



JOÃO PEDRO MADEIRA DIAS

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NÃO TRADICIONAIS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil
Perfil de Construção

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2024

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NÃO TRADICIONAIS

JOÃO PEDRO MADEIRA DIAS

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Orientador: Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar,
Professor Associado, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa -
NOVA FCT

Júri:

Presidente: Doutor Válder José da Guia Lúcio, Professor Associado da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
NOVA de Lisboa.

Arguente: Doutor Daniel Aelenei, Professor Associado da Faculdade
de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de
Lisboa.

Vogal: Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar, Professor Associado
da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade NOVA de Lisboa.

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL – PERFIL DE CONSTRUÇÃO

Universidade NOVA de Lisboa
setembro, 2024

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NÃO TRADICIONAIS

Copyright © João Pedro Madeira Dias, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador. Ao Professor Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar, um muito obrigado por todo o apoio ao longo da realização da minha dissertação, por toda a sua disponibilidade, generosidade e importante partilha de conhecimentos. Sem dvida um exemplo a seguir, tanto pelos seus conhecimentos e boas práticas profissionais, como também pelas suas competências humanas.

Quero agradecer à Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, por ter sido uma instituição fundamental para o desenvolvimento das minhas valências profissionais e pessoais. Um obrigado a todos os professores que estiveram presentes ao longo do meu percurso, pelo seu profissionalismo, dedicação, disponibilidade e empenho em direcionar os alunos da melhor forma ao longo da realização do curso. Um muito obrigado, em especial, aos meus colegas de curso, ao Diogo, Miguel, Vasco, Bernardo, Rodrigo, Constança, João e Beatriz, com quem partilhei grandes desafios e inúmeras conquistas que certamente tornaram a faculdade uma experiência incomparável.

Ao André, um especial agradecimento, por ser um amigo insubstituível e incansável, que sempre me apoiou em todos os momentos com a sua enorme sabedoria e companheirismo. Certamente, uma amizade para a vida.

Obrigado  Rosa e  Luísa pela confiança, carinho e apoio, ao longo do processo de realização da presente dissertação.

Agradeço à minha família. Aos meus avs Jorge e Dulce por sempre terem cuidado de mim da melhor forma possível, a quem nunca conseguirei agradecer o suficiente.  minha tia Elsa, ao meu tio Bernardo e ao meu primo Z Miguel, pelas palavras de encorajamento, apoio e conforto.

E, finalmente,  minha mãe, por tudo. Por ser a melhor mãe do mundo e estar sempre ao meu lado em todos os momentos.

“Eu acumulei hábitos pequenos mas consistentes
que acabaram por conduzir a resultados
que eram inimagináveis quando comecei”
(James Clear).

RESUMO

Atualmente, o setor da construção é um dos principais consumidores de energia a nível mundial. Representa cerca de 30% do consumo de energia final global, dos quais, aproximadamente 26%, estão associados à emissão de CO₂ para a atmosfera, sendo 8% emissões diretas dos edifícios e 18% emissões indiretas resultantes da produção de eletricidade e aquecimento no seu interior [1]. No entanto, tem-se vindo a verificar recentemente um importante esforço e atenção, direcionados para reduzir o mais significativamente possível os impactos ambientais provenientes deste setor. O desafio passa, essencialmente, por duas grandes vertentes, a diminuição do consumo de energia dos edifícios durante a sua utilização e a redução de energia incorporada nos edifícios a nível dos materiais utilizados e energia consumida durante a sua fase de construção e desconstrução.

Ao longo das últimas décadas, no que diz respeito ao isolamento térmico dos edifícios, verifica-se uma utilização dominante de materiais sintéticos produzidos através de processos petroquímicos, contendo aditivos tóxicos. Para além destes materiais serem altamente poluentes, a energia associada à sua produção é considerada elevada [2]. Torna-se, por isso, essencial, testar materiais alternativos que potenciem melhores condições higrotérmicas, diminuição do consumo de energia e aumento do conforto no interior dos edifícios, respeitando ao mesmo tempo os requisitos regulamentares para os diferentes tipos de edifícios e as metas propostas de aumento de eficiência energética dos vários países.

A abordagem proposta na presente dissertação, passa pelo estudo higrotérmico de três soluções construtivas monolíticas para a construção modular, com enfoque na envolvente exterior em zona opaca vertical. As soluções construtivas estudadas, foram desenvolvidas com fundamento em resultados de estudos anteriores, nos quais foram incorporados materiais de origem natural considerados fortemente sustentáveis e conceitos transversais à área da construção modular. O processo de simulação e análise numérica das soluções construtivas, foi realizado com recurso ao software WUFI, mais especificamente a versão WUFI2D, que permite avaliar o comportamento higrotérmico de soluções construtivas individuais e compostas por vários materiais, submetidas a condições ambientais exteriores e interiores especificadas, no domínio de duas dimensões. Neste contexto, é possível realizar uma análise comparativa do conjunto de resultados obtido, salientando tanto as principais vantagens como desvantagens, de modo a tornar a escolha dos materiais mais informada, sustentável ambientalmente e tecnicamente mais eficiente, preservando o tempo de vida útil da construção, garantindo conforto para os ocupantes e diminuindo níveis de consumo de energia.

Em contexto de conclusões obtidas para o presente estudo, a solução construtiva contendo isolamento térmico à base de fibras de madeira sem introdução de barreira ao vapor, demonstrou ser a solução com a resposta geral mais estável e promissora perante a variação das diferentes grandezas higrotérmicas impostas. Nos quadros de risco de ocorrência de condensações internas e vulnerabilidade ao desenvolvimento de microrganismos fúngicos, esta solução apresentou a resposta mais promissora e a que assegura melhores condições dos vários materiais de construção ao longo da espessura da parede, pelo que, intervém como a solução mais praticável para o clima tipo de Portugal continental.

As restantes soluções, sem introdução de barreira ao vapor, apesar de exibirem resultados aceitáveis em termos de performance higrométrica, demonstraram, face à solução com fibras de madeira, uma resposta de carácter mais irregular, com amplitude de valores obtidos de teor de água, humidade relativa, temperatura e pressão parcial do vapor de água, ligeiramente acrescida tanto para a solução integral como para a consideração individual do material isolante.

Palavas chave: Isolante térmico, materiais sintéticos, materiais de origem natural, construção modular, condensações internas, desenvolvimento de microrganismos fúngicos.

ABSTRACT

The construction sector is one of the world's largest consumers of energy. It accounts for around 30% of global final energy consumption, of which about 26% is associated with CO₂ emissions into the atmosphere, of which 8% are direct emissions from buildings and 18% are indirect emissions resulting from the production of electricity and heating in buildings [1]. Much effort and attention are currently being devoted to reducing the environmental impacts of this sector as much as possible. The challenge essentially involves two main issues: reducing the energy consumption of buildings during their use and reducing the energy incorporated into buildings in terms of the materials used and the energy consumed during their construction and deconstruction phases.

Currently, synthetic materials produced through petrochemical processes and containing toxic additives are used to insulate buildings. Not only are these materials being highly polluting, but the energy required to produce them is considered to be high [2]. It is therefore essential to test alternative materials that provide better hygrothermal conditions, reduce energy consumption and increase comfort inside buildings, while respecting the regulations implemented for buildings and the proposals for increasing energy efficiency in various countries.

The proposed approach in this dissertation, involves the hygrothermal study of three monolithic construction solutions in the exterior wall area, developed on the basis of studies carried out in which materials of natural origin considered to be highly sustainable and concepts that are transversal to the area of modular construction were incorporated. The simulation and numerical analysis process associated with the construction solutions, was carried out using the WUFI software, more specifically the WUFI2D version, which makes it possible to evaluate the hygrothermal behavior of individual regions and regions made up of various materials, subjected to specified exterior and interior environmental conditions, in the two-dimensional domain. In this context, it is possible to carry out a comparative analysis of the set of results obtained, highlighting both the main advantages and disadvantages, in order to make the choice of materials more informed and sustainable, preserving the useful life of the building, guaranteeing comfort for the occupants and reducing energy consumption levels.

In the context of the conclusions reached for this study, the construction solution containing wood fiber insulation without the introduction of a vapor barrier proved to be the solution with the most stable and promising overall response to the variation of the different hygrothermal parameters imposed. In terms of the risk of internal condensation and suscep-

tibility to the development of fungal microorganisms, this solution presented the most advantageous response and the one that ensures the best conditions for the various construction materials throughout the thickness of the wall, making it the most feasible solution for the climate type associated with mainland Portugal.

The remaining solutions, without the introduction of a vapor barrier, despite showing positive results, showed a more irregular response compared to the wood fiber solution, with the range of values obtained for water content, relative humidity, temperature and partial pressure of water vapor, slightly increased both for the integral solution and for the individual consideration of the insulating material.

Keywords: Thermal insulation, synthetic materials, materials of natural origin, modular construction, internal condensation, development of fungal microorganisms.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	VII
RESUMO	XI
ABSTRACT	XIV
ÍNDICE	XVII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XX
ÍNDICE DE TABELAS.....	XXIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XXIV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	3
2 COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO NA ÓTICA DA CONSTRUÇÃO MODULAR 7	
2.1. MECANISMOS ASSOCIADOS À TRANSFERÊNCIA DE CALOR	7
2.1.1. Transporte de calor	7
2.1.2. Condutibilidade térmica seca	10
2.1.3. Difusividade térmica.....	10
2.1.4. Coeficiente de transmissão térmica.....	11
2.1.5. Resistência térmica superficial (exterior/interior).....	12
2.1.6. Temperatura superficial (exterior/interior)	14
2.1.7. Capacidade térmica	14
2.1.8. Calor de adsorção/desorção.....	15
2.2. MANIFESTAÇÃO E TRANSPORTE DE HUMIDADE	16
2.2.1. Humidade relativa (interior/exterior).....	16
2.2.2. Mecanismos de adsorção e absorção	17
2.2.3. Capilaridade	19
2.2.4. Higroscopicidade	20
2.2.5. Condensações (superficiais e/ou internas)	20
2.3. CONSTRUÇÃO MODULAR E PRÉ-FABRICAÇÃO	23
2.3.1. Conceitos gerais	23
2.3.2. Sistemas de desenvolvimento computacional.....	27
2.3.3. Processo industrial	29
2.3.4. Considerações importantes no processo de transporte e no local de obra	31
2.4. CASOS DE ESTUDO	32

2.4.1.	<i>Incorporação de sensores inteligentes para medição do desempenho higrotérmico</i>	34
2.4.2.	<i>Considerações finais</i>	36
3	CARACTERIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS	42
3.1.	SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE MADEIRA	42
3.2.	SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE LÃ MINERAL DE ROCHA	50
3.3.	SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE CÂNHAMO	54
4	FUNCIONALIDADES E DADOS INTRODUZIDOS NO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE NUMÉRICA WUFI	59
4.1.	GEOMETRIA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA	61
4.2.	CONDIÇÕES DE GRELHA	62
4.3.	ESPECIFICAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS	63
4.4.	CONDIÇÕES INICIAIS DE SIMULAÇÃO	64
4.5.	ATRIBUIÇÃO DE CONDIÇÕES DE FRONTEIRA	65
4.6.	PARÂMETROS COMPUTACIONAIS	68
5	ANÁLISE HIGROTÉRMICA DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS	69
5.1.	TEOR DE ÁGUA- ANÁLISE GLOBAL E COMPARATIVA	71
5.2.	HUMIDADE RELATIVA- ANÁLISE GLOBAL E COMPARATIVA	78
5.3.	TEMPERATURA- ANÁLISE GLOBAL E COMPARATIVA	85
5.4.	PRESSÃO PARCIAL DO VAPOR DE ÁGUA- ANÁLISE GLOBAL E COMPARATIVA	89
5.5.	ANÁLISE COMPARATIVA NA ZONA DO MATERIAL ISOLANTE	92
5.5.1.	<i>Teor de água</i>	92
5.5.2.	<i>Humidade relativa</i>	94
5.5.3.	<i>Temperatura</i>	96
5.5.4.	<i>Pressão parcial do vapor de água</i>	97
5.6.	ANÁLISE DE RISCO DE OCORRÊNCIA DE CONDENSAÇÕES INTERNAS	99
5.6.1.	<i>Solução contendo isolamento de fibras de madeira</i>	103
5.6.2.	<i>Solução contendo isolamento de lâ mineral de rocha</i>	105
5.6.3.	<i>Solução contendo isolamento de fibras de cânhamo</i>	107
5.7.	ANÁLISE DE VULNERABILIDADE AO DESENVOLVIMENTO DE MICRORGANISMOS FÚNGICOS	108
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	113
6.1.	CONCLUSÕES	113
6.2.	PROPOSTAS DE TRABALHO FUTUROS	118
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: CÁLCULO DE RESISTÊNCIA TÉRMICA DE ELEMENTO OPACO VERTICAL.....	13
FIGURA 2-2:PROCESSOS DE ADSORÇÃO E ABSORÇÃO.	18
FIGURA 2-3:DIAGRAMA PSICROMÉTRICO.	21
FIGURA 2-4:COMPARAÇÃO DE CALENDÁRIO ENTRE PROCESSO DE CONSTRUÇÃO MODULAR E CONSTRUÇÃO TRADICIONAL.	25
FIGURA 2-5:FATORES IMPORTANTES NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO MODULAR.....	26
FIGURA 2-6: FATORES DETERMINANTES NA ATRATIVIDADE DA INDÚSTRIA MODULAR.	26
FIGURA 2-7: SISTEMA BASEADO NA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA MCMPro.	29
FIGURA 2-8: AUTOMAÇÃO INTEGRADA NA CONSTRUÇÃO MODULAR.	30
FIGURA 2-9: ESQUEMA ILUSTRATIVO DE PROCESSO ASSOCIADO À CONSTRUÇÃO MODULAR AUTOMATIZADA.	30
FIGURA 2-10: EMISSÕES DIRETAS E INDIRETAS GLOBAIS DE CO ₂ NO CONTEXTO DE EDIFÍCIOS.....	32
FIGURA 2-11: CONSUMO TOTAL DE ENERGIA INCORPORADO NO CONTEXTO DE ÁREA DE CONSTRUÇÃO GLOBAL ÚTIL.....	33
FIGURA 2-12: MODELO DATA LOGGER ALMEMO 710.....	35
FIGURA 2-13: CONECTOR COM TECNOLOGIA DIGITAL ALMEMO D6/D7.	36
FIGURA 3-1: PORMENORIZAÇÃO 2D DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE MADEIRA.	44
FIGURA 3-2: PORMENORIZAÇÃO 3D DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE MADEIRA.	44
FIGURA 3-3: EVOLUÇÃO DO TEOR DE ÁGUA FACE AO VALOR DE HUMIDADE RELATIVA DE UM MATERIAL DE ISOLAMENTO FEITO A PARTIR DE FIBRAS DE MADEIRA.	46
FIGURA 3-4:DISTRIBUIÇÃO DA ESPÉCIE RICINUS COMMUNIS L. EM PORTUGAL CONTINENTAL E ILHAS.....	48
FIGURA 3-5: PORMENORIZAÇÃO 2D DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE LÃ MINERAL DE ROCHA.	50
FIGURA 3-6: PORMENORIZAÇÃO 3D DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE LÃ MINERAL DE ROCHA.	51
FIGURA 3-7: CLASSIFICAÇÃO DO VALOR DE ATENUAÇÃO DE HUMIDADE PARA O MATERIAL FABRICADO A PARTIR DE FIBRAS DE MADEIRA E CIMENTO.....	54
FIGURA 3-8: PORMENORIZAÇÃO 2D DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE CÂNHAMO.	55
FIGURA 3-9: PORMENORIZAÇÃO 3D DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE CÂNHAMO.	55
FIGURA 3-10: RELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA E A ESPESSURA DOS TRÊS MATERIAIS ISOLANTES.	57
FIGURA 4-1: GEOMETRIA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA.....	61

FIGURA 4-2: INPUT DE VALORES E ATRIBUIÇÃO DE DESIGNAÇÃO.....	62
FIGURA 4-3: DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE GRELHA.	62
FIGURA 4-4: CARACTERÍSTICAS DAS REGIÕES DE ANÁLISE.	63
FIGURA 4-5: DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	64
FIGURA 4-6: CONDIÇÕES INICIAIS DE SIMULAÇÃO.	65
FIGURA 4-7: SELEÇÃO DO FICHEIRO CLIMÁTICO ASSOCIADO À REGIÃO DE LISBOA.....	66
FIGURA 4-8: DIAGRAMAS DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA ANUAIS ASSOCIADOS AO FICHEIRO CLIMÁTICO DA REGIÃO DE LISBOA.....	66
FIGURA 4-9: ANÁLISE CLIMÁTICA DE RADIAÇÃO SOLAR E OCORRÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO ASSOCIADA AO FICHEIRO CLIMÁTICO DA REGIÃO DE LISBOA.	67
FIGURA 4-10: ATRIBUIÇÃO DE CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.	67
FIGURA 4-11: DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS COMPUTACIONAIS.	68
FIGURA 5-1: EVOLUÇÃO DO TEOR DE ÁGUA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE MADEIRA.	72
FIGURA 5-2: EVOLUÇÃO DO TEOR DE ÁGUA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE LÃ MINERAL DE ROCHA.	73
FIGURA 5-3: EVOLUÇÃO DO TEOR DE ÁGUA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE CÂNHAMO.	74
FIGURA 5-4: ANÁLISE COMPARATIVA DAS TRÊS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS FACE À EVOLUÇÃO DO TEOR DE ÁGUA.	76
FIGURA 5-5: ANÁLISE COMPARATIVA DAS TRÊS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS FACE À EVOLUÇÃO DO TEOR DE ÁGUA NUM PERÍODO DE TRÊS ANOS.	78
FIGURA 5-6: EVOLUÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE MADEIRA.	79
FIGURA 5-7: EVOLUÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE LÃ MINERAL DE ROCHA.	80
FIGURA 5-8: EVOLUÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE CÂNHAMO.....	81
FIGURA 5-9: ANÁLISE COMPARATIVA DAS TRÊS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS FACE À EVOLUÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA.....	82
FIGURA 5-10: ANÁLISE COMPARATIVA DAS TRÊS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS FACE À EVOLUÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA NUM PERÍODO DE TRÊS ANOS.	85
FIGURA 5-11: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE MADEIRA.	86
FIGURA 5-12: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE LÃ MINERAL DE ROCHA.	87
FIGURA 5-13: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE CÂNHAMO.	87
FIGURA 5-14: ANÁLISE COMPARATIVA DAS TRÊS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS FACE À EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA.....	88
FIGURA 5-15: EVOLUÇÃO DA PRESSÃO PARCIAL DO VAPOR DE ÁGUA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE MADEIRA.	89
FIGURA 5-16: EVOLUÇÃO DA PRESSÃO PARCIAL DO VAPOR DE ÁGUA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE LÃ MINERAL DE ROCHA.	90
FIGURA 5-17: EVOLUÇÃO DA PRESSÃO PARCIAL DO VAPOR DE ÁGUA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE CÂNHAMO.....	90

FIGURA 5-18: ANÁLISE COMPARATIVA DAS TRÊS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS FACE À EVOLUÇÃO DA PRESSÃO PARCIAL DO VAPOR DE ÁGUA.	91
FIGURA 5-19: ANÁLISE COMPARATIVA DAS TRÊS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NA ZONA DO MATERIAL ISOLANTE FACE À EVOLUÇÃO DO TEOR DE ÁGUA.	93
FIGURA 5-20: ANÁLISE COMPARATIVA DAS TRÊS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NA ZONA DO MATERIAL ISOLANTE FACE À EVOLUÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA.	94
FIGURA 5-21: ANÁLISE COMPARATIVA DAS TRÊS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NA ZONA DO MATERIAL ISOLANTE FACE À EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA.	96
FIGURA 5-22: ANÁLISE COMPARATIVA DAS TRÊS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NA ZONA DO MATERIAL ISOLANTE FACE À EVOLUÇÃO DA PRESSÃO PARCIAL DO VAPOR DE ÁGUA.	98
FIGURA 5-23: ANÁLISE DO RISCO DE OCORRÊNCIA DE CONDENSAÇÕES INTERNAS PARA OS PERÍODOS FRIO E QUENTE, ASSOCIADA À SOLUÇÃO CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE MADEIRA.	103
FIGURA 5-24: ANÁLISE DO RISCO DE OCORRÊNCIA DE CONDENSAÇÕES INTERNAS PARA OS PERÍODOS FRIO E QUENTE, ASSOCIADA À SOLUÇÃO CONTENDO ISOLAMENTO DE LÃ MINERAL DE ROCHA.	105
FIGURA 5-25: ANÁLISE DO RISCO DE OCORRÊNCIA DE CONDENSAÇÕES INTERNAS PARA OS PERÍODOS FRIO E QUENTE, ASSOCIADA À SOLUÇÃO CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE CÂNHAMO.	107
FIGURA 5-26: RISCO DE DESENVOLVIMENTO DE ORGANISMOS FÚNGICOS DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE MADEIRA.	110
FIGURA 5-27: RISCO DE DESENVOLVIMENTO DE ORGANISMOS FÚNGICOS DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE LÃ MINERAL DE ROCHA.	111
FIGURA 5-28: RISCO DE DESENVOLVIMENTO DE ORGANISMOS FÚNGICOS DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA CONTENDO ISOLAMENTO DE FIBRAS DE CÂNHAMO.	111
FIGURA 6-1: TABELA COMPARATIVA DE CONCLUSÕES.	117

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2-1: COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA SUPERFICIAIS MÁXIMOS DE ELEMENTOS PERTENCENTES À ENVOLVENTE OPACA DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO UMÁX [W/(m ² .°C)] EM PORTUGAL CONTINENTAL.....	12
TABELA 2-2: COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA SUPERFICIAIS MÁXIMOS DE ELEMENTOS PERTENCENTES À ENVOLVENTE OPACA DE EDIFÍCIOS DE COMÉRCIO E SERVIÇOS UMÁX [W/(m ² .°C)]....	12
TABELA 2-3: VALORES DE RSE E RSI.	13
TABELA 2-4: EXIGÊNCIAS PORTUGUESAS PARA EDIFÍCIOS NZEB.	28
TABELA 2-5: QUADRO RESUMO CONTENDO CASOS DE ESTUDO ASSOCIADOS AO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS POR VIA DE MODULAÇÃO E/OU MONITORIZAÇÃO.	38
TABELA 3-1: ANÁLISE COMPARATIVA DA PEGADA CARBÓNICA ENTRE PLACAS DE ICB E OUTROS MATERIAIS UTILIZADOS.	45
TABELA 3-2: VALORES DE GRANDEZAS DISPONIBILIZADOS NO SOFTWARE WUFI, REFERENTES AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUGERIDOS.	58
TABELA 4-1 : ANÁLISE COMPARATIVA DE POTENCIALIDADES DE TRÊS VERSÕES DO SOFTWARE WUFI, ADAPTADA DE [82].	60
TABELA 4-2: LISTA DE MATERIAIS ATRIBUÍDOS.	63

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Denominação	Unidades
q	Fluxo de calor por condução	$W \cdot m^{-2}$
λ	Condutibilidade térmica do material	$[W/(m \cdot K)]$
A	Área da secção medida na perpendicular à direção do fluxo de calor	m^2
L	Espessura da parede	$[m]$
ΔT	Variação de temperatura entre as duas faces da parede plana	$[^{\circ}C]$
q	Fluxo de calor por convecção	$[W]$
h	Coeficiente de troca de calor por convecção	$W/m^2 \cdot K$
A	Área da superfície	m^2
ΔT	Variação da temperatura entre o fluido afastado da superfície e a temperatura da superfície	$[K]$
Q	Energia emitida	W/m^2
S	Área de superfície	m^2
ε	Emissividade	Sem unidades
σ	Constante de Stefan-Boltzman	$W/m^2 \cdot K^4$
T	Temperatura do ar	$[K]$
T_{sup}	Temperatura da superfície do corpo	$[K]$
$T_{envl.}$	Temperatura da envolvente	$[K]$
α	Difusividade térmica	m^2/s
ρ	Massa volúmica	$kg \cdot m^3$
C_p	Calor específico do material	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
U	Coeficiente de transmissão térmica	$W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)];$
R	Resistência térmica	$(m^2 \cdot ^{\circ}C)/W]$
Q	Fluxo de calor	$[W]$
ΔT	Diferença de temperatura entre a superfície exterior e interior do elemento	$[K]$
R_t	Resistência térmica de todos os materiais pertencentes ao elemento construtivo	$[K/W]$
C	Capacidade térmica	$[cal/^{\circ}C]$
Q	Quantidade de calor recebida/cedida	$[cal]$
ΔT	Variação de temperatura do material	$[^{\circ}C]$
m	Massa do material	$[g]$
c	Calor específico do material	$[cal/g \cdot ^{\circ}C]$
H_r	Humidade relativa	$[%]$
W	Humidade absoluta	-
W_s	Limite de saturação	-

Z	Altura da coluna de líquido	[m]
γ	Tensão da superfície	N/m^{-1}
θ	Ângulo de contacto entre o líquido e a superfície	[rad]
ρ	Massa volúmica do líquido	kg/m^{-3}
g	Valor de referência da aceleração da gravidade	m/s^{-2}
r	Raio do tubo capilar	[m]
θ_i	Temperatura superficial interior	(°C)
t_i	Temperatura de massa de ar interior	(°C)
t_e	Temperatura de massa de ar exterior	(°C)
K	Coeficiente de transmissão térmica da parede	$(W/m^2 \cdot ^\circ C)$
h_i	Condutância térmica superficial interior	$(W/m^2 \cdot ^\circ C)$
P_s	Pressão de saturação	[Pa]
T	Temperatura	(°C)
μ	Fator de resistência à difusão do vapor de água	[-]
δ_{ar}	Valor médio da permeabilidade ao vapor de água do ar	[kg/m.s.Pa]
$\delta_{material}$	Permeabilidade ao vapor de água do material	[kg/m.s.Pa]
Sd	Camada de ar de difusão equivalente	[m]
d	Espessura do material	[m]

1.1. Motivação e enquadramento do tema

Atualmente, encontram-se estabelecidas metas definidas pela comissão europeia [3], orientadas para a adoção de políticas que compreendam os novos projetos habitacionais realizados, na qualidade de edifícios com emissões de energia, tendencialmente nulas, até ao ano de 2030 [4]. Um edifício nZEB (nearly zero-energy building), é definido como uma construção com elevada eficiência energética, com principal objetivo de reduzir o consumo de energia associado, pelo que, apresenta um leque de características direcionado a viabilizar a sustentabilidade no setor da construção civil. São exemplo destas características, a escolha de materiais sustentáveis de origem natural com baixa pegada carbónica, priorizando materiais disponíveis na região onde decorre a obra, privilegiar soluções/sistemas passivos, utilização de fontes de energia renováveis, incorporação de materiais com elevado carácter de isolamento térmico, etc. Adicionalmente, o conceito de positive energy building (PEB), tem vindo a estabelecer-se como um novo e importante objetivo, na indústria da construção, demonstrando ser um edifício que gera mais energia do que aquela que consome.

