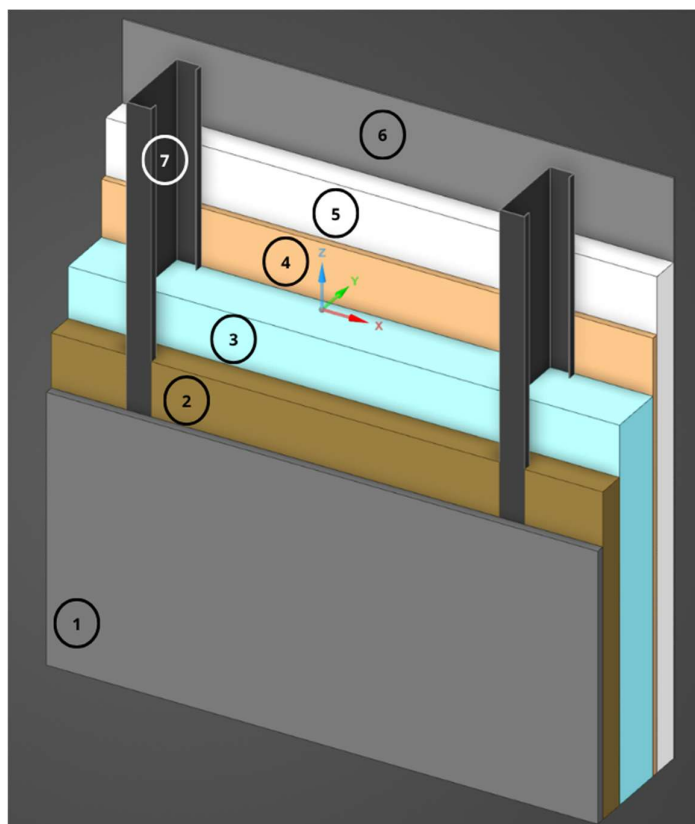
3.3 VALIDAÇÃO COM A LITERATURA

Após a familiarização com a plataforma *AD*, iniciou-se um estudo de controlo com o propósito de avaliar a consistência e coerência dos resultados gerados pelo software. Para tal, selecionou-se um modelo de referência de uma parede em sistema LSF modelada numa tese de doutoramento. A parede foi modelada no *AD* garantindo-se a total correspondência construtiva. Esta abordagem permitiu fazer uma validação comparativa direta entre os dados numéricos simulados no *AD* e os resultados publicados na dissertação mencionada [46].

Adicionalmente, realizou-se o cálculo analítico do coeficiente de transmissão térmica teórico (U_T) do elemento construtivo de acordo com a norma ISO 6946. A presença do perfil metálico entre as várias camadas da parede constitui uma ponte térmica significativa que tem de ser considerada no cálculo. Por este motivo, não foi possível a aplicação do método tradicional de cálculo do coeficiente de transmissão térmica, obtido a partir da contribuição de cada camada.

Ao aplicar o método simplificado para componentes heterogêneos da referida norma, verificou-se que o rácio entre o limite superior e o limite inferior da resistência térmica excede o valor de 1,5. Este resultado, como será demonstrado posteriormente, invalida a viabilidade deste método analítico. Ainda assim, o valor resultante deste cálculo será mantido no presente estudo exclusivamente como termo comparativo entre o desempenho da simulação do modelo computacional desenvolvido e a parede descrita na literatura.

Iniciando o estudo, previamente à realização dos cálculos térmicos, procedeu-se à caracterização detalhada das várias camadas da parede e sua constituição. A solução construtiva de referência selecionada está representada e descrita em detalhe na Fig. 10:



1 – Placa de Gesso Cartonado (15mm); 2 – Lã Mineral (50mm); 3 – Caixa de Ar (100mm); 4 – Placas de derivados de Madeira de Frestas Orientadas [OSB] (12mm); 5 – Poliestireno Expandido (50mm); 6 – Gesso Armado (3mm); 7 – Perfil de Aço (C150*43*1,5).

Fig. 10 – Modelo geométrico da parede exemplo e a sua constituição [46].

Complementarmente a Tabela 2 sistematiza as propriedades físicas de cada material constituinte da solução construtiva em LSF, designadamente a condutibilidade térmica (λ), o calor específico (c), a densidade (ρ) e a resistência térmica (R). Estes parâmetros foram retirados da literatura de referência, enquanto a resistência térmica do ar (R_{ar}) foi estabelecida de acordo com a norma ITE50.

A resistência térmica de cada camada foi determinada a partir da equação (1) [47]:

$$R_i = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (1)$$

Em que R_i é a resistência térmica da camada i ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), e_i é a espessura da camada i (m) e λ_i é a condutibilidade térmica da camada i ($W/m \cdot ^\circ C$).

Tendo em conta que a espessura da caixa de ar em análise é de 100mm, adotou-se para a respetiva resistência térmica, R_{ar} , o valor de $0,18 m^2 \cdot ^\circ C/W$.

Tabela 2 – Propriedades físicas dos materiais integrados no sistema construtivo em LSF [46].

Materiais	λ [W/m.°C]	c [J/kg.°C]	ρ [kg/m³]	R [m².°C/W]
Placa de Gesso Cartonado	0,19	1009	607	0,07895
Lã Mineral	0,037	1030	27	1,351
Caixa de Ar	0,556	1005	1,23	0,18
Placas de derivados de Madeira de Frestas Orientadas	0,12	1400	610	0,10
Poliestireno Expandido	0,036	1450	20	1,389
Gesso Armado	0,75	735	1540	0,004
Perfil de Aço	60	434	7854	-

Após a definição das características e propriedades físicas da parede foi possível estabelecer o U_T , com base nas diretrizes da norma ISO 6946 [48]. Esta norma define o método para determinar a resistência térmica total de componentes construtivos constituídos por camada homogéneas e heterogéneas.

A resistência térmica total, R_{tot} , de um componente constituído por camadas termicamente homogêneas e heterogêneas paralelas à superfície é determinada através da média aritmética entre os seus limites superiores e inferiores [48], segundo a equação (2):

$$R_{tot} = \frac{R_{tot;upper} + R_{tot;lower}}{2} \quad (2)$$

Em que R_{tot} é a resistência térmica total da parede ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), $R_{tot;upper}$ corresponde ao limite superior da resistência térmica total ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), calculado assumindo um fluxo de calor unidimensional, e $R_{tot;lower}$ representa o limite inferior da resistência térmica total ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), refletindo a dispersão lateral do calor em direção às pontes térmicas do perfil.

Para o cálculo do limite superior, a parede é idealizada como um conjunto de secções térmicas paralelas. A resistência total de cada secção engloba as resistências ($R_{si} = 0,13$ e $R_{se} = 0,04$ $m^2 \cdot ^\circ C/W$) e a soma em série das camadas atravessadas (gesso cartonado, gesso armado, OBS e poliestireno extrudido). A metodologia distingue o alinhamento da caixa de ar, constituído pela lâ mineral e pela caixa de ar, do alinhamento do perfil de aço. Em seguida, aplica-se a média ponderada dos inversos das resistências de cada secção, em função das suas respetivas frações de área, conforme expresso na equação (3):

$$\frac{1}{R_{tot;upper}} = \frac{f_a}{R_{tot;a}} + \frac{f_b}{R_{tot;b}} + \dots + \frac{f_q}{R_{tot;q}} \quad (3)$$

Em que o $R_{tot;upper}$ corresponde ao limite superior da resistência térmica total ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), $R_{tot;a}$, $R_{tot;b}$, ..., $R_{tot;q}$ representam as resistências térmicas totais de ambiente para ambiente para cada secção ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), e f_a , f_b , ..., f_q indicam as frações de área de cada secção.

Para o modelo em análise, conforme a equação (4), a geometria em "C" do perfil divide a transferência de calor em três secções: a alma central (0,25%), as extremidades que formam as abas (6,92%) e a cavidade restante, constituída por lâ mineral e a caixa de ar (92,83%). Substituindo-se os valores, obtém-se a equação (4):

$$\frac{1}{R_{tot;upper}} = \frac{0,0025}{1,745} + \frac{0,0692}{3,230} + \frac{0,9283}{3,273} = 0,3065 \Leftrightarrow R_{tot;upper} = 3,263 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/W \quad (4)$$

Para o cálculo do limite inferior, considera-se que todos os planos paralelos às superfícies da parede apresentam uma temperatura perfeitamente uniforme em toda a sua extensão. Neste caso, a parede é dividida em camadas sucessivas, determinando-se a resistência térmica equivalente de cada secção heterogénea com base nas frações de área dos seus materiais (equação 5).

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_{eq;j}} \quad (5)$$

Em que R_j corresponde à resistência térmica equivalente da camada j ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/W$), d_j é a espessura da camada j (m), e $\lambda_{eq;j}$ representa a condutibilidade térmica equivalente em relação à camada j ($W/m \cdot ^\circ\text{C}$).

Aplicando este princípio à camada que contém o perfil metálico (R_{cav}), obtém-se a equação (6):

$$R_{cav} = \frac{0,0015}{4,336} + \frac{0,0485}{0,187} + \frac{0,0985}{0,705} + \frac{0,0015}{4,818} = 0,400 \text{ m}^2 \cdot C/W \quad (6)$$

Por fim, a resistência total da parede no limite inferior ($R_{tot;lower}$) é obtida através da soma entre as camadas homogéneas e heterogéneas, conforme demonstra a equação (7):

$$R_{tot;lower} = 1,742 + 0,400 = 2,142 \text{ m}^2 \cdot C/W \quad (7)$$

Determinados os limites superior e inferior é possível agora estimar a resistência total (R_{tot}) através da média aritmética entre ambos, como expresse na equação (8):

$$R_{tot} = \frac{3,263 + 2,142}{2} = 2,703 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W} \quad (8)$$

A partir deste valor, foi deduzido o coeficiente de transmissão térmica teórica da parede (U_T), através do inverso da resistência térmica total (R_{tot}), resultando na equação (9):

$$U_T = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{2,703} \approx 0,37 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C} \quad (9)$$

Por fim, verificou-se a aplicabilidade do método simplificado para confirmar se este era válido e se o valor calculado podia servir de referência para a parede descrita na literatura. Conforme demonstrado pela equação (10), o rácio obtido entre os limites superior e inferior da resistência térmica foi de 1,523.

$$\frac{R_{tot;upper}}{R_{tot;lower}} = \frac{3,263}{2,142} = 1,523 > 1,5 \quad (10)$$

Como este valor ultrapassa o limite de 1,5 estabelecido pela norma ISO 6946, a utilização deste método simplificado fica inválida. Logo, para avaliar com precisão o impacto das pontes térmicas originadas pelos perfis metálicos, torna-se essencial recorrer à norma ISO 10211 [49] e adotar métodos de simulação numérica para a análise bidimensional e tridimensional da transferência de calor como foi realizado de seguida.

Concluído o estudo analítico, a investigação avançou para a fase de simulação numérica, na qual se realizou a modelação geométrica e a respetiva análise térmica no *AD*. Esta etapa teve como objetivo avaliar a correspondência e comparar os resultados computacionais em relação ao comportamento teórico calculado anteriormente, constituindo este último uma mais-valia como termo de comparação entre o valor teórico expectável, os dados disponíveis na literatura e os resultados da simulação desenvolvida.

Para reproduzir as condições originais do caso de estudo exemplo, foram impostas duas temperaturas fixas nas faces limites exterior e interior da parede, aplicando-se 0 °C e 20 °C respetivamente. Adicionalmente, de forma a isolar o fluxo de calor na direção perpendicular à parede foram definidas condições de fronteira adiabáticas ao longo dos contornos das paredes.

Para obter um rigor maior dos resultados, definiu-se um refinamento local da malha nos elementos mais críticos da parede. Assim, o perfil de aço foi modelado com uma fidelidade de 1,5 a 0,5mm, enquanto a camada de gesso cartonado contou com um intervalo de 3 a 0,5mm.

A Fig. 11 mostra a geometria modelada e as propriedades físicas inseridas para as simulações.

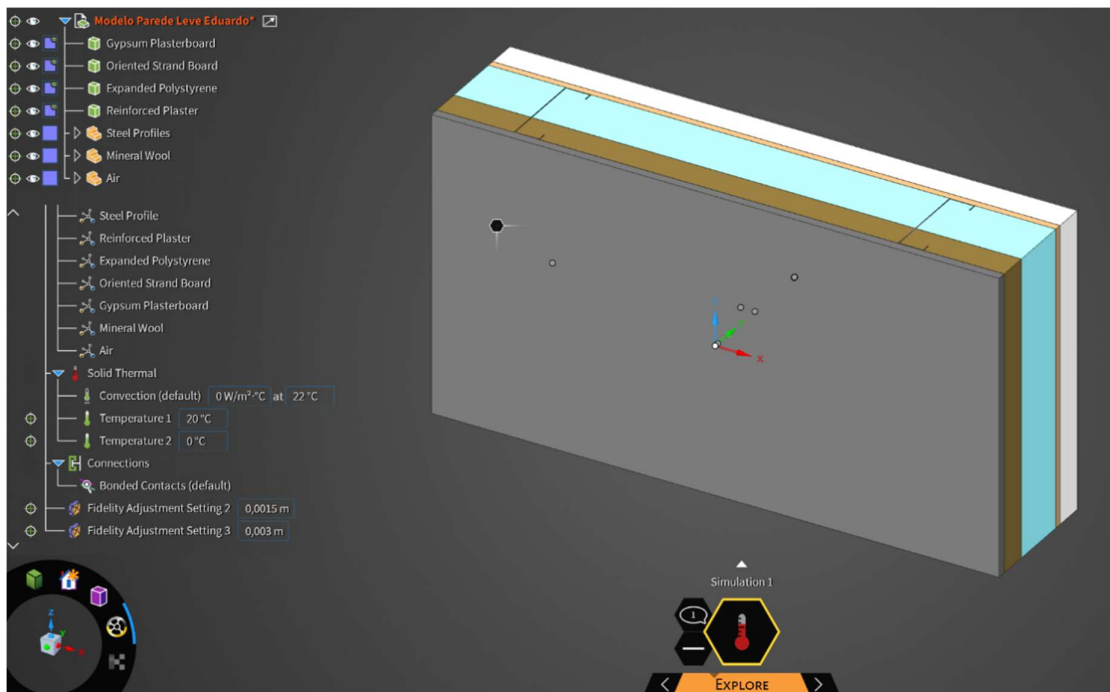


Fig. 11 – Configuração do modelo geométrico para a simulação térmica.

Concluídas as simulações, foram recolhidos os dados necessários para a determinação do coeficiente de transmissão térmica (U_{sim}) da parede exemplo. Para o efeito, extraíram-se os valores do fluxo de calor gerados pelo software e aplicou-se a Lei de Fourier da condução de calor para obter a resistência térmica da parede simulada (R_{sim}), como mostra a equação (11).

$$q = \frac{\Delta T}{R_{sim}} \Leftrightarrow R_{sim} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{(20 - 0)}{8,05} = 2,48 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W} \quad (11)$$

Em que R_{sim} é a resistência térmica da parede simulada ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), ΔT representa a diferença da temperatura entre as superfícies ($^\circ C$), e q corresponde ao fluxo de calor por unidade de área (W/m^2).

A resistência térmica total ($R_{sim;total}$) foi obtida somando a resistência térmica da parede simulada (R_{sim}) e as resistências superficiais interna e externa (R_{si} e R_{se}), de acordo com a equação (12):

$$R_{sim;total} = R_{si} + R_{sim} + R_{se} = 0,13 + 2,48 + 0,04 = 2,65 \text{ } m^2 \cdot C/W \quad (12)$$

Em que $R_{sim;total}$ representa a resistência térmica total da parede simulada ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), R_{si} a resistência térmica superficial interna ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), R_{se} a resistência térmica superficial externa ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), e R_{sim} é a resistência térmica da parede simulada ($m^2 \cdot ^\circ C/W$).

De seguida, determinou-se o coeficiente de transmissão térmica da simulação através do inverso da resistência térmica total simulada, seguindo o procedimento aplicado na Equação (9), o que resultou na Equação (13):

$$U_{sim} = \frac{1}{2,65} = 0,38 \text{ } (m^2 \cdot C/W) \quad (13)$$

Os valores obtidos através do software oscilaram num intervalo entre 0,37 e 0,39 $W/m^2 \cdot ^\circ C$, variando em função dos parâmetros de fidelidade local adotados, sendo que com uma malha mais detalhada os valores convergiram para 0,38 $W/m^2 \cdot ^\circ C$. Comparando os resultados obtidos com o resultado teórico e o resultado disponível na literatura, observa-se que os resultados gerados pelo software apresentam uma elevada proximidade do valor teórico expectável.

O valor apresentado na literatura ($U = 0,36 \text{ } W/m^2 \cdot ^\circ C$) revelou uma diferença mínima em relação à estimativa teórica. A Fig. 12 apresenta uma comparação direta entre os valores do coeficiente de transmissão térmica (U), obtidos por via teórica, da literatura e por simulação térmica no *AD*.

Globalmente, este estudo permitiu desenvolver e validar as competências de modelação e simulação no *AD*, confirmando a consistência dos resultados obtidos. Esta convergência entre os valores teóricos e simulados valida a fiabilidade do software e a metodologia adotada, assegurando que o *AD* é uma ferramenta adequada para as simulações pretendidas nesta dissertação.

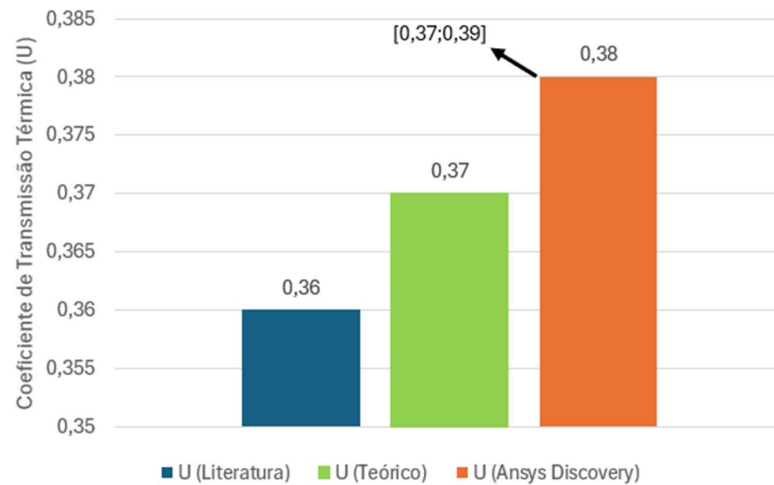


Fig. 12 – Comparação entre os coeficientes de transmissão térmica (U) teóricos, simulados e da literatura.

3.4 CENÁRIOS DE ESTUDO

A metodologia de simulação adotada estrutura-se em três fases principais: i) definição e modelação da geometria base, com a respetiva seleção e parametrização das variáveis de entrada; ii) desenvolvimento dos modelos para as geometrias alternativas, incorporando igualmente a definição das variáveis de entrada; e iii) execução das simulações numéricas para os diferentes cenários e extração dos indicadores-chave de desempenho (KPIs).

A Figura 13 sistematiza estas três etapas, detalhando a parametrização das variáveis, as configurações alternativas para as aberturas de ventilação na cavidade e as métricas utilizadas na avaliação dos resultados.

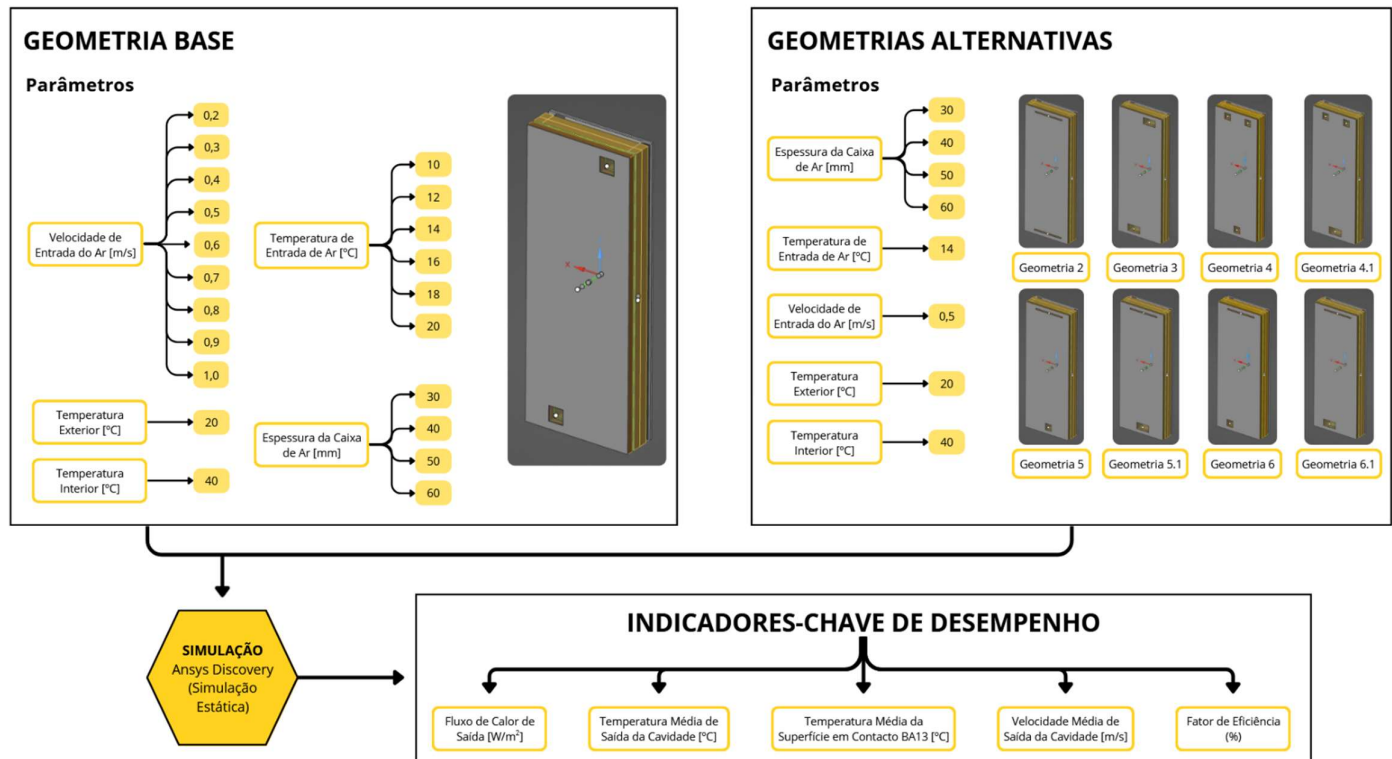


Fig. 13 – Mapeamento dos parâmetros das condições de fronteira, geometrias simuladas e respetivos indicadores-chave de desempenho (KPIs).

3.4.1 Constituição e Propriedades Físicas dos Modelos Geométricos

Dando início aos vários cenários de estudo, foi necessário realizar a modelação geométrica das paredes e introduzir as propriedades físicas das diferentes camadas constituintes. Importa notar que todos os modelos apresentam uma composição interna idêntica, diferenciando exclusivamente na geometria das aberturas de admissão e exaustão do fluxo de ar. O modelo base selecionado é o sistema SKINIUM, desenvolvido numa parceria das empresas PERFISA, Gyptec Ibérica, Amorim Cork Solutions e MAPEI. Para a modelação consultou-se a informação disponível na plataforma digital desenvolvida pelas empresas para a promoção do sistema e também um contacto direto com as mesmas para garantir a máxima fiabilidade do modelo face ao sistema real [50].

Desta forma, a articulação com os fabricantes e a análise detalhada das fichas técnicas disponibilizadas permitiram estruturar a estratigrafia do sistema SKINIUM como sintetiza a Tabela 3. É importante destacar que entre os quatro sistemas comerciais disponíveis, a presente investigação foca-se especificamente no sistema de fachada SKINIUM WS2.

Tabela 3 – Camadas do sistema de fachada SKINIUM WS2.

Posição	Material	Espessura [mm]
Acabamento colorido		
Face Exterior	1 Barramento Armado MAPEI (MAPETHERM AR2 + MAPENET P)	1,2 + 4
	Buchas de Fixação Mecânica	
	2 Paineis ICB Amorim	40+
	3 Adesivo Mapei (MAPETHERM AR2)	4
	4 GYPTEC PROTECT	12,5
Cavidade	1 Perfil LSF UC-150 PERFISA (Thermosteel)	150
	2 Duas camadas de lã mineral Volcalis Alpha ($\lambda 35$) rolo no interior dos perfis (60mm + 60mm)	
Face Interior	1 Placa de Gesso GYPTEC BA13	12,5
	2 Placa de Gesso GYPTEC BA13	12,5
	3 Massa de acabamento	1-2

Definida a constituição do sistema, procedeu-se à modelação geométrica na plataforma *AD*, aplicando-se o conhecimento consolidado através da avaliação preliminar. De forma a otimizar o custo computacional e garantir a eficiência das simulações, introduziram-se simplificações em algumas camadas da envolvente. Na Face Exterior, a camada 1 foi simplificada referente à sua espessura e condutibilidade térmica (λ), adotando-se uma espessura única de 5,2mm e uma condutibilidade de 0,43 W/m.°C (MAPETHERM AR2). Em contrapartida, a camada 3 da Face Interior não foi inserida no modelo, devido à sua reduzida espessura que apresenta um impacto desprezável nas análises térmicas. A configuração final do sistema, após este processo de modelação, encontra-se representada na Fig. 14.

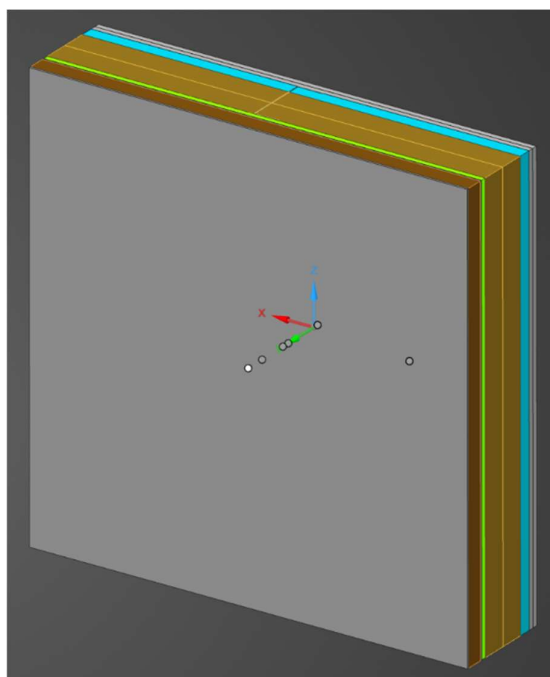


Fig. 14 – Modelo geométrico tridimensional do sistema WS2 no *Ansys Discovery*.

Posteriormente, definiram-se as propriedades físicas de cada material. Para a camada correspondente à caixa de ar, foi necessário determinar a sua resistência térmica seguindo a metodologia descrita no subcapítulo anterior. Utilizando o valor de referência de $0,18 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ para a resistência térmica de cavidades de ar não ventiladas com fluxo de calor horizontal, obteve-se uma condutibilidade de $0,167 \text{ W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$. Importa salientar que esta propriedade específica se aplicou à determinação da resistência térmica total (R_T) do sistema sem o sistema DTIS (Fig. 14), através de simulação.

Doutro modo, nas simulações correspondentes ao regime de isolamento térmico dinâmico, ou seja com as aberturas e a circulação de ar na cavidade interior da parede, adotou-se o modelo de material “Ar” disponível na plataforma *AD*, uma vez que a cavidade passa a comportar-se como um espaço ventilado. A Tabela 4 demonstra as propriedades físicas de cada material retiradas das fichas técnicas fornecidas pelas empresas representantes do sistema.

Tabela 4 – Propriedades Físicas dos materiais integrados no sistema de fachada WS2 [50].

Materiais	λ [W/m.°C]	c [J/kg.°C]	ρ [kg/m³]	R [m².°C/W]
MAPETHERM AR2 (Barramento Armado MAPEI)	0,43	100	1400	0,012
MAPETHERM AR2 (Adesivo MAPEI)	0,43	100	1400	0,093
Painel ICB Amorim	0,039	1600	110	1,026
GYPTEC PROTECT	0,165	1000	880	0,076
Perfil LSF UC-150 PERFISA (Thermosteel)	54	434	7854	-
Lã Mineral Volcalis Alpha	0,035	1030	27	1,714
Caixa de Ar	0,167	1010	1,23	0,180
Placa de Gesso BA13	0,1	1000	600	0,125

3.4.2 Caracterização Geométrica

Consolidada a modelação do sistema inicial, estabeleceram-se as diferentes configurações geométricas a integrar nos casos de estudo com ventilação do espaço de ar interior, modeladas a partir do volume tridimensional apresentado na Fig. 14.

É importante notar que o sistema DTIS é obtido a partir de aberturas na face exterior da parede que ligam a uma cavidade de ar atrás da camada de isolamento, permitindo assim que a parede no seu modo condutivo apresente uma resistência térmica mais baixa. A Fig. 15 mostra a geometria do sistema DTIS.

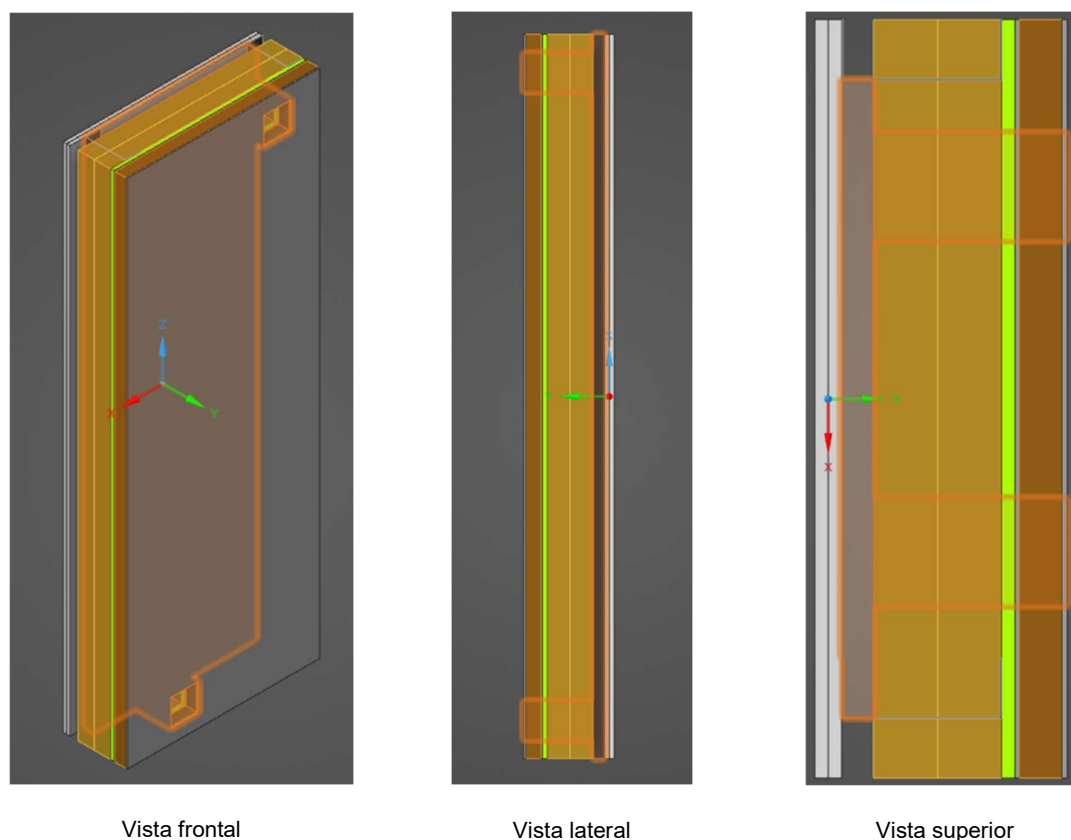


Fig. 15 – Configuração geométrica do sistema DTIS integrado na fachada em LSF, evidenciando as aberturas na face exterior e a cavidade de ar.

Para tal, desenvolveram-se nove variantes nas quais as aberturas de admissão e exaustão de ar resultam de combinações das seguintes geometrias: secções quadradas de $100 \times 100 \text{ mm}^2$; retangulares de $200 \times 100 \text{ mm}^2$ e retangulares de $443 \times 22,6 \text{ mm}^2$. Dependendo do cenário em análise, o posicionamento das cavidades de ventilação varia ao longo da fachada, localizando-se na zona central, no alinhamento esquerdo ou no alinhamento direito do modelo.

A seguinte nomenclatura foi utilizada para que haja a maior compreensão possível: Geometria Base, uma vez que esta vai ser a geometria onde se vão realizar as simulações com todos os valores das condições de fronteira (análise paramétrica); e as restantes oito, denominadas por Geometria 2, Geometria 3, Geometria 4, Geometria 4.1, Geometria 5, Geometria 5.1, Geometria 6 e Geometria 6.1, em que apenas se simularam os cenários referentes à temperatura de admissão de 14°C e à velocidade de $0,5 \text{ m/s}$. A Fig. 16 mostra geometria de cada modelo.

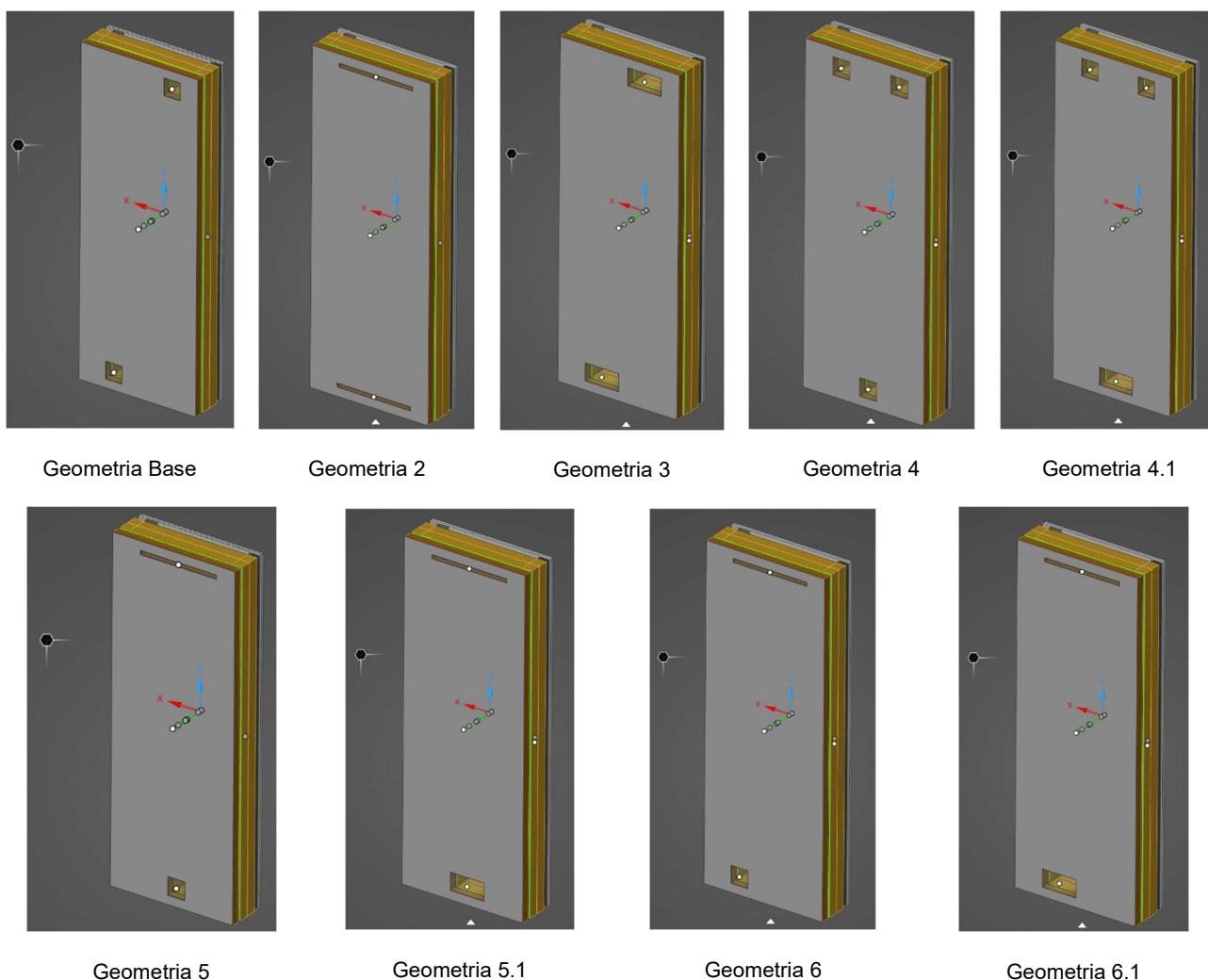


Fig. 16 – Caracterização Geométrica dos vários cenários de estudo.