Em continuidade ao contexto, é essencial, numa fase prévia ao início da obra, definir as exigências a cumprir e realizar estudos prévios e simulações, devidamente fundamentados, com a finalidade de extrair o máximo benefício das variáveis existentes que, eventualmente, poderão comprometer o bom desempenho da solução construtiva.

A higrotermia associada à área da construção civil, é um tema central e de grande incidência, por compreender o processo de interação entre condições de humidade e temperatura de um determinado espaço. Pela análise das condições higrotérmicas do ambiente interior de uma habitação, é possível estabelecer sistemas de climatização eficientes e garantir condições de qualidade do ar e conforto para os ocupantes. Adicionalmente, a análise higrotérmica nas zonas de parede exterior incorporando vários materiais de construção, é essencial para o estudo do impacto das variações de temperatura e humidade na durabilidade e desempenho dos mesmos. A obtenção de dados e controlo constante de variáveis higrotérmicas como o teor de água, humidade relativa, temperatura e pressão parcial do vapor de água, exponencia o ótimo funcionamento da construção durante o seu tempo de vida útil.

Destacando o efeito da humidade na temática abordada, é fundamental identificar e associar, de forma correta, as anomalias que emergem devido à sua presença, com a respetiva

causa, sendo que, a manifestação de humidade pode ocorrer das seguintes formas [5]: humidade de construção, humidade proveniente do terreno, humidade de precipitação, humidade de condensação, humidade devida a fenómenos de higroscopicidade e humidade devida a causas fortuitas. A deteção atempada das frentes de manifestação e transporte de humidade, viabiliza a recuperação das mesmas.

A tecnologia da construção modular, desempenha um papel importante no cumprimento de metas associadas à sustentabilidade de edifícios, demonstrando inúmeras vantagens face à construção tradicional [6]. Esta área, envolve a manufatura de elementos pré-fabricados em ambiente de fábrica controlado, conservando as suas características iniciais, estabelecendo um processo eficiente e padronizado, assegurando condições de segurança apropriadas aos trabalhadores e garantido um produto final com maior qualidade. Numa fase seguinte, as peças modulares são transportadas e montadas no local de obra, onde as fundações, realizadas de forma simultânea ao seu processo de fabrico, já se encontram em condições adequadas para as receber. Verifica-se, neste sentido, uma redução significativa do tempo de construção e de custos em cerca de 50% e 20% respetivamente [6], devido ao paralelismo do plano de trabalhos.

Em resultado da produção dos elementos pré-fabricados ser realizada em fábrica existe, naturalmente, uma desvantagem associada ao seu transporte para o local de obra, resultando em níveis elevados de emissões de CO₂ para a atmosfera sendo, por isso, um fator de enorme importância a ter em consideração. No entanto, de forma a contrabalançar a desvantagem anterior, a construção modular apresenta valores de taxa de desperdício de material na ordem dos 3% face a 30% correspondente à construção tradicional [7].

Pela conjugação dos conceitos de higrotermia e construção modular mencionados anteriormente, é possível definir um conjunto de parâmetros importantes, com vista a potenciar as condições de aplicabilidade dos materiais de construção e garantir níveis saudáveis de humidade relativa, temperatura e outras grandezas higrotérmicas, melhorando tanto a performance energética da habitação como o conforto dos habitantes e o tempo de vida útil do próprio elemento construtivo.

Estabelecer uma análise comparativa entre várias soluções construtivas desenvolvidas, é essencial para compreender o comportamento do elemento construtivo como um todo, ou seja, a forma como a sequência de materiais definida responde, ao longo do tempo, perante condições envolventes impostas no software de simulação utilizado. Deste modo, é possível identificar pontos positivos e mitigar eventuais desvantagens verificadas, de modo a obter uma solução que compreenda benefícios expressivos a longo prazo.

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivos, numa fase inicial, a procura de informação alusiva a mecanismos associados ao transporte de calor, transporte e manifestação de humidade, conceitos gerais inerentes à área da construção modular e pré-fabricação e organização de um conjunto de dados resultante de casos de estudo práticos, assentes nas temáticas abordadas.

Neste sentido, com base em toda a informação recolhida, o seguinte objetivo passa pelo desenvolvimento e dimensionamento de três soluções construtivas, cujos materiais sugeridos encontram-se devidamente fundamentados pela apresentação das suas características e incorporação dos mesmos em casos de estudo práticos.

Numa fase seguinte, o objetivo passa pela realização de uma análise higrotérmica das soluções construtivas desenvolvidas, considerando a espessura do elemento construtivo na sua totalidade e particularizando a região do material isolante.

A recolha de dados inerentes à resposta das soluções face a variações das grandezas higrotérmicas de teor de água, humidade relativa, temperatura, pressão parcial do vapor de água e perante o possível risco de ocorrência de condensações internas e desenvolvimento de microrganismos fúngicos, permitirá averiguar a praticabilidade das soluções, assim como os benefícios e desvantagens, a longo prazo, das mesmas.

Com base em toda a informação recolhida, efetuou-se uma análise comparativa dos resultados obtidos, com vista a alcançar conclusões fundamentais e sugerir a solução construtiva mais eficiente tecnicamente e simultaneamente mais sustentável.

1.3. Organização do documento

Com o principal objetivo de favorecer uma compreensão facilitada do conjunto de resultados obtidos na presente dissertação, encontra-se apresentada, no segundo capítulo, a fundamentação teórica relacionada com o tema desenvolvido, introduzindo temas como os mecanismos associados ao transporte e manifestação de humidade e calor, construção modular e pré-fabricação e, por fim, a exposição de um conjunto de casos de estudo relacionados com a temática desenvolvida.

Procedeu-se, no seguinte capítulo, com a apresentação e caracterização das soluções construtivas desenvolvidas para efeitos de análise higrotérmica. De seguida, apresentou-se o conjunto de funcionalidades e dados introduzidos no programa de simulação e análise numérica utilizado, sendo que, nos capítulos seguintes, encontra-se a análise dos resultados obtidos nas simulações efetuadas e respetivas conclusões.

Neste sentido, a presente dissertação encontra-se dividida num total de 6 capítulos, respeitando a seguinte estrutura organizada:

- Capítulo 1: Introdução da dissertação.
- Capítulo 2: Comportamento higrotérmico na ótica da construção modular.
- Capítulo 3: Caracterização das soluções construtivas desenvolvidas.

- Capítulo 4: Funcionalidades e dados introduzidos no software de simulação e análise numérica WUFI.
- Capítulo 5: Análise higrotérmica das soluções construtivas.
- Capítulo 6: Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros.

O capítulo 1, introduz a presente dissertação, expressando a motivação e enquadramento do tema, problemas e objetivos e a organização do documento.

O capítulo 2, compreende uma pesquisa complexa de temáticas centrais relacionadas com o tema. São apresentados, inicialmente, vários fenómenos de enorme importância associados ao comportamento higrotérmico de materiais de construção no contexto de transporte e manifestação de calor e humidade. De seguida, visto que as soluções construtivas desenvolvidas no capítulo seguinte demonstram características monolíticas pela utilização de elementos pré-fabricados, são apresentados conceitos fundamentais ligados à área da construção modular e pré-fabricação e, por fim, encontram-se organizados, por meio de quadros-resumo, um conjunto de estudos conduzidos que agrupam a informação mencionada anteriormente. A pesquisa efetuada para o presente capítulo, foi realizada e fundamentada com recurso a vários artigos científicos, dissertações, sites, documentos científicos e livros publicados.

No capítulo 3, encontram-se detalhadas três soluções construtivas, cujo dimensionamento teve por base toda a informação obtida no capítulo 2. De forma a facilitar a compreensão sequencial dos materiais que constituem os elementos construtivos, encontram-se disponibilizadas pormenorizações legendadas em 2D e 3D, realizadas em Autocad. Os materiais de construção sugeridos, encontram-se devidamente fundamentados pela especificação das suas características e por resultados obtidos decorrentes da sua implementação em casos de estudo práticos.

O capítulo 4, abrange o conjunto de funcionalidades e dados introduzidos no software de simulação e análise numérica utilizado na presente dissertação. Numa fase inicial, encontra-se definida uma análise comparativa entre as potencialidades da versão do software utilizada e as restantes. Ininterruptamente exibe-se, a título exemplificativo, a utilização da solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira, na região do material isolante contendo barreira ao vapor, como referência, para uma compreensão objetiva do conjunto de passos a efetuar ao longo do processo de simulação.

No que se refere ao capítulo 5, associado à análise higrotérmica das soluções construtivas desenvolvidas, utilizou-se a extensão de software WUFI Graph, contribuindo como suporte de análise individual e comparativa de resultados obtidos, por via de construção de gráficos. Procedeu-se, numa fase inicial, à análise individual da resposta de cada uma das soluções construtivas, com e sem barreira ao vapor, perante variações das grandezas higrotérmicas em estudo. Seguidamente, no término da análise de cada uma das grandezas e considerando apenas a situação sem colocação de barreira ao vapor, agrupou-se o comportamento observado para as três soluções no mesmo ambiente de análise, potenciando a obtenção de resultados favoráveis por via de um único gráfico. Numa fase seguinte, sem consideração do estrato de barreira ao vapor, analisou-se a resposta das três soluções, unicamente, na zona do material isolante. Por fim, avaliou-se o risco de ocorrência de condensações internas

ao longo da espessura do elemento construtivo e a vulnerabilidade ao desenvolvimento de microrganismos fúngicos.

No último capítulo do estudo realizado, apresentam-se as principais conclusões, decorrentes da análise e discussão de resultados obtidos, visando destacar as principais contribuições para a área em estudo. Adicionalmente, são referenciadas as principais limitações encontradas ao longo de todo o processo e o seu efeito na obtenção de resultados. Por fim, estabelecem-se sugestões para desenvolvimentos futuros, com o principal objetivo de incentivar pesquisas subsequentes na área e impulsionar avanços nas abordagens utilizadas.

Comportamento higrotérmico na ótica da construção modular

Existem vários fenômenos associados ao comportamento higrotérmico de um edifício. Para uma melhor compreensão e estudo desta matéria, a existência de uma boa base de informação e domínio dos vários conceitos é essencial.

Neste capítulo são apresentados e organizados vários conceitos científicos relacionados com o tema e com o programa de modelação numérica utilizado (WUFI), assim como características associadas à importância da análise higrotérmica de soluções construtivas para a envolvente exterior de edifícios na ótica da pré-fabricação.

2.1. Mecanismos associados à transferência de calor

2.1.1. Transporte de calor

O transporte de calor é um conceito essencial na área da engenharia civil. Diz respeito ao movimento de calor de zonas mais quentes para zonas mais frias com o objetivo final de alcançar o equilíbrio.

Existem três tipos de mecanismos de transporte de calor: condução, convecção e radiação. A correta compreensão e aplicação destes conceitos garante melhores condições a nível de equilíbrio térmico e otimização do consumo de energia num edifício.

2.1.1.1. Condução

A condução de calor é um processo de transferência de calor que pode ser definido como o total de energia que é conduzida de uma zona com maior valor de temperatura para uma zona com menor valor de temperatura. A condução de calor ocorre nos meios sólido, líquido e gasoso.

A temperatura das partículas que se encontram mais próximas da fonte de calor irá aumentar, levando a uma maior libertação de energia que passará, por meio de interações, para as restantes partículas ao longo do material em questão. O processo de condução de calor ocorre até ser atingido o estado de equilíbrio.

Para obtenção do valor do fluxo de calor através de uma parede, é aplicada a lei de Fourier de acordo com a equação [2-1]:

$$q = \frac{\lambda \times A}{L} \times \Delta T \quad (2-1)$$

Onde:

- q Fluxo de calor por condução [$W \cdot m^{-2}$];
- λ Condutibilidade térmica do material [$W/(m \cdot K)$];
- A Área da secção medida na perpendicular à direção do fluxo de calor [m^2];
- L Espessura da parede plana [m];
- ΔT Variação de temperatura entre as duas faces da parede plana [$^{\circ}C$].

Tendo como base a fórmula mencionada acima, é possível estudar as várias formas de reduzir o fluxo de calor através de uma parede plana: optar por um material com menor valor de condutibilidade térmica, redução da área de secção, aumento da espessura da parede e aumento da temperatura que se verifica no interior [8].

2.1.1.2. Convecção

O movimento de convecção apenas se verifica nos meios líquidos e gasosos por transferência de massa. Este movimento consiste na transferência de calor a partir da movimentação das várias partículas que constituem o fluido, ou seja, quando se verifica um aumento de temperatura numa zona específica, a agitação das partículas aumenta levando ao seu afastamento. Ocorre, portanto, uma diminuição de densidade resultando numa ascensão das partículas. Consequentemente, a zona mais fria, com maior densidade, tem tendência natural a descer resultando assim num movimento de equilíbrio de calor por convecção.

Existem dois tipos de convecção: convecção natural (processo mencionado acima) e convecção forçada que ocorre por aplicação de um agente externo [8].

O fluxo de calor por convecção resulta da equação [2-2]:

$$q = h \times A \times \Delta T \quad (2-2)$$

Onde:

- q Fluxo de calor por convecção [W];
- h Coeficiente de troca de calor por convecção [$W/m^2 \cdot K$];
- A Área da superfície [m^2];
- ΔT Variação da temperatura entre o fluido afastado da superfície e a temperatura da superfície [K].

2.1.1.3. Radiação

A radiação exprime o processo de transferência de calor entre duas superfícies a diferentes temperaturas através de ondas eletromagnéticas. Esta forma de transferência de calor

não necessita de um meio material para se propagar, por isso, este processo também ocorre em condições de vácuo.

De notar que, associado às características de radiação, é possível fazer a distinção entre superfície real, corpo negro e corpo cinzento.

Um corpo negro, é capaz de absorver 100% da radiação que nele incide dentro de uma gama contínua de frequência e comprimento de onda e emitir radiação térmica com base na sua temperatura. Um corpo cinzento, apresenta valores de absorção e emissão de radiação mais reduzidos que um corpo negro, pois absorve uma percentagem da radiação que nele incide, refletindo a restante. Um corpo cinzento demonstra características de radiação semelhantes às de uma superfície real [8].

A radiação térmica pode ser expressa através da Lei de Stefan-Boltzman de acordo com a equação [2-3]:

$$Q = S \times \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (2-3)$$

Onde:

- Q Energia emitida [W/m^2];
- S Área de superfície [m^2];
- ε Emissividade [-];
- σ Constante de Stefan-Boltzman [$W/m^2 \cdot K^4$];
- T Temperatura [K].

Naturalmente, a fórmula mencionada acima pode ser reescrita para várias situações, isto é, se considerarmos um corpo negro, o valor da emissividade será 1 por ser um emissor perfeito e, adicionalmente, para o cálculo da energia emitida entre a superfície de um corpo e o meio envolvente, a equação assume a seguinte estrutura [2-4]:

$$Q = S \times \varepsilon \times \sigma \times (T_{sup}^4 - T_{envl.}^4) \quad (2-4)$$

Onde:

- Q Energia emitida [W/m^2];
- S Área de superfície [m^2];
- ε Emissividade [-];
- σ Constante de Stefan-Boltzman [$W/m^2 \cdot K^4$];
- T_{sup} Temperatura da superfície do corpo [K];
- $T_{envl.}$ Temperatura da envolvente [K].

2.1.2. Condutibilidade térmica seca

Como mencionado anteriormente, os materiais de construção apresentam diversas propriedades associadas a processos de transferência de calor (condução, convecção e radiação). Estas grandezas não são constantes, podendo variar de acordo com as características do meio ambiente e composição do material.

No domínio de transferência de calor por condução, a variação do teor de água no interior do material conduzirá a diferentes valores obtidos. Tendo em vista a percentagem de água no seu interior, o material pode ser considerado como estando no estado seco, húmido ou saturado.

De notar a importância destas variações das propriedades dos vários materiais como considerações importantes em projetos que envolvam isolamento térmico e cumprimento de objetivos ligados à eficiência energética.

Posto isto, a condutibilidade térmica seca de um material refere-se à capacidade que o material demonstra em conduzir energia sob a forma de calor quando se encontra maioritariamente seco, sem a influência de água.

2.1.3. Difusividade térmica

A difusividade térmica de um material reflete a velocidade com que o material se deixa atravessar pelo calor tendo em conta a sua capacidade de armazenamento do mesmo. Demonstra a capacidade de adequação do material a eventuais oscilações de temperatura, por isso, em materiais com elevado valor de difusividade térmica, o calor propaga-se com maior velocidade através do material, resultando numa resposta mais rápida de ajuste às mudanças de temperatura. Contrariamente, em materiais com valor de difusividade térmica menor, existe maior resistência à propagação de calor através do material, levando a um ajuste mais lento à variação de temperatura [9].

Para obtenção desta grandeza física, é necessário o cálculo da condutibilidade térmica, da densidade e do calor específico do material em questão.

A difusividade térmica de um material calcula-se através da equação [2-5]:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \times Cp} \quad (2-5)$$

Onde:

- α Difusividade térmica [m^2/s];
- k Condutibilidade térmica do material [$W.m^{-1}.K^{-1}$];
- ρ Densidade do material [$kg.m^3$];
- Cp Calor específico do material [$J.kg^{-1}.K^{-1}$].

2.1.4. Coeficiente de transmissão térmica

O coeficiente de transmissão térmica é uma grandeza que caracteriza o transporte de calor e eficiência térmica de elementos construtivos como paredes de fachada simples ou duplas, pavimentos sobre espaços exteriores, coberturas horizontais e inclinadas, que apresentem ou não desvão não habitado sobre esteira horizontal e vãos envidraçados situados nas fachadas ou coberturas dos edifícios [10]. Naturalmente, associadas aos elementos construtivos mencionados acima, existe uma diversidade de soluções construtivas com alto desempenho e aplicabilidade tendo por base as condições climáticas de cada país.

No domínio das soluções construtivas correntes, o valor dos coeficientes de transmissão térmica apresentados em [10], garantem intervalos de segurança propícios à aplicação das várias soluções construtivas descritas no mesmo documento, não tendo em consideração eventuais anomalias na geometria dos elementos e más condições de fixação de materiais de acabamento ou revestimento [10].

De notar que o valor de cálculo desta grandeza, varia consoante o tipo e interação entre dois espaços, a solução construtiva aplicada em obra e o tipo de fluxo de calor a que o elemento de construção está submetido (fluxo ascendente ou fluxo descendente). A interação entre estas variáveis poderá, eventualmente, resultar em acertos no valor de coeficiente de transmissão térmica obtido.

Relativamente a soluções construtivas não-tradicionais em estudo e desenvolvimento, é essencial o auxílio da vertente laboratorial para obtenção de valores de coeficiente de transmissão térmica.

O valor do coeficiente de transmissão térmica obtém-se pela equação [2-6]:

$$U = \frac{1}{R} \quad (2-6)$$

Onde:

U Coeficiente de transmissão térmica [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$];

R Resistência térmica [$(m^2 \cdot ^\circ C)/W$].

Pela análise da expressão anterior, conclui-se que quanto menor a resistência térmica do elemento, maior o coeficiente de transmissão térmica resultando numa maior transferência de calor. Contrariamente, quanto maior a resistência térmica, menor o coeficiente de transmissão térmica e consequentemente, existirão menos perdas de calor do interior do edifício para o exterior ou elemento imediatamente em contacto.

A portaria n.º 138-I_2021 [11], estabelece valores de requisitos mínimos e máximos de desempenho energético direcionados para a envolvente exterior dos edifícios. O valor do coeficiente de transmissão térmica de elementos de construção que fazem parte da envolvente opaca dos edifícios de habitação e de comércio e serviços, novos ou renovados, terá de respeitar os valores estabelecidos por esta portaria apresentados nas tabelas 2-1 e 2-2:

Tabela 2-1: Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos de elementos pertencentes à envolvente opaca de edifícios de habitação Umáx [W/(m².°C)] em Portugal Continental.

Portugal Continental			Zona Climática		
Tipo de elemento	Condição fronteira		I1	I2	I3
Zona corrente da envolvente.	Verticais	Exterior ou interior com $b_{zlu} > 0,7$	0,50	0,40	0,35
		Interior com $b_{zlu} \leq 0,7$	2,00	2,00	1,90
	Horizontais	Exterior ou interior com $b_{zlu} > 0,7$	0,40	0,35	0,30
		Interior com $b_{zlu} \leq 0,7$	1,65	1,30	1,20
Zona de PTP	Verticais	Exterior	0,90		
		Interior com $b_{zlu} > 0,7$	1,75	1,60	1,45
		Interior com $b_{zlu} \leq 0,7$	2,00	2,00	1,90
	Horizontais	Exterior	0,90		
		Interior com $b_{zlu} > 0,7$	1,25	1,00	0,90
		Interior com $b_{zlu} \leq 0,7$	1,65	1,30	1,20

Tabela 2-2: Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos de elementos pertencentes à envolvente opaca de edifícios de comércio e serviços Umáx [W/(m².°C)].

Portugal Continental e Regiões Autónomas			Zona Climática		
Tipo de elemento	Condição fronteira		I1	I2	I3
Zona corrente da envolvente	Verticais	Exterior ou interior com $b_{zlu} > 0,7$	0,70	0,60	0,50
	Horizontais	Exterior ou interior com $b_{zlu} > 0,7$	0,50	0,45	0,40
Zona de PTP	Verticais	Exterior	0,90		
		Interior com $b_{zlu} > 0,7$	1,75	1,60	1,45
	Horizontais	Exterior	0,90		
		Interior com $b_{zlu} > 0,7$	1,25	1,00	0,90

2.1.5. Resistência térmica superficial (exterior/interior)

O cálculo da resistência térmica de um elemento construtivo é realizado tendo em conta, naturalmente, a espessura desse mesmo elemento, porém a sua espessura não é o único foco que influencia a transferência de calor através do elemento. Ambas as superfícies externas do elemento, necessitam de ser tidas em consideração como zonas de influência para a resistência térmica pois essas zonas encontram-se no trajeto efetuado pelo processo de transferência de calor.

No cálculo da resistência térmica de um elemento construtivo, as características onde esse elemento se insere, ditam qual valor a utilizar, ou seja, se esse elemento estiver em contato

com um espaço interior numa das suas faces, considera-se o valor de resistência térmica superficial interior para essa mesma face (R_{si}). Se a face oposta desse mesmo elemento se encontrar em contato com o ambiente exterior, considera-se o valor de resistência térmica superficial exterior para essa face (R_{se}). De notar que o mesmo elemento pode estar em contato com espaço interior em ambas as suas faces por isso, nesse caso considera-se o valor de R_{si} para ambas as faces (elementos que separam espaço útil interior de espaço interior não-aquecido).

Para além do tipo de envolvente do elemento construtivo, como referido anteriormente, o sentido do fluxo de calor é um dado condicionante para o processo de cálculo pois dá-nos informação acerca das condições de temperatura em redor desse elemento. Adicionalmente, poderão existir diferentes tipos de materiais ou zonas de espaço de ar que compõe a solução construtiva e, nesse caso, é necessário um levantamento da resistência térmica de cada segmento para que, juntamente com as resistências térmicas superficiais, seja possível a obtenção do valor final de resistência térmica.

A tabela 2-3, cujos dados foram retirados de [10], constitui os valores de R_{si} e R_{se} utilizados de acordo com a norma europeia EN 6946:1996 [12]:

Tabela 2-3: Valores de R_{se} e R_{si} .

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial [$(m^2 \cdot ^\circ C)/W$]	
	R_{se}	R_{si}
Horizontal	0,04	0,13
Vertical ascendente	0,04	0,10
Vertical descendente	0,04	0,17

A título exemplificativo e em concordância com o tema em estudo, o seguinte esquema de cálculo retirado de [13], demonstra o processo de obtenção do valor do coeficiente de transmissão térmica de um elemento opaco vertical em contato com espaço útil interior numa das suas faces e com espaço exterior na face oposta.

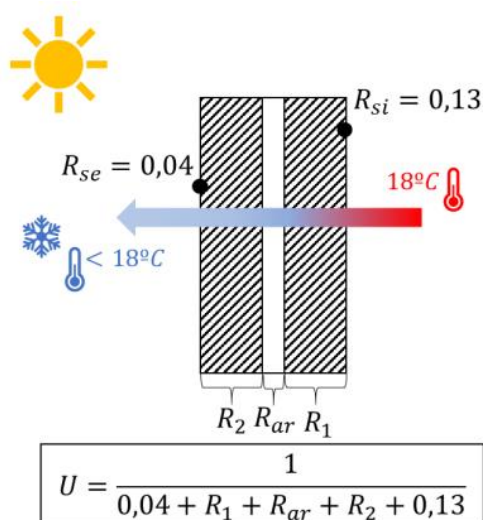


Figura 2-1: Cálculo de resistência térmica de elemento opaco vertical.

Analisando a imagem acima, verifica-se que o elemento de construção é composto sequencialmente por um material 1, um espaço de ar e por fim um material 2. De notar que o fluxo de calor se desenvolve na direção horizontal e cada segmento adquire o seu próprio valor de resistência térmica.

Dito isto, o cálculo irá integrar o valor de R_{si} , a resistência térmica do material 1 (R_1), a resistência térmica do espaço de ar (R_{ar}), a resistência térmica do material 2 (R_2) e, por fim, a R_{se} . Utilizando a fórmula mencionada anteriormente, é possível determinar o valor do coeficiente de transmissão térmica do elemento de construção.

2.1.6. Temperatura superficial (exterior/interior)

As temperaturas superficiais exterior e interior de elementos de construção situados na interface entre o interior do edifício e o ambiente exterior, desempenham um papel importante no estudo das condições de desempenho higrotérmico do próprio edifício.

Naturalmente, existem vários fatores internos e externos, tendo como referência a posição do elemento construtivo, que resultam na variação destas duas grandezas, sendo que, existem fatores provenientes de causas naturais como por exemplo as condições climáticas do ambiente exterior, a área de exposição solar, entre outros, e causas de natureza humana como por exemplo o tipo de revestimento de superfície colocado no exterior, níveis de temperatura e humidade no interior do edifício resultantes de hábitos domésticos, entre outros.

A lei de Fourier [2-7], estabelece o valor de fluxo de calor gerado, relacionando a diferença de temperatura entre as superfícies exterior e interior e a(as) resistência(as) térmica(as) do(s) material(ais) constituinte(s) do elemento de construção em questão.

$$Q = \frac{\Delta T}{R_t} \quad (2-7)$$

Onde:

Q Fluxo de calor [W];

ΔT Diferença de temperatura entre a superfície exterior e interior do elemento [K];

R_t Resistência térmica de todos os materiais pertencentes ao elemento construtivo [K/W].

Visto que todos estes aspetos assentam na prioridade de obtenção de níveis satisfatórios de desempenho térmico, é essencial existir um balanceamento de condições propícias a valores de fluxo de calor eficientes.

2.1.7. Capacidade térmica

A capacidade térmica de um material de construção diz respeito à sua capacidade de receber/ceder calor para que a sua temperatura varie 1°C , por outras palavras, é a quantidade de calor necessária para elevar/baixar 1°C , um 1kg de massa desse mesmo material.

Existem duas formas para a obtenção desta grandeza. Pode ser obtida pelo quociente entre a quantidade de calor recebida/cedida pelo corpo e a variação da sua temperatura e pelo produto entre a massa do corpo e o valor de calor específico característico do material de construção.

Esta grandeza é um indicador importante a ter em conta no estudo do comportamento térmico de um edifício. Conhecendo o seu valor, é possível escolher materiais que se adequam da melhor forma ao projeto a realizar, pois haverá informação acerca da capacidade de resposta do material a mudanças de temperatura.

A capacidade térmica de um material é obtida pelas equações [2-8] e [2-9]:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2-8)$$

Onde:

- C Capacidade térmica [cal/°C];
- Q Quantidade de calor recebida/cedida [cal];
- ΔT Variação de temperatura do material [°C].

$$C = m \times cp \quad (2-9)$$

Onde:

- C Capacidade térmica [cal/°C];
- m Massa do material [g];
- cp Calor específico do material [cal/g.°C].

2.1.8. Calor de adsorção/desorção

Os processos de adsorção e desorção envolvendo materiais de construção porosos, são processos de grande importância que refletem o comportamento do material sólido face a substâncias envolventes.

Neste segmento, pertencente aos mecanismos associados ao transporte do calor, será dado ênfase sobretudo ao processo de libertação e absorção de calor de materiais sólidos quando ocorre adsorção ou desorção por via de vapor de água, sendo que, no capítulo seguinte referente aos mecanismos associados ao transporte de humidade, será dada maior atenção ao funcionamento e características dos processos de adsorção e absorção de um material poroso.

O processo de adsorção consiste na ligação superficial de moléculas de uma substância a um material sólido que apresente uma estrutura porosa. Contrariamente, quando as moléculas constituintes da substância envolvente "quebram" a ligação superficial existente com o material sólido, por exemplo, por aumento da temperatura, ocorre o processo de desorção.

Naturalmente, na ocorrência de ambos os processos, será libertada ou absorvida energia, pelo material sólido, em forma de calor.

Existem vários materiais de construção que apresentam características promissoras associadas ao calor gerado nos processos de adsorção e desorção, como é o caso de compostos formados com base em materiais de origem natural. Estes compostos, demonstram potencial para funcionarem como sistemas passivos de regulação de temperatura o que, certamente, resultará em dados promissores aplicáveis ao estudo e melhoramento da performance térmica dos edifícios [14].

2.2. Manifestação e transporte de humidade

2.2.1. Humidade relativa (interior/exterior)

A humidade relativa no interior dos edifícios é um fator muito importante a ter em consideração pois demonstra um importante efeito na saúde dos ocupantes, mais especificamente no aparecimento de infeções e dificuldades a nível respiratório.

A humidade relativa é apresentada em percentagem e, de acordo com o seu valor, é possível fazer uma associação direta com a taxa de sobrevivência de bactérias infecciosas transmitidas através do ar. Vários estudos experimentais concluíram que dentro de um intervalo de humidade relativa variando entre 40% e 70%, existem condições impeditivas à propagação e sobrevivência de organismos infecciosos, portanto, é essencial estabelecer condições saudáveis dentro de um edifício tendo sempre por base de referência o intervalo mencionado acima [15].

Tipicamente, durante o período de inverno, os valores de humidade relativa interna diminuem, por isso, é necessária a devida atenção neste período. O ar seco causa irritação a nível ocular e secura a nível da garganta e canais nasais influenciando o normal funcionamento das mucosas podendo originar infeções respiratórias ou problemas relacionados com asma.

O termo aerossol, diz respeito à existência de partículas líquidas ou sólidas de dimensões muito reduzidas que se encontram presentes num ambiente gasoso e que podem representar perigo para a saúde. Baixos valores de humidade relativa estão associados ao aumento de aerossóis no ambiente pois, existindo uma rápida evaporação devida ao ar seco, o diâmetro das partículas dos aerossóis pode diminuir para valores abaixo do limite que permite a sua suspensão levando, por isso, à sua acumulação. Em situação de valores elevados de humidade relativa, verifica-se um aumento de vapor de água no ambiente e diminuição da velocidade de evaporação, contribuindo para o aumento das dimensões dos aerossóis pela absorção de água e maior facilidade de acumulação [15].

A humidade relativa interna, de forma silenciosa, tem relação direta com a formação de organismos prejudiciais à saúde humana, por isso, é de extrema importância, que os seus níveis sejam considerados e contabilizados como fatores cruciais para a qualidade do ar interior.

A humidade relativa do ar exterior, diz respeito ao valor de humidade que o ar exterior contém face à sua capacidade máxima a uma determinada temperatura. Quanto maior o valor de humidade relativa, mais o ambiente exterior se aproxima de condições de saturação, ou seja, um estado de percentagem de vapor de água máxima.

A variação da humidade relativa no ambiente exterior, tem influência em vários aspetos como por exemplo a nível de condensações, onde se regista uma maior ocorrência quanto maior o valor da humidade relativa. Outro aspeto importante, está ligado à maior facilidade/dificuldade de evaporação do suor humano, ou seja, em climas mais húmidos, a evaporação torna-se mais difícil pelo alto nível de humidade no ambiente, enquanto que em climas mais secos, a evaporação ocorre mais facilmente devido ao baixo valor de humidade no ambiente.

A relação e interação que existe entre os valores de humidade relativa interior e exterior terá, naturalmente, impacto direto tanto na qualidade e características dos materiais do parque edificado, como no conforto e saúde humana e, por isso, são duas grandezas às quais é essencial atribuir a devida importância.

A humidade relativa é apresentada, em percentagem, de acordo com a equação [2-10]:

$$Hr = \frac{W}{Ws} \times 100 (\%) \quad (2-10)$$

Onde:

Hr Humidade relativa [%];

W Humidade absoluta (quantidade de vapor de água que o ar contém;

Ws Limite de saturação (quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter à mesma temperatura).

2.2.2. Mecanismos de adsorção e absorção

O processo de adsorção, diz respeito à ligação superficial de átomos, iões ou moléculas de um elemento, à superfície de um material sólido. O agente adsorvido, em contexto de humidade, pode ser encontrado apenas no estado gasoso.

No domínio interno de um elemento monolítico associado a uma parede exterior, a escolha adequada de materiais e o estudo das condições internas da parede a nível de humidade é extremamente crucial. É neste domínio que a adsorção de vapor de água pode causar, eventualmente, sérios problemas. O estudo e escolha inadequados de materiais, pode resultar em elevados teores de humidade no interior da parede conduzindo a uma maior taxa de adsorção o que, a longo prazo, poderá danificar os vários materiais e diminuir acentuadamente o seu tempo de vida útil. Poderá ser posta em causa a estabilidade estrutural e a saúde dos ocupantes do edifício.

Como referido anteriormente, um dos grandes objetivos atuais na indústria da construção, é aumentar o conforto térmico no interior, diminuindo ao mesmo tempo as perdas de calor. Materiais que apresentem elevada porometria e tortuosidade dos poros, são vistos como uma boa opção para reduzir o coeficiente de transmissão térmica, no entanto, remetendo este aspeto para o tópico da adsorção, tem de existir um cuidado redobrado na forma como ambos

são relacionados. Visto que o agente adsorvido concentra-se na superfície externa e na estrutura porosa do material sólido, quando maior a sua área e porosidade aberta, mais eficaz será o processo de adsorção. Por isso, é importante proceder á escolha correta de materiais que cumpram de forma saldável e eficaz os vários requisitos existentes.

Dependendo da sua intensidade, a adsorção pode ser classificada em dois tipos: adsorção física e adsorção química. Relativamente à adsorção física, as ligações estabelecidas entre o agente adsorvido e o material adsorvante, estão associadas a forças de coesão molecular sendo, por isso, ligações mais fracas. Contrariamente, no domínio da adsorção química, as ligações são estabelecidas pela troca ou partilha de eletrões entre as moléculas do agente adsorvido e a superfície adsorvante, formando novas ligações químicas que demonstram ser mais fortes [16].

A adsorção física pode ocorrer em toda a superfície disponível do adsorvante, enquanto que a adsorção química apenas ocorre em zonas que apresentem características específicas capazes de adsorver quimicamente as moléculas do fluido [16].

Contrariamente à adsorção, o processo de absorção demonstra a capacidade que um certo material tem de absorver água ou outro tipo de material líquido, fazendo com que o processo ocorra não a nível superficial, mas a nível interno do material. A capacidade de absorção de um material está diretamente relacionada com a sua porosidade aberta, portanto, materiais que apresentem maior porosidade integrarão maior capacidade de absorção enquanto que materiais com menor valor de porosidade aberta serão mais estanques.

É extremamente importante ter em atenção o fator porosidade no momento de escolha do material. Para melhoramento de condições internas de conforto de um edifício e obtenção de níveis benéficos de isolamento térmico, é usual a utilização de materiais de isolamento térmico, como é o caso da lã de vidro, que apresentam elevados valores de porosidade acessível pelo exterior e consequentemente considerados como materiais propícios ao processo de absorção podendo, naturalmente, pôr em causa o bom funcionamento das suas propriedades de performance térmica.

De notar, que o processo de absorção dos vários materiais pode fragilizar e pôr em causa as condições de estabilidade estrutural de todo o edifício.

Na figura seguinte [17], está apresentado um esquema que elabora os processos de adsorção e absorção de um material:

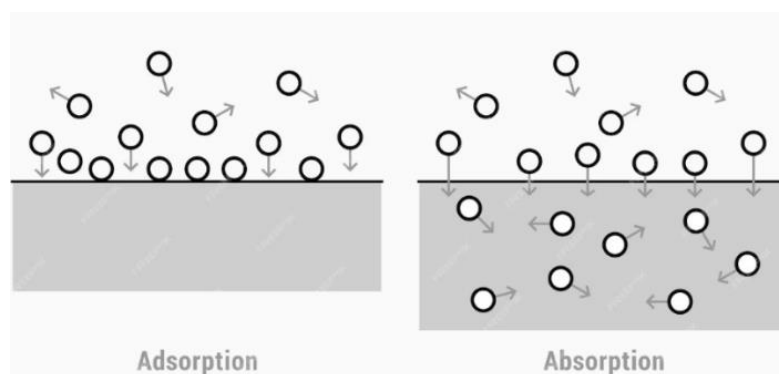


Figura 2-2: Processos de adsorção e absorção.

2.2.3. Capilaridade

O processo de capilaridade diz respeito ao comportamento ascensional de um líquido através de um material que apresente uma estrutura porosa. É um processo comum que existe em vários contextos, como por exemplo a ascensão capilar de água no solo e nos materiais de construção, por isso, demonstra ser um conceito importante e fundamental de estudo.

Acompanhando o movimento ascensional do líquido, verifica-se a ocorrência de vários processos físicos e químicos como a coesão, adesão, tensão superficial do líquido, dimensão dos poros e pressão capilar. A coesão é estabelecida pela força de ligação entre as moléculas do líquido existente, sendo que, para valores mais elevados de coesão, o movimento demonstra ser mais eficaz pelo facto das moléculas "caminharem" de forma junta. A adesão diz respeito ao comportamento de aderência das moléculas do líquido à superfície porosa, existindo neste processo, dois fatores importantes a ter em conta: o ângulo de contacto entre o líquido e a superfície e a afinidade estabelecida entre ambos. Naturalmente, quanto maior a afinidade e menor o ângulo de contacto entre os dois domínios, mais "molhada" será a superfície, potencializando o movimento do líquido. Em conformidade com o processo de adesão, a tensão superficial caracteriza-se pela força que mantém a ligação entre as moléculas do líquido e a superfície porosa, sendo que, para líquidos com elevado valor de tensão superficial, a ligação é mais eficaz ao longo de todo o processo ascensional.

A existência de condições propícias à ascensão capilar associadas aos processos mencionados acima, juntamente com o reduzido valor da medida do raio dos poros do material, motivam a um acréscimo geral da pressão capilar.

A altura de líquido obtida pela ascensão capilar atingirá um nível que é estabelecido por um balanço entre as grandezas da gravidade e capilaridade [17], podendo ser expressa através da equação [2-11]:

$$z = \frac{2 \times \gamma \times \cos(\theta)}{\rho \times g \times r} \quad (2-11)$$

Onde:

Z	Altura do líquido [m];
γ	Tensão da superfície [N/m^{-1}];
θ	Ângulo de contacto entre o líquido e a superfície [rad];
ρ	Densidade do líquido [kg/m^{-3}];
g	Valor de referência da aceleração da gravidade [m/s^{-2}];
r	Raio do poro capilar [m].

2.2.4. Higroscopicidade

O fenómeno da higroscopicidade diz respeito à capacidade intrínseca dos materiais de construção de absorver e manter humidade proveniente do meio ambiente.

A existência de humidade no interior do material, pode condicionar significativamente as suas propriedades tanto a nível de características mecânicas como no domínio do isolamento.

As condições climatéricas do local de construção representam um fator importante relativamente a valores de humidade existentes. Num local de construção que apresente elevados valores de humidade, tem de existir um balanceamento entre a escolha de materiais com baixos níveis de higroscopicidade e que permitam ao mesmo tempo cumprir os requisitos presentes no projeto sem condicioná-lo, sendo que, existe adicionalmente o reforço de garantir boas condições pela aplicação de sistemas de impermeabilização e técnicas de drenagem. Contrariamente, um ambiente de construção que apresente valores reduzidos de humidade, será propício à escolha de uma diferente gama de materiais de construção com maior valor de potencial higroscópico o que, de certa forma, pelo acréscimo de quantidade de espaços de ar do material, possibilita melhores condições de isolamento térmico e acústico para o interior do edifício.

A análise ponderada de todos estes aspetos associados à presença de humidade nos materiais, conduzirá a uma adequação mais eficaz do edifício e dos materiais que o constituem às condições que se fazem sentir no ambiente exterior, proporcionando condições saudáveis de habitabilidade e a perpetuação das características originais dos vários materiais de construção.

2.2.5. Condensações (superficiais e/ou internas)

Como mencionado anteriormente, o valor de humidade relativa do ar em percentagem (Hr), obtém-se pelo quociente entre a humidade absoluta (W), que diz respeito à quantidade de vapor de água existente no ar em redor, pela quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter à mesma temperatura (Ws), designado limite de saturação.

Para valores de humidade absoluta constantes obtidos por medição, verifica-se que a variação de temperatura influencia diretamente o limite de saturação do ar (Ws) resultando numa consequente alteração no valor de humidade relativa. Quanto maior a temperatura, mais elevado se torna o limite de saturação e a humidade relativa diminuirá. Contrariamente, quanto menor a temperatura, mais reduzido se torna o limite de saturação e a humidade relativa tenderá a aumentar.

Através do diagrama psicrométrico representado na figura 2-3, verifica-se que tendo sido fornecidos os valores de humidade absoluta do ar (kg/m^3) e da respetiva temperatura ($^{\circ}C$) a que essa massa de ar se encontra, é possível determinar diretamente o valor de humidade relativa pelas curvas dispostas no diagrama.

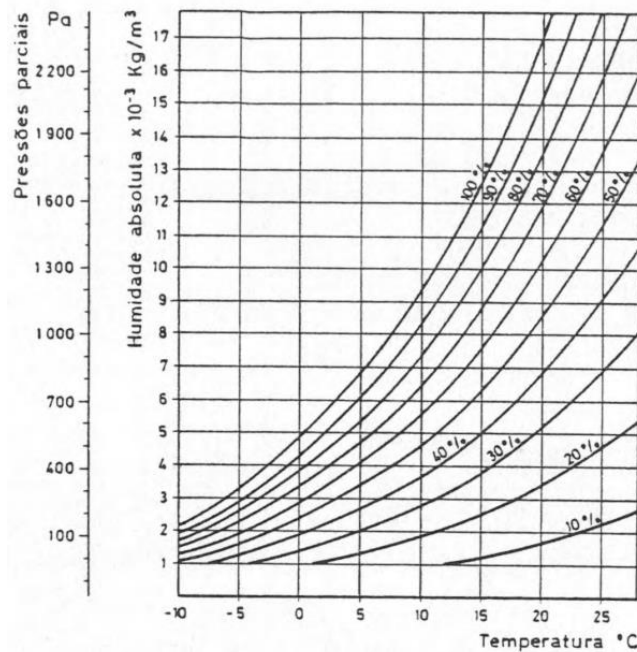


Figura 2-3:Diagrama psicrométrico.

Tendo como base de pensamento a informação referida acima, é possível criar um elo de ligação com os conceitos de condensação superficial e interna.

A ocorrência de condensações superficiais e internas, está diretamente relacionada com o transporte de humidade através dos elementos de construção, e com os valores registados de temperatura tanto do ar como da superfície e interior dos materiais.

O processo de condensação ocorre sempre que uma dada massa de ar atinge o limite de saturação associado a uma respetiva temperatura.

Em condições de Inverno, é usual a ocorrência de condensações superficiais na face interior das paredes exteriores dos edifícios, mais especificamente e com maior regularidade, em zonas de ponte térmica plana onde não existe sistema de isolamento.

A temperatura superficial interior de paredes exteriores de uma habitação, é menor face à temperatura do ar ambiente na estação de inverno e maior na estação de verão devido, por exemplo, a hábitos domésticos como cozinhados, funcionamento de eletrodomésticos, higiene, calor humano libertado, entre outros. Todos estes fatores estão ligados à produção e libertação de vapor de água, portanto, quando a massa de ar interior, que se encontra a uma temperatura superior, entra em contacto com a superfície interior das paredes exteriores, a menor temperatura, encontrará um domínio que apresenta menor valor de limite de saturação, resultando num decréscimo de temperatura da massa de ar interior e aumento da sua humidade relativa, para níveis onde as condições se reúnem para o limite de saturação ser atingido e consequentemente ocorrerem condensações.

O vapor de água produzido tende, de imediato, a procurar a forma mais eficaz de se "deslocar". A maior percentagem de vapor de água no interior, é encaminhado para o exterior por ação de renovação do ar interior, sendo que, a restante percentagem atravessa as paredes

exteriores com risco de eventuais condensações internas ou condensa em contacto com a superfície interior. De notar que, a existência de um eficaz sistema de renovação de ar interior, mesmo em condições de inverno, é vantajoso para as mitigar elevadas concentrações de humidade no interior dos edifícios. O ar mais frio proveniente do exterior, entrará em contacto com o ar mais quente do interior (se o ambiente interior for climatizado) levando, naturalmente, a um aumento da sua temperatura que provocará a consequente diminuição do seu valor de humidade relativa, contribuindo para uma geral diminuição da humidade relativa do espaço interior.

Pela corrente de pensamento explicitada acima, a manifestação de condensações superficiais no interior dos edifícios está diretamente relacionada com as condições de renovação de ar estabelecidas que, apesar de não ser atribuída a devida importância em inúmeros projetos de construção, o seu contributo é constatado [5].

A temperatura superficial interior relativa a paredes exteriores de um edifício, calcula-se pela equação [2-12], considerando que as características e variáveis do sistema em questão se mantêm inalteradas ao longo do tempo:

$$\theta_i = t_i - \frac{1}{h_i} \times K \times (t_i - t_e) \quad (2-12)$$

Onde:

- θ_i Temperatura superficial interior ($^{\circ}\text{C}$);
- t_i Temperatura de massa de ar interior ($^{\circ}\text{C}$);
- t_e Temperatura de massa de ar exterior ($^{\circ}\text{C}$);
- K Coeficiente de transmissão térmica da parede ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$);
- h_i Condutância térmica superficial interior ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$).

O vapor de água gerado no interior dos edifícios, como referido anteriormente, é, em grande parte, direcionado para o exterior por meio de processos de renovação de ar, sendo que, a restante percentagem resulta em processos de condensações superficiais e internas.

A manifestação de condensações internas no interior das paredes, ocorre quando a pressão parcial do vapor de água da massa de ar que atravessa a parede por difusão, iguala a pressão de saturação á mesma temperatura [5]. Adicionalmente, a massa de ar que atravessa as paredes por difusão, pode estabelecer contacto com uma superfície que se encontre a uma temperatura mais baixa no interior da estrutura. Verifica-se que a massa de ar ao apresentar maior temperatura, o seu limite de saturação é maior que o da superfície mais fria, por isso, o contato direto, tenderá para a diminuição da temperatura da massa de ar, diminuindo o seu valor de limite de saturação e conduzido a que o vapor de água mude de estado físico para líquido.

O processo de condensação interna no interior das paredes pode resultar em consequências negativas para os vários materiais que a constituem, levando ao enfraquecimento das suas propriedades e características iniciais e diminuindo a sua durabilidade.

Associadas a esta problemática, existem várias ações de proteção e prevenção que podem ser adotadas no decorrer do projeto de construção para evitar o acumular excessivo de humidade em zonas propícias para tal e no tratamento adequado, a nível de isolamento térmico, de superfícies interiores da estrutura que, devido às suas características, funcionem como eventuais zonas de fortalecimento à manifestação de condensações internas.

Um exemplo de medida a adotar é a colocação de barreiras para-vapor em zonas estratégicas no interior da parede. Visto que a função principal da barreira ao vapor é estabelecer um equilíbrio interno saudável a nível de humidade e bloquear a difusão do vapor de água proveniente do interior, o seu posicionamento, para que seja um elemento eficaz, tem de assegurar que o vapor de água não alcança superfícies interiores frias onde a ocorrência de condensações seria inevitável, por isso, a barreira ao vapor deve ser colocada antes de superfícies internas frias como proteção assegurada (visualizando de uma perspetiva do movimento da massa de ar do interior para o exterior).

Para além da importância da posição de colocação da barreira ao vapor no interior da parede, para que o sistema funcione de forma eficaz e duradora, tem de ser garantida a compatibilidade química e física entre a barreira ao vapor e os materiais de construção existentes em seu redor. Desta forma, é garantido o proveito e benefício máximos desta opção construtiva implementada.

A manifestação de condensações internas num edifício é, de facto, um importante fator a ter em consideração. Um estudo prévio que vise a implementação de sistemas de ventilação eficazes, escolha adequada de materiais com função de isolante térmico e implementação estratégica de materiais no domínio interno das paredes, contribuem como um todo para níveis de qualidade de ar interior saudáveis, maior eficiência térmica e proteção dos materiais.

2.3. Construção modular e pré-fabricação

2.3.1. Conceitos gerais

De acordo com um estudo publicado em julho de 2020 pela revista científica *The Lancet* [18], a população mundial demonstra um cenário de crescimento cujas projeções apontam para que seja atingido o pico populacional no ano de 2064 com cerca de 9.73 biliões de habitantes, revertendo a sua tendência de crescimento até ao final do século com um número previsto de 8.79 biliões de habitantes no ano de 2100.

Naturalmente, para corresponder ao aumento previsto de população até ao ano de 2064, o setor da construção desempenha um papel crucial para satisfazer as necessidades populacionais.

Fatores como o aumento do custo dos materiais de construção, falta de mão de obra especializada, valorização de terrenos para construção, problemas associados a gestão de produtividade, entre outros, demonstram ser fatores que oferecem resistência ao crescimento do parque habitacional necessário. Surge, portanto, a necessidade de adotar medidas que visem colmatar as dificuldades existentes.

A construção modular, é uma área associada ao ramo da construção civil que envolve o fabrico, em ambiente controlado, de componentes individuais ou em módulo, para edifícios de habitação, serviços ou industriais, que serão transportados e, posteriormente, montados no local de construção [6]. As peças modulares obtidas, demonstram acabamentos para facilitar a incorporação de sistemas mecânicos, de canalização e parte elétrica.

Comparativamente à construção tradicional, a realização de projetos envolvendo a construção modular, evidencia inúmeras vantagens como o facto de 80% de todo o processo decorrer em ambiente controlado [19], redução do tempo de construção e de custos em cerca de 50% e 20% respetivamente [6], entre outros. A pré-fabricação dos vários componentes em fábrica, garante melhores condições de controlo tanto na sequência de processos envolvidos no fabrico dos componentes, como na qualidade dos materiais, pelo facto de se encontrarem protegidos das condições atmosféricas exteriores que, eventualmente, poderiam afetar negativamente as suas características iniciais. Existem condições de segurança apropriadas para os trabalhadores, garantido melhores condições de trabalho e um nível melhorado de qualidade atingida a nível de produto final [19].

Sendo a construção modular um processo rápido e eficaz, cujos principais objetivos são atingir condições ímpares de otimização e eficiência, verificam-se, portanto, menores custos e maior eficácia a nível de tempo associados. O dimensionamento e estabelecimento dos vários componentes em fábrica, proporcionam um processo livre de interferências e condicionantes exteriores, contrariamente à construção tradicional cujo plano de trabalhos é altamente dependente das condições atmosféricas. Adicionalmente, existe a necessidade de implementar mão de obra especializada que, a par com o dimensionamento de conjuntos de peças com características semelhantes, faz com que todo o processo de produção seja padronizado e mais eficiente [20]. Visto que o processo de fabrico dos elementos pré-fabricados/módulos é independente do processo de preparação do terreno para colocação da estrutura modular em segurança, de modo a otimizar o diagrama de atividades do projeto, ambas as tarefas podem ser realizadas em simultâneo, otimizando custos e tempo [21].

A nível de sustentabilidade, este tipo de construção apresenta uma taxa de desperdício de materiais de cerca de 3%, comparativamente à taxa de desperdício de materiais observada na construção tradicional que pode chegar aos 30% [7]. Acrescendo ao facto de gerar menos resíduos de construção, a construção modular tem a vantagem de economizar os materiais existentes, sendo possível desmontar a estrutura modular e movê-la para outro local salvaguardando os eventuais impactos que existiriam a nível acústico no parque habitacional em redor e os resíduos gerados pelo processo de demolição [22].

A vantagem do fabrico de peças modulares e elementos pré-fabricados ser realizada em fábrica agrega, inevitavelmente, uma desvantagem no processo de transporte para o local de obra. Estão associadas altas emissões de CO₂ para a atmosfera assim como condicionantes de dimensões permitidas à circulação em espaço rodoviário por isso, para que sejam cumpridas todas as regras em vigor, é necessário atribuir a devida atenção a estes aspetos.

A figura 2-4, organiza a informação e compara de forma sumariada o calendário associado ao processo de construção modular e construção tradicional.

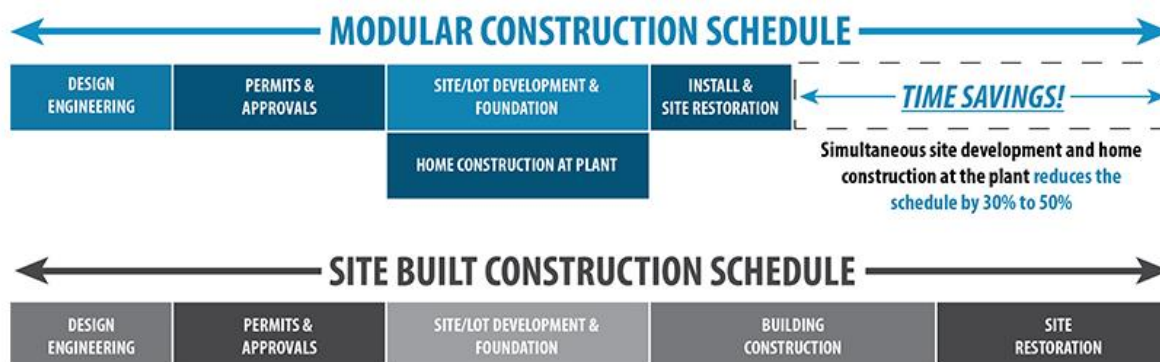


Figura 2-4: Comparação de calendário entre processo de construção modular e construção tradicional.