Fazendo uma análise das geometrias, na Geometria Base, as aberturas de admissão e exaustão de ar têm uma secção quadrada de $100 \times 100 \text{ mm}^2$, apresentando um alinhamento à esquerda e à direita, respetivamente. A Geometria 2 é constituída por condutas retangulares de $443 \times 22,6 \text{ mm}^2$ (mesma área útil que na geometria base), tanto na admissão como na exaustão, com uma disposição central em ambas. Na Geometria 3 as duas cavidades são constituídas por uma geometria retangular de $200 \times 100 \text{ mm}^2$ (dobro da área útil da geometria base), em que a admissão se localiza no alinhamento esquerdo da fachada e a exaustão no alinhamento direito.

As Geometrias 4 e 4.1 relativamente à área de exaustão, têm as mesmas geometrias, consistindo em duas saídas quadrangulares de $100 \times 100 \text{ mm}^2$, diferindo na admissão onde a Geometria 4 tem uma geometria quadrangular com as mesmas dimensões que a de saída, enquanto a Geometria 4.1 apresenta uma geometria para a admissão retangular de $200 \times 100 \text{ mm}^2$. As admissões são centradas e as extrações estão nos cantos da parede.

Uma lógica semelhante aplica-se às Geometrias 5, 5.1, 6 e 6.1. Nas Geometrias 5 e 6, a abertura de admissão é igual, apresentando uma forma quadrada de $100 \times 100 \text{ mm}^2$, mas com posicionamentos distintos: a Geometria 5 tem um alinhamento central e a Geometria 6 um alinhamento à esquerda. Quanto à exaustão, ambas partilham de uma secção retangular de $443 \times 22,6 \text{ mm}^2$. Por fim, as Geometrias 5.1 e 6.1 mantêm os mesmos alinhamentos (central e à esquerda, respetivamente), mas a sua conduta de admissão passa a ser retangular de $200 \times 100 \text{ mm}^2$.

3.4.3 Definição das Condições de Fronteira

Com a modelação das geometrias concluída e as propriedades físicas inseridas, foram estabelecidas as condições de fronteira para o estudo dos vários cenários. Assim, as primeiras duas condições definidas foram as temperaturas interior e exterior aplicadas nas faces da parede. Como o objetivo principal deste estudo é avaliar o desempenho do sistema de isolamento dinâmico numa fachada em LSF para facilitar o arrefecimento interior, a parede foi analisada num cenário de sobreaquecimento, onde a face interior tem uma temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ e a face exterior tem uma temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, garantindo um fluxo de calor do interior para o exterior.

A condição seguinte foi a temperatura de admissão do ar, que foi parametrizada, iniciando nos $10 \text{ }^\circ\text{C}$ e foi subindo de 2 em 2 até atingir o máximo de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta variação permite avaliar a sensibilidade do sistema perante as oscilações da temperatura de admissão do ar. As Fig. 17 e Fig. 18 mostram como estas condições foram aplicadas e introduzidas no AD, tendo sido escolhida a Geometria Base como exemplo.



Fig. 17 – Temperaturas superficiais na face interior e exterior.

A próxima condição considerada foi a velocidade de admissão do ar na cavidade, que também foi parametrizada, começando com uma velocidade de 0,2 m/s e chegando a um máximo de 1,0 m/s, como demonstra a Fig. 18.

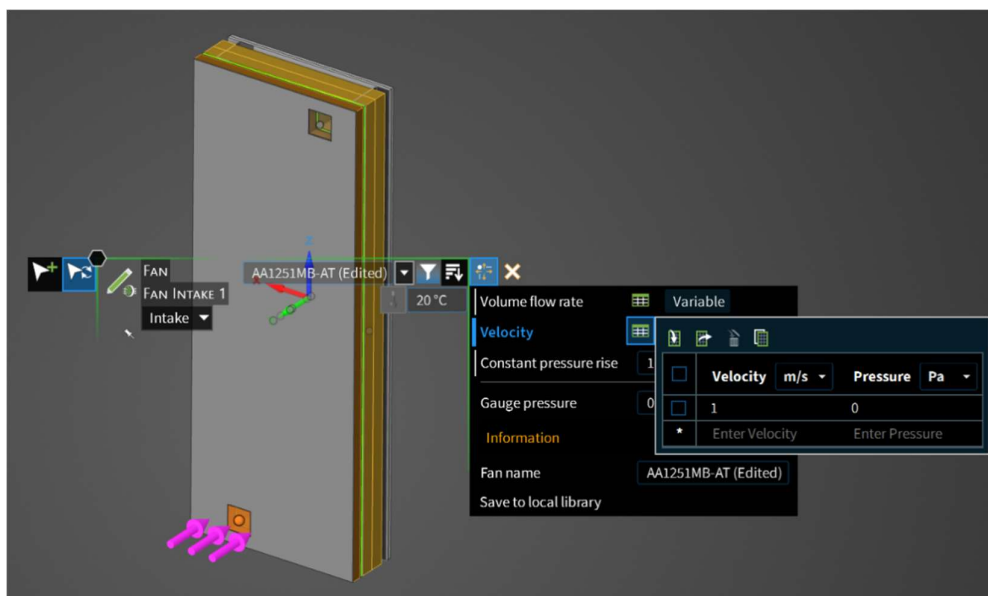


Fig. 18 – Temperatura e velocidade do ar de admissão.

Conforme ilustrado na Fig. 19, a última condição de fronteira determinada foi a espessura da caixa de ar. Esta variável começou nos 30mm e foi aumentando de 10 em 10mm até atingir a espessura máxima de 60mm. O objetivo do estudo desta condição é analisar de que forma a variação do espaço físico da caixa de ar altera o escoamento de ar no interior da parede.

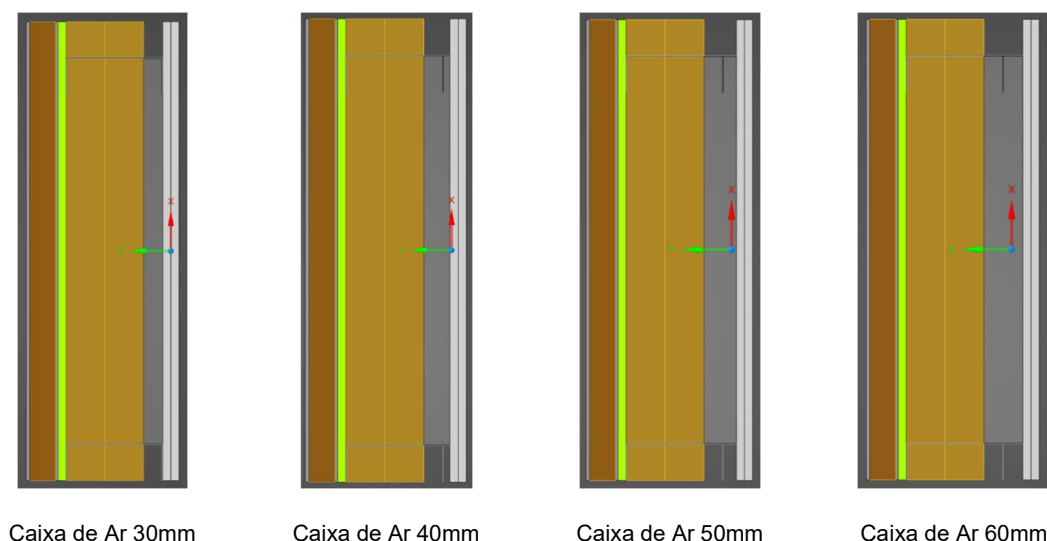


Fig. 19 – Configuração geométrica da Caixa de Ar (30mm a 60mm).

Relativamente ao processo de simulação, é importante notar que esta etapa decorreu sob condições adiabáticas nos contornos da parede, à semelhança do procedimento adotado no capítulo anterior da validação com a literatura. Adicionalmente, para garantir um maior rigor nos resultados, aplicou-se um refinamento local da malha. Este controlo de densidade foi introduzido nos elementos geométricos mais críticos, nomeadamente no perfil de aço (com um tamanho de elemento de 1,5mm), no barramento armado MAPEI (5,2mm) e no adesivo MAPEI (4mm), garantindo com maior exatidão o comportamento térmico detalhado do modelo.

3.4.4 Indicadores-chave de Desempenho

Introduzidas as condições de fronteira, iniciaram-se as simulações térmicas com o objetivo de recolher os dados fundamentais para a análise do sistema. Para o efeito, os dados foram tratados e extraíram-se indicadores-chave de desempenho (KPIs), necessários para compreender como as diferentes variáveis influenciam a dissipação de calor na parede.

Assim, de forma a avaliar e comparar o desempenho do sistema nos vários cenários em estudo, foram selecionados cinco indicadores-chave de desempenho (KPIs), nomeadamente: a velocidade média de saída do ar na cavidade (m/s); o fluxo de calor de saída (W/m^2); a temperatura média da superfície de contacto com o ar (BA13) ($^{\circ}C$); a temperatura média de saída do ar na cavidade ($^{\circ}C$); e o fator de eficiência (η) (%).

Começando pela velocidade média de saída do ar na cavidade, o objetivo é avaliar o comportamento dinâmico do fluido após atravessar o interior da estrutura. Uma vez que o ar sofre variações de temperatura e encontra resistência física ao longo das diferentes geometrias, a medição da velocidade na exaustão torna-se essencial para verificar se o fluxo circula de forma eficiente ou se existem perdas de carga e zonas de estagnação que possam prejudicar o sistema. Ligado a este parâmetro, a temperatura média de saída do ar na cavidade permite avaliar as trocas de calor na cavidade, que se traduzem num aumento da temperatura do ar.

Relativamente à avaliação quantitativa da energia, o objetivo da escolha do fluxo de calor de saída é determinar a energia que o sistema consegue dissipar pela parede. Através deste indicador, é possível perceber qual das configurações geométricas tem a maior capacidade de dissipação.

Complementarmente, a temperatura média da superfície em contacto com o ar (BA13) permite avaliar o comportamento do ambiente interior face às diferentes condições de fronteira estabelecidas. Esta análise permite demonstrar que o registo de temperaturas mais baixas nesta camada reflete um maior sucesso no arrefecimento dinâmico do sistema.

Por último, foi definido um Fator de Eficiência (η) para tentar avaliar e quantificar o desempenho térmico global do sistema dinâmico face ao comportamento teórico da parede. Este indicador é calculado através da equação (14):

$$\eta = \left(1 - \frac{R^*}{R_T}\right) * 100 \text{ (\%)} \quad (14)$$

Em que R^* representa a resistência térmica total ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$), obtida através da soma de R_{si} , R_{se} e da resistência térmica das simulações da parede com o sistema DTIS (R_{sim^*} , para os cenários de estudo). Por sua vez, R_T corresponde à resistência térmica total ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$) obtida somando R_{si} , R_{se} e a resistência térmica da simulação da parede sem o sistema DTIS (R_{simT} , conforme a Fig. 14). Esta abordagem por simulação foi necessária uma vez que a aplicação dos cálculos da norma ISO 6946 [48] era inviável, dado que o rácio foi superior a 1,5, obrigando ao uso da norma ISO 10211 [49]. Este indicador é bastante importante porque normaliza os resultados, permitindo comparar diretamente o desempenho das várias geometrias e cenários. Assim, o Fator de Eficiência traduz de forma clara qual é a configuração que apresenta a maior eficácia na dissipação de calor. A título de referência, importa salientar que a simulação da parede sem o sistema DTIS registou um fluxo de calor de $4,87 \text{ W}/\text{m}^2$, resultando numa resistência térmica simulada (R_{simT}) de $4,107 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ e numa resistência térmica total (R_T) de $4,277 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$.

Com estes cinco indicadores, fica estabelecida a base analítica necessária para a avaliação e discussão dos cenários de simulação que serão apresentados de seguida.

4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, procede-se à apresentação, análise e discussão crítica dos resultados obtidos nas simulações computacionais efetuadas na plataforma *AD*. O principal propósito desta etapa consiste em avaliar a eficácia de cada geometria na dissipação de calor.

De acordo com as etapas metodológicas descritas no capítulo anterior, a investigação engloba um total de 248 cenários simulados. Este conjunto de ensaios computacionais foi estruturado de forma a compreender o impacto isolado das variáveis operacionais (velocidade de admissão do ar e temperatura de admissão do ar) e das condicionantes geométricas (espessura da caixa de ar) no comportamento do fluido e no desempenho global do sistema. Desta forma é possível compreender qual impacto individual de cada variável, fazendo com que seja possível analisar um fator de cada vez. Para tal, a análise dos resultados encontra-se dividida em três fases fundamentais:

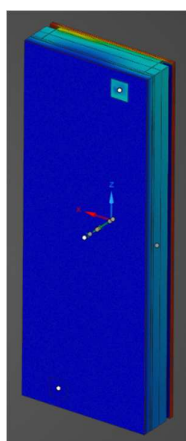
1. Análise do Caso de Estudo Base – dedicada à avaliação rigorosa da Geometria Base ao longo de 216 cenários, nos quais se cruzam as quatro espessuras da caixa de ar (30mm, 40mm, 50mm e 60mm), com as variações de velocidade de admissão do ar (0,2 m/s a 1,0 m/s) e as diferentes temperaturas de admissão do ar (10 °C a 20 °C). Esta fase apoia-se no recurso a gráficos de coordenadas paralelas, para a caracterização global dos dados, e a gráficos de linhas, e de barras para a análise isolada entre os múltiplos KPIs.

2. Avaliação Comparativa das Geometrias Alternativas – focada no estudo das restantes oito variantes geométricas (Geometria 2 a Geometria 6.1) sob um cenário fixo, cujos parâmetros operacionais (velocidade e temperatura do ar) foram selecionados pela sua elevada representatividade face às condições reais do ambiente exterior. Esta abordagem permite validar o desempenho das novas variantes por comparação direta com a Geometria Base de referência, focando-se no impacto específico da configuração, do posicionamento e da tipologia das aberturas de admissão e exaustão.
3. Discussão Holística da Eficiência do Sistema – utiliza-se o Fator de Eficiência (η) como métrica normalizada para classificar o desempenho global de cada cenário face ao comportamento teórico definido pela ISO 10211 [49], determinando assim a configuração otimizada do sistema.

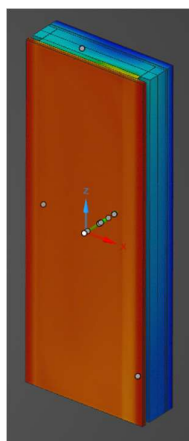
É importante referir que todas as simulações foram executadas sob condições estáticas e adiabáticas no contorno para garantir o fluxo unidimensional de calor, aplicando-se um gradiente térmico fixo: temperatura interior de 40 °C e temperatura exterior de 20 °C.

4.2 ANÁLISE DO CASO DE ESTUDO BASE

O estudo detalhado da Geometria Base engloba a análise global de 216 cenários de simulação, resultantes da combinação das quatro espessuras da caixa de ar com as sucessivas variações na velocidade e temperatura de admissão do fluido. A Fig. 20 ilustra os resultados brutos obtidos para a caixa de 30 mm, sob velocidade e temperatura de admissão de ar de 1,0 m/s e 10 °C.