Analisando a figura 2-4, verifica-se a similaridade a nível de tempo decorrido de ambos os tipos de construção numa fase inicial. Desta fase fazem parte os processos de projeto de engenharia, autorizações e aprovações, tratamento do terreno do local de construção e fundações, sendo que, como referido anteriormente, na construção modular existe a vantagem do fabrico do módulo ser realizado em fábrica em simultâneo com as fundações em obra enquanto que na construção tradicional, a obra apenas continua após o término das fundações.

Após a conclusão das fundações, é inequívoca a vantagem da construção modular. Uma vez que o fabrico dos elementos foi realizado em fábrica, procede-se à sua instalação no local de obra e à sua consequente restauração, enquanto que na construção tradicional, é iniciada a fase de construção e a posterior restauração do terreno, sendo evidente uma grande desvantagem de tempo de obra gasto. Conclui-se que a escolha pela construção modular providencia uma economia de tempo entre 30% a 50% contribuindo, paralelamente, para a redução do impacto ambiental.

De maneira oposta à construção tradicional, a construção modular apresenta um traço individual de flexibilidade e versatilidade no sentido em que pode ser adaptada a diferentes setores. Dependendo do contexto e implicações do projeto, é possível realizar adaptações pontuais de forma segura e eficaz para satisfazer eventuais necessidades sem condicionar aspetos de segurança estrutural. A construção da estrutura com base em módulos e elementos pré-fabricados, garante uma característica de escalabilidade permitindo o acréscimo, remoção e reconfiguração de elementos de acordo com necessidades de projeto, leis e regulamentos, e efeitos estéticos [23].

Tanto para o fabricante como para o cliente, verificam-se benefícios se existir uma unificação de valores ótimos a nível de custo, tempo e qualidade figura 2-5.

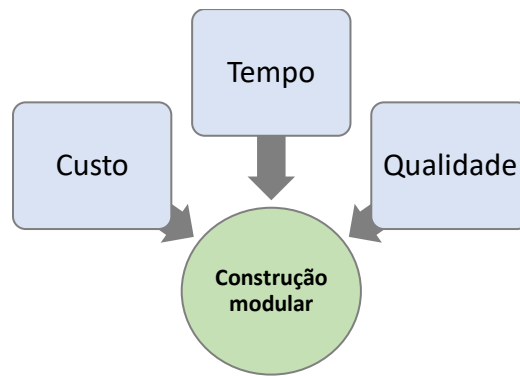


Figura 2-5: Fatores importantes na indústria da construção modular.

A existência de limitações ao acesso de mão de obra qualificada, a regulamentação existente e a dificuldade de fazer face à procura, demonstram ser os fatores mais decisivos no que diz respeito à atratividade do mercado modular por parte das empresas. A mudança estabelecida no processo de construção para o interior em fábrica, resulta num investimento significativo a nível de infraestrutura que dependerá diretamente da sua dimensão e do nível de sistemas de automatização implementados, sendo este, também um fator de investimento respeitável a ser considerado pelas empresas [24].

De acordo com a figura 2-6, estabeleceu-se um conjunto de sete fatores que culminam na determinação do nível de atratividade do setor da indústria modular. Fazem parte deste conjunto a regulamentação existente, acesso a materiais de construção, cadeia de fornecimento e logística, mão de obra, qualidade, limitações locais e contínua necessidade de corresponder à procura.

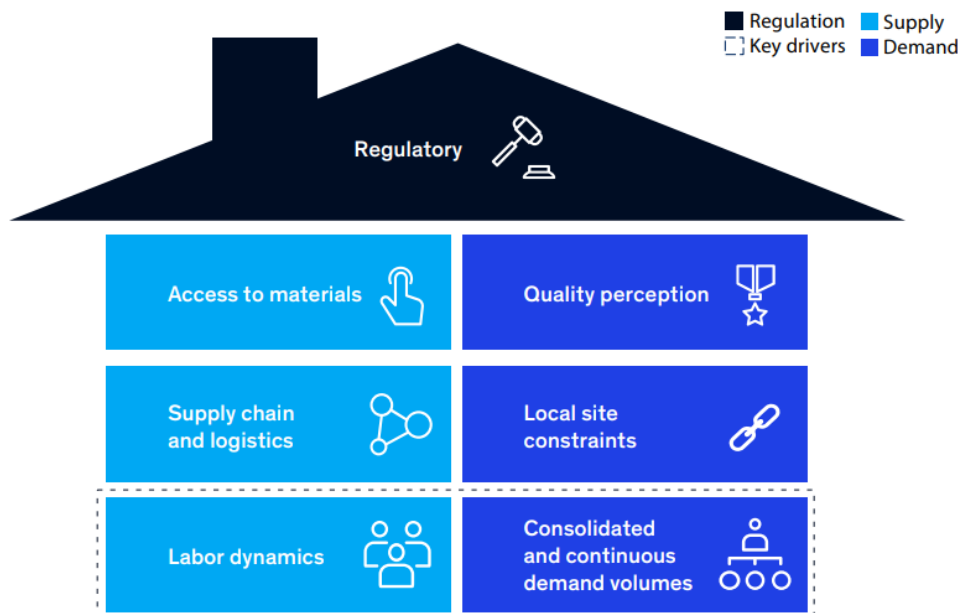


Figura 2-6: Fatores determinantes na atratividade da indústria modular.

2.3.2. Sistemas de desenvolvimento computacional

A modelagem da informação da construção (BIM), consiste no processo computacional de criação de um modelo tridimensional (3D) evidenciando um conjunto de dados importantes associados ao projeto em questão. A tecnologia BIM permite obter dados relativos a detalhes geométricos dos elementos de construção, representação de incompatibilidade entre elementos, listas de materiais e respetivas quantidades necessárias, indicadores importantes para o processo de fabrico, entre outros parâmetros.

A agregação de informação facilita a comunicação entre todas as entidades e participantes nos projetos de design e construção contribuindo para melhores resultados obtidos [25].

A modelagem da informação da construção aplicada à construção modular, apresenta um leque importante de vantagens. Sendo a construção modular um processo padronizado onde a união facilitada e segura entre elementos tem de ser assegurada, a implementação da metodologia BIM auxilia na deteção prévia de eventuais defeitos nos elementos pré-fabricados, assegurando boas condições de montagem no local de construção e evitando, em simultâneo, custos acrescidos e desperdício de material.

A criação da modelação 3D do elemento de construção facilita, neste sentido, a perceção detalhada das suas características e, como referido anteriormente, sendo a construção modular uma área de trabalho versátil, existe maior possibilidade de as peças pré-fabricadas sofrerem alterações. O tempo de integração de alterações pretendidas é fortemente otimizado pelo uso desta metodologia, visto que todos os documentos, incluindo lista de materiais do elemento de construção, são imediatamente atualizados [26].

Para além da sua componente de navegação virtual pelo interior do projeto de construção, a adoção da metodologia BIM possibilita a simulação e análise de padrões associados ao desempenho térmico e energético do elemento modular, sendo potencializada a integração do mesmo dentro dos parâmetros estabelecidos por normas europeias referentes a "Near Zero energy building" (nZEB) [27].

De acordo com a diretiva europeia 2010/31/U [28], um (near zero energy building) é definido como um edifício com balanço energético quase nulo, ou seja, o seu processo de construção e materiais utilizados, assentam em escolhas sustentáveis que conduzem a um elevado desempenho energético.

É da responsabilidade de cada estado membro da União Europeia definir os parâmetros que caracterizem e insiram um edifício na qualidade de nZEB. Remetendo para Portugal, existem dois grandes grupos, os edifícios de habitação e edifícios de comércio e serviços, cujas exigências estão apresentadas na tabela seguinte [29]:

Tabela 2-4: Exigências portuguesas para edifícios nZEB.

Edifícios de habitação (Portaria n.º 98/2019 de 2 de abril)

Exigências para Edifícios de Habitação nZEB	
Energia útil para aquecimento: N_{IC} e N_I = indicadores de energia útil para aquecimento, calculado e nominal respetivamente	$N_{IC}/N_I \leq 75\%$
Energia primária: N_{TC} e N_T = indicadores de energia primária calculado e nominal respetivamente	$N_{TC}/N_T \leq 50\%$
Fontes de energia renovável devem suprir usos de climatização e AQS	$\geq 50\%$

Edifícios de Comércio e Serviços (Portaria n.º 42/2019 de 30 de janeiro)

Valor máximo do Indicador de Eficiência Energética (IEE_S) e do rácio de classe energética (R_{IEE}):

Exigências para Edifícios de Comércio e Serviços nZEB	
$IEE_S \leq 75\% IEE_{S,REF}$	$R_{IEE} \leq 0,50$

De acordo com Joaquín Abellán, professor doutorado em ciência política na universidade autónoma de Madrid, a implementação da metodologia BIM em Portugal e Espanha ainda se encontra numa fase embrionária *"Para alcançar um patamar elevado de implementação do BIM, e para se chegar ao nível já verificado nos EUA ou na maior parte da UE, precisamos de ser mais sustentáveis. Um dos principais fatores que a tecnologia BIM nos fornece é o cálculo do consumo energético do edifício, e nem Portugal nem Espanha estão suficientemente avançados nesta área (...)"* [27].

De acordo com Alwisy [30], desenvolveu-se um projeto automatizado para a construção de painéis modulares em madeira para edifícios de habitação recorrendo a um programa baseado em BIM designado por MCMPro, por via de aplicações de base visual (VBA) num ambiente de desenho assistido por computador (CAD).

Este programa aplicado à construção modular, utiliza uma análise baseada em cenários (SBA) que interpreta os dados introduzidos no MCMPro, como o projeto desenvolvido em 2DCAD, dimensões do modelo, equipamento disponível, regras aplicadas ao elemento modular, entre outros inputs. Por fim, é gerado um output pelo programa que disponibiliza o modelo central BIM, um modelo BIM melhorado, baseado nos padrões do programa MCMPro, esquemas auxiliares dos vários elementos modulares e listas de materiais [30].

A ilustração na figura 2-7, demonstra o funcionamento do processo descrito:

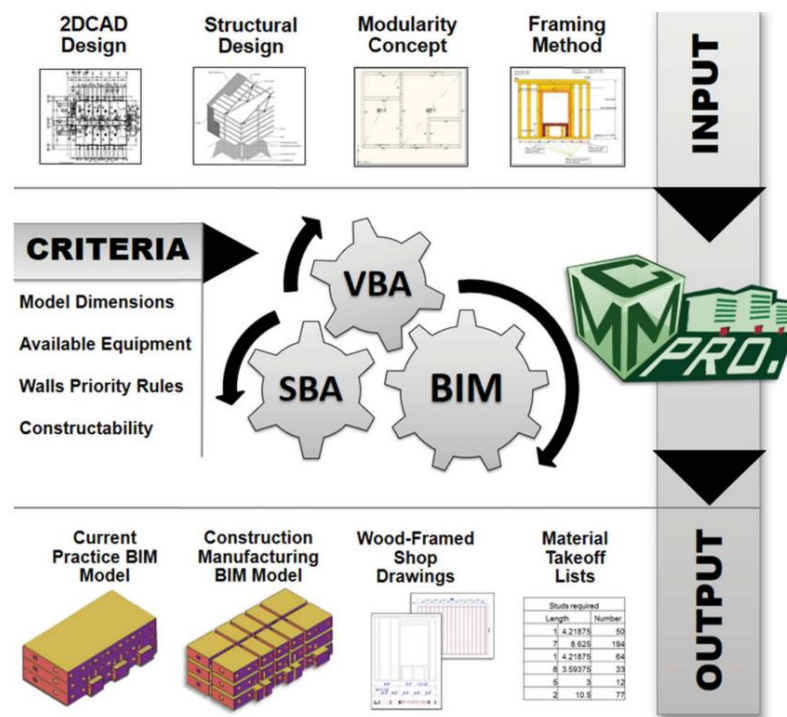


Figura 2-7: Sistema baseado na utilização do programa MCMPro.

2.3.3. Processo industrial

Relativamente ao processo industrial na ótica da construção modular, verifica-se a incorporação de componentes essenciais para a eficácia de todo o processo fabril como a automização de processos envolvendo componentes robóticas, estações de linha de produção, controlo de qualidade integrado, sistemas de união de peças modulares, entre outros.

Empresas que estabelecem associação com a indústria modular, incorporam nas suas unidades fabris linhas de produção totalmente automatizadas que conduzem os elementos modulares ao longo de várias estações onde se encontram equipas prontas a realizar um conjunto de tarefas específicas. Paralelamente, existe a possibilidade de as empresas obtarem pela implementação de linhas de produção estáticas, ou seja, um processo onde todas as equipas especializadas convergem para o mesmo local e realizam as respetivas funções [31].

De acordo com Gilbert Trudeau, dono e CEO da empresa RCM Modulaire [32], as linhas de produção automatizadas demonstram ser mais vantajosas face a linhas de produção estáticas. Existe margem para maior organização no sentido em que são definidos timings específicos para a conclusão de cada tarefa assim como as equipas e o respetivo equipamento de trabalho não necessitam de ser deslocados. Deste modo, cada estação adquire características mais especializadas e direcionadas para o trabalho a cumprir, contribuindo para um aumento de qualidade do produto final. Uma vantagem associada a este tipo de linhas de produção faz parte integrante do processo de deteção de erros pois, na eventual ocorrência de um erro numa determinada estação, é possível a sua deteção na estação seguinte [31].

Sendo a construção modular uma área baseada na padronização e construção em massa, a automatização de processos envolvendo novas tecnologias e componentes robóticas conduz à otimização e eficácia de todo o processo.

O grupo KUKA [33], sediado em Augsburg na Alemanha, é um dos fornecedores líderes a nível internacional de sistemas de automação inteligentes. Este grupo atua em várias indústrias sendo a construção civil modular automatizada uma das principais. A integração de máquinas, componentes e robôs, constituem linhas complexas de fabricação e montagem. Deste modo, é garantido um número elevado de processamento de pedidos que visam possibilitar uma mudança de paradigma na construção automatizada de casas [33].



Figura 2-8: Automação integrada na construção modular.

O esquema ilustrativo seguinte [33], apresenta um exemplo do processo fabril associado à construção modular automatizada fragmentado em diferentes fases:

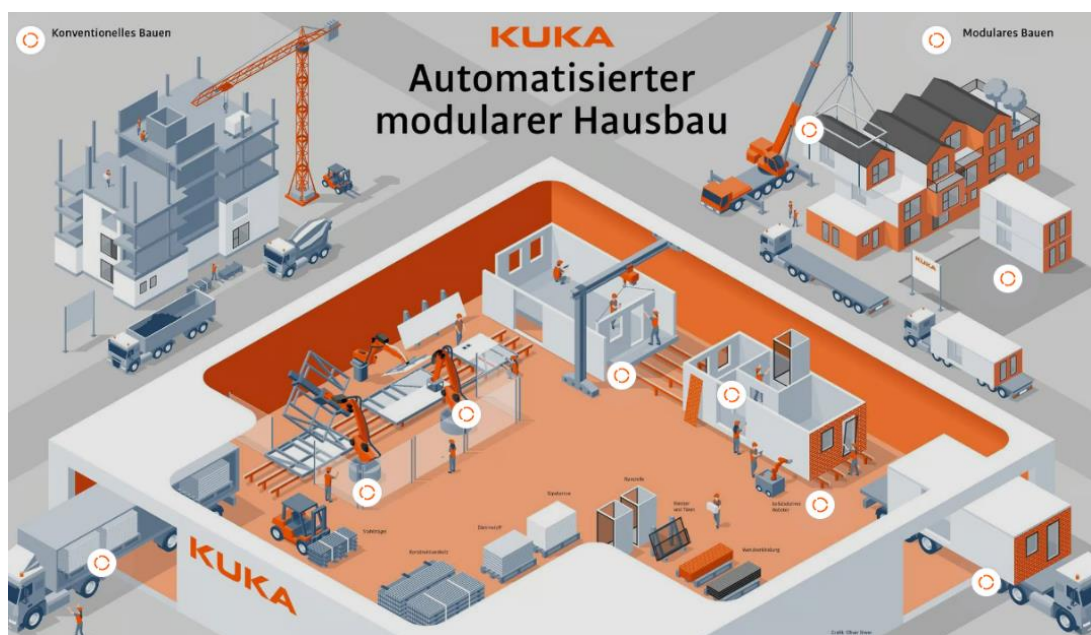


Figura 2-9: Esquema ilustrativo de processo associado à construção modular automatizada.

Associando a informação mencionada anteriormente no subcapítulo de "Conceitos gerais" aos tópicos relacionados com o processo industrial depreende-se, pelo esquema ilustrativo apresentado, que as matérias primas são inicialmente entregues e armazenadas em fábrica para os vários projetos. Com auxílio de máquinas intervenientes automatizadas, dimensiona-se a estrutura de suporte principal, em madeira ou aço, para paredes, tetos e pisos, que servirá de base para todos os módulos subsequentes. Posteriormente, adicionam-se todos os materiais constituintes do elemento modular, incluindo materiais de isolamento, e definem-se áreas para integração de sistemas MEP¹, resultando num elemento finalizado.

Seguidamente, as peças modulares são encaminhadas para a linha de montagem onde, pela atuação de várias equipas especializadas, são unidas e concatenadas para obtenção da estrutura modular final. Posteriormente, a estrutura final é submetida a um processo minucioso de controlo de qualidade integrada de modo a verificar se são cumpridos todos os requisitos legais.

Por fim, sucede-se o transporte da estrutura modular para o local de obra onde é realizada a sua montagem e o término do projeto [33].

2.3.4. Considerações importantes no processo de transporte e no local de obra

A logística de transporte associada à construção modular assenta em dois aspetos fundamentais, sendo que o primeiro exhibe o transporte da estrutura modular totalmente finalizada para colocação em obra e usufruto imediato e o segundo relaciona-se com o transporte de elementos pré-fabricados individuais e outros elementos necessários à sua montagem no local de obra [34].

Naturalmente, e consoante cada país, estão estabelecidos regulamentos que determinam um conjunto de leis a cumprir face a dimensões permitidas na circulação rodoviária. Relativamente a Portugal, de acordo com o diário da república e a base de dados jurídica, encontram-se expressas no Decreto-Lei nº 133/2010, Anexo 1, Secção 2, Artigo 3º, as dimensões máximas de veículos para efeito de circulação [35].

No que se refere aos cuidados a adotar em obra, é fundamental considerar parâmetros como as condições de união e encaixe entre os módulos pré-fabricados, para que o nível de segurança ideal seja assegurado, método de trabalho adequado e experiência a operar na ótica da construção modular por parte das várias equipas integrantes da obra, instruir tanto os intervenientes em obra como o futuro agregado familiar ocupante acerca de boas práticas de manutenção pós-obra tendo por base o tipo de construção e materiais utilizados, entre outros aspetos.

¹ Sistemas mecânicos, elétricos e de canalização.

2.4. Casos de estudo

As emissões de gases com efeito de estufa, em particular o CO₂, é considerado o principal interveniente na tendência altista do aquecimento global [36]. De acordo com a agência internacional de energia (IEA) [1], o funcionamento dos edifícios traduz um peso de 30% do consumo final de energia a nível mundial e 26% de emissões globais em termos de energia sendo que, 8% representam emissões do próprio edifício e os restantes 18%, emissões indiretas por via dos ocupantes na produção de calor e eletricidade. No ano de 2022, verificou-se um aumento de cerca de 1% no consumo de energia na utilização dos edifícios, possivelmente devido a efeitos relacionados com a pandemia COVID-19.

A implementação de medidas concretas para alcançar os objetivos estabelecidos é uma prioridade do presente, visto que, definiu-se uma meta de 20% do parque habitacional existente estar inserido nos parâmetros de zero-carbon-ready² até ao ano de 2030.

Relativamente às emissões de CO₂, verificou-se no ano de 2022 um decréscimo por parte de emissões diretas de edifícios para um valor de 3 Giga toneladas (Gt) e um aumento por parte de emissões indiretas de edifícios para um valor cerca de 6.8 Gt. Projetando os mesmos parâmetros para o ano de 2030, é ambicionada uma emissão direta de CO₂ de 1.7 Gt e uma emissão indireta de 2.7 Gt, como constatado no gráfico da figura 2-10:

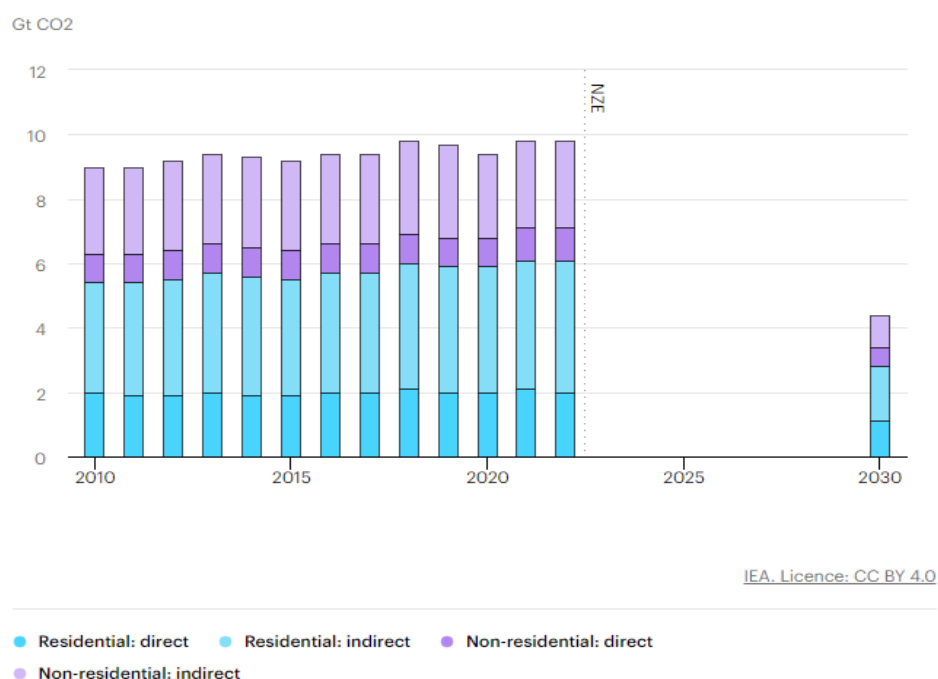


Figura 2-10: Emissões diretas e indiretas globais de CO₂ no contexto de edifícios.

Até ao final do ano de 2030, estima-se um crescimento de área útil de construção global de cerca de 15% sendo que, 20% do valor total de crescimento está associado a economias

² Edifícios altamente eficientes que utilizem energia renovável ou dependam de fontes de energia que possam ser totalmente descarbonizadas. O conceito inclui emissões operacionais e incorporadas [1].

avançadas e os remanescentes 80%, a economias em desenvolvimento. Tendo por base a relação entre o crescimento de área de construção útil e o consumo de energia no setor, registou-se no ano de 2022 um consumo de energia total de 145.1 kWh/m². Com o objetivo de atingir as projeções para o final da década, é vital assegurar um valor de cerca de 96.2 kWh/m², o que equivale a um declínio de consumo de energia por metro quadrado em 35% no ano de 2030, face ao ano de 2022 (figura 2-11, retirada de [1]).

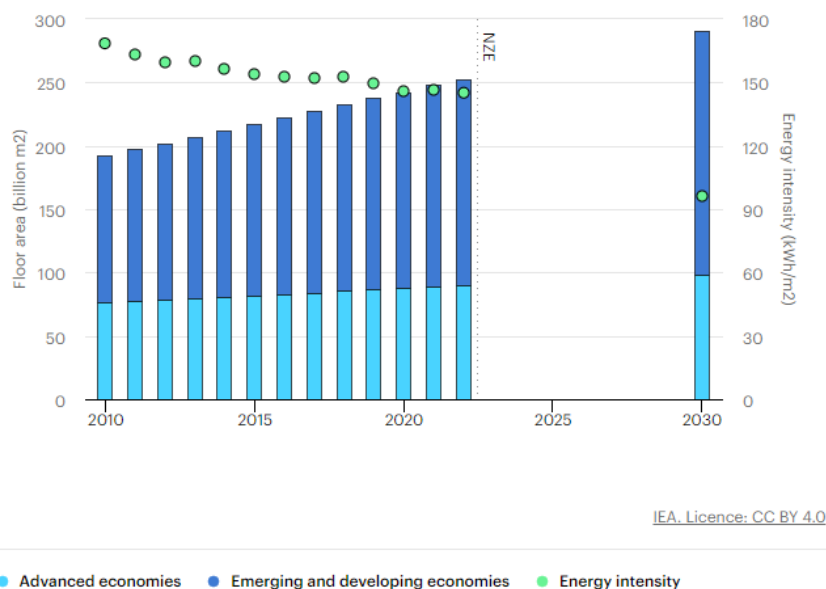


Figura 2-11: Consumo total de energia incorporado no contexto de área de construção global útil.

Averiguam-se, portanto, dois pontos prioritários de incidência, a redução da energia consumida durante a utilização dos edifícios e a redução da energia incorporada nos materiais de construção. Para reprimir o segundo ponto, um processo conveniente passa pela escolha de materiais que apresentem características e propriedades promissoras, como materiais ligados ao setor da agricultura [14]. Materiais com características de isolamento térmico provenientes de plantas ou revestimento de animais, demonstram ser um enfoque atual no setor da construção, por serem associados a materiais sustentáveis e recicláveis. A implementação destes materiais, pode ser realizada de forma individualizada, ou seja, pela utilização do material de base biológica submetido ao mínimo processamento possível como a construção utilizando fardos de palha [37], ou combinados com outros materiais, obtendo-se compostos mais complexos como betão reforçado com fibras de tamareira [38], compósitos leves de base biológica incorporando tecido interior dos caules de plantas como milho e girassol [14], construção com base em cal de cânhamo [36], entre outros casos [39].

Particularizando os materiais de origem vegetal, estes, através do processo da fotossíntese, são capazes de captar e reter dióxido de carbono presente na atmosfera. De notar que, na maioria dos casos, a percentagem de dióxido de carbono absorvido é superior face à quantidade envolvida no seu processo de fabrico o que, conseqüentemente, resulta numa pegada de carbono negativa [39]. Para além desta propriedade, materiais de isolamento compostos por

fibras naturais, possuem o traço de promover características "respiráveis" ao elemento de construção, ou seja, uma resposta direta em termos de absorção e libertação de humidade em consequência de eventuais oscilações de valores de humidade relativa verificadas no ambiente [36].