(a) Vista frontal



(a) Vista traseira



(a) Escala da temperatura

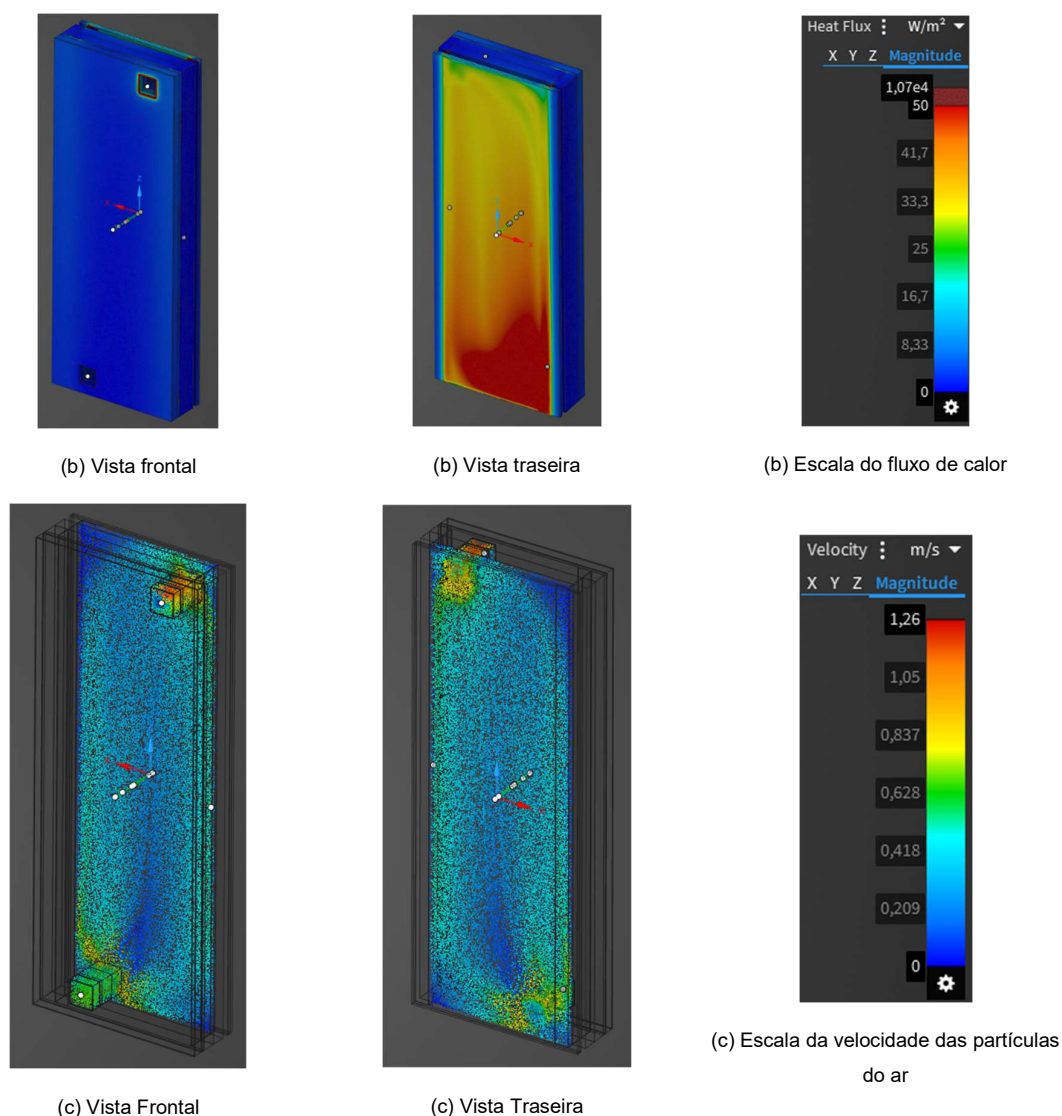
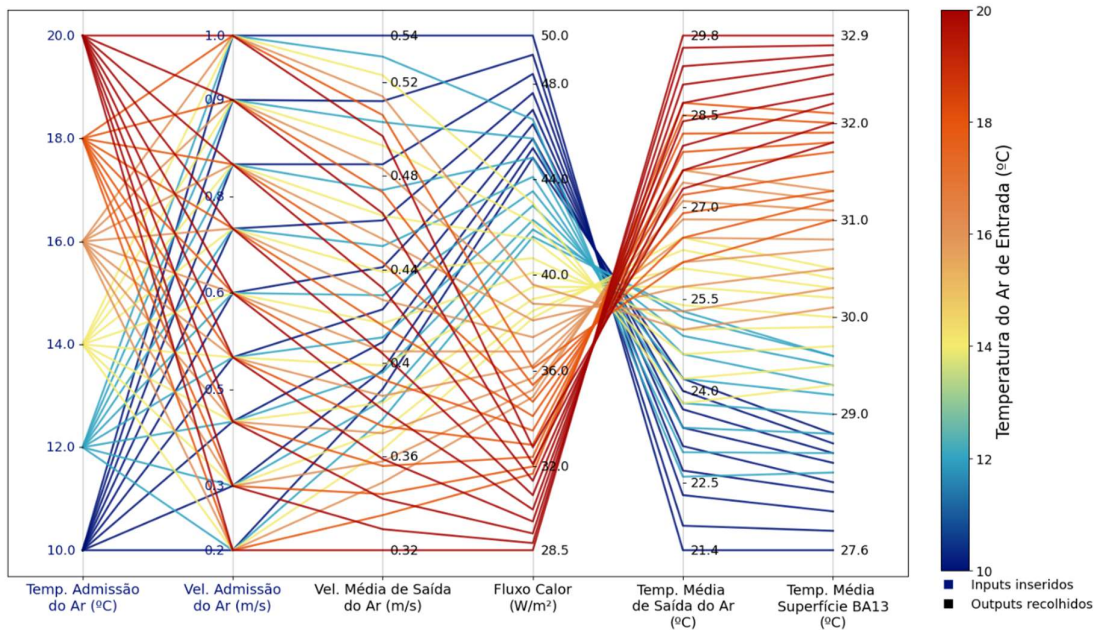
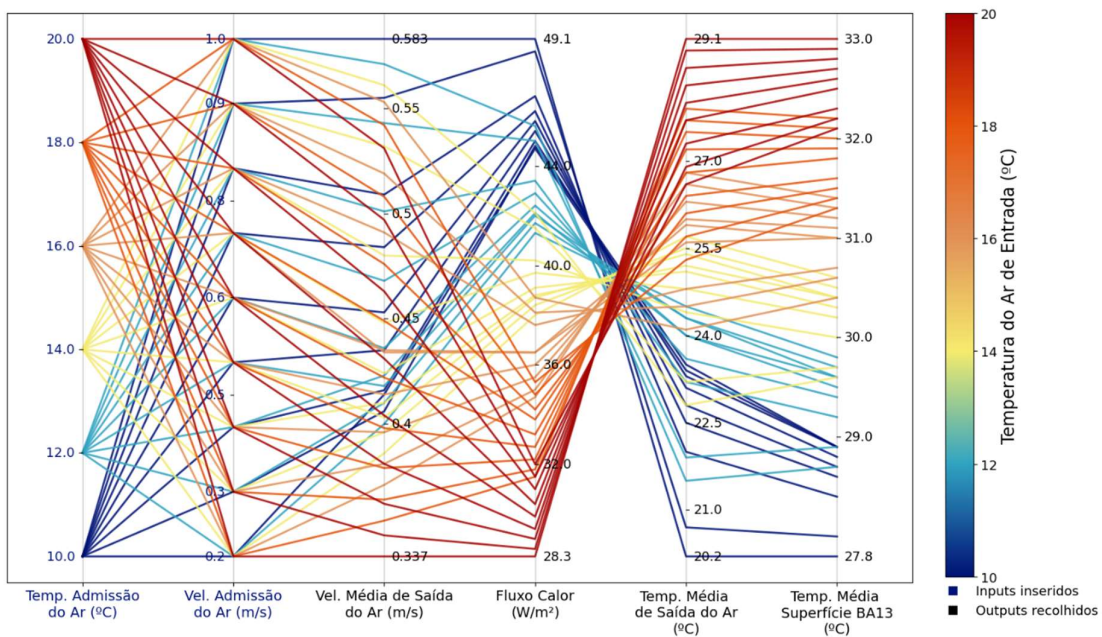


Fig. 20 – Resultados gráficos brutos da Geometria Base (caixa de 30 mm): (a) distribuição de temperaturas, (b) mapeamento do fluxo de calor e (c) vetores de velocidade do escoamento do ar.

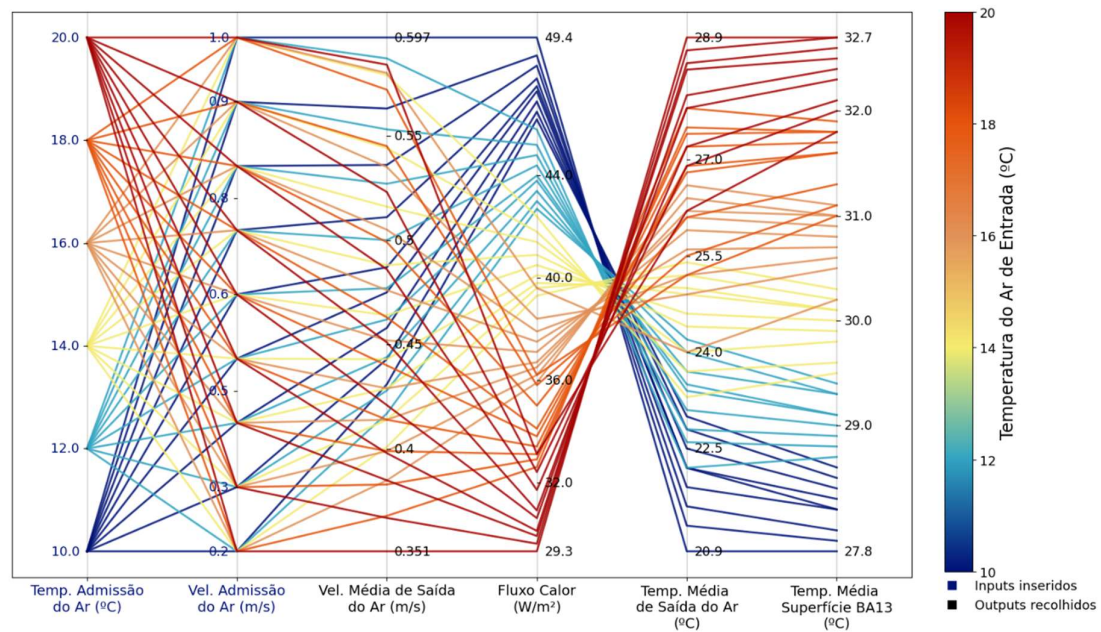
Devido à densidade da matriz de resultados, torna-se essencial adotar uma abordagem visual que permita mostrar simultaneamente múltiplas variáveis, facilitando assim a interpretação global dos resultados. Para esse efeito, recorre-se aos gráficos de coordenadas paralelas apresentados na Fig. 21 para cada uma das dimensões da caixa de ar (30mm, 40mm, 50mm e 60mm). Esta ferramenta analítica atua como um mapeamento panorâmico do sistema, facilitando a compreensão de como as condições de fronteira operacionais interagem para gerar os resultados térmicos finais.



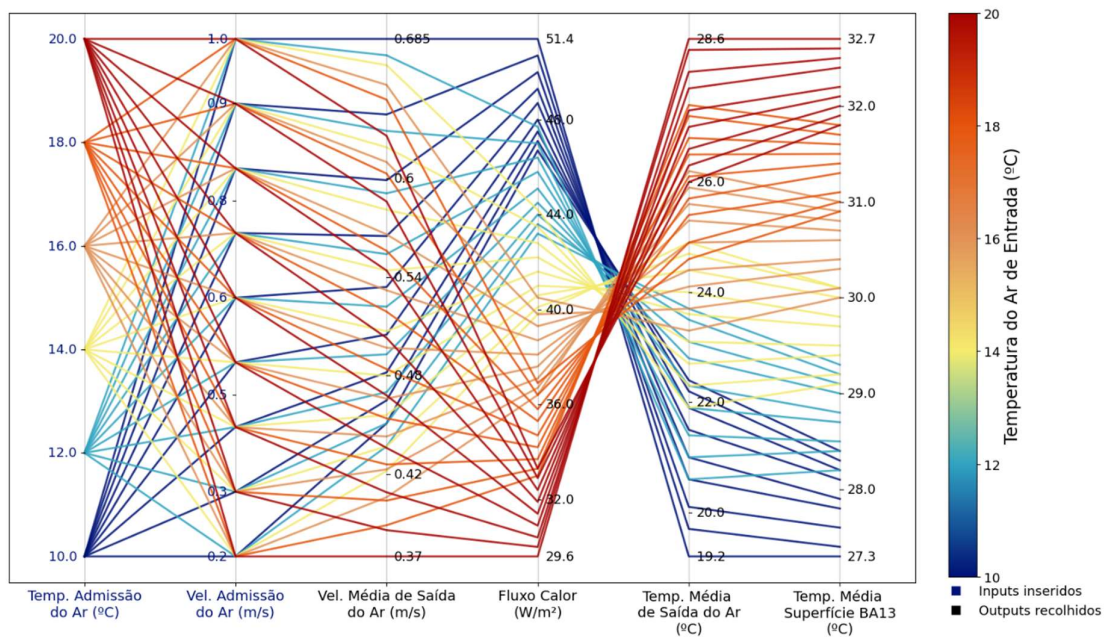
(a) Gráfico de coordenadas paralelas para a caixa de ar de 30mm



(b) Gráfico de coordenadas paralelas para a caixa de ar de 40mm



(c) Gráfico de coordenadas paralelas para a caixa de ar de 50mm



(d) Gráfico de coordenadas paralelas para a caixa de ar de 60mm

Fig. 21 – Comparação global entre as condições de fronteira e os resultado da simulação para diferentes espessuras da caixa de ar.

Na interpretação destes diagramas, os primeiros eixos posicionados à esquerda mostram os parâmetros de entrada: a temperatura e a velocidade de admissão do ar. Os restantes parâmetros correspondem aos indicadores de desempenho extraídos (velocidade e temperatura médias do ar na abertura de saída, fluxo de calor e a temperatura média superficial da placa de gesso BA13). A observação geral destas curvas permite identificar padrões de comportamento consistentes. Torna-se claro que, dentro do intervalo operacional simulado, o aumento da velocidade aliado a admissões de ar mais frio resulta na otimização da taxa de dissipação de calor.

Contudo, para além da influência direta da velocidade e da temperatura, a comparação dos quatro gráficos evidencia o papel da geometria do sistema. Apesar de a distribuição visual das linhas ser semelhante entre as diferentes espessuras, os resultados demonstram que o desempenho varia ligeiramente. Por exemplo, para a velocidade máxima analisada no presente estudo, o fluxo de calor atinge os 50 W/m^2 na caixa de 30mm e sobe para os $51,4 \text{ W/m}^2$ na caixa de 60mm. Em contraste, a caixa de 40mm foge a esta progressão, apresentando um menor pico de $49,1 \text{ W/m}^2$.

Estas diferenças sugerem que a alteração do espaço físico da caixa de ar influencia o padrão do escoamento e a transferência convectiva, e não apenas o volume de ar a circular, embora não de uma forma decisiva. Para fundamentar estas observações, os subcapítulos seguintes analisam e detalham o comportamento do sistema, explorando primeiro a resposta do modelo às condições de fronteira impostas e, de seguida, o estudo do impacto da espessura da caixa de ar no desempenho global.

4.2.1 Impacto da Velocidade e da Temperatura de Admissão do Ar

A primeira análise efetuada para a Geometria Base foi a avaliação do impacto da variação da velocidade e da temperatura de admissão do ar. A Fig. 22, foca-se primeiramente no cenário da Geometria Base com uma caixa de ar de 30mm. Conforme ilustrado é possível observar que o aumento da velocidade de admissão do ar provoca um crescimento contínuo do fluxo de calor. À medida que a velocidade de admissão aumenta de $0,2 \text{ m/s}$ para $1,0 \text{ m/s}$, o fluxo de calor cresce de forma consistente.

Este fenómeno é expectável e confirma o efeito favorável da convecção forçada no interior da caixa de ar, demonstrando que o aumento da velocidade do ar favorece a transferência de calor. Para tal, analisou-se o aumento percentual do fluxo de calor para os valores extremos da velocidade de admissão do ar. Para a velocidade de 0,2 m/s, o fluxo de calor variou entre um mínimo de 28,5 W/m² e um máximo de 44,9 W/m², representando um aumento de cerca de 57,5%. Por sua vez, para a velocidade de 1,0 m/s, os valores oscilaram entre 32,8 W/m² e 50,0 W/m², o que resulta num aumento de 52,4%. Observa-se, assim, que a percentagem de aumento do fluxo de calor é ligeiramente inferior para a velocidade de admissão mais elevada.

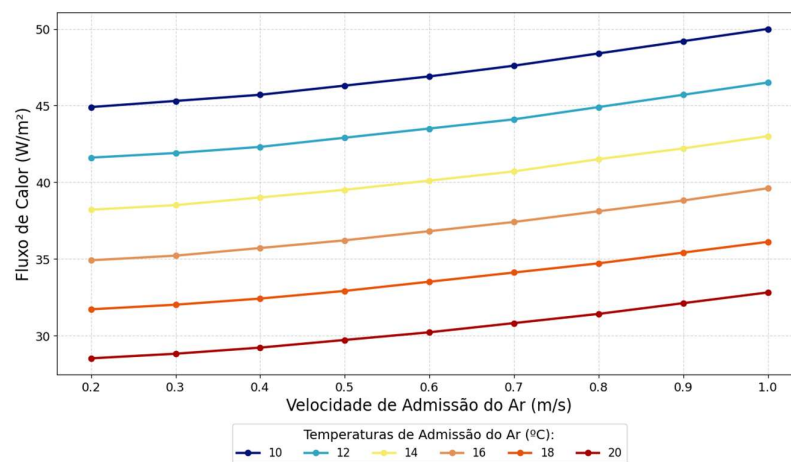


Fig. 22 – Evolução do Fluxo de Calor na camada interior em função da velocidade e da temperatura de admissão do ar para a caixa de 30mm.

Simultaneamente, os dados evidenciam o impacto da temperatura de admissão do ar. Observa-se que a capacidade máxima de transferência de calor ocorre quando o ar injetado é introduzido à temperatura de 10 °C, ou seja, a temperatura mais baixa, atingindo um pico de 50 W/m² à velocidade de 1,0 m/s. Em contrapartida, quando o ar de admissão se encontra a 20 °C, o fluxo de calor diminui substancialmente, registando valores de 32,8 W/m² para a velocidade máxima de 1,0 m/s.

Esta desigualdade de desempenho acontece pela diferença de temperatura entre a superfície da parede interior (estabilizada a 40 °C) e ar introduzido na caixa de ar. Um ar mais frio aumenta o gradiente e, conseqüentemente, a transferência de calor. Contudo, é de notar que mesmo no cenário mais desfavorável (comparando entre as várias velocidades e temperaturas), o fluxo de calor é de 28,5 W/m², superior ao registado no cenário de aberturas fechadas (4,87 W/m²).

Para consolidar a análise do impacto destas condições de fronteira, importa ainda avaliar o efeito na temperatura da superfície da placa de gesso BA13 que está em contacto com a caixa de ar. Sendo este o elemento principal da separação física para o compartimento interior, que se encontra sujeito a um cenário de sobreaquecimento de 40 °C, a evolução da sua temperatura superficial permite compreender a resposta térmica do painel perante as dinâmicas de transferência de calor na caixa de ar.

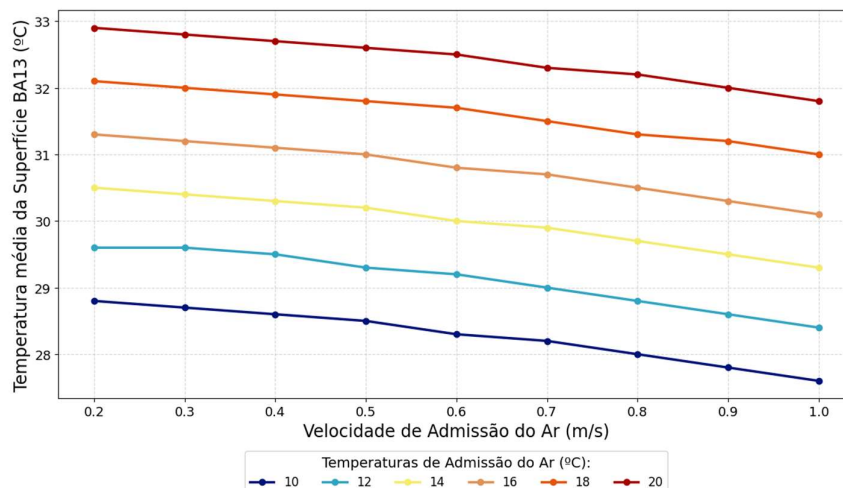


Fig. 23 – Evolução da temperatura média da superfície da placa BA13 em função da velocidade e da temperatura de admissão do ar para a caixa de ar de 30mm.

A observação da Fig. 23 revela uma tendência de redução contínua à medida que a velocidade de admissão do fluido se intensifica. Esta resposta térmica ilustra a eficácia do escoamento na prevenção no arrefecimento da superfície. Ao aumentar a velocidade de admissão, as trocas de calor convectivas na face interna da caixa de ar são maximizadas.

No cenário mais favorável, com o ar injetado a 10 °C a uma velocidade de 1,0 m/s, consegue-se reduzir a temperatura da superfície da placa para valores na ordem dos 27,6 °C. No entanto, quando o ar é injetado a 20 °C e a uma mesma velocidade, a sua ação consegue reduzir a temperatura até cerca dos 31,8 °C. Importa ainda salientar que, mesmo perante condições menos favoráveis (analisando outras temperaturas e velocidades do ar de admissão), o efeito do sistema de isolamento térmico dinâmico é observável, resultando numa temperatura superficial menor à da superfície em contacto com o ambiente interior.

Verifica-se que, com velocidades de admissão mais baixas, o ar permanece mais tempo na caixa de ar e atinge temperaturas mais altas. Contudo, uma temperatura de saída do ar mais elevada não implica, uma maior transferência de calor num dado intervalo de tempo. Ao aumentar a velocidade de admissão, a temperatura na saída desce, mas a taxa de renovação do ar na caixa aumenta significativamente. É esta constante renovação que maximiza a convecção, assegurando um fluxo de calor mais elevado, minimizando assim o risco de sobreaquecimento.

Numa perspetiva global, o padrão de comportamento termodinâmico identificado para a caixa de ar de 30mm, caracterizado pelo aumento progressivo do fluxo de calor e pela resultante redução da temperatura superficial da placa BA13, regista-se de forma global e consistente em todas as espessuras simuladas para a Geometria Base (30mm, 40mm, 50mm e 60mm). Embora a resposta aos estímulos operacionais da velocidade e temperatura de admissão do ar mantenha a mesma lógica física, a dimensão e o sucesso global deste arrefecimento variam de acordo com a dimensão da caixa de ar. Esta variação de desempenho evidencia que o espaço físico disponível para o escoamento afeta a transferência de calor, algo que será discutido em maior detalhe no subcapítulo seguinte.

4.2.2 Influência da Espessura da Caixa de Ar no Desempenho Térmico

Após a análise da influência da velocidade e da temperatura do ar de admissão, avaliou-se o impacto da espessura da caixa do interior da parede. A dimensão da caixa de ar não atua apenas como uma fronteira espacial, mas como um parâmetro ativo que condiciona o volume de fluido em circulação e, como consequência, impacta a eficácia das trocas térmicas por convecção no interior da fachada.

Este subcapítulo foca-se, assim, na variação da espessura da caixa de ar (de 30 a 60mm) e na forma como esta dimensão altera o comportamento do fluido e a consequente extração de energia térmica. Para garantir uma análise comparativa mais rigorosa, isolando apenas o efeito da espessura, a análise foi efetuada fixando a velocidade de admissão do ar num valor de 0,5 m/s. A temperatura de admissão do ar manteve-se parametrizada entre (10 °C e 20 °C).

A observação da Fig. 24 revela que a relação entre o aumento da espessura da caixa e o fluxo de calor não é linear. Contrariando a premissa de que um maior volume de ar resultaria sempre em mais fluxo de calor, verifica-se uma ligeira quebra na transição da caixa de 30mm para a de 40mm. Este fenómeno indica que a espessura de 40mm cria uma condição menos favorável para a Geometria Base, possivelmente gerando um regime de escoamento que prejudica a transferência de calor. Contudo, a partir dos 40mm, verifica-se um crescimento contínuo do fluxo de calor, atingindo o valor mais elevado na espessura de 60mm.

Para quantificar este comportamento, a análise dos dados revela que, para a temperatura de admissão de 20 °C, o fluxo de calor na caixa de 30mm é de 29,7 W/m², decrescendo na caixa de 40mm para 29,4 W/m², o que representa uma redução de 1,01%. Seguidamente, o valor aumenta na caixa de ar de 50mm para 30,1 W/m² e atinge o máximo na espessura de 60mm com 30,9 W/m², correspondendo a duas subidas de 2,38% e 2,66%, respetivamente.

A mesma análise para a temperatura de admissão de 10 °C mostra que o fluxo de calor na caixa de 30mm é de 46,3 W/m², diminuindo para 45,4 W/m² na espessura de 40 mm, o que equivale a uma descida de 1,94%. O fluxo de calor volta a subir na caixa de ar de 50 mm para 47,3 W/m² e atinge os 48,0 W/m² na espessura de 60 mm, representando duas subidas percentuais de 4,19% e 1,48%. É possível observar uma maior diferença na transição da espessura de 40 mm para a de 50mm com a temperatura de admissão de 10 °C, sendo que para a temperatura de 20 °C o maior aumento ocorre na passagem da espessura de 50 mm para a de 60mm.

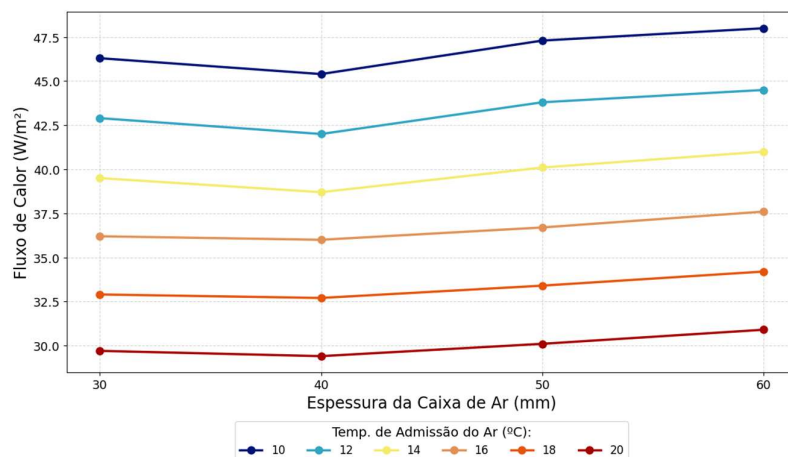


Fig. 24 – Fluxo de calor em função da espessura da caixa de ar e da temperatura de admissão do ar para a velocidade de 0,5 m/s.

O impacto da espessura da caixa de ar também é observável na temperatura média da superfície interior da placa de gesso BA13, como ilustrado na Fig. 25. Na espessura de 40mm, onde a transferência de calor mostrou ser menos eficaz, a superfície da parede interior regista o seu pico máximo de temperatura, confirmando uma maior retenção de calor que penaliza diretamente o espaço habitável.

Em oposição, à medida que a caixa de ar aumenta a espessura para os 50mm e 60mm, a melhoria na transferência de calor traduz-se num arrefecimento gradual da superfície. O cenário de 60mm afirma-se, assim, como a configuração mais vantajosa, garantindo a temperatura interior mais baixa para todos os valores da temperatura do ar de admissão.

A avaliação numérica das temperaturas demonstra que, considerando a temperatura de admissão de 10 °C, a temperatura da superfície na espessura de 30mm é de 28,5 °C, subindo para o seu valor máximo de 28,8 °C na caixa de 40mm (um aumento de cerca de 1,05%). A partir desse ponto, o arrefecimento ocorre, descendo para 28,3 °C na caixa de ar de 50 mm e atingindo o mínimo de 28,1 °C na espessura de 60mm, o que representa uma redução térmica de aproximadamente 2,43% face ao pico. Uma tendência idêntica ocorre para a temperatura de admissão de 20 °C: a superfície regista 32,6 °C na caixa de 30mm, sofre um ligeiro aumento para 32,7 °C na espessura de 40mm (uma subida de 0,31%) e arrefece gradualmente até aos 32,4 °C na caixa de ar de 60mm, traduzindo-se numa descida de 0,92% em relação à condição menos favorável.

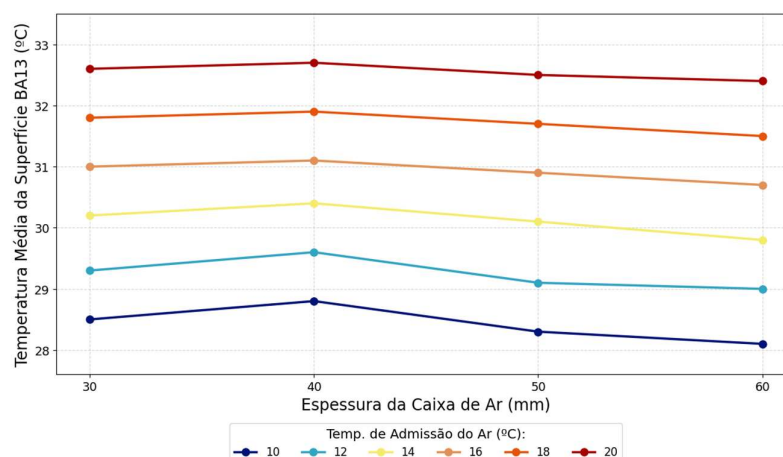


Fig. 25 – Temperatura média superficial da placa de gesso BA13 face à variação da espessura da caixa de ar e da temperatura de admissão do ar para a velocidade de 0,5 m/s.

Esta análise comprova que o dimensionamento da caixa de ar tem um papel importante no desempenho do sistema de Isolamento Térmico Dinâmico. Importa destacar que, embora exista a quebra de rendimento registada na transição dos 30mm para os 40mm e que esta seja perfeitamente consistente nos indicadores analisados, a identificação exata do fenómeno físico responsável por esta situação não pôde ser conclusivamente determinada no âmbito do estudo. Se por um lado a razão pode estar apenas relacionada com alterações no regime de escoamento, por outro, pode haver alguma dificuldade na modelação do fenómeno e, portanto, o resultado obtido ser uma consequência de uma insuficiente discretização na malha do modelo. Esta situação não pôde ser verificada, por restrições computacionais associadas ao equipamento utilizado nas simulações.

4.3 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS GEOMETRIAS ALTERNATIVAS

Com o intuito de otimizar o desempenho térmico da fachada, procedeu-se à avaliação de oito configurações geométricas alternativas (da Geometria 2 até à Geometria 6.1) para as aberturas de admissão e extração de ar. Para assegurar uma base de comparação rigorosa e isolar o efeito das aberturas, todas as variantes foram analisadas sob as mesmas condições de fronteira, fixando-se a velocidade de admissão do ar em 0,5 m/s e a temperatura de admissão do ar a 14 °C. A análise foca-se assim no impacto da geometria das aberturas, avaliada através dos cinco indicadores de desempenho.

O primeiro indicador avaliado é o fluxo de calor, apresentado na Fig. 26, essencial para compreender o comportamento da transferência de calor em cada geometria estudada. A análise dos dados demonstra uma melhoria global no desempenho das configurações alternativas relativamente à Geometria Base, que apresenta os valores mais baixos de fluxo de calor para qualquer espessura da caixa de ar analisada, confirmando uma maior limitação à libertação de calor da estrutura.

A análise numérica centra-se inicialmente na espessura de 60mm, permitindo agrupar as configurações em três níveis de dissipação de calor. No grupo de menor desempenho, a Geometria Base regista 41,0 W/m², a Geometria 2 atinge 41,4 W/m², a Geometria 6 apresenta 41,6 W/m² e a Geometria 5 regista 41,8 W/m².

No grupo intermédio encontram-se as Geometrias 6.1 e 5.1, com $42,1 \text{ W/m}^2$ e $42,4 \text{ W/m}^2$, respetivamente, enquanto a Geometria 4 alcança $43,6 \text{ W/m}^2$.

As configurações de maior desempenho são as Geometrias 3 e 4.1, que atingem $44,4 \text{ W/m}^2$ e $45,2 \text{ W/m}^2$, respetivamente, sendo esta última a que apresenta o valor máximo da análise. A transição da Geometria 3 para a Geometria 4.1 corresponde a um aumento de 1,80% no fluxo de calor. Considerando os extremos para a espessura de 60mm, a passagem da Geometria Base ($41,0 \text{ W/m}^2$) para a Geometria 4.1 ($45,2 \text{ W/m}^2$) representa um aumento global de 10,24%.

No cenário correspondente à espessura de 40mm, a Geometria Base apresenta o valor mínimo absoluto de $38,7 \text{ W/m}^2$, enquanto a Geometria 4.1 regista $43,3 \text{ W/m}^2$, o que corresponde a um incremento de 11,89% na dissipação de calor. Estes resultados demonstram que o impacto percentual da alteração geométrica na dissipação de calor é superior na espessura de 40mm, apesar de esta corresponder ao cenário de menor desempenho global.

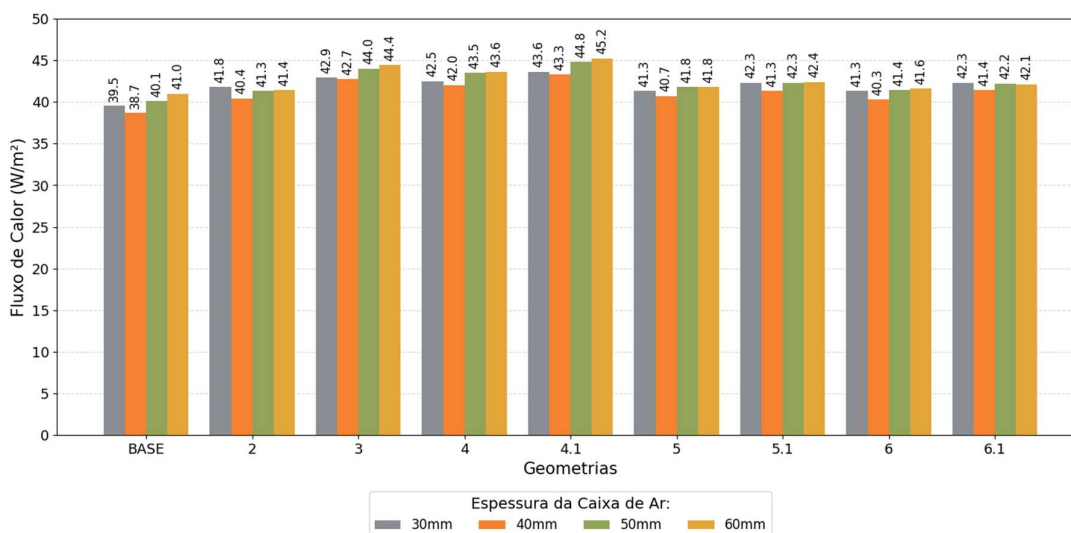


Fig. 26 – Fluxo de calor para as diferentes geometrias e espessuras avaliadas.

O impacto das diferentes geometrias na temperatura da superfície interior do elemento de contacto com a caixa de ar (placa de gesso BA13) é exposto na Fig. 27. Os resultados confirmam que as geometrias com maior fluxo de calor registam menores temperaturas superficiais.

A Geometria Base apresenta as temperaturas mais elevadas, enquanto as Geometrias 3, 4 e 4.1 registam os valores mais baixos, destacando-se a Geometria 4.1 como a configuração mais eficaz na redução da temperatura superficial. As Geometrias 2, 5, 5.1, 6 e 6.1 apresentam um desempenho intermédio.

Para a espessura de 60mm, a Geometria Base regista 29,8 °C e a Geometria 2 apresenta 29,7 °C. No grupo intermédio, as Geometrias 5 e 6.1 registam 29,6 °C, a Geometria 6 obtém 29,7 °C e a Geometria 5.1 apresenta 29,5 °C. Entre as configurações com menores temperaturas, a Geometria 4 regista 29,2 °C, a Geometria 3 atinge 29,0 °C e a Geometria 4.1 fixa-se no valor mínimo de 28,8 °C. A passagem da Geometria Base para a Geometria 4.1 corresponde a uma redução de 3,36% na temperatura superficial.

Para a espessura de 40mm, a Geometria Base apresenta novamente o valor mais elevado, com 30,4 °C, seguida pelas Geometrias 2 e 6, com 30,0 °C. A Geometria 5 regista 29,9 °C, enquanto as Geometrias 5.1 e 6.1 apresentam 29,8 °C. No grupo de menores temperaturas, a Geometria 4 obtém 29,6 °C, a Geometria 3 atinge 29,4 °C e a Geometria 4.1 regista 29,3 °C. Neste caso, a comparação entre a Geometria Base e a Geometria 4.1 resulta numa redução de 3,62%.

A comparação entre espessuras demonstra que o impacto da alteração geométrica na redução da temperatura superficial é superior para 40mm (3,62%) do que para 60mm (3,36%).