A incorporação de biomateriais na ótica da construção modular agrega, portanto, diversos benefícios associados ao melhoramento de práticas sustentáveis e propriedades higrotérmicas de soluções construtivas.

Um aspeto importante a ter em consideração, diz respeito à disponibilidade geográfica destes materiais de origem natural pelo que, para diminuição de custos associados ao transporte e tempo de chegada do material, a escolha optativa de materiais pertencentes a um raio significativamente próximo do local de construção introduz, notoriamente, benefícios chave [14].

Por conseguinte, o objetivo principal baseia-se no estudo da performance higrotérmica de paredes monolíticas com carácter modular, incorporando biomateriais de diferentes tipos. Deste modo, é possível proceder à realização de uma análise comparativa entre as várias soluções construtivas apresentadas, tendo presente as propriedades dos materiais utilizados, os mecanismos associados ao transporte de calor, fatores associados à manifestação e transporte de humidade e conceitos gerais relacionados com a construção modular, como mencionado nos subcapítulos anteriores. A análise de um conjunto de critérios de avaliação, permitirá obter conclusões associadas à influência das várias soluções construtivas nas condições de conforto interior, que estabelecem impacto direto no consumo de energia.

2.4.1. Incorporação de sensores inteligentes para medição do desempenho higrotérmico

A incorporação de sensores inteligentes para medição do desempenho higrotérmico de soluções construtivas na ótica da construção modular, introduz um suplemento importante pela existência de um processo contínuo de monitorização, controle e adaptação, tanto das condições ambientais interiores, como do quadro específico, em termos de variações de temperatura, humidade, entre outras grandezas, de cada tipo de solução construtiva adotada.

Efetuando a ponte com os mecanismos associados ao transporte de calor e humidade, a existência de tecnologia de medição, permite o controlo de sistemas de aquecimento, garantido níveis de temperatura interior confortáveis e controlo de níveis de humidade relativa, assegurando valores saudáveis que visam contrabalançar a possível ocorrência de condensações. O controlo pode, da mesma forma, estar associado a sistemas de ventilação (HVAC)³, permitindo uma deteção de aumento/diminuição da temperatura interior, sendo posteriormente acionados de modo a regulá-la para níveis de conforto.

A facilidade de integração de vários sensores individuais, estabelece uma rede de medição num conjunto de pontos de interesse, cuja monitorização é efetuada de forma centralizada [40].

³ Sistemas que regulam a temperatura interior de edifícios, de modo a serem atingidas condições de conforto saudáveis.

A empresa alemã Ahlborn [40], situada na região de Munique, desenvolveu uma tecnologia de medição designada Almemo Measurement Technology. O sistema é composto por um equipamento principal de medição com ecrã tátil, conferindo uma utilização facilitada com o complemento de análise gráfica, conectores inteligentes que estabelecem ligação direta ao medidor e que guardam toda a informação do sensor associado, e por sensores individuais colocados em pontos de medição pré-estabelecidos (figura 12). Existe, portanto, a possibilidade de implementação de sensores em zonas de medição inacessíveis que estabelecerão ligação direta via wireless com o equipamento de medição. A associação de um parâmetro de medição a cada sensor individual, permite a criação de um sistema lógico e organizado de designação com a característica principal de agregação e análise simultânea de diferentes parâmetros, ou seja, à medida que for realizada a colocação de cada sensor, será estabelecida ligação direta com o respetivo conector, gerando uma lista organizada no equipamento de medição [40].

Deste modo, é possível garantir a utilização de apenas um equipamento principal para efetuar a medição de todos os parâmetros pretendidos, tornando o processo mais organizado e preciso.



Figura 2-12: Modelo data logger ALMEMO 710.

Adicionalmente, a existência de conectores fabricados com base na tecnologia digital ALMEMO D6 e D7, permite a ligação de dispositivos de medição que contenham uma interface analógica ou digital à interface do conector (figura 2-13). Após ser estabelecida a ligação de um conector ALMEMO D6/D7 com o dispositivo de medição, como referido anteriormente, toda a informação e parâmetros de medição do respetivo sensor, são reconhecidos e apresentados.

Um aspeto importante, está associado com o tempo de calibração dos equipamentos de medição. Quanto maior o tempo de calibração, naturalmente, menos eficiente será o processo de medição por isso, de modo a fazer face a este obstáculo, o sistema de conectores ALMEMO D7 permite o funcionamento, sem interrupções, do processo de medição se for verificada a necessidade de troca de um sensor descalibrado ou defeituoso [40].

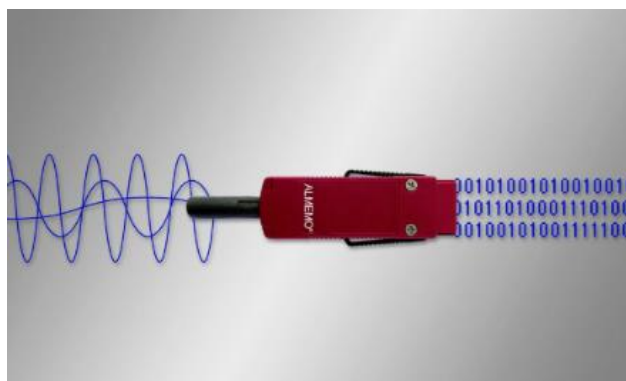


Figura 2-13: Conector com tecnologia digital ALMEMO D6/D7.

A obtenção e processamento dos dados adquiridos, realiza-se através de um programa designado WinControl software [41]. Este software, para além de permitir a componente de programação dos equipamentos compreendidos na tecnologia ALMEMO, prescreve características assentes no armazenamento de dados, processamento matemático de valores, exportação de dados para outros programas visando análises complementares, implementação de alarmes baseados no conjunto de valores obtidos, entre outras potencialidades [40].

Este software, disponibiliza ao utilizador uma ficha técnica [42], na qual se encontram apresentadas todas as características e funcionalidades do programa, assim como, quadros resumo que organizam os vários parâmetros existentes implementados em cada versão do software.

O WinControl software, é apropriado para medições e monitorização a longo prazo e, pelo seu funcionamento assente numa interface Windows, atribui características adicionais de segurança e fácil familiarização [42].

A utilização da tecnologia ALMEMO articulada com o software de medição especificado, atribui vantagens imediatas para as empresas a nível de custos e adaptabilidade pois, pelo facto de não ser necessário o ajuste de software, alteração de parâmetros e processos de reprogramação, a adaptação às práticas internas da empresa torna-se facilitada e objetiva.

Neste sentido, verifica-se a importância e potencialidades na incorporação de sensores inteligentes no setor da construção modular para monitorização contínua e criação de ambientes inteligentes e adaptáveis.

2.4.2. Considerações finais

Para fundamento desta dissertação, foram examinados diversos artigos científicos cujo critério de seleção assenta principalmente na ótica da construção modular e na implementação de soluções construtivas envolvendo materiais de origem natural. De notar que, no leque selecionado de artigos, existem casos que não se encontram relacionados diretamente com os principais critérios de busca mencionados acima, no entanto, apresentam informações relevantes que suportam o estudo em questão como por exemplo: metodologia de obtenção de dados e programa de simulação associado, apresentação de critérios de avaliação da performance higrotérmica, zona de implementação da solução construtiva, entre outros aspetos.

A meta primária, baseia-se no estabelecimento de um quadro resumo que contém um levantamento das principais informações e características dos artigos selecionados. Desta forma, a concatenação de informação neste formato, institui uma ferramenta de leitura e pesquisa facilitadas.

A tabela 2-5 encontra-se organizada, primeiramente, pela designação do estudo conduzido. Em seguida, é especificada a referência para o acesso direto ao artigo e, por fim, estabeleceu-se um conjunto de parâmetros de caracterização dos quais fazem parte: a zona de implementação, a caracterização da solução construtiva em termos de materiais que a constituem, o tipo de abordagem utilizada para obtenção e análise de dados, ou seja, por via de utilização de um programa de modulação ou processo exclusivamente por via de monitorização, e as principais grandezas estudadas e avaliadas.

Fatores como as condições climáticas verificadas num certo local e a disponibilidade de materiais, representam aspetos relevantes associados à zona de implementação da solução construtiva que, de forma direta, influenciam o desempenho do projeto. A descrição e o conhecimento detalhado das características dos materiais constituintes da solução construtiva, potencia a toma de decisões mais informadas, contribuindo para maior eficiência e sustentabilidade. O processo de obtenção e análise de dados realizado pelas duas vias mencionadas anteriormente permite, de forma contínua, o estudo da interação entre a solução construtiva e os ambientes exterior e interior e a compreensão do comportamento entre os vários materiais.

Nos artigos selecionados, analisaram-se grandezas indispensáveis ao estudo da performance higrotérmica que permitem estabelecer uma base importante de informação.

Por conseguinte, a convergência dos critérios definidos, garante uma compreensão geral e informada de conceitos pilar no estudo higrotérmico de soluções construtivas.

De notar que os artigos apresentados, encontram-se organizados por ordem decrescente de ano de publicação.

Tabela 2-5: Quadro resumo contendo casos de estudo associados ao comportamento higrotérmico de soluções construtivas por via de modulação e/ou monitorização.

Estudo conduzido	Referências	Zona de implementação	Caracterização da solução construtiva/ material estudado	Programa de modulação utilizado	Processo de monitorização	Principais grandezas estudadas
Comportamento higrotérmico de uma casa com estrutura em madeira em condições climáticas reais	M. Rahim et al., 2023 [43]	Universidade de Lorraine, França	Edifício teste com estrutura em madeira contendo placa de OSB, barreira ao vapor, isolamento em fibra de madeira, barreira impermeável à chuva e revestimento pregado	n.a	Sim, pela aplicação de 6 sensores em diferentes posições. Utilização do sistema de aquisição de dados (AGILENT 34970A)	Temperatura e humidade relativa
Desempenho higrotérmico de uma casa com baixo consumo energético em clima Nórdico	F. Fedorik et al., 2021 [44]	Oulu, Finlândia	Edifício de dois andares com estrutura em madeira contendo revestimento pregado em madeira, lã de rocha, placa de gesso, lã mineral e barreira ao vapor	WUFI 2D	Sim, pela aplicação de 32 sensores (16 associados à temperatura e 16 à HR)	Temperatura, humidade relativa e desenvolvimento de bolores
Efeito de zonas de difusão de vapor no desempenho higrotérmico de paredes com estrutura em madeira	B. Reich et al., 2021 [45]	British Columbia, Canadá	Parede com estrutura em madeira contendo tacos de fibra de vidro, barreira ao vapor, placa de gesso, OSB e WRB	WUFI 2D	Sim, com o objetivo de validar o modelo de WUFI 2D.	Teor de humidade

Estudo conduzido	Referências	Zona de implementação	Caracterização da solução construtiva/ material estudado	Programa de modulação utilizado	Processo de monitorização	Principais grandezas estudadas
Estudo da performance térmica e higrotérmica de paredes com estrutura principal em madeira contendo diferentes acabamentos	H. Fu et al., 2020 [46]	Nanjing, China	Placa de OSB, estrutura principal em madeira preenchida com glass cotton, membrana resistente à água, acabamento em (placa de cortiça ou placa de madeira de pinho).	WUFI	Sim	Coefficiente de transmissão térmica, humidade relativa, teor de humidade, temperatura
Desempenho higrotérmico de paredes de gesso	A.Santos et al., 2018 [47]	Diversas regiões, Brasil	Alvenaria de gesso	WUFI 5.2	Sim	Permeabilidade ao vapor de água, absorção capilar, condutibilidade térmica, humidade relativa, teor de humidade
Influência de chuva e difusão de vapor no desempenho higrotérmico de um edifício com envelope permeável	D. Bastien et al., 2018 [48]	Holbaek, região perto de Copenhaga, Dinamarca	Reboco de cimento mineral, painéis de fibra de madeira, estrutura principal em madeira preenchida com fibras de madeira, placa de argila, reboco de argila	WUFI Plus	n.a	Teor de humidade, risco de desenvolvimento de bolores, humidade relativa,

Estudo conduzido	Referências	Zona de implementação	Caracterização da solução construtiva/ material estudado	Programa de modulação utilizado	Processo de monitorização	Principais grandezas estudadas
Utilização de argila e resíduos de poda de oliveira para conceção de materiais de construção com elevado desempenho higratérmico	S. Liuzzi et al., 2017 [49]	Bari, Itália	Reboco de cimento e areia aplicado pelo exterior, alvenaria de tijolo (25cm), aplicação interior de dois tipos de reboco: gesso, argila com 6% de resíduos de oliveira	WUFI Plus	n.a	Densidade aparente, condutibilidade térmica, temperatura, humidade relativa, energia necessária para aquecimento/arrefecimento
Desempenho higratérmico de um edifício com estrutura em madeira, composto por fardos de palha	O. Douzane et al., 2016 [37]	Picardie, França	Estrutura principal em madeira preenchida com fardos de palha, reboco de cal, placa de gesso	n.a	Sim, pela implementação de sensores de temperatura e humidade relativa	Coeficiente de transmissão térmica, temperatura, humidade relativa
Desempenho higratérmico de uma parede com estrutura principal em madeira com elevado isolamento térmico	P. Pihelo et al., 2016 [50]	Estónia	Placa rebocada, espaço de ar ventilado, barreira ao vento de lã mineral, placa de fibras de madeira, isolamento com celulose, barreira ao vapor, placa de OSB	Delphin	Sim, ao longo de 2 anos após a construção. O processo de monitorização auxiliou na veracidade de resultados obtidos pelo programa Delphin	Temperatura, humidade relativa, índice de desenvolvimento de bolores

Estudo conduzido	Referências	Zona de implementação	Caracterização da solução construtiva/ material estudado	Programa de modulação utilizado	Processo de monitorização	Principais grandezas estudadas
Desempenho higrotérmico em clima subtropical de um envelope com envolvente aberta ao vapor	Y. Goto et al., 2016 [51]	Ohmihachiman, Japão	Camada de reboco, placa de fibra de madeira, painel principal em madeira, placa de argila, reboco de argila	WUFI Pro	Sim, durante um período de 1 ano, pela implementação de sensores de temperatura e humidade	Temperatura, humidade relativa
Desempenho higrotérmico em paredes com estrutura principal em madeira, preenchidas com isolamento à base de fibras de madeira e cânhamo	E. Latif et al., 2015 [52]	Wales, Reino Unido	Acabamento em placas de madeira, espaço de ar, membrana respirável, placa de OSB, material de isolamento, barreira ao vapor, placa de OSB	n.a	Sim, pela aplicação de sensores de temperatura, humidade relativa e fluxo de calor	Ocorrência de condensações internas, risco de desenvolvimento de bolores, coeficiente de transmissão térmica, humidade relativa, temperatura
Desempenho higrotérmico de um edifício experimental contendo isolamento à base de cal e cânhamo	A. Shea et al., 2012 [36]	Universidade de Bath, Reino Unido	Placa de silicato de magnésio, estrutura principal em madeira com enchimento de um material isolante feito à base de cal e cânhamo, placa de silicato de magnésio	WUFI	Sim, pela aplicação de sensores de humidade relativa, temperatura, medição da humidade da estrutura principal em madeira	Condutibilidade térmica, temperatura (meio envolvente e dos vários materiais), humidade relativa

Caracterização das soluções construtivas

No presente capítulo, encontra-se estabelecida a caracterização de três soluções construtivas cujo dimensionamento, em termos de materiais utilizados, propriedades inerentes e sequência de posicionamento, considerou-se bastante relevante para a presente dissertação.

Com o objetivo principal de organizar toda a informação de forma clara e objetiva é, primeiramente, realizada uma descrição da solução construtiva, onde são enumerados todos os materiais constituintes, dimensões adotadas e a ordem de posicionamento, tendo como referência o ambiente exterior e interior. Seguidamente, de forma a proporcionar uma componente de compreensão visual da solução construtiva em análise, é vinculada uma pormenorização legendada em 2D e 3D, realizadas em Autocad.

Com o propósito de suportar as escolhas efetuadas dos vários materiais, realizou-se uma análise assente em duas vias. Inicialmente, procedeu-se ao levantamento de propriedades intrínsecas dos materiais que favorecem a sua aplicação, trazendo vantagens ao longo do tempo de vida útil da construção e, posteriormente, procurou-se formar uma fundamentação prática por meio de exemplos de aplicação, tendo sido estabelecida referência a estudos conduzidos, enfatizando conclusões obtidas.

Por fim, tendo em consideração as funcionalidades e a base de dados de materiais de construção disponibilizada pelo programa de simulação e análise numérica WUFI organizou-se, para as soluções construtivas sugeridas, um quadro que expressa um conjunto delineado de grandezas consideradas de grande importância para a análise higrotérmica das mesmas. Naturalmente, estando a opção de escolha de materiais de construção limitada à base de dados do software, os materiais selecionados para a análise higrotérmica das soluções construtivas, apresentam características semelhantes aos sugeridos no estudo realizado.

3.1. Solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira

Relativamente à constituição da solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira, incorporaram-se os seguintes materiais de construção, estabelecendo-se a seguinte sequência de posicionamento do interior para o exterior: placa de gesso cartonado com 1,5 cm de espessura (1), placa de OSB produzida a partir de madeira de eucalipto com 1,2 cm de espessura (2), estrato de barreira ao vapor com 0,025 cm de espessura (3), estrutura principal em madeira de pinho laminada cruzada (CLT) com enchimento de um material de isolamento térmico feito à base de placas de fibras de madeira com 20 cm de espessura (4), placa de OSB produzida a partir de madeira de eucalipto com 1,2 cm de espessura (5), placa de cortiça à vista com 4 cm de espessura (6).

De notar que as placas de OSB e gesso cartonado, foram utilizadas nas três soluções construtivas apresentadas, com um leque análogo de características em termos de árvore de

origem e espessura e que, nas soluções construtivas contendo isolamento de lã mineral de rocha e fibras de cânhamo, optou-se pela aplicação de um revestimento exterior em placas de madeira e cimento. Neste sentido, de forma a apresentar uma caracterização das soluções construtivas ininterrupta pela aplicação pontual dos mesmos materiais, a caracterização realizada para os materiais OSB e gesso cartonado na solução construtiva primeiramente apresentada, deve ser tida em consideração para as restantes soluções e a descrição do material de revestimento exterior efetuada na solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha, deve ser tida em consideração para a solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo.

Os valores de espessura sugeridos dos vários materiais incorporados nas três soluções construtivas, tiveram como base de decisão valores comerciais disponíveis em Portugal.

Para as três soluções construtivas apresentadas procedeu-se, inicialmente, à incorporação de um estrato de barreira ao vapor. O posicionamento desta barreira de proteção, efetuou-se na região que precede a colocação do material de isolamento térmico (sentido interior para exterior) devido ao facto de, nessa região, ocorrer um decréscimo de temperaturas o que, associado a elevadas pressões parciais de vapor, aumenta a probabilidade de ocorrerem condensações internas. Com o propósito de adquirir uma base de dados sólida, será efetuada uma análise complementar das soluções construtivas removendo o estrato de barreira ao vapor.

As dimensões adotadas para o elemento monolítico das três soluções construtivas são de 2,5 metros de comprimento por 3 metros de altura, sendo estas dimensões frequentemente utilizadas para o dimensionamento deste tipo de estruturas pré-fabricadas. Na zona ocupada pela estrutura principal em madeira incorporou-se, de forma a aumentar a componente de segurança estrutural, secções verticais em madeira de eucalipto. A espessura destas secções, não perfaz o valor da espessura total do material isolante de forma a tirar o máximo proveito das vantagens do mesmo. Neste sentido, surge um aspeto fundamental a ter em consideração que se deve ao facto de tanto a zona periférica da moldura, como as zonas de incorporação das secções de madeira, funcionarem como zonas de ponte térmica sendo, por isso, essencial verificar as condições higrotérmicas nestas áreas. Para além disso, as condições de encaixe das zonas de canto da moldura devem atender, de forma benéfica, ao cumprimento de requisitos de estanquidade e variações dimensionais decorrentes das condições de temperatura existentes, de forma a estabelecer um comportamento seguro para toda a estrutura.

Nas figuras 3-1 e 3-2, encontra-se apresentada a pormenorização legendada da solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira:

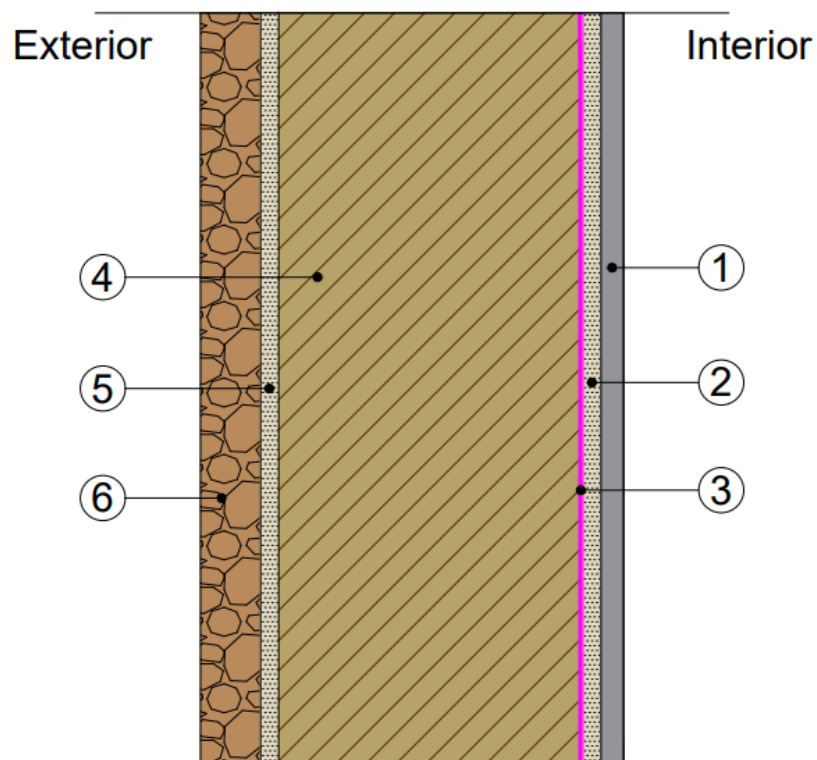


Figura 3-1: Pormenorização 2D da solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira.

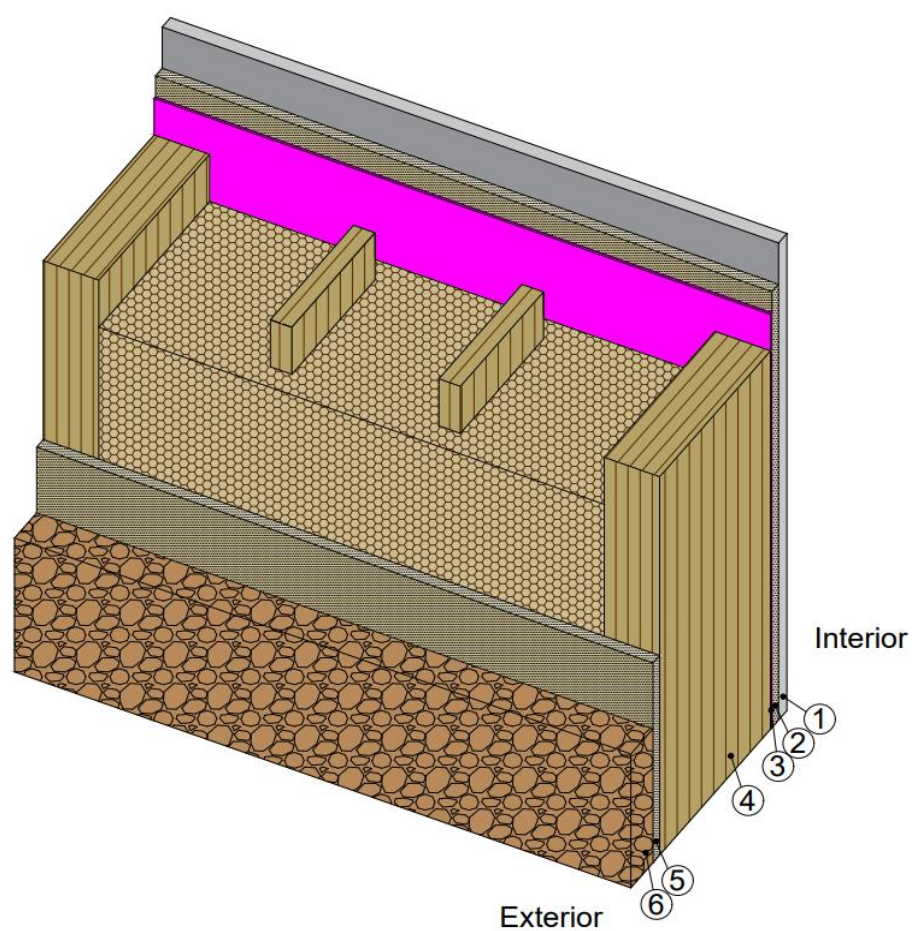


Figura 3-2: Pormenorização 3D da solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira.

O sobreiro é uma árvore muito abundante na região mediterrânea, levando Portugal a ser o maior produtor de cortiça a nível mundial, contribuindo com mais de 50% da produção e processamento totais de cortiça sendo, neste sentido, um setor com um peso bastante considerável na economia nacional [53].

As placas de cortiça, também referidas como placas de ICB (Insulation Cork Board), apresentam um conjunto de características promissoras à sua aplicação em soluções construtivas sustentáveis. Este material exhibe propriedades favoráveis de impermeabilidade, portabilidade, durabilidade, isolamento térmico e sonoro, absorção de choques, é considerado um material *slow burning* sem libertação de gases tóxicos, não ocorre decréscimo das suas características ao longo do tempo, é um material altamente reciclável, não é atacado por roedores, entre outros aspetos. A cortiça, para além de ser um produto que pode ser utilizado de forma direta sem a necessidade de adição de agentes ligantes para formação de novos produtos aglomerados, apresenta um elevado potencial em termos de captação de CO₂, o que, adicionando ao facto de a pegada carbónica ser o indicador mais relevante de atribuição de nível de sustentabilidade de um material, coloca a cortiça num nível promissor de aplicação [53].

Um estudo conduzido por Tártaro et al. [53], teve como objetivo principal o cálculo da pegada carbónica de placas de ICB produzidas por uma empresa portuguesa e comparar os valores obtidos com outros materiais de isolamento presentes no mercado (EPS, XPS, PU, SW e LECA). As placas de ICB demonstraram ser o único material que apresenta uma pegada carbónica negativa, com um valor de -116,23 KgCO₂ equivalente a m³ de ICB.

Tabela 3-1: Análise comparativa da pegada carbónica entre placas de ICB e outros materiais utilizados.