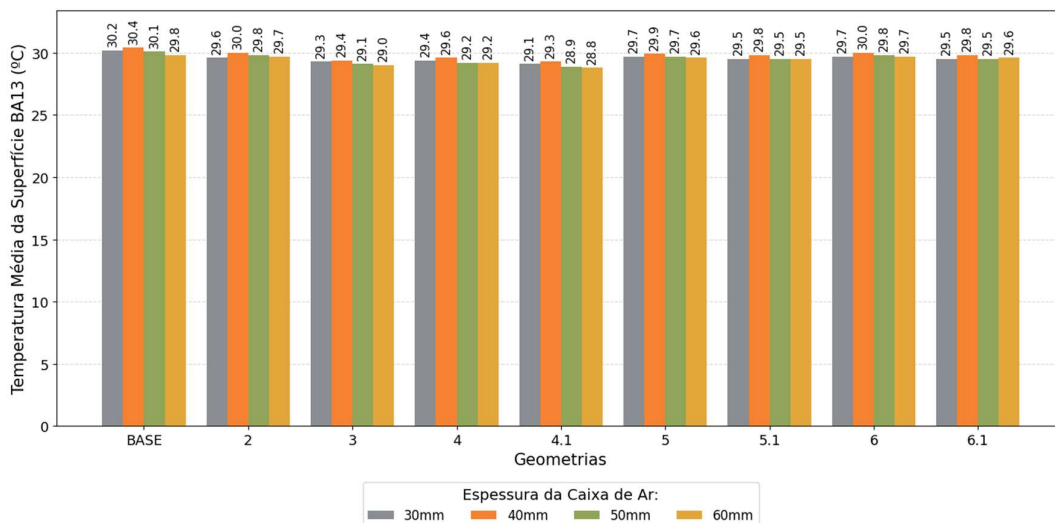


Fig. 27 – Temperatura média superficial da placa BA13 em contacto com ar consoante a geometria das aberturas e a espessura da caixa de ar.

A Fig. 28 expõe a velocidade média de saída do ar na cavidade. Os resultados confirmam que o formato das aberturas altera a velocidade de saída do ar. Assim, a análise destes dados permite agrupar o comportamento da exaustão em três grupos. As Geometrias 3, 4 e 4.1 registam as velocidades médias de saída mais baixas. Num patamar intermédio, e apresentando um comportamento mais próximo com a Geometria Base, situam-se as Geometrias 2, 5 e 6. Por outro lado, as Geometrias 5.1 e 6.1 destacam-se no topo deste indicador, atingindo os valores mais elevados entre as várias variantes. Estes dados evidenciam que a configuração das aberturas modifica o escoamento terminal da fachada, constatando-se que as configurações que alcançaram o melhor desempenho térmico registaram, os valores mais baixos na velocidade de exaustão.

A análise quantitativa para a espessura de 60mm mostra que, no grupo de menores velocidades, a Geometria 4 regista o valor mínimo de 0,306 m/s, seguida pela Geometria 4.1 com 0,390 m/s e pela Geometria 3 com 0,393 m/s. Nos valores intermédios para esta mesma caixa de ar, a Geometria Base e a Geometria 2 atingem ambas 0,480 m/s, a Geometria 5 obtém 0,481 m/s e a Geometria 6 fixa-se nos 0,484 m/s. No grupo com as velocidades mais elevadas nesta caixa, as Geometrias 5.1 e 6.1 alcançam o valor máximo de 0,541 m/s.

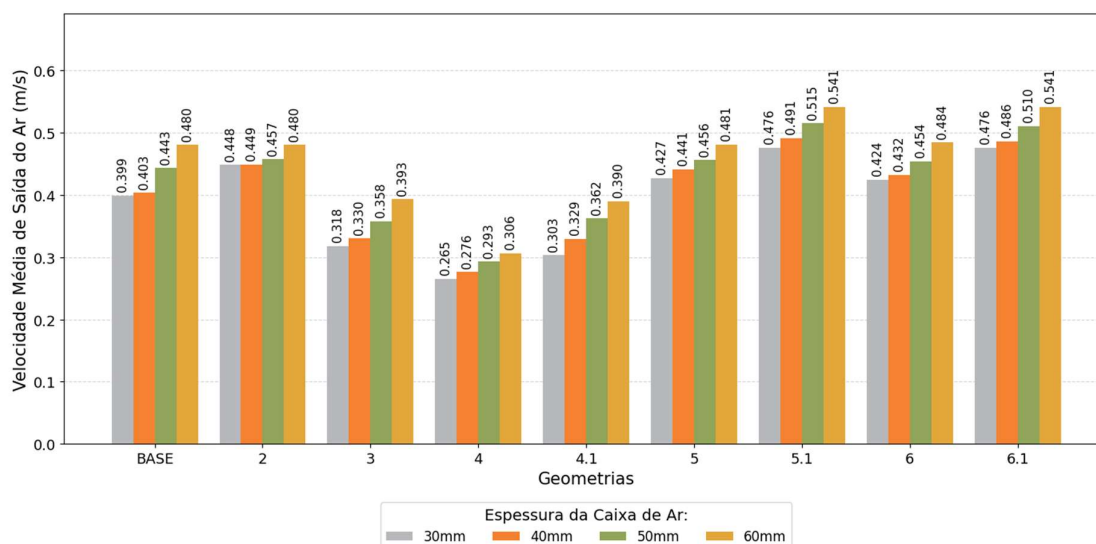


Fig. 28 – Velocidade média de saída do ar na cavidade para as diferentes configurações geométricas e espessuras.

A Fig. 29, mostra os resultados relativos à temperatura média de saída do ar na cavidade. O estado térmico do ar na exaustão ilustra a condição com que o ar abandona a abertura após o seu percurso. Fazendo a análise destes dados constata-se que a Geometria Base regista as temperaturas mais elevadas, evidenciando a saída do fluido globalmente mais quente.

Num patamar intermédio, agrupam-se as Geometrias 2, 4, 5, 5.1, 6 e 6.1, exibindo valores de temperatura moderados e que traduzem um arrefecimento face à Geometria Base. O principal destaque incide, mais uma vez, sobre as Geometrias 3 e 4.1, que se destacam no limite inferior ao demonstrarem as temperaturas médias de saídas mais baixas.

Para a espessura de 60mm, a Geometria Base regista o valor máximo de 24,0 °C, as Geometrias intermédias oscilam entre 22,3 °C e 23,7 °C, a Geometria 3 atinge 21,2 °C e a Geometria 4.1 fixa-se no valor mínimo de 20,9 °C, correspondendo a uma redução de 12,92% face à Geometria Base. Para a espessura de 40mm, o valor máximo da Geometria Base (25,4 °C) desce para o mínimo de 21,9 °C na Geometria 4.1, o que corresponde a uma redução de 13,78%.

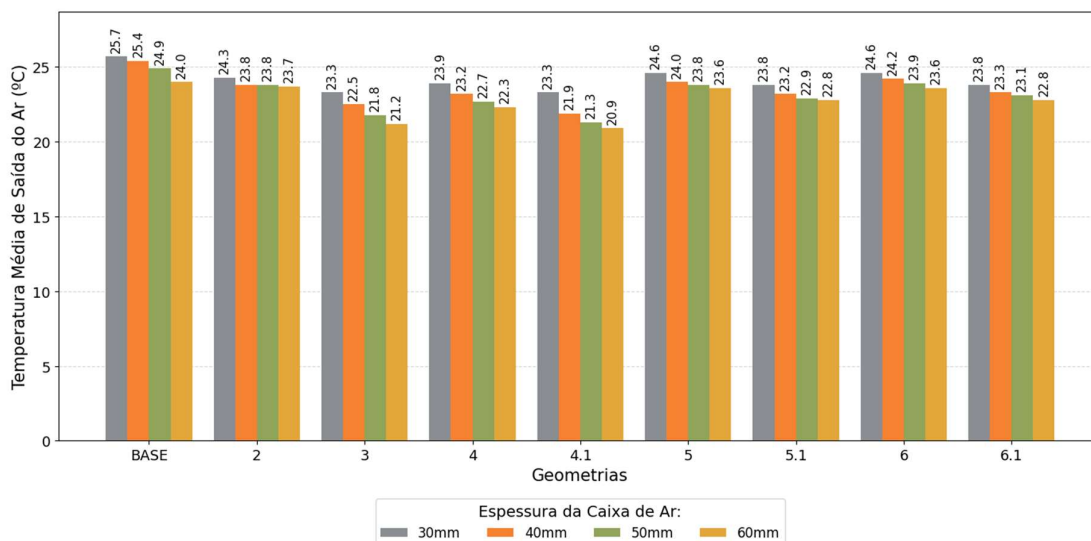


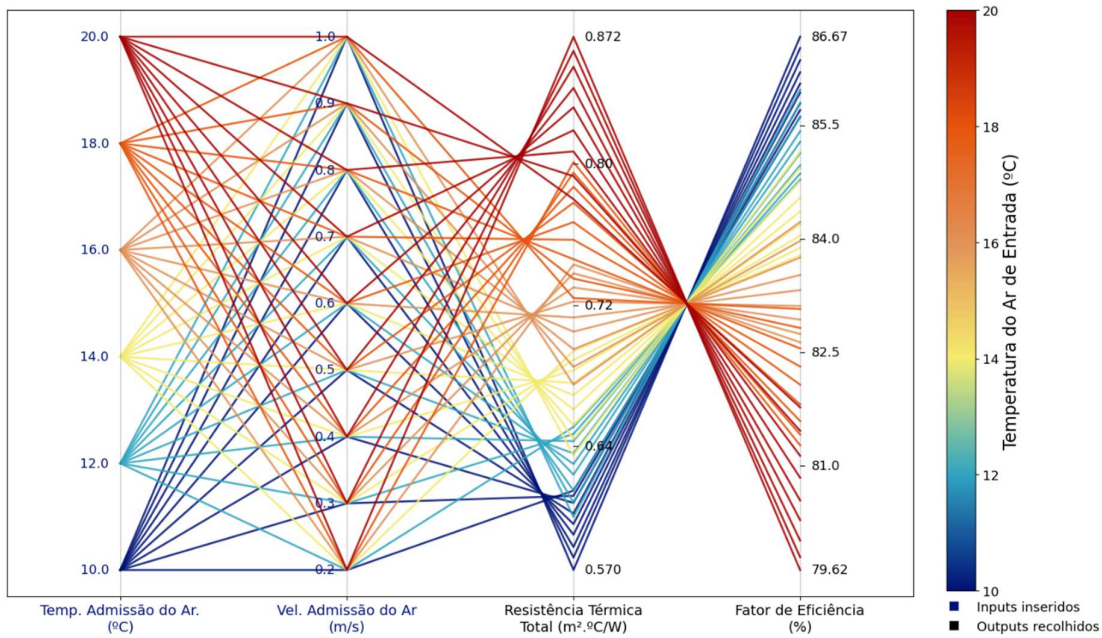
Fig. 29 – Temperatura média de saída do ar na abertura em função das geometrias e das espessuras da caixa de ar.

Estes resultados confirmam que a alteração geométrica das aberturas é um elemento fundamental na variação da eficiência do sistema de isolamento térmico dinâmico. Os dados indicam uma tendência onde as configurações que se afastam do formato da Geometria Base e das aberturas contínuas tendem a apresentar resultados globais mais favoráveis. O grupo composto pelas Geometrias 3, 4 e 4.1 demonstrou uma maior capacidade de transferência de calor. Face a este balanço a Geometria 4.1 destaca-se como a alternativa mais promissora.

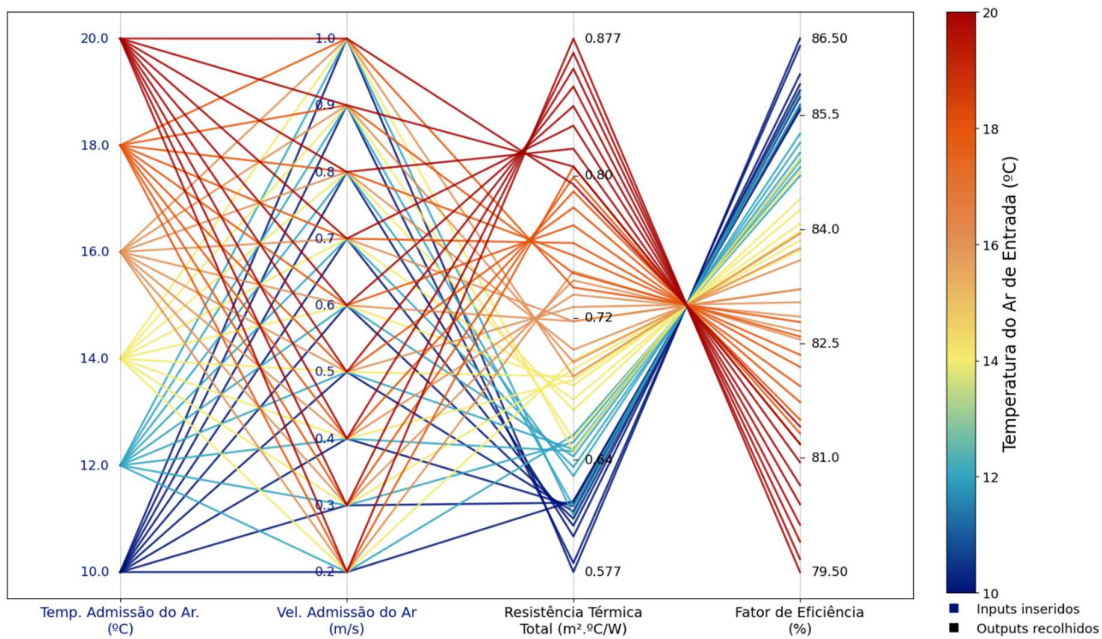
Para consolidar esta avaliação, o subcapítulo 4.4 explorará o Fator de Eficiência do sistema associado a cada configuração, traduzindo estes resultados num único indicador mais global.

4.4 FATOR DE EFICIÊNCIA TÉRMICA DO SISTEMA

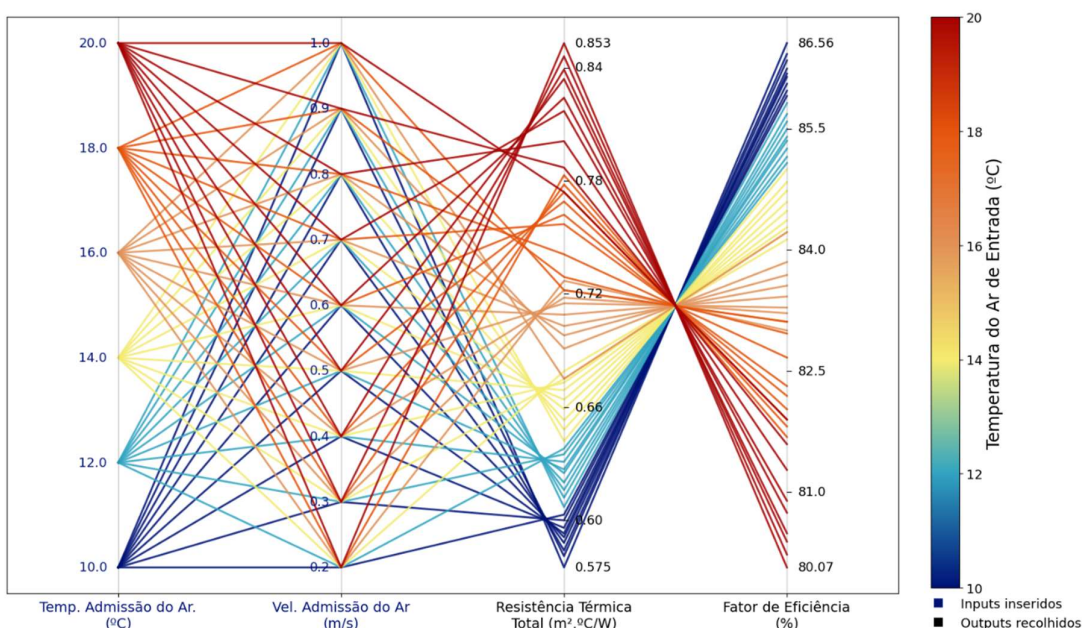
A consolidação da análise da eficiência do sistema de isolamento dinâmico exige a introdução de um parâmetro abrangente, capaz de traduzir o desempenho global do sistema num indicador quantitativo direto. Para cumprir este objetivo, recorre-se ao Fator de Eficiência, um instrumento de avaliação que permite traduzir desempenho numa percentagem clara e simples de interpretar. Este indicador, matematicamente definido através da equação (14) apresentada no subcapítulo 3.4.4, procura traduzir a eficácia do sistema no processo de transferência de calor, um valor de 0% corresponde ao comportamento de uma fachada convencional em estado puramente isolante, sendo que valores superiores indicam uma transferência de calor mais eficiente, ou seja, uma redução da resistência térmica do sistema, um valor de 100% corresponderia a situação em que não existe resistência térmica. Com o propósito de estruturar a discussão de forma sucessiva e fornecer um referencial sólido, a avaliação dos resultados deste indicador inicia-se de forma isolada na Geometria Base. Numa primeira fase, o comportamento é estruturado através de gráficos de coordenadas paralelas, o que permite compreender a relação das variáveis de entrada na eficiência final. A Fig. 30 ilustra os gráficos de coordenadas paralelas referentes à Geometria Base, detalhando os valores registados para o Fator de Eficiência (η) e a Resistência Térmica Total (R^*) obtida através das simulações.



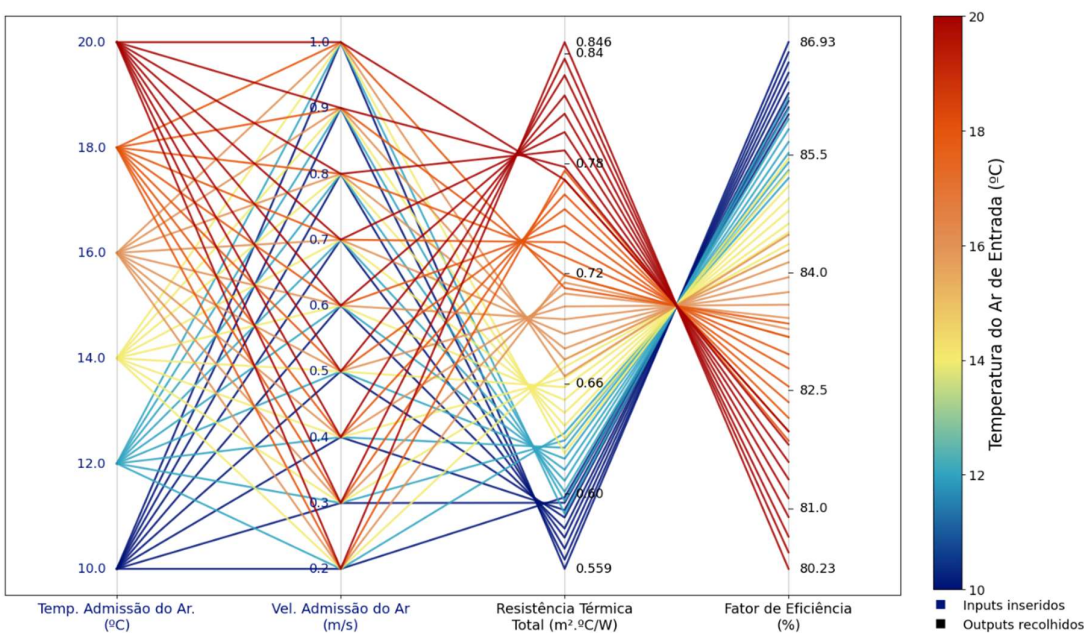
(a) Gráfico de coordenadas paralelas para a caixa de ar de 30mm



(b) Gráfico de coordenadas paralelas para a caixa de ar de 40mm



(c) Gráfico de coordenadas paralelas para a caixa de ar de 50mm



(d) Gráfico de coordenadas paralelas para a caixa de ar de 60mm

Fig. 30 – Avaliação multivariável da Resistência Térmica Total (R^*) e do Fator de Eficiência (η) entre as várias caixas de ar.

A análise dos gráficos de coordenadas paralelas revela um padrão de comportamento consistente para as quatro espessuras da caixa de ar em estudo. Observa-se ainda na Fig. 31 que as trajetórias associadas aos valores mais elevados do Fator de Eficiência correspondem aos registos mais baixos de Resistência Térmica Total. Este comportamento é consistente com o objetivo do sistema, reduzir a resistência térmica de forma a aumentar o coeficiente de transmissão térmico, induzindo uma maior libertação de energia ao passar a parede de um estado isolante para um estado mais condutivo. Além disso, verifica-se que a capacidade máxima de dissipação térmica da Geometria Base é atingida quando o fluxo de calor regista os valores mais elevados, ou seja, o fluxo de calor confirma-se como um indicador fundamental para avaliar o sistema. Por outro lado, as trajetórias com os menores índices de eficiência estão diretamente associadas a resistências térmicas superiores. Nestas condições, o processo de arrefecimento é prejudicado, fazendo com que a fachada dissipe menos energia. A análise destes resultados evidencia a sensibilidade do desempenho global do sistema face aos parâmetros dinâmicos de entrada.

Verifica-se ainda que, embora a dimensão da caixa de ar tenha um papel fundamental no escoamento do ar, a eficiência final não é muito afetada por este parâmetro, variando entre 86,50% para a caixa de ar de 40mm e 86,93% para a de 60mm.

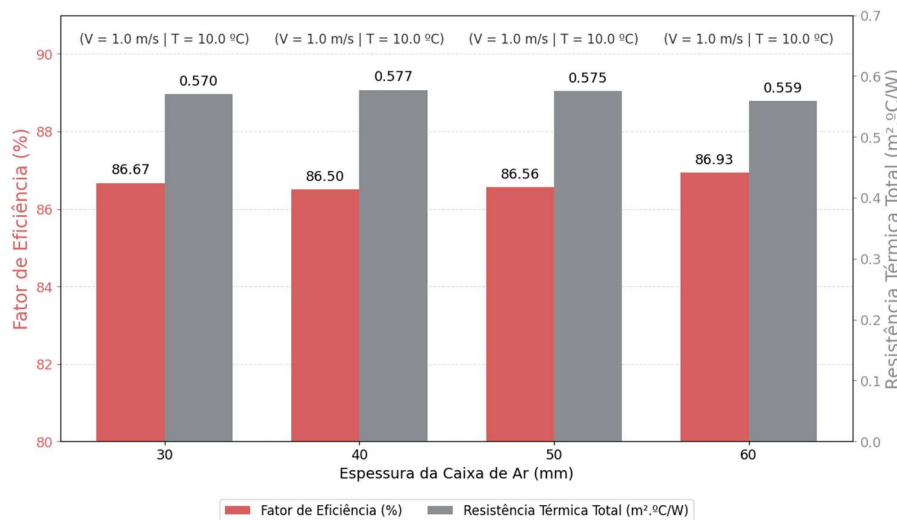


Fig. 31 – Fator de Eficiência máximo e respetiva Resistência Térmica alcançados pela Geometria Base (30 a 60mm).

Após a caracterização da Geometria Base, o estudo foca-se na avaliação do impacto das geometrias alternativas no desempenho térmico da envolvente. Esta análise incide apenas sobre as condições operacionais de escoamento de velocidade de admissão do ar de 0,5 m/s e temperatura do ar de admissão de 14°C.

Conforme ilustrado na Fig. 32, a introdução destas novas configurações resulta sempre num aumento global do Fator de Eficiência para todas as espessuras de caixa de ar em estudo, confirmando a eficácia das alterações propostas na otimização do sistema. Esta otimização reflete-se na redução mais acentuada da resistência térmica da parede, melhorando a interação entre o fluido e a estrutura em LSF, garantindo assim uma transferência de calor mais eficiente.

A análise numérica revela que a Geometria Base apresenta sistematicamente os valores mais baixos deste indicador, assinalando o mínimo absoluto de 83,94% na espessura de 40mm. Este registo acompanha a quebra de desempenho verificada na transição da caixa de 30mm para a de 40mm, um comportamento já referido anteriormente. A partir deste valor mínimo, regista-se um crescimento progressivo até atingir os valores máximos na espessura de 60mm, com particular destaque para as Geometrias 3 e 4.1, que obtêm 85,49% e 85,68%, respetivamente. Estabelecendo a comparação direta, constata-se que o Fator de Eficiência subiu cerca de 1,54% do valor mínimo da Geometria Base para o valor máximo da Geometria 4.1 (caixa de 40mm).

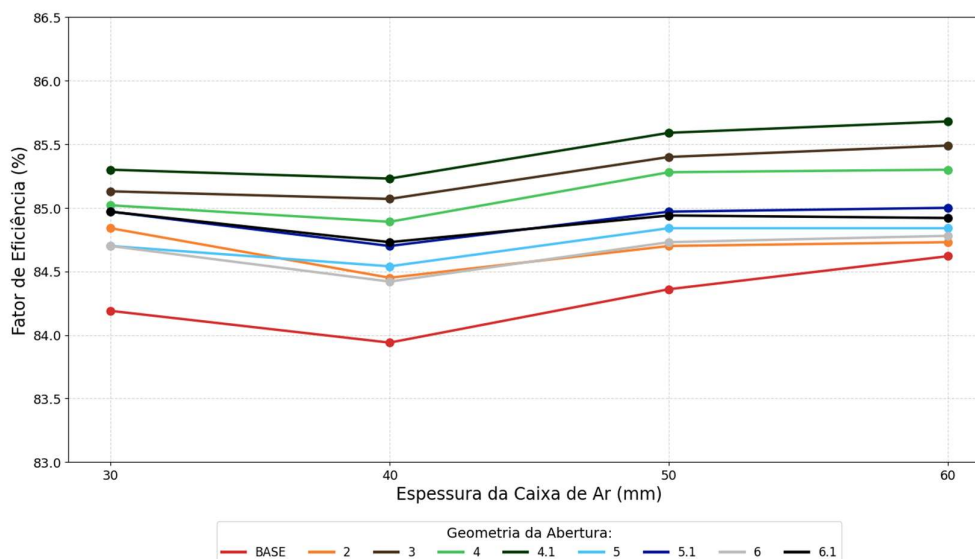


Fig. 32 – Comparação do Fator de Eficiência entre as geometrias alternativas para as diferentes espessuras de caixa de ar.

A Fig. 33 mostra a relação entre a espessura da caixa e os vários indicadores de desempenho. Fica demonstrado visualmente que as trajetórias das novas geometrias, ao gerarem fluxos de calor superiores, diminuem a resistência térmica para os valores mais baixos, alcançando assim patamares de eficiência superiores aos do modelo base sob as mesmas condições de simulação. Este comportamento valida as propostas de otimização geométrica, provando que alteração das configurações constitui uma estratégia viável e eficiente para mitigar o risco de sobreaquecimento na envolvente em LSF.

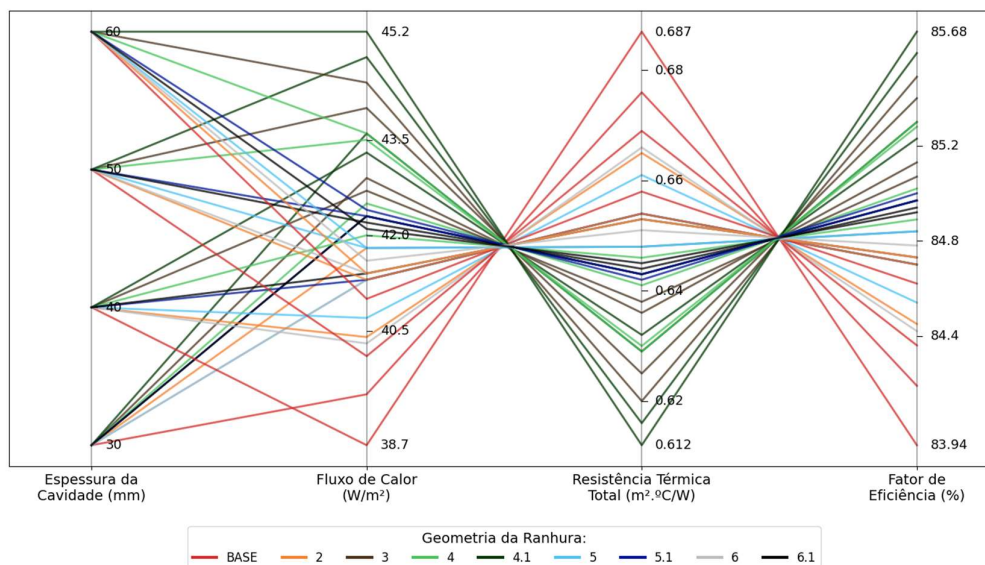


Fig. 33 – Análise termodinâmica das geometrias alternativas em um gráfico de coordenadas paralelas.

Em suma, a avaliação do Fator de Eficiência confirma a importância da otimização geométrica do sistema de Isolamento Térmico Dinâmico. A análise global dos resultados comprova que é possível melhorar o desempenho face ao modelo base. Neste contexto, destacam-se as Geometrias 3 e 4.1, que registaram os maiores índices de eficiência térmica em todas as espessuras de cavidade estudadas. Estas configurações provaram ser mais aptas, induzindo a maior redução na resistência térmica da parede e garantindo uma maior transferência de calor.

4.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A análise detalhada desenvolvida ao longo deste capítulo permite estabelecer uma visão consolidada sobre o comportamento térmico da fachada em LSF com a incorporação do sistema de isolamento dinâmico.

O estudo iniciou-se pela avaliação da Geometria Base, demonstrando que a admissão de ar promove a transferência de calor na estrutura, sendo este processo dependente da velocidade de admissão do ar e pela temperatura de admissão do ar. A caracterização desta configuração revelou ainda uma quebra de rendimento observada na transição da cavidade de 30mm para a de 40mm. A partir deste valor, o fluxo de calor aumenta com o aumento da espessura da caixa de ar.

Tendo por base este modelo geométrico, a avaliação de soluções geométricas alternativas para as aberturas de entrada e de saída de ar confirmou que a sua reconfiguração impacta de forma significativa o perfil de escoamento interno, mostrando potencial para a otimização do sistema. Fixando as condições de fronteira relacionadas com o ar de entrada (0,5 m/s e 14 °C), as novas geometrias provaram ser capazes de otimizar a convecção no interior da envolvente. Esta alteração traduziu-se num aumento direto do fluxo de calor e numa redução da temperatura superficial no interior da placa de gesso. Fica assim demonstrado que a geometria da ranhura tem um impacto direto e quantificável na melhoria da performance do sistema.

Para consolidar estas observações, a Fig. 34 mostra a relação entre as condições de entrada do ar na cavidade e o fluxo de calor e a temperatura média na superfície da placa BA13. Adicionalmente, ao estender esta representação gráfica para as geometrias alternativas estudadas, conforme ilustrado na Fig. 35, o estudo demonstrou a diferença de desempenho entre os modelos. O conjunto formado pelas Geometrias 3, 4 e 4.1 isolou-se como o grupo de melhor desempenho comparativamente às outras geometrias, alcançando os maiores valores de fluxo de calor e as menores temperaturas superficiais. Complementarmente a esta maior eficácia de extração, estas mesmas configurações registaram as velocidades e temperaturas médias mais baixas na exaustão.

A Fig. 36 sintetiza a informação relativa ao Fator de Eficiência, ilustrando os resultados relativos ao desempenho global da fachada para as diferentes espessuras da caixa de ar.

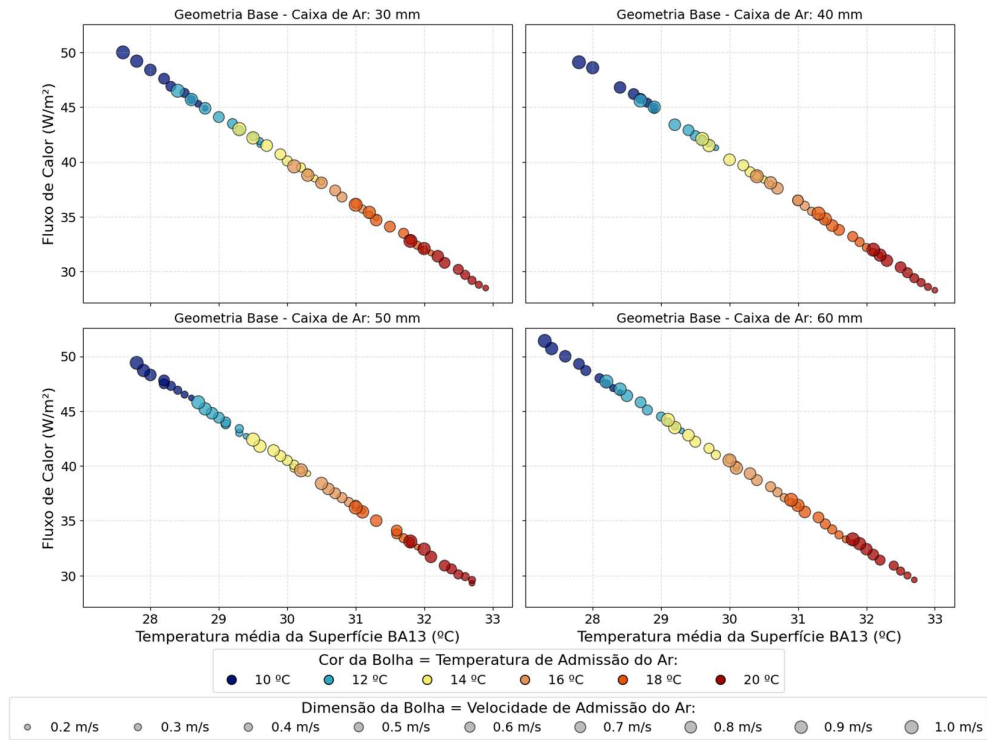


Fig. 34 – Mapeamento do comportamento térmico e fluidodinâmico da Geometria Base para as quatro espessuras de caixa de ar.

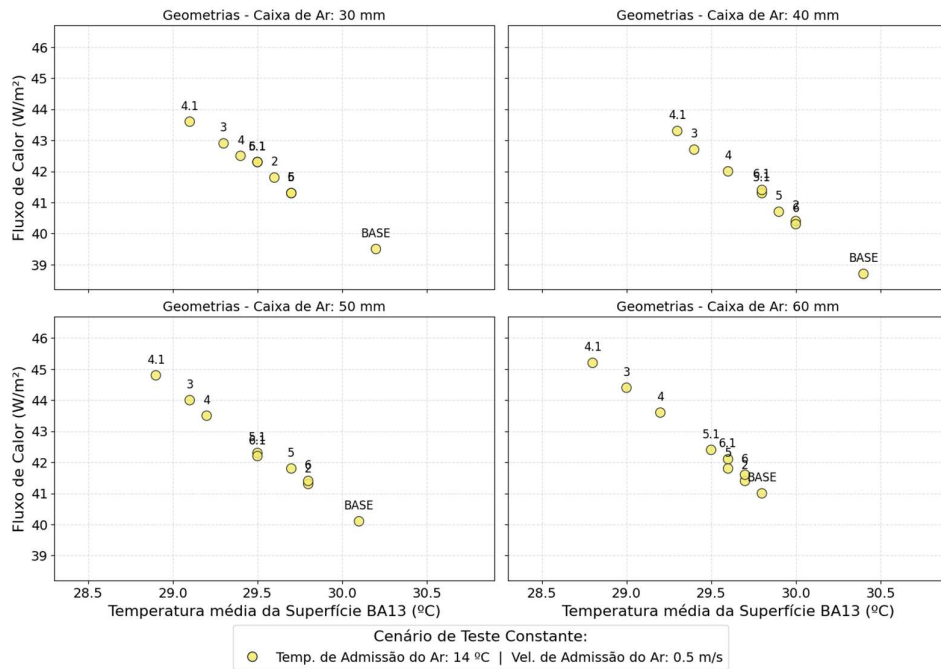


Fig. 35 – Análise comparativa de desempenho entre a Geometria Base e as soluções alternativas.