Common insulation materials	Contribution to Global Warming or Carbon Footprint (kg CO ₂ eq./m ³ ICB)
Expanded Polystyrene (EPS) ¹	59.00
Extruded Polystyrene (XPS) ²	94.40
Polyurethane (PU) ³	127.70
Stone Wool (SW) ⁴	34.35
Light Expanded Clay Aggregates (LECA) ⁵	53.77
Insulation Cork Board (ICB) ⁶	-116.23
Data source: (1) EPD-EPS-20130078-CBG1-EN (2013), (2) EPD-EXI-20140155-IBE1-EN (2014), (3) EPD-PUE-20140017-CBE1-EN (2014), (4) EPD-DRW-2012111-EN (2012), (5) EPD 00120 rev1 (2013), (6) Calculations performed in this study.	

[53]

De acordo com o estudo mencionado anteriormente na secção "Quadro-resumo", H.Fu et al. [46], concluíram que o edifício de estudo com isolamento térmico exterior em placas de ICB, apresentou um valor anual médio de temperatura interior de 22.6°C e humidade relativa de 54.92%, no mesmo período. Este edifício, comparativamente ao outro caso de estudo presente no artigo científico contendo alterações em termos de existência de espaço de ar e acabamento exterior em placas de madeira de pinho, demonstrou melhores características e resultados a nível de isolamento térmico e absorção de humidade, sendo que, a cortiça apresentou uma elevada capacidade de absorção de calor, baixa condutibilidade térmica e baixa capacidade de absorção de humidade, quando comparada com os restantes materiais incorporados.

As fibras de madeira, são resíduos industriais gerados por empresas fabricantes de produtos de madeira primários. A utilização de fibras naturais para isolamento térmico de edifícios, como o caso de fibras de madeira, apresenta inúmeras vantagens. Este material exibe um baixo valor de energia incorporada, alta capacidade de "amortecer" variações consideráveis de humidade relativa, apresenta um baixo custo de obtenção, pode ser utilizado como material de isolamento em edifícios com estrutura principal em madeira de forma direta, ou seja, sem a adição de outros componentes [54].

Adicionando ao facto de a condutibilidade térmica das fibras de madeira estar relacionada, de forma linear, com o seu valor de temperatura e teor de água [43], materiais à base de fibras de madeira, apresentam ótimas características em termos de capacidade de absorção de humidade, como é possível aferir com base na respetiva curva de retenção de humidade. Este parâmetro de medição, define-se como a variação do teor de água do material em função do valor de humidade relativa. Verifica-se, neste sentido, a influência direta da temperatura na curva de retenção de humidade pois, variações consideráveis de temperatura, conduzem a alterações de valores de humidade relativa, o que, atribui impacto direto no teor de água do material [43].

Um estudo conduzido por O.Vololonirina et al. [55], teve como principal foco a análise da condutibilidade térmica, difusividade de vapor e características de absorção e dessorção de três materiais produzidos à base de madeira, entre os quais está presente um material de isolamento feito a partir de fibras de madeira. A figura 3-3, apresenta a evolução do teor de água deste material face ao valor de humidade relativa, em condições de absorção e dessorção:

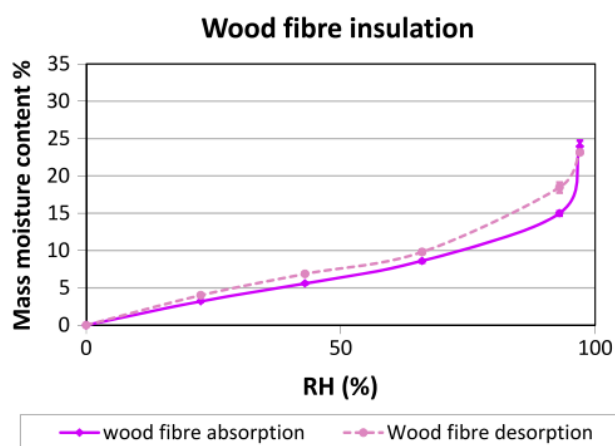


Figura 3-3: Evolução do teor de água face ao valor de humidade relativa de um material de isolamento feito a partir de fibras de madeira.

De acordo com o estudo publicado por M. Rahim et al. [43], cujo principal objetivo assenta no estudo do desempenho higrotérmico de um edifício com estrutura principal em madeira, incorporou-se, na solução construtiva avaliada, um material de isolamento feito à base de fibras de madeira com cerca de 20cm de espessura. Concluiu-se que, quando comparado

com uma placa de OSB, este material apresenta níveis de saturação duas vezes inferiores, sugerindo que a sua implementação proporciona características positivas em termos de remoção de humidade em excesso.

A análise deste estudo foi dividida em dois períodos (período de inverno e período de verão), onde se registou em ambos, na zona do material de isolamento, uma variação inversa de valores de humidade relativa face a valores de temperatura e pressão de vapor de água. Esta relação pode ser explicada pelo impacto significativo da temperatura na capacidade do material de absorver e expelir humidade [43].

Adicionalmente, a partir de dados recolhidos, verificou-se uma variação de humidade relativa exterior entre 45% e 97% ao longo dos dois períodos mencionados acima. Na zona do isolamento térmico, registou-se uma variação de humidade relativa na ordem dos 50% durante o mesmo intervalo de tempo, significando que o material, face a grandes oscilações de humidade relativa exterior, demonstrou uma elevada capacidade de absorção e libertação de humidade, contribuindo para o decréscimo do seu valor. O nível equilibrado de humidade no material de isolamento, contribui para boas condições de conforto interno, diminuição do risco de desenvolvimento de bolores e aumento da durabilidade do próprio material.

Verificou-se que, no mesmo estudo, os valores obtidos de humidade relativa na zona de espaço de ar entre o revestimento exterior e a estrutura principal em madeira, evoluíram de forma ajustada às variações de humidade relativa do ambiente exterior. Neste sentido, em situações onde se verifiquem valores elevados de humidade relativa exterior, o valor de humidade relativa no espaço de ar enquadrar-se-ia no mesmo leque de valores elevados, dando origem a possíveis condensações na zona da estrutura principal, inviabilizando a integridade dos vários materiais [43]. No entanto, de acordo com um estudo realizado por J.Batista et al. [56], a existência de um espaço de ar ventilado, permite a remoção e drenagem da humidade, por intermédio de uma ventilação eficiente.

Portanto, de forma a obter uma base de resultados enquadrada em ambas as situações, no dimensionamento da solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira, optou-se pela não incorporação de uma zona de espaço de ar e nas soluções construtivas seguintes, procedeu-se à sua colocação.

O Eucalipto, demonstra ser a espécie mais característica no território nacional, representando cerca de 25,7% da área florestal Portuguesa [57]. A madeira obtida a partir desta árvore, apresenta diversas características que a tornam um importante recurso a ser considerado na área da construção tais como, elevada resistência e durabilidade, rápido crescimento, fácil processamento, etc.

Os painéis de aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas (OSB), são constituídos por partículas de madeira ligadas entre si pela aplicação, frequente, de uma resina sintética. Estes painéis são compostos por três camadas, sendo que, as camadas exteriores apresentam uma orientação longitudinal das fibras de madeira em relação ao comprimento do painel, enquanto que as fibras presentes na camada interior, encontram-se orientadas na direção perpendicular ao comprimento do painel.

A geometria obtida, atribui a este material um elevado valor de resistência mecânica, tornando-o indicado para aplicações estruturais. Para além de assegurar boas condições de

compatibilidade com outros materiais, é fabricado, maioritariamente, a partir de fibras de madeira, o que demonstra um traço característico de sustentabilidade [58].

Um estudo publicado por E.Sugahara et al. [59], teve como principal objetivo a avaliação das propriedades mecânicas de placas de OSB fabricadas a partir de madeira de eucalipto, em resposta a um tratamento por indução de calor após o seu processo de fabricação. A manipulação da temperatura, conduz a um processo de degradação da madeira de forma controlada, com o objetivo de melhorar as suas propriedades intrínsecas como o seu comportamento perante oscilações acentuadas de humidade, resistência mecânica, resistência à radiação ultravioleta, entre outros aspetos. Este procedimento, contribui para a obtenção de dados favoráveis que indiquem a substituição do uso de produtos químicos de conservação de madeiras.

O processo de adesão das partículas de madeira que constituem os painéis de OSB é, regularmente, efetuado pela aplicação de produtos que agregam componentes prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente, como o fenol-formaldeído e o metileno difenil diisocianato. Neste sentido, pela necessidade de incorporação de produtos mais sustentáveis no processo de fabricação destes painéis optou-se, no estudo conduzido, pela utilização de uma resina natural à base de poliuretano e óleo de rícino [59].

O recurso a esta árvore de pequeno porte, agrupa inúmeras vantagens de utilização que passam pela floração ao longo de todo o ano, sendo a reprodução máxima verificada nos meses de maio e julho, um processo de crescimento rápido, integração na lista nacional de espécies invasoras de acordo com [60] e, relativamente à sua área de distribuição, verifica-se uma elevada ocupação nas zonas sul, litoral e ilhas, como expresso na figura 3-4.

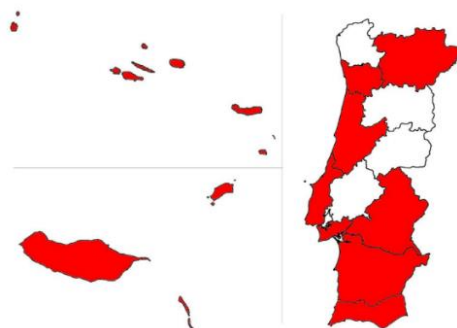


Figura 3-4:Distribuição da espécie *Ricinus communis* L. em Portugal Continental e ilhas.

Perante o artigo mencionado anteriormente, retirou-se um conjunto de conclusões fundamentais que beneficiam a utilização deste material de construção. Ao longo de todo o processo de teste, o material evidenciou um conjunto favorável de propriedades, indicando um bom comportamento entre a madeira de eucalipto e a resina natural. No leque de temperaturas analisado, registou-se uma evolução positiva das propriedades físicas do material como o aumento da sua estabilidade dimensional o que, a partir de dados recolhidos referentes a condições de absorção de água, demonstra o impacto positivo do tratamento de calor aplicado, elevando as suas características hidrófugas [59].

Um estudo publicado por B.Esteves et al. [61] analisou, de forma comparativa, a influência direta de um tratamento de calor nas propriedades de madeira de pinho e madeira de

eucalipto. A partir de dados obtidos, verificou-se um melhoramento no comportamento de ambos os tipos de madeira face a humidades, sendo que, ocorreu um decréscimo de teor de humidade de 46% e 61% para a madeira de pinho e de eucalipto, respetivamente.

Ao longo do processo de tratamento, verificou-se um aumento gradual de perda de massa em ambas as madeiras, tendo sido registado um máximo de 7,3% para a madeira de pinho e 14,5% para a madeira de eucalipto o que, no domínio das suas propriedades mecânicas, conduziu a um decréscimo tanto do módulo de elasticidade (5% para a madeira de pinho e 15% para a madeira de eucalipto), como da resistência à flexão (40% para a madeira de pinho e 50% para a madeira de eucalipto). Apesar deste último não ter apresentado resultados positivos, concluiu-se que, de forma a não intensificar demasiado os efeitos negativos do decréscimo da resistência à flexão, é possível obter, para ambos os tipos de madeira, um melhoramento significativo de propriedades para perdas de massa menores na ordem dos 3-4% [61].

Relativamente ao material de construção com função de revestimento interior compreendido nas três soluções construtivas, optou-se pela incorporação de placas de gesso cartonado. Este material, é composto por gesso prensado contra um revestimento em cartão em condições de altas temperaturas, resultando num painel leve e resistente ideal para remodelação de edifícios e incorporação em envelopes com estrutura principal em madeira [62].

Verifica-se a existência de vários tipos de placa de gesso cartonado orientadas para uma função específica como, maior resistência ao fogo, incorporando na sua constituição fibras de vidro, maior resistência à humidade, placa de gesso cartonado para aplicações standard, maior resistência ao choque, entre outros tipos [63].

A aplicação deste material reúne diversas vantagens tais como apresentar uma componente de pré-fabricação e cumprimento de normas associadas, contribuição para um aumento de produtividade no seu processo de colocação, garante, pela sua leveza, uma rápida velocidade de execução, existe um baixo custo do material associado e, quando combinado com materiais de isolamento apropriados, potencia a existência de melhores condições de isolamento térmico e consequentemente maior conforto interior e eficiência energética [64].

Por norma, a composição das placas de gesso cartonado demonstra uma resistência à água reduzida, pelo que, a sua aplicação em zonas de elevada manifestação de humidades como cozinhas, casas de banho e caves, poderá originar efeitos negativos. No entanto, de forma a ultrapassar esta limitação, é possível recorrer a placas de gesso cartonado submetidas a um processo de tratamento hidrófugo que garante a este material, condições melhoradas de resistência à ação direta da humidade.

3.2. Solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha

Relativamente à constituição da solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha, incorporaram-se os seguintes materiais de construção, estabelecendo-se a seguinte sequência de posicionamento do interior para o exterior: placa de gesso cartonado com 1,5 cm de espessura (1), placa de OSB produzida a partir de madeira de eucalipto com 1,2 cm de espessura (2), estrato de barreira ao vapor com 0,025 cm de espessura (3), estrutura principal em madeira de pinho laminada cruzada (CLT) com enchimento de um material de isolamento térmico de lã mineral de rocha com 20 cm de espessura (4), placa de OSB produzida a partir de madeira de eucalipto com 1,2 cm de espessura (5), zona de espaço de ar com 2 cm de espessura onde colocou-se pequenas vigas em madeira de forma a estabelecer ligação entre o revestimento exterior e a placa de OSB (6), revestimento exterior em placas de madeira e cimento (placas Viroc) com 1,6 cm de espessura (7).

Nas figuras 3-5 e 3-6, encontra-se apresentada a pormenorização legendada da solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha:

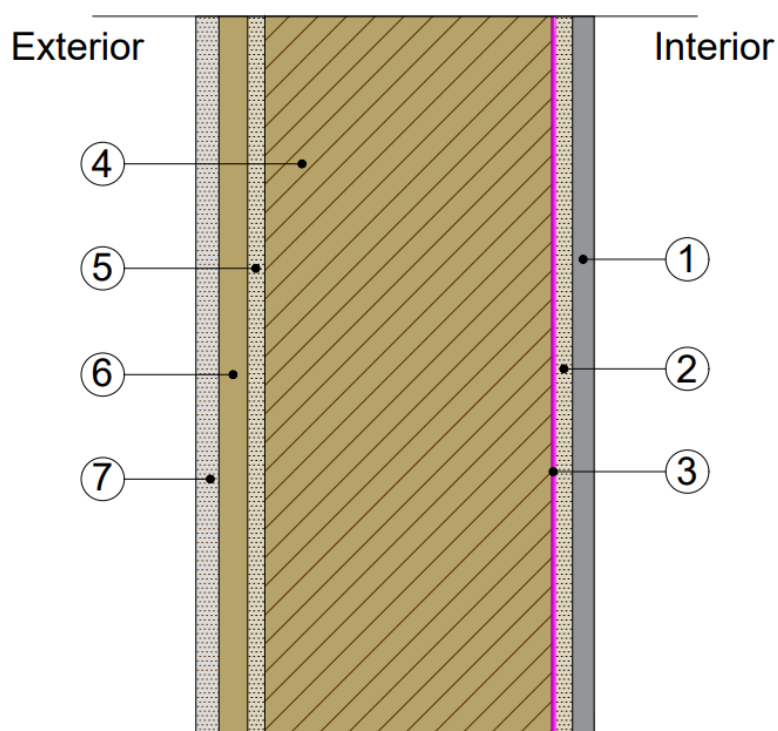


Figura 3-5: Pormenorização 2D da solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha.

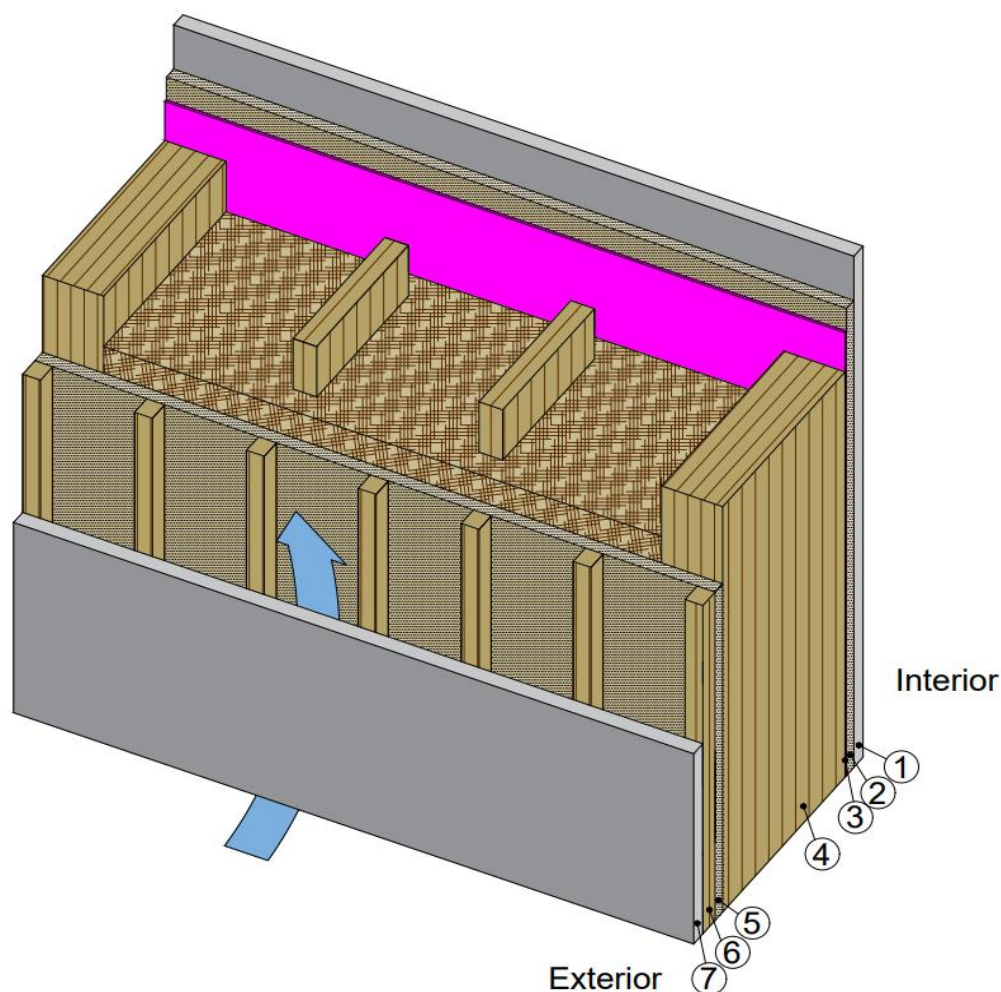


Figura 3-6: Pormenorização 3D da solução construtiva contendo isolamento de lâ mineral de rocha.

As soluções construtivas apresentadas, tratam-se de soluções construtivas leves que demonstram reduzida massa no seu todo, quando comparadas com soluções construtivas que incorporam materiais tradicionais como betão e alvenaria de tijolo, sendo que, apresentam uma desvantagem associada a baixo índice de isolamento acústico aos sons aéreos. O facto de possuírem menor massa, conduz a uma diminuição da sua capacidade de armazenamento de energia, que funcionaria como mecanismo de equilíbrio da temperatura interior. Para além disso, associada a uma massa reduzida, existe maior facilidade de propagação de ondas sonoras, resultando num mau comportamento acústico.

Estabelece-se, neste sentido, a importância de incorporação de materiais de isolamento com propriedades benéficas nos domínios de isolamento térmico, acústico e eficiência energética.

A lâ mineral de rocha, é um material de isolamento de origem natural que, em consonância com a sua versatilidade de aplicação em diversas zonas, apresenta um excelente conjunto de propriedades intrínsecas como alto isolamento térmico e acústico, elevada resistência ao fogo, facilidade de transporte e instalação devidos à leveza do material, não exige um processo de manutenção periódico, é considerado um material não cancerígeno, apresenta alta

compatibilidade com os materiais que estabelece contacto, demonstra um bom desempenho face a humidades, entre outras características [65].

A empresa [66], situada na região centro de Portugal, atua na produção de lã mineral por via de um processo inovador e pioneiro a nível nacional. A produção deste material de isolamento, realiza-se à base de areia e ligante de origem natural sendo, por isso, uma opção totalmente ecológica. Pela sua característica de elevada compressibilidade, a escolha deste material reduz significativamente as emissões de CO₂ associadas ao seu processo de transporte e, por apresentar emissões quase nulas de substâncias prejudiciais à saúde humana para o ambiente interior, é-lhe atribuída a classificação A+ de qualidade de ar interior, sendo esta, a classificação mais alta [67].

De acordo com um relatório técnico publicado pelo centro comum de pesquisa associado à comissão Europeia [68], analisou-se o panorama concorrencial de valor e implementação de materiais de isolamento em habitações na União Europeia, face a outras regiões. Concluiu-se que a Europa é o maior e mais valorizado mercado, a nível mundial, no domínio de materiais de isolamento, assegurando as principais empresas líder nesta área. Adicionalmente, a lã mineral e o EPS aferiram-se como sendo os principais materiais de isolamento utilizados nos edifícios.

Neste sentido, a escolha de lã mineral como material de isolamento em detrimento do EPS, assenta em dois aspetos principais, estando o primeiro relacionado com o facto de a lã mineral ser um material que demonstra excelentes propriedades de resistência ao fogo o que, pela incorporação de uma estrutura principal em madeira, garante elevada conformidade e o segundo, por demonstrar maior permeabilidade ao vapor de água, diminuindo o risco de condensações internas devidas à difusão do vapor de água [56].

As placas de madeira e cimento utilizadas como revestimento exterior na presente solução construtiva, são constituídas por fibras de madeira envolvidas em cimento Portland dando origem, por meio de um processo de compactação, ao produto final.

Sendo fabricado a partir de fibras de madeira, este material de construção é considerado como uma escolha sustentável. Devido à sua versatilidade, apresenta um conjunto significativo de aplicações, podendo ser incorporado de forma estrutural ou, pela vasta gama de opções estéticas, como revestimento em soluções construtivas com estrutura principal em madeira sendo que, na sua aplicação como revestimento exterior, terá de ser protegido por pintura ou verniz.

Na escolha de um material de construção, dois aspetos fundamentais a ter em consideração, estão associados com o seu impacto ambiental e à saúde humana. Este material cumpre, de forma positiva, ambos os pontos anteriores por não apresentar constituintes tóxicos e não ser combustível [69].

Relativamente ao conjunto de propriedades associadas a este material destacam-se: combinação favorável entre a resistência mecânica do cimento e a flexibilidade da madeira, garantindo uma elevada estabilidade dimensional, bom isolamento térmico e acústico, elevada resistência à biodegradação provocada por insetos e fungos, boas características ignífugas e hidrófugas, elevada resistência a cargas e impactos, material não tóxico e de fácil instalação [70].

De acordo com a ficha técnica de aplicação de placas de madeira e cimento em soluções construtivas que disponham de fachada ventilada, disponibilizada pela empresa [71], o efeito da humidade relativa do ar e da temperatura nos painéis viroc, provoca pequenas variações dimensionais, estando situadas num intervalo de -3.0‰ a +1.0‰ por isso, de forma a permitir a deformação natural destas placas sem indução de esforços que comprometam a sua integridade, é fundamental respeitar as distâncias de fixação estabelecidas no respetivo documento técnico.

Os painéis de madeira e cimento, são mais leves que betão sendo, por isso, uma excelente alternativa de implementação em soluções construtivas pré-fabricadas, mais especificamente em elementos que não se encontrem sujeitos a grandes cargas como paredes [72].

Apesar dos produtos fabricados à base de cimento e madeira apresentarem diversas características promissoras, encontra-se associado a estes materiais, um elevado traço de incompatibilidade química, com origem na segregação de extratos naturais por parte da madeira, maioritariamente açúcares, que dificultam o processo de hidratação do cimento. Este processo químico envolve uma mistura de cimento e água no qual são originados componentes sólidos em torno das partículas de cimento suspensas em água, por via de uma reação de precipitação, resultando num consequente preenchimento dos espaços existentes entre as mesmas e a água circundante.

Neste sentido e tendo em consideração o aumento verificado na produção deste tipo de painéis para aplicações exteriores, torna-se essencial a realização de um levantamento prévio que manifeste tanto as causas associadas à incompatibilidade química entre ambos os materiais como a espécie de árvore utilizada, localização, altura do ano em que realizou-se o corte, condições de armazenamento, como as medidas necessárias a adotar para obtenção de um produto final com qualidade assegurada, como o estudo da compatibilidade entre o cimento e madeira utilizados, adição de aceleradores de cura do cimento, entre outros métodos [73].

Um estudo publicado por M.Li et al. [74], analisou o comportamento higrotérmico de um compósito feito a partir de fibras de madeira recicladas, incorporadas numa matriz cimentícia. Para a realização deste estudo, foram tidas em consideração as propriedades térmicas e hídricas do material em análise que, no decorrer da investigação, foram utilizadas como dados de input num programa numérico com o objetivo de obter resultados referentes ao processo de transferência de calor humidade com impacto direto nas condições de conforto interiores.

Comparando os dados obtidos por via experimental e com recurso ao programa numérico, concluiu-se que existe uma concordância favorável de valores de transferência de calor e humidade, com destaque especial para uma elevada capacidade de atenuação de humidade proveniente do ambiente exterior, como apresentado na figura 3-7.

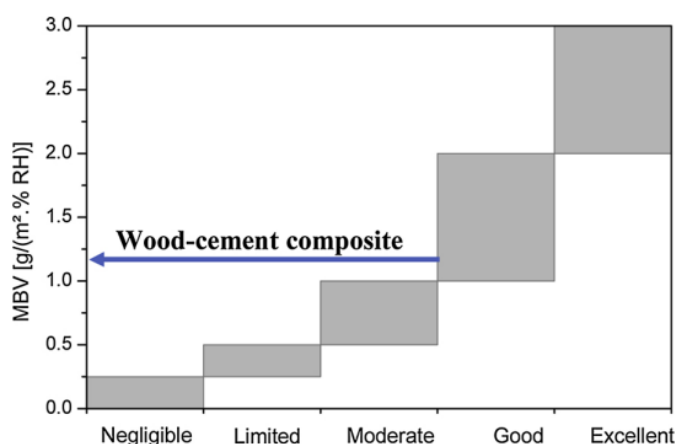


Figura 3-7: Classificação do valor de atenuação de umidade para o material fabricado a partir de fibras de madeira e cimento.

3.3. Solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo

Relativamente à constituição da solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo, incorporaram-se os seguintes materiais de construção, estabelecendo-se a seguinte sequência de posicionamento do interior para o exterior: placa de gesso cartonado com 1,5 cm de espessura (1), estrato de barreira ao vapor com 0,025 cm de espessura (2), estrutura principal em madeira de pinho laminada cruzada (CLT) com enchimento de um material de isolamento térmico feito à base de fibras de cânhamo com 20 cm de espessura (3), placa de OSB produzida a partir de madeira de eucalipto com 1,2 cm de espessura (4), zona de espaço de ar com 2 cm de espessura onde colocou-se pequenas vigas em madeira de forma a estabelecer ligação entre o revestimento exterior e a placa de OSB (5), revestimento exterior em placas de madeira e cimento (placas Viroc) com 1,6 cm de espessura (6).

Nas figuras 3-8 e 3-9, encontra-se apresentada a pormenorização legendada da solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo:

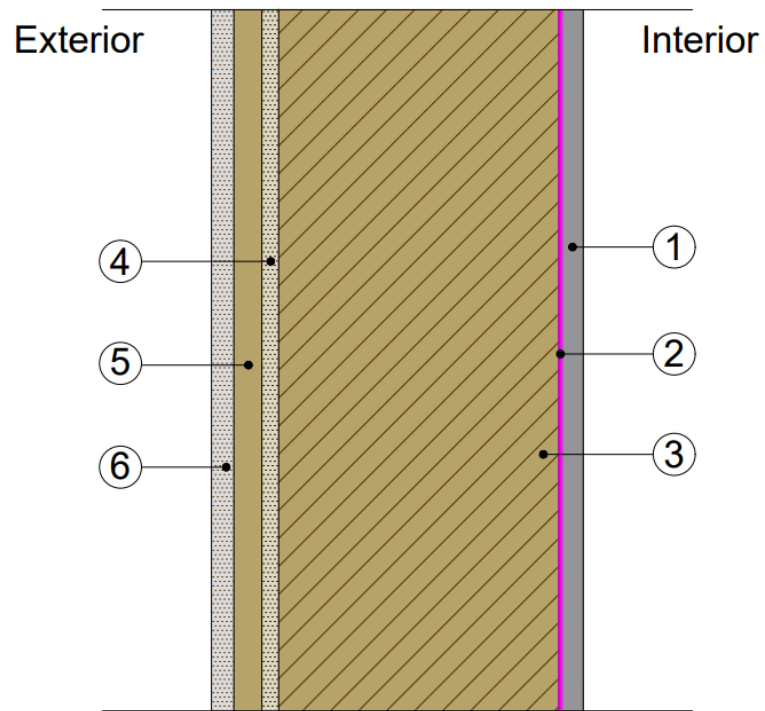


Figura 3-8: Pormenorização 2D da solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo.

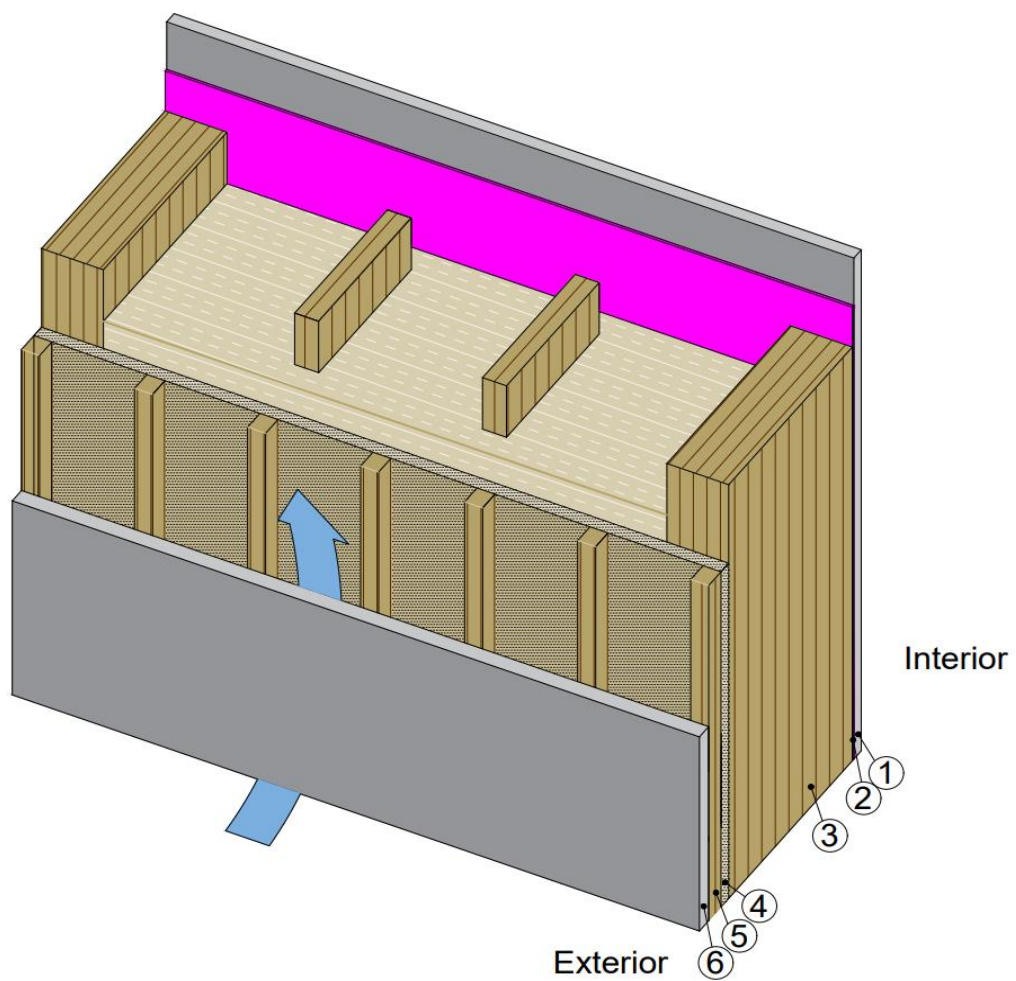


Figura 3-9: Pormenorização 3D da solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo.

A lã de cânhamo, é um material de origem natural obtido a partir de fibras naturais extraídas do caule da planta de cânhamo.

Este material, frequentemente comercializado em placas com constituição de 90% de fibras naturais e 10% de fibras de polímero [75], garante excelentes propriedades de aplicação nomeadamente em zonas de parede exterior, pelo conjunto de características promissoras e sustentáveis que exhibe.

Apresenta elevado desempenho térmico e acústico e, devido ao seu valor de inércia térmica, estabelece uma elevada resistência a mudanças de fase, garantindo uma adaptação confortável do ambiente interior face a variações acentuadas de valor de temperatura nos períodos de Verão e Inverno, impulsionando diretamente o conforto dos ocupantes, a qualidade do ar interior e a diminuição dos custos associados a aquecimento e arrefecimento da habitação [76].

Relativamente ao seu desempenho higrotérmico, a lã de cânhamo, por ser constituída por fibras de origem natural, apresenta um mecanismo eficaz de retenção e libertação de humidade, que não influencia de forma prejudicial as suas propriedades intrínsecas, ao contrário de outros tipos de materiais de origem não natural, cujas propriedades são diretamente afetadas pelo efeito da passagem da humidade. As fibras de cânhamo, demonstram uma gestão eficiente na presença de humidade, apresentando elevada resistência à mesma e limitando o desenvolvimento de condensações na matriz interna do material, sendo possível manter o seu valor de resistência térmica praticamente inalterado. Adicionalmente, este material é submetido a um processo de tratamento onde atuam apenas produtos não tóxicos de origem natural que combatem o aparecimento de pragas e aumentam a resistência ao fogo [77].

No domínio das condições de trabalhabilidade, as placas de lã de cânhamo, conferem características favoráveis de estabilidade dimensional e resistência mecânica, o que facilita o seu manuseamento e garante firmeza ao material após a sua colocação na zona de parede. Para além do referido, este material é classificado como não irritante para a pele e, sendo que não existe incorporação de componentes tóxicos na sua constituição como componentes orgânicos voláteis, o seu manuseamento é seguro sem qualquer tipo de proteção [76]. A lã de cânhamo, apresenta uma vasta gama comercial de dimensões, podendo ser cortada *in situ*, de forma a atender a necessidades específicas [78].

No que diz respeito à sua componente de sustentabilidade, para além do referido anteriormente, a lã de cânhamo apresenta uma pegada carbónica negativa, confinando maior quantidade de dióxido de carbono no seu interior face à quantidade produzida no seu processo de fabrico, contribui diretamente para a diminuição de gases de efeito de estufa e é um material substancialmente reciclável com elevado tempo de vida útil.

Tendo em consideração a sua ampla gama de benefícios, a incorporação de lã de cânhamo como material de isolamento térmico numa zona de parede exterior com estrutura principal em madeira, é pertinente para o estudo da sua performance higrotérmica.

Um estudo conduzido por M.DLIMI et.al [79], teve como principal objetivo a investigação experimental do comportamento térmico de três tipos de materiais de isolamento: poliestireno, material feito à base de madeira e lã de cânhamo. Primeiramente, caracterizou-se um

conjunto de propriedades térmicas para cada um dos materiais utilizando estes dados, subsequentemente, para avaliar a performance térmica dos três tipos de material isolante submetidos a três tipos de fluxo de calor e a variações de espessura.

O intervalo de valores de fluxo de calor imposto foi de 20W/m^2 , 40W/m^2 e 60W/m^2 e a variação de espessura ocorreu para os valores de 2cm, 3cm e 4cm.

Verificou-se, pela recolha dos dados obtidos, que para os três tipos de fluxo de calor impostos, a variação de temperatura entre a temperatura superficial interior e exterior do material, apresentou uma tendência crescente com o aumento de espessura. Por conseguinte, para os três tipos de fluxo de calor e espessuras mencionados, o material de isolamento feito a partir de madeira, apresentou uma variação entre a temperatura superficial interior e exterior no intervalo de $1,73^\circ\text{C}$ e $11,35^\circ\text{C}$, o poliestireno entre 2°C e $12,4^\circ\text{C}$ e, por fim, o material de isolamento fabricado a partir de lã de cânhamo entre $2,18^\circ\text{C}$ e $12,45^\circ\text{C}$ [79].

No gráfico apresentado na figura 3-10, estabeleceu-se a relação entre a variação da resistência térmica dos três materiais, de acordo com o aumento do seu valor de espessura. Concluiu-se que o material isolante à base de lã de cânhamo, demonstrou o melhor comportamento por apresentar maior valor de resistência térmica com o aumento da espessura resultando, por exemplo, numa diminuição direta do consumo de energia.

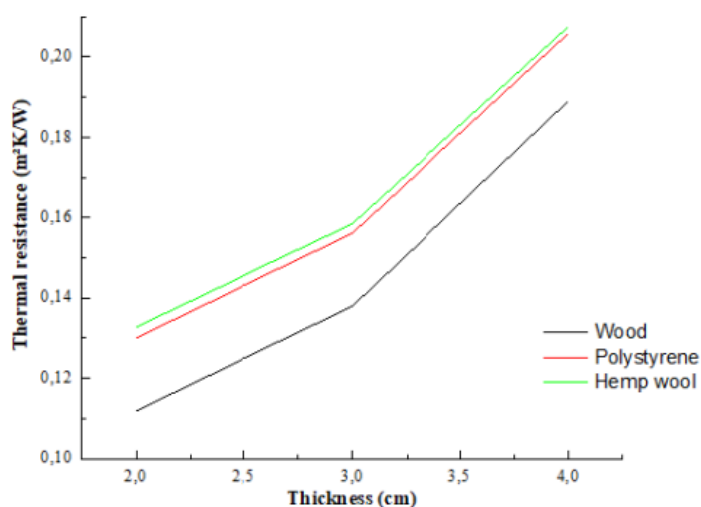


Figura 3-10: Relação entre a variação da resistência térmica e a espessura dos três materiais isolantes.

Uma pesquisa realizada por M.Dlimi et.al [80], teve como principal foco a investigação experimental e numérica da performance térmica de três materiais de isolamento (cimento à base de cânhamo, lã de cânhamo e poliestireno), em condições de clima mediterrâneo, mais rigorosamente, na região de Marrocos.

De notar que, apesar do estudo ter sido conduzido pela aplicação de cada um dos materiais isolantes numa parede de betão, o seu comportamento individual é de grande relevância para o processo de fundamentação dos materiais sugeridos na presente dissertação.

Neste sentido realizou-se, primeiramente, um levantamento e caracterização de um conjunto de propriedades térmicas associadas aos materiais utilizados, essenciais para a condução do estudo. Seguidamente, por via experimental, procedeu-se à incorporação dos três materiais isolantes em diferentes paredes-teste de betão, submetidas a um conjunto de condições exteriores frequentes. Por fim, pela utilização do software TRNSYS, executou-se um processo de simulação com base na imposição de diferentes fluxos de aquecimento e arrefecimento nas várias paredes, de forma a obter respostas do seu comportamento térmico.

Concluiu-se que, ao longo de todas as fases do estudo, o material de isolamento feito a partir de lã de cânhamo, apresentou os melhores resultados na esfera da performance térmica.

Na tabela 3-2, encontra-se organizado, de forma individual para cada material de construção, um conjunto de grandezas disponibilizadas pelo software WUFI, à luz dos materiais sugeridos para as soluções construtivas desenvolvidas na presente dissertação. De notar a incorporação de materiais iguais nas três soluções construtivas, pelo que, o conjunto apresentado perfaz a totalidade.

Tabela 3-2: Valores de grandezas disponibilizados no software WUFI, referentes aos materiais de construção sugeridos.

	Massa volúmica [kg/m ³]	Porosidade [m ³ /m ³]	Capacidade térmica [J/kgK]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Fator de resistência à difusão do vapor de água [-]
Placa de gesso cartonado	850	0.65	850	0.2	8.3
Placa de OSB	650	0.57	1400	0.12	276
Barreira ao vapor	130	0.001	2300	2.3	1500000
Isolamento de fibras de madeira	140	0.91	1400	0.039	3
Isolamento de lã mineral de rocha	178	0.934	850	0.0336	1.76
Isolamento de fibras de cânhamo	62.5	0.85	1340	0.04	4.09
Placa de cortiça	107	0.22	1900	0.0397	28.3
Zona de espaço de ar	1.3	0.999	1000	0.13	0.56
Placa de madeira e cimento	1284	0.36	1500	0.4	167

Funcionalidades e dados introduzidos no software de simulação e análise numérica WUFI

Para o estudo do comportamento higrotérmico das soluções construtivas anteriormente apresentadas, definiu-se o recurso ao software de simulação e análise numérica WUFI, desenvolvido pelo instituto Fraunhofer de física de edifícios [81], mais especificamente a utilização da versão WUFI2D, por apresentar o conjunto de parâmetros que mais se adequa ao presente estudo.

O software WUFI, compõe um processo de cálculo e apresentação de resultados direcionado para a avaliação do transporte de calor e humidade em edifícios submetidos a condições climáticas de um determinado local. Dependendo da versão utilizada, é possível realizar o estudo higrotérmico para elementos de construção singulares, avaliar o comportamento conjunto de elementos compostos por vários materiais de construção, como por exemplo paredes exteriores e avaliar o comportamento do edifício como um todo. O conjunto de dados gerado pelo programa, adquire uma forte validação por apresentar uma base sólida de comparação com resultados obtidos em laboratório e estudos efetuados na zona exterior do instituto [81].

O software dispõe de uma utilização objetiva onde toda a informação encontra-se devidamente organizada, permitindo ao utilizador navegar pelas diferentes fases do projeto e efetuar alterações pretendidas de forma facilitada. É possível, na secção de dimensionamento da geometria da solução construtiva, otimizar o seu design e identificar eventuais erros numa fase inicial, que poderiam levar à obtenção de resultados imprecisos. É disponibilizada ao utilizador, uma vasta lista de materiais de construção com as respetivas características discriminadas e a opção de efetuar inputs manuais de materiais de construção que não se encontrem presentes na lista disponível. No que diz respeito ao input das condições climáticas, o software apresenta um mapa com várias zonas disponíveis para seleção, permitindo ao utilizador a escolha do ficheiro climático mais adequado à sua simulação.

Relativamente à versão WUFI2D, o processo de análise prolonga-se para o domínio de duas dimensões, com foco na simulação higrotérmica de componentes de um edifício expostos a condições de ambiente exterior e interior especificadas. Nesta versão do software, é possível efetuar o estudo higrotérmico de regiões que contenham diferentes materiais de construção, visto que, esta análise não seria possível ser realizada numa única dimensão, pois diferentes materiais apresentam diferentes respostas a variações de temperatura e humidade.

Para além disso, a análise em duas dimensões é apropriada para regiões que apresentem uma geometria não uniforme como zonas de canto.

Na tabela 4-1, apresenta-se uma análise comparativa das potencialidades das três versões do software direcionadas para simulação higrotérmica de componentes de edifícios.

Tabela 4-1 : Análise comparativa de potencialidades de três versões do software WUFI, adaptada de [82].

Potencialidades	Domínio	WUFI Pro	WUFI 2D	WUFI light
Simulação de secções unidimensionais	Térmico			
	Hígrico			
Simulações de zonas de canto e pontes térmicas	Térmico			
	Hígrico			
Edição de propriedades dos materiais	-			
Edição de ficheiros climáticos	-			
Importação de dados de materiais e ficheiros climáticos	-			
Exportação de resultados	-			

Pela análise da tabela 4-1, constata-se o cumprimento de todas as potencialidades apresentadas por parte da versão de software WUFI2D. Como referido anteriormente, as soluções construtivas dimensionadas, apresentam zonas de ponte térmica, cuja análise é essencial para avaliação de eventuais riscos associados, como o fator de risco de desenvolvimento de bolores e danos associado a efeitos de condensação. Neste sentido, o recurso a esta versão de software, permite o estudo detalhado do efeito destas regiões no cálculo bidimensional das propriedades térmicas e hídricas de elementos de construção.

No que diz respeito ao conjunto de outputs gerado pelo programa, é possível extrair diferentes tipos de informação de forma organizada, como perfis de humidade num período de tempo especificado, teor de água adquirido por parte de cada material de forma a avaliar o respetivo risco de desenvolvimento de bolores, teor de água do conjunto de materiais definido para efeitos de avaliação do balanço de humidades, de forma a estudar a resposta da solução construtiva face às mudanças de clima ao longo do ano, e valores de temperatura e humidade relativa em pontos específicos da solução construtiva. O software disponibiliza uma interface de animação temporal onde é possível, de forma manual, editar as condições de visualização, como definir uma escala de intensidade de cores para suporte visual, em termos de diferenciação de expressividade da ocorrência dos fenómenos estudados, definir o intervalo de tempo de simulação, entre outras opções. Obtém-se, neste sentido, acesso a distribuições espaciais de parâmetros associados a condições higrotérmicas como o fluxo de humidade e calor, teor de água, humidade relativa, temperatura, etc. [83].

Na fase seguinte do presente capítulo, surgiu o interesse de integração do processo realizado no software WUFI2D, contendo os principais passos a efetuar como definição da geometria da solução construtiva, dimensionamento das condições de grelha, especificação das características dos materiais utilizados, caracterização das condições iniciais de simulação, definição das condições de fronteira consoante o seu posicionamento (superfície exterior, interior ou adiabática), introdução do ficheiro climático associado à região de estudo e, por fim, edição dos parâmetros computacionais.

A título exemplificativo, utilizou-se o conjunto de passos efetuados referentes à solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira, na região do material isolante, contendo barreira ao vapor.

4.1. Geometria da solução construtiva

Inicia-se o dimensionamento da solução construtiva, pela definição da sua geometria (figura 4-1). Esta secção, encontra-se dividida em duas regiões principais de desenho e input de valores que interagem de forma complementar. Procedeu-se ao traçado de todos os materiais de construção constituintes da solução, tendo como ponto de partida, o ponto que dista 10 mm do eixo x e y, sendo que, sempre que ocorre a adição de um novo material de construção, é gerada, na região de input de valores, uma linha com informação referente à espessura do material, altura, distância aos eixos x e y e nome atribuído. Deste modo, é possível confirmar continuamente as dimensões introduzidas e proceder de forma sequencial e organizada (figura 4-2).

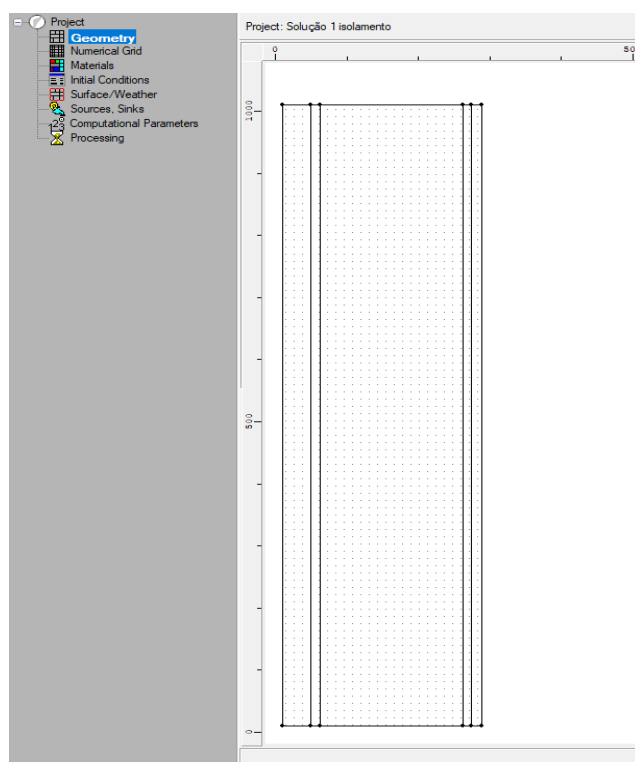


Figura 4-1: Geometria da solução construtiva.

```

} def
0 0 0 setrgbcolor
/mm{1 mul}def%Macro for dimension mm
/cm{10 mul}def%Macro for dimension cm
40 mm 1000 mm 10 mm 10 mm (Placa de cortiça à vista) r stroke
12.00 mm 1000 mm 50.00 mm 10.00 mm (Placa de OSB1) r stroke
200 mm 1000 mm 62 mm 10 mm (Isolamento em placa de fibras de madeira) r stroke
0.25 mm 1000 mm 262 mm 10 mm (Barreira ao vapor) r stroke
12 mm 1000 mm 262.25 mm 10.00 mm (Placa de OSB2) r stroke
15 mm 1000.00 mm 274.25 mm 10.00 mm (Placa de gesso cartonado) r stroke

```

Figura 4-2: Input de valores e atribuição de designação.

4.2. Condições de grelha

No segmento de definição das condições de grelha, a solução construtiva surge com um template inicial disponibilizado pelo software, podendo ser alterado ou mantido consoante o grau de análise pretendido (figura 4-3). De notar que a grelha contida em todas as secções de análise da solução construtiva, não deve apresentar uma estrutura com poucos elementos de grandes dimensões nem uma distribuição com muitos elementos de pequenas dimensões, pois resultaria numa obtenção de resultados pouco precisa e um tempo de cálculo acrescido, respetivamente. Neste sentido, tornou-se essencial definir uma grelha com dimensões equilibradas e adequadas, face às características dos materiais utilizados, em ambos os eixos x e y, pelo que, para todas as regiões de análise, definiu-se um modo de grelha médio para os dois eixos.

Pela seleção do modo de grelha mencionado, é possível constatar (figura 4-4) as características que o elemento de construção adquire como a largura das várias regiões de análise, o número de elementos existentes na região, o fator de expansão atribuído, ou seja, a proporção de acréscimo/decrécimo dos elementos ao longo do desenvolvimento da região, etc.

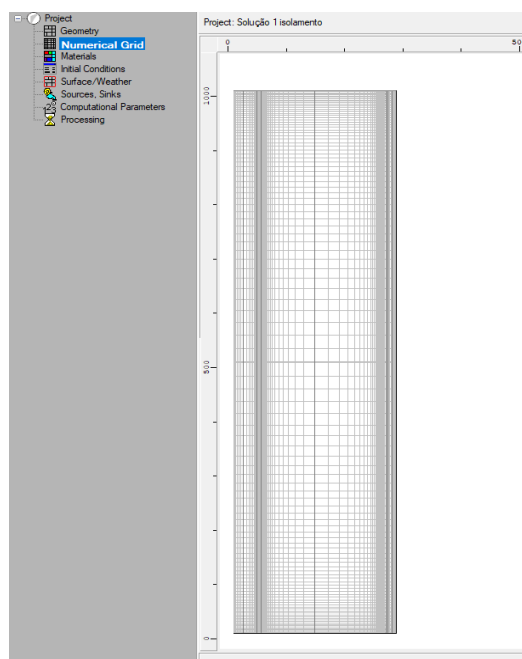


Figura 4-3: Definição das condições de grelha.

(x,y)[mm]: (656.63,416.22)			
Min. # of elements:		Max. # of Elements:	
x: 2	y: 2	x: 150	y: 150
Total # of Elements:		x: 112 y: 112	
ID	Width	No. of El.	Exp. Factor
X-1a	16.7	6	1.2471
X-1b	23.3	9	0.8019
X-2a	6.99	5	1.2137

Figura 4-4: Características das regiões de análise.

4.3. Especificação de características dos materiais utilizados

Relativamente à identificação das características dos materiais de construção utilizados, é essencial salientar, numa fase inicial, a limitação existente associada à escolha de materiais no software WUFI2D. A base de dados disponibilizada pelo programa, permite uma seleção de materiais restrita ao conjunto existente o que, em certos casos, poderá funcionar como uma desvantagem, por dar origem a valores não necessariamente idênticos aos reais pretendidos. No entanto, o software de análise higrotérmica WUFI2D demonstra, na etapa de seleção de materiais, uma forte consideração por esta questão, salientando a importância do utilizador atender à escolha de materiais com características semelhantes às pretendidas e dando ênfase à ocorrência de oscilação de valores natural agregada a cada material devido a vários fatores como por exemplo as condições de armazenamento a que estão submetidos, no caso das madeiras, o aumento e diminuição do seu volume devido a diferentes níveis de teor de humidade, entre outros fatores. De notar que se não existir um material com características semelhantes ao pretendido na base de dados, o software permite a introdução manual de propriedades.

Neste sentido, o conjunto de materiais disponibilizado pelo software (tabela 4-2), cuja informação é proveniente de várias empresas e de estudos conduzidos pelo próprio instituto, permite desenvolver soluções construtivas e obter resultados com um forte carácter representativo. No domínio de condições higrotérmicas favoráveis, o intervalo de valores registado entre materiais genéricos e específicos deve permanecer reduzido e com tendência de aproximação sendo que, de forma a potencializar um suporte de informação mais preciso e representativo, é essencial desenvolver soluções construtivas práticas com integração de materiais específicos e confrontar os resultados práticos com os obtidos por via de simulação numérica. Sob esta linha de pensamento, definiu-se o conjunto de materiais, apresentado posteriormente, para a solução construtiva em questão (figura 4-5).

Tabela 4-2: Lista de materiais atribuídos.