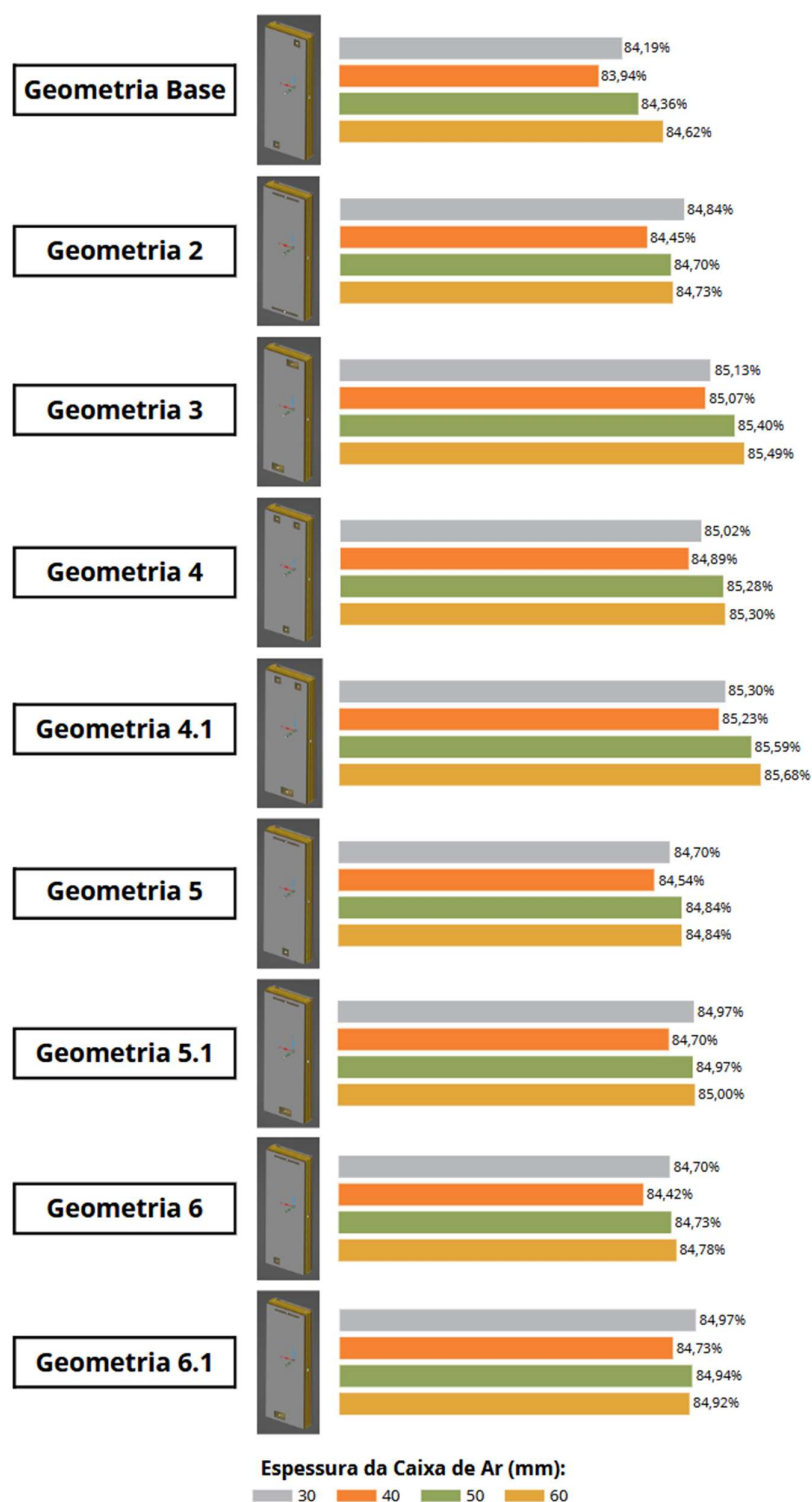


Fig. 36 – Síntese global do Fator de Eficiência alcançado por todas as configurações geométricas avaliadas em função da espessura da caixa de ar.

Através desta análise, verifica-se que as configurações com maior fluxo de calor induzem uma diminuição da resistência térmica total da estrutura. Ao reduzir esta resistência através da ventilação, o sistema dissipa o calor acumulado mais facilmente.

O destaque incide mais uma vez sobre as Geometrias 3 e 4.1. que se encontram no topo de todas as métricas apresentadas, em todas as espessuras de caixa de ar analisadas, comprovando o melhor desempenho destas soluções face ao modelo original. Conclui-se, assim, que a otimização geométrica pode melhorar o desempenho do sistema de isolamento dinâmico aplicado numa solução em LSF.

5

CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração de fachadas adaptativas na envolvente dos edifícios representa uma evolução tecnológica de enorme relevância para os desafios da construção sustentável. Estas soluções oferecem múltiplos benefícios, incluindo a manutenção das temperaturas interiores em patamares de conforto, resultando na redução dos impactes ambientais associados à climatização. No entanto, implementar este comportamento dinâmico nas estruturas é um processo complexo. O desenvolvimento e a execução prática exigem sistemas capazes de se ajustar às flutuações do ambiente exterior.

Neste contexto, o presente estudo permitiu alargar o conhecimento científico sobre a otimização de um Sistema de Isolamento Térmico Dinâmico quando aplicado a estruturas leves em Light Steel Framing (LSF). Sendo o LSF um método construtivo com reduzida inércia térmica, apresentando elevada suscetibilidade ao sobreaquecimento. A solução de isolamento dinâmico aqui estudada assenta na ventilação de uma caixa de ar no interior da parede, permitindo assim reduzir a resistência térmica do elemento construtivo. Neste contexto o controlo da geometria da abertura e da caixa de ar ventilada apresenta-se como a chave para otimizar o desempenho do sistema. Através de simulações tridimensionais computacionais fluidodinâmicas no software *Ansys Discovery*, esta investigação testou a resposta de múltiplos cenários sob diferentes condições de fronteira, retirando-se as seguintes conclusões fundamentais sobre o trabalho desenvolvido:

- A análise do impacto das condições de fronteira comprovou que o aumento da velocidade de admissão do ar associado a temperaturas de ar mais frias maximiza a transferência de calor. No entanto, mesmo sob os parâmetros mais desfavoráveis testados, o sistema dinâmico assegurou um aumento da transferência de calor.
- O estudo da variação espacial evidenciou que a transferência de calor não cresce de forma perfeitamente linear com o aumento da espessura da caixa de ar. Contudo, ultrapassada a quebra de rendimento registada nos 40 mm, o alargamento para os 50 mm e 60 mm otimizou a transferência convectiva e garantiu as menores temperaturas nas superfícies interiores.
- A reconfiguração das aberturas alterou o comportamento do fluido na caixa de ar, verificando-se que as Geometrias 3, 4 e 4.1 registaram as velocidades médias mais baixas na exaustão. No entanto, a sua maior eficácia na extração de calor faz com que estas configurações se revelem globalmente mais eficazes na mitigação do sobreaquecimento do que a adoção de aberturas contínuas e do que a Geometria Base original.
- Através do Fator de Eficiência, foi possível provar que a Geometria 4.1 apresenta o melhor desempenho global. Esta variante conseguiu a maior diminuição da resistência térmica da envolvente para todas as espessuras de caixa de ar analisadas.

De forma global, conclui-se que a otimização de um Sistema de Isolamento Térmico Dinâmico constitui uma estratégia altamente promissora para mitigar o sobreaquecimento nas estruturas em Light Steel Framing. No entanto, assumindo as limitações inerentes a este estudo estático, estas conclusões necessitam de validação em trabalhos futuros, nomeadamente através de simulações térmicas em regime transiente.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O desenvolvimento desta dissertação permitiu consolidar dados fundamentais sobre o comportamento térmico e fluidodinâmico do sistema de isolamento dinâmico otimizado. No entanto, a complexidade associada às fachadas adaptativas e as limitações do estudo abrem várias possibilidades de investigação que merecem ser exploradas em novos estudos. De modo a dar continuidade ao trabalho realizado e aprofundar o conhecimento científico e prático sobre esta tecnologia, sugerem-se as seguintes vias de investigação para trabalhos futuros:

- Realização de simulações numéricas com uma malha computacional mais refinada e detalhada. Este aumento do detalhe no modelo permitirá obter uma resolução superior do comportamento do fluido, com o objetivo de investigar rigorosamente as causas físicas relacionadas à quebra de rendimento térmico assinalada na cavidade de 40 mm.
- Desenvolvimento de simulações em regime transiente para a envolvente em LSF em estudo. A evolução do modelo numérico em regime permanente para o regime dinâmico possibilitará avaliar o desempenho do sistema sob condições climáticas reais ao longo do tempo, capturando o impacto das flutuações diárias na resposta térmica da estrutura leve.
- Validação experimental dos resultados numéricos obtidos no *Ansys Discovery*. Propõe-se a construção de um protótipo físico à escala real que incorpore a configuração geométrica otimizada neste estudo, com o objetivo de realizar ensaios laboratoriais numa câmara climática para medir os fluxos de calor reais e validar a precisão do modelo computacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Chappells † and E. Shove ‡, "Debating the future of comfort: environmental sustainability, energy consumption and the indoor environment," *Building Research & Information*, vol. 33, no. 1, pp. 32–40, 2005/01/01 2005, doi: 10.1080/0961321042000322762.
- [2] *DIRECTIVE 2002/91/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 2002 on the energy performance of buildings*, December 2002.
- [3] *DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings*, May 2010.
- [4] *DIRECTIVE (EU) 2018/844 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency (Text with EEA relevance)*, May 2018.
- [5] *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast) (Text with EEA relevance)*, April 2024.
- [6] *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE, THE COMMITTEE OF THE REGIONS AND THE EUROPEAN INVESTMENT BANK A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy*, November 2018.
- [7] M. Frontczak and P. Wargocki, "Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments," *Building and Environment*, vol. 46, no. 4, pp. 922–937, 2011/04/01/ 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>.
- [8] A. Faraji, M. Rashidi, F. Rezaei, and P. Rahnamayiezekavat, "A Meta-Synthesis Review of Occupant Comfort Assessment in Buildings (2002–2022)," *Sustainability*, vol. 15, no. 5, p. 4303, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/5/4303>.
- [9] *Ergonomia em ambientes térmicos [Recurso eletrônico] : determinação analítica e interpretação do conforto térmico utilizando o cálculo dos índices PMV e PPD e critérios de conforto térmico local (ISO 7730: 2005) : NP EN ISO 7730: 2021 / Instituto Português da Qualidade (Ergonomie des ambiances thermiques détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local (ISO 7730: 2005))*. Caparica: IPQ, 2020.

- [10] ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, 2013.
- [11] P. Antoniadou and A. M. Papadopoulos, "Occupants' thermal comfort: State of the art and the prospects of personalized assessment in office buildings," *Energy and Buildings*, vol. 153, pp. 136–149, 2017/10/15/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.001>.
- [12] M. Navai and J. Veitch, "Acoustic Satisfaction in Open-Plan Offices: Review and Recommendations," 01/01 2003, doi: 10.4224/20386513.
- [13] *Light and lighting [Recurso eletrônico] : basic terms and criteria for specifying lighting requirements : EN 12665: 2018 / European Committee for Standardization* (Lumière et éclairage : termes de base et critères pour la spécification des exigences en éclairage). Brussels: CEN, 2018.
- [14] W. M. O. (WMO), "State of the Climate Update for COP30," WMO, Switzerland, Climate Statement 2025. [Online]. Available: <https://library.wmo.int/idurl/4/69674>
- [15] IPCC, "Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," IPCC, Geneva, Switzerland, 2023.
- [16] P. United Nations Environment, "Emissions Gap Report 2025: Off target - Continued collective inaction puts global temperature goal at risk," 2025–11 Mar 17, 2026 2025. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/48854>.
- [17] M. Gonçalves, A. Figueiredo, R. M. S. F. Almeida, and R. Vicente, "Dynamic façades in buildings: A systematic review across thermal comfort, energy efficiency and daylight performance," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 199, p. 114474, 2024/07/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114474>.
- [18] L. M. Campagna and F. Fiorito, "On the Impact of Climate Change on Building Energy Consumptions: A Meta-Analysis," *Energies*, vol. 15, no. 1, p. 354doi: 10.3390/en15010354.
- [19] T. Hong *et al.*, "Ten questions concerning thermal resilience of buildings and occupants for climate adaptation," *Building and Environment*, vol. 244, p. 110806, 2023/10/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110806>.
- [20] S. Verbeke and A. Audenaert, "Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2300–2318, 2018/02/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>.
- [21] H. Asan, "Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials," *Building and Environment*, vol. 41, no. 5, pp. 615–620, 2006/05/01/ 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.020>.

- [22] N. Aste, A. Angelotti, and M. Buzzetti, "The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings," *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 11, pp. 1181–1187, 2009/11/01/ 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.005>.
- [23] T. Kuczyński and A. Staszczuk, "Experimental study of the influence of thermal mass on thermal comfort and cooling energy demand in residential buildings," *Energy*, vol. 195, p. 116984, 2020/03/15/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116984>.
- [24] A. Reilly and O. Kinnane, "The impact of thermal mass on building energy consumption," *Applied Energy*, vol. 198, pp. 108–121, 2017/07/15/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.024>.
- [25] A. Figueiredo, R. M. S. F. Almeida, R. Vicente, and V. M. Ferreira, "Impact of heating strategies towards energy-efficient buildings," *Energy and Buildings*, vol. 315, p. 114287, 2024/07/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114287>.
- [26] E. Roque, R. Vicente, R. M. S. F. Almeida, and V. M. Ferreira, "The Impact of Thermal Inertia on the Indoor Thermal Environment of Light Steel Framing Constructions," *Energies*, vol. 15, no. 9, p. 3061doi: 10.3390/en15093061.
- [27] N. Soares, A. R. Gaspar, P. Santos, and J. J. Costa, "Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates," *Energy and Buildings*, vol. 70, pp. 411–421, 2014/02/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.072>.
- [28] P. Santos and P. Santos, "Energy Efficiency of Lightweight Steel-Framed Buildings," in *Energy Efficient Buildings*, E. H. Yap Ed. London: IntechOpen, 2017.
- [29] L. T. Rodrigues, M. Gillott, and D. Tetlow, "Summer overheating potential in a low-energy steel frame house in future climate scenarios," *Sustainable Cities and Society*, vol. 7, pp. 1–15, 2013/07/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.03.004>.
- [30] E. Roque, R. Vicente, and R. M. S. F. Almeida, "Indoor Thermal Environment Challenges of Light Steel Framing in the Southern European Context," *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 7025doi: 10.3390/en14217025.
- [31] G. Evola and L. Marletta, "The Effectiveness of PCM Wallboards for the Energy Refurbishment of Lightweight Buildings," *Energy Procedia*, vol. 62, pp. 13–21, 2014/01/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.362>.
- [32] M. Gonçalves, A. Figueiredo, R. M. S. F. Almeida, R. Vicente, A. Samagaio, and J. Kośny, "Thermal performance evaluation of a light steel framing building with macroencapsulated phase change materials in a Mediterranean climate," *Energy and Buildings*, vol. 323, p. 114837, 2024/11/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114837>.

- [33] N. Soares, P. Santos, H. Gervásio, J. J. Costa, and L. Simões da Silva, "Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 194–209, 2017/10/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066>.
- [34] A. M. A. Faragalla and S. Asadi, "Biomimetic Design for Adaptive Building Façades: A Paradigm Shift towards Environmentally Conscious Architecture," *Energies*, vol. 15, no. 15, p. 5390doi: 10.3390/en15155390.
- [35] D. Aelenei, L. Aelenei, and C. P. Vieira, "Adaptive Façade: Concept, Applications, Research Questions," *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 269–275, 2016/06/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.218>.
- [36] "What is an adaptive façade? Analysis of Recent Terms and definitions from an international perspective," (in en), *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 65–76, 2018, doi: 10.7480/jfde.2018.3.2478.
- [37] A. Tabadkani, A. Roetzel, H. X. Li, and A. Tsangrassoulis, "Design approaches and typologies of adaptive facades: A review," *Automation in Construction*, vol. 121, p. 103450, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103450>.
- [38] D.-K. Bui, T. N. Nguyen, A. Ghazlan, N.-T. Ngo, and T. D. Ngo, "Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach," *Applied Energy*, vol. 265, p. 114797, 2020/05/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114797>.
- [39] S. Attia, S. Bertrand, M. Cuchet, S. Yang, and A. Tabadkani, "Comparison of Thermal Energy Saving Potential and Overheating Risk of Four Adaptive Façade Technologies in Office Buildings," *Sustainability*, vol. 14, no. 10, p. 6106doi: 10.3390/su14106106.
- [40] A. Karanafti, T. Theodosiou, and K. Tsikaloudaki, "Assessment of buildings' dynamic thermal insulation technologies-A review," *Applied Energy*, vol. 326, p. 119985, 2022/11/15/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119985>.
- [41] M. Fawaier and B. Bokor, "Dynamic insulation systems of building envelopes: A review," *Energy and Buildings*, vol. 270, p. 112268, 2022/09/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112268>.
- [42] S. J. M. Koenders, R. C. G. M. Loonen, and J. L. M. Hensen, "Investigating the potential of a closed-loop dynamic insulation system for opaque building elements," *Energy and Buildings*, vol. 173, pp. 409–427, 2018/08/15/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.051>.
- [43] A. Karanafti and T. Theodosiou, "Summer thermal performance analysis of an Opaque ventilated Façade operating under the dynamic insulation principle," *Energy and Buildings*, vol. 312, p. 114193, 2024/06/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114193>.

- [44] Z. Zhang, N. Zhang, Y. Yuan, P. E. Phelan, and S. Attia, "Thermal performance of a dynamic insulation-phase change material system and its application in multilayer hollow walls," *Journal of Energy Storage*, vol. 62, p. 106912, 2023/06/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106912>.
- [45] Ansys. "Descrição Geral do Produto." <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-discovery> (accessed).
- [46] E. Roque, "Conforto Térmico Interior e Desempenho Energético de Edifícios Residenciais com Estrutura Ligeira em Aço Enformado a Frio," Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2021.
- [47] C. A. P. d. Santos and L. M. C. Matias, *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios : Versão actualizada 2006 / Carlos A. Pina dos Santos e Luís Matias*, 18ª ed. (Informações Científicas e Técnicas). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2011.
- [48] *Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation method*, International Organization for Standardization, 2015.
- [49] *Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures — Detailed calculations*, International Organization for Standardization, 2017.
- [50] PERFISA, Gyptec Ibérica, Amorim Cork Solutions, and Mapei. "Soluções de Parede e Fachada (SKINIUM)." SKINIUM. <https://skinium.pt/#solucoes> (accessed).