Name	X-Material
Placa de cortiça à vista	*Thermacork 100% Natural Cork Insulation, Standard Density, 50 mm - unlocked
Placa de OSB1	AiF OSB 4
Isolamento em placa de fibras de madeira	AiF Wood-Fiber Insulation Board WF in dry indoor environment
Barreira ao vapor	vapour barrier (sd=1500m)
Placa de OSB2	AiF OSB 4

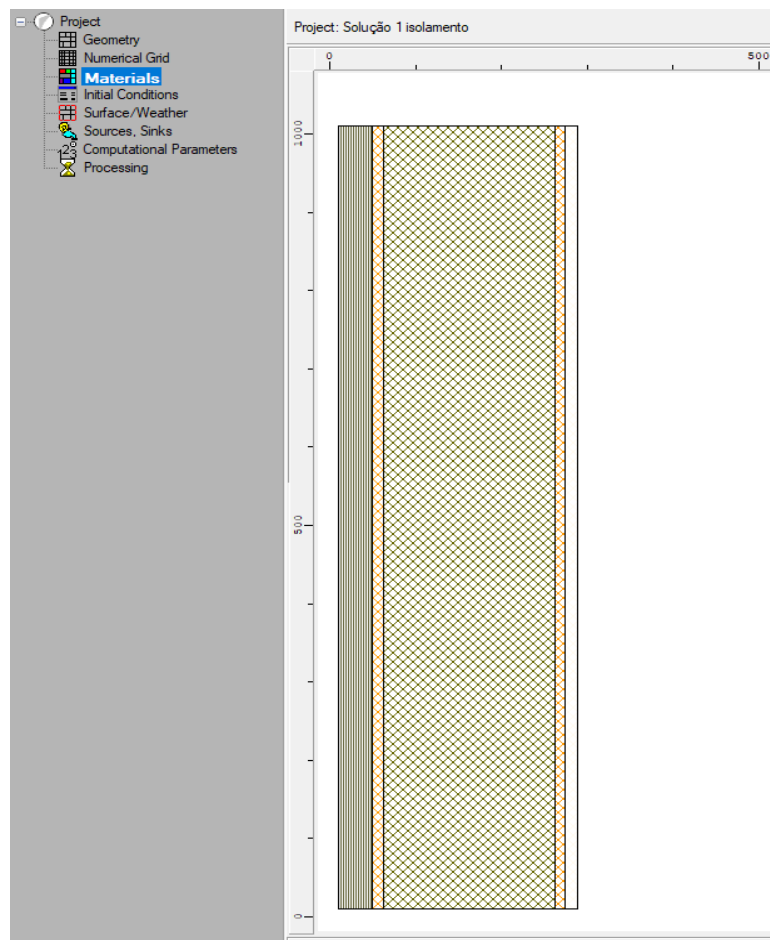


Figura 4-5: Definição dos materiais de construção.

4.4. Condições iniciais de simulação

A definição das condições iniciais de simulação (figura 4-6), assenta na atribuição de valores relativos a temperatura, humidade relativa e teor de água, sendo a variação deste último, diretamente dependente da humidade relativa.

Considerou-se um valor inicial de temperatura para todos os materiais de 20°C. De notar, que a temperatura de um material demonstra um ajuste rápido às condições envolventes, pelo que, reconheceu-se o valor de 20°C como adequado.

No que se refere às condições iniciais de humidade relativa, admitiu-se um valor inicial para todos os materiais de 0.8 ou 80% de humidade relativa. O valor atribuído, tem como base condições normais de armazenamento dos materiais ao ar livre face a valores de humidade relativa registados em Portugal, pelo Instituto Português do Mar e Atmosfera [84].

Identifier	Temp. [°C]	WC. [kg/m ³]	R.H. [-]
*Thermacork 100% Natural Cork Insulation, Sta	20	4.4	0.8
AiF OSB 4 :: AiF OSB 4	20	97.5	0.8
AiF Wood-Fiber Insulation Board WF in dry indc	20	21	0.8
vapour barrier (sd=1500m) :: vapour barrier (sd	20	0	0.8
Gypsum Board :: Gypsum Board	20	6.3	0.8

Figura 4-6: Condições iniciais de simulação.

4.5. Atribuição de condições de fronteira

Relativamente às condições de fronteira da solução construtiva, procedeu-se à atribuição, para cada uma das superfícies envolventes da parede, de um conjunto de características com base no seu posicionamento e ficheiro climático associado à região de Lisboa.

Para a realização deste passo, é essencial que a geometria da solução construtiva não apresente qualquer tipo de interrupção no desenvolvimento das superfícies, sendo que, na existência de zonas de espaço de ar, a atribuição de condições de fronteira é igualmente essencial nas envolventes exteriores destas regiões, caso contrário, seria exigível defini-las para todas as superfícies que perfazem a zona de espaço de ar resultando, naturalmente, num aumento do tempo de análise por parte do software.

Neste sentido, a classificação atribuída às superfícies de fronteira assenta em três grupos principais: superfície em contacto com o ambiente exterior, superfície em contacto com ambiente interior e superfície adiabática, ou seja, uma região que isola termicamente dois sistemas, impedindo que ocorram trocas de calor entre os mesmos.

O ficheiro climático selecionado (figura 4-7), apresenta um conjunto de dados próprio para cada tipo de classificação atribuída sendo, por isso, exibido, a título exemplificativo, o conjunto de dados relativos à classificação de superfície em contacto com ambiente exterior.

Remetendo a informação mencionada para o caso de estudo, considerou-se a superfície contendo cortiça à vista como superfície em contacto com o ambiente exterior, a superfície contendo gesso cartonado como superfície em contacto com o ambiente interior e as superfícies inferior e superior da parede, como sendo adiabáticas.

De notar, que nas especificações das características das fachadas, admitiu-se que a parede se encontra orientada a Norte, por ser uma orientação de natureza benéfica para o presente estudo. Relativamente à ação da chuva, considerou-se um fator de incidência de 0.7, pelo que, 70% da chuva incidente na fachada encontra-se disponível para processos de absorção e os restantes 30%, adquirem um comportamento sem efeito direto nos materiais. Visto que a cortiça demonstra uma cor escurecida, considerou-se essencial definir um valor de absorção de radiação de onda curta, tendo sendo atribuído pelo software um valor de 0.8.

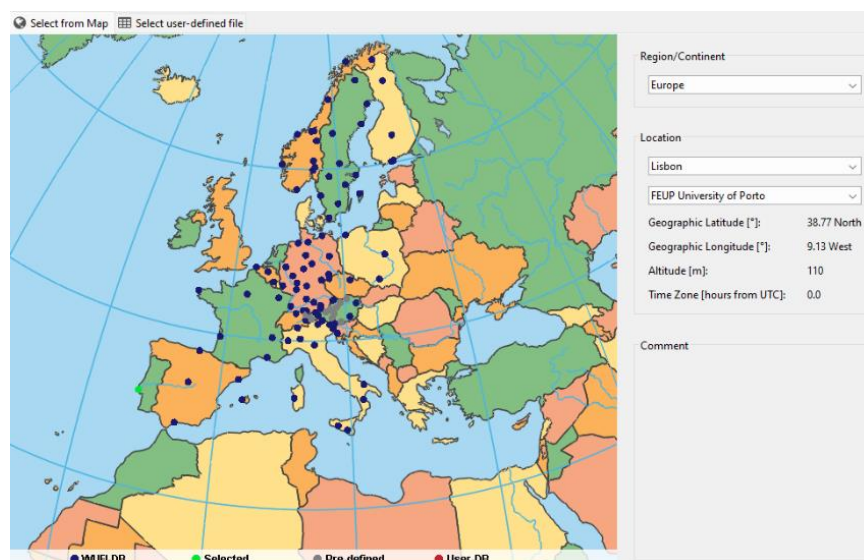


Figura 4-7: Seleção do ficheiro climático associado à região de Lisboa.

Como mencionado anteriormente, os diagramas apresentados nas figuras 4-8 e 4-9, contêm dados gerados pela seleção de superfície em contacto com o ambiente exterior associada ao ficheiro climático da região de Lisboa.

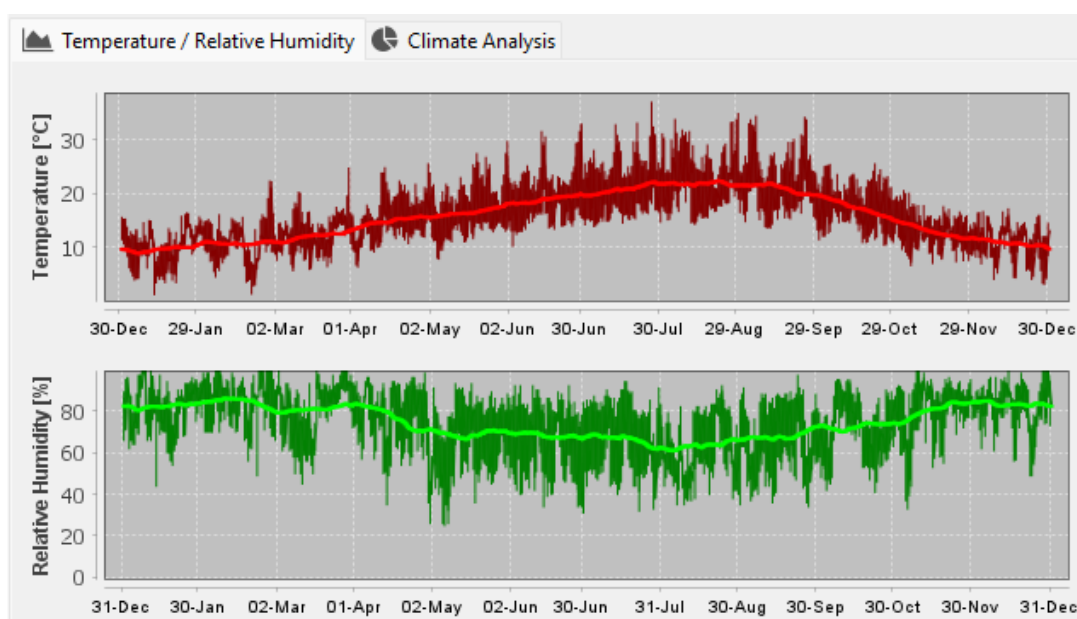


Figura 4-8: Diagramas de temperatura e humidade relativa anuais associados ao ficheiro climático da região de Lisboa.

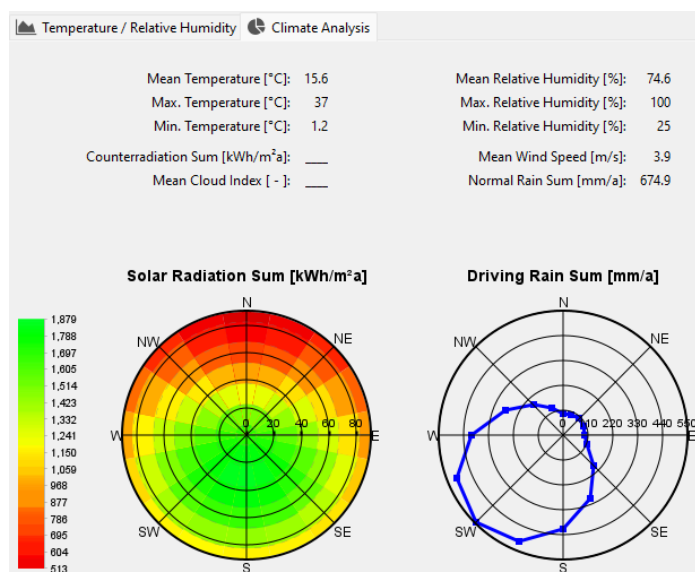


Figura 4-9: Análise climática de radiação solar e ocorrência de precipitação associada ao ficheiro climático da região de Lisboa.

Por fim, procedeu-se à classificação completa de todas as regiões integrantes da fronteira da solução construtiva, com os respetivos dados devidamente inseridos tendo por base as características da superfície.

De modo tornar a distinção mais adequada, na figura 4-10 a superfície em contacto com o ambiente exterior, interior e adiabática, apresenta a cor azul, cor de rosa e verde, respetivamente.

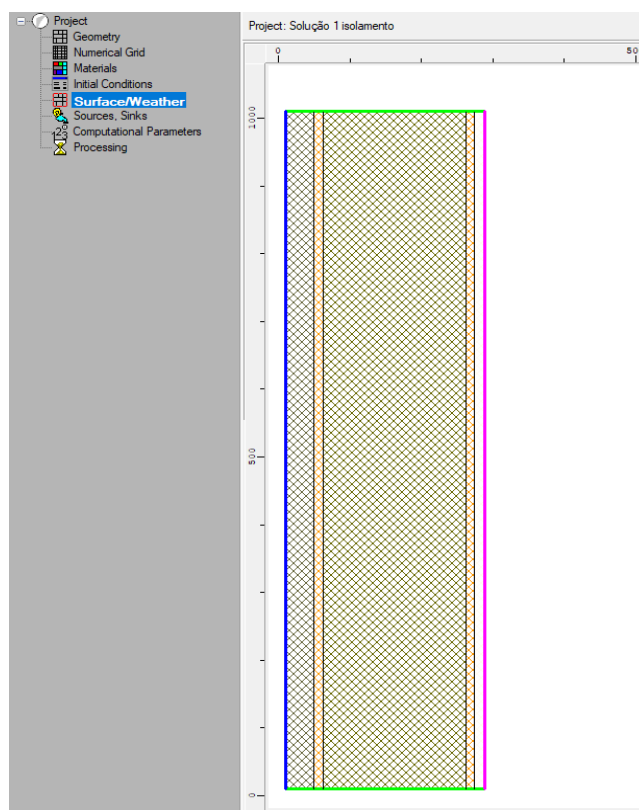


Figura 4-10: Atribuição de condições de fronteira.

4.6. Parâmetros computacionais

Relativamente à edição dos parâmetros computacionais (figura 4-11), começou-se por definir o início do período de simulação., tendo sido designado o dia 1 de outubro de 2023. A seleção desta data como início da simulação, tem a ver com o facto de, neste momento do ano, verificar-se um elevado movimento de fluxo de humidades do interior das habitações para o meio exterior, atravessando os elementos que compõem a solução construtiva. Estipulou-se, adicionalmente, um período de simulação com duração total de 1 ano ou 8760 horas.

Por fim, seleccionou-se o conjunto de grandezas a serem expressas, nas folhas de resultados, após realização das simulações e deu-se início ao processamento de toda a informação colocada. De notar, que as grandezas selecionadas foram as seguintes: teor de água, humidade relativa, temperatura e pressão de vapor de água.

Project: Solução 1 isolamento

Simple | Enhanced

Period of Calculation

Start Date/Time: 01/10/2023 0:00

Number of Time Steps: 8760

Mode of Calculation

☒ Heat Transport Calculation

☒ Moisture Transport Calculation

Hygrothermal Special Options

☐ Excluding Latent Heat of Evaporation

☐ Excluding Latent Heat of Fusion

☐ Excluding Capillary Conduction

Numerical Parameters

Accuracy: Medium

Convergence: Soft dependencies

Adaptive Time Step Control

☐ Enabled

Steps: 3

Max.Stages: 5

Result File contains

W.C.	R.H.	Temp.	Va.P.	Flu.C.	Flu.D.	Flu.H.
☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐

Figura 4-11: Definição dos parâmetros computacionais.

Análise higrotérmica das soluções construtivas

No presente capítulo relacionado com a análise higrotérmica das soluções construtivas desenvolvidas na presente dissertação, utilizou-se como principal recurso a ferramenta WUFI Graph. Esta extensão do software WUFI, contribui como suporte de análise individual e comparativa de resultados obtidos, por via de construção de gráficos contendo informação, ao longo do período de simulação definido, da resposta da solução construtiva face às grandezas higrotérmicas estabelecidas.

A utilização da ferramenta mencionada, permite a edição e desenvolvimento de gráficos consoante a análise que se pretende efetuar. Uma vez recolhidos os dados do processo de simulação, é possível importar o ficheiro associado a uma ou mais soluções construtivas, sendo que, pela escolha de apenas um documento definido como o projeto de uma solução construtiva, a análise higrotérmica apenas pode ser conduzida de forma individual e, pela introdução de dois ou mais documentos, é possível estabelecer uma análise comparativa entre diferentes soluções construtivas. A análise realizada, compreende as duas vias.

Para efeitos de obtenção de suporte gráfico, é necessário, primeiramente, delinear a zona da solução construtiva a ser analisada, pela seleção dos materiais de construção pretendidos. Seguidamente, seleciona-se a grandeza higrotérmica desejada e a coloração da respetiva curva a ser apresentada. De notar que na fase de análise comparativa, de forma a facilitar a leitura dos resultados obtidos, atribuiu-se à curva de uma dada solução construtiva, a tonalidade do respetivo material isolante.

Em seguimento do contexto apresentado, numa fase inicial, estabeleceu-se a análise higrotérmica global para cada uma das soluções construtivas e a respetiva análise comparativa, sendo que, a informação encontra-se organizada e dividida por grandeza higrotérmica de estudo. Para esse efeito, considerou-se a espessura total do elemento, tendo sido obtido um conjunto de gráficos para as variáveis higrotérmicas de teor de água, humidade relativa, temperatura e pressão parcial de vapor de água. Relativamente às etapas da análise higrotérmica global para cada solução, agrupou-se o comportamento do elemento construtivo com e sem barreira ao vapor, com o intuito de facilitar o processo de comparação de resultados. Nas etapas associadas à análise comparativa, tendo como fundamento os resultados obtidos na fase de análise anterior, selecionou-se, para cada grandeza de estudo, a situação mais vantajosa de cada solução construtiva, podendo ser retirado o extrato de barreira ao vapor ou tendo em consideração a incorporação do mesmo.

Na segunda fase de avaliação, de forma a complementar o estudo realizado, conduziu-se à análise comparativa das três soluções construtivas na zona do material isolante. Considerou-se de grande relevância a análise individual desta região do elemento, por ocupar um espaço maioritário da construção, viabilizando efeitos diretos significativos, assim como os resultados obtidos serem um forte indicativo do desempenho ao longo do tempo de vida útil da construção.

Posteriormente, no terceiro estágio de avaliação, analisou-se o risco de ocorrência de condensações internas ao longo da parede, para as três soluções. Nesta fase, recorreu-se ao método de Glaser com o principal objetivo de analisar perfis de temperatura e pressão de vapor de água ao longo da espessura da parede num ponto específico no tempo e averiguar o eventual cruzamento das curvas de pressões parciais de vapor de água e pressões de saturação, sendo conclusivo de fenómenos de condensações internas.

No último momento de análise, procurou-se avaliar a vulnerabilidade ao desenvolvimento de microrganismos fúngicos. Para tal, comparou-se dados recolhidos, resultantes do cruzamento de condições de temperatura e humidade relativa, com níveis de isopletras associados a cada uma das soluções construtivas, gerados pelo software. O posicionamento de cada ponto face à posição das isopletras LIM1 e LIM2, traduz o grau de risco de desenvolvimento destes microrganismos.

De forma a tornar o processo de análise objetivo, atribuiu-se uma designação simplificada para cada solução construtiva, pelo que, a solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira adquire a designação de solução construtiva 1, a solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha, solução construtiva 2 e a solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamos, solução construtiva 3.

O suporte de resultados obtidos é de grande importância para a sua veracidade, pelo que, através de estudos conduzidos e dados mencionados na presente dissertação referentes aos materiais isolantes sugeridos, é possível estabelecer vários elos de informação causa-efeito, para as diferentes grandezas higrótérmicas. A informação apresentada de seguida, visa comparar várias propriedades dos materiais isolantes das três soluções, de forma a remeter para conclusões chave com base na análise dos gráficos obtidos.

Os materiais isolantes compostos por fibras de madeira, fibras naturais de cânhamo e lã mineral de rocha, apresentam na sua constituição física, uma matriz com elevada densidade em termos de distribuição e orientação das fibras impedindo, deste modo, a acumulação de água em zonas singulares. As fibras de madeira e de cânhamo, contrariamente à lã mineral de rocha, apresentam maior grau de capilaridade, funcionando como materiais mais suscetíveis de absorver e libertar água sendo, por isso, expectáveis maiores níveis de teor de água e humidade relativa associados a estes materiais.

No domínio de permeabilidade ao vapor de água, os três materiais isolantes, demonstram características de elevada higroscopicidade, sendo que, a lã mineral de rocha apresenta um valor de fator de resistência à difusão do vapor de água de 1.76, as fibras de madeira de 3 e as fibras naturais de cânhamo de 4.09.

A lã mineral de rocha, demonstra ser o material com maior nível de hidrofobia, estando limitado o seu contacto com a água e, por apresentar o menor valor de fator de resistência à

difusão de vapor de água, a migração da humidade do ar através da parede é facilitada, pelo que, é expectável que este material demonstre os níveis absolutos de humidade relativa e teor de água menores.

Adicionalmente, apesar dos materiais isolantes compostos por fibras de madeira e fibras naturais de cânhamo, demonstrarem maior resistência à difusão do vapor de água presente no ar, atuam na sua libertação de forma lenta e gradual, estabelecendo um mecanismo benéfico de controlo de humidade. Espera-se, para estes materiais, agregado a níveis de teor de água e humidade relativa superiores, um maior risco associado ao aparecimento de condensações internas.

Naturalmente, as características inerentes aos materiais com função de isolamento térmico são de elevada importância, contudo, de forma a retirar conclusões o mais plausíveis possível, é essencial ter em consideração, de igual modo, as características dos restantes materiais que compõem o elemento construtivo bem como a sua sequência de posicionamento.

As referências efetuadas neste capítulo, face a outros estudos realizados, têm por base aspetos semelhantes que adquirem um carácter de suporte de resultados obtidos.

5.1. Teor de água- Análise global e comparativa

Pela observação do gráfico (figura 5-1) do teor de água relativo à solução construtiva com isolamento de fibras de madeira, constata-se uma evolução com tendência decrescente por parte de ambas as situações apresentadas ao longo do período de simulação, sendo que, o teor de água do elemento construtivo sem introdução de barreira ao vapor demonstra, numa fase inicial desde o mês de outubro até fevereiro, uma ligeira sobreposição de valores chegando, em certas zonas, a adotar valores superiores. Nos meses iniciais de simulação, a variação do teor de água reside no intervalo entre $24kg/m^3$ e $21kg/m^3$, tendo ocorrido picos em ambas as curvas que podem ser explicados por situações pontuais de precipitação extrema, elevando rapidamente os valores de teor de água ao longo da parede. A partir do mês de fevereiro, verifica-se um nítido afastamento das duas curvas de teor de água, observando-se um declínio mais acentuado por parte da situação sem incorporação de barreira ao vapor. Naturalmente, as condições a partir de fevereiro, demonstram ser mais favoráveis anulando a barreira ao vapor, com um teor de água a variar entre os $21kg/m^3$ e $17kg/m^3$ perante a outra situação, que demonstra um intervalo entre $21kg/m^3$ e $18,5kg/m^3$.

De forma geral, para as soluções com fibras de madeira e lã mineral de rocha, a colocação de barreira ao vapor, não introduz mudanças significativas nos níveis de teor de água [48].

Solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira

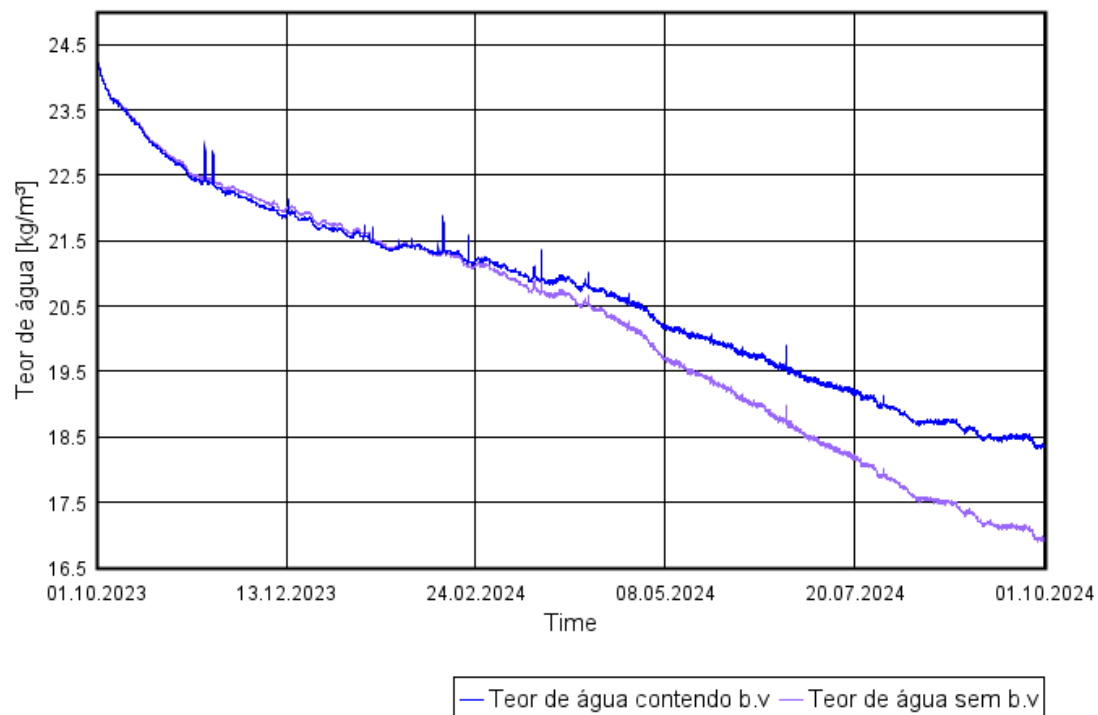


Figura 5-1: Evolução do teor de água da solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira.

Relativamente ao gráfico (figura 5-2) obtido para a solução construtiva com isolamento de lã mineral de rocha verifica-se, nos meses iniciais de simulação, outubro a fevereiro, uma tendência ligeiramente lateralizada com ocorrência de picos de teor de água para ambas as curvas. Neste período, a variação ocorre dentro do intervalo de valores de 13kg/m^3 a $15,8\text{kg/m}^3$. Durante o mês de outubro, os valores de teor de água tenderam a decrescer para ambas as situações, sendo que, no início do mês de novembro, ocorreu um aumento brusco, resultando em valores de teor de água superiores para o caso de não utilização de barreira ao vapor, no decorrer dos meses subsequentes. De notar que, pela análise do gráfico abaixo, sempre que ocorre um pico de teor de água nos meses mais frios do ano, a curva associada à situação sem barreira ao vapor, apresenta valores superiores face à situação contendo barreira ao vapor no decorrer dos dias seguintes, sendo, por isso, um aspeto interessante a ter em consideração.

A partir do mês de fevereiro, a tendência começa a demonstrar um comportamento decrescente, estando os valores associados a ambas as situações, fortemente sobrepostos. Verifica-se que, desde o mês de junho até ao final da simulação, o elemento construtivo sem barreira ao vapor, adquire condições mais proveitosas, apresentando valores de teor de água menores na ordem dos $8,8\text{kg/m}^3$. À medida que se estabelecem os meses mais quentes do ano, a ocorrência de picos de teor de água é, naturalmente, menos frequente, sendo possível observar que, no mês de junho, pela sua manifestação, o elemento construtivo sem barreira ao vapor não adquiriu valores superiores no decorrer dos dias seguintes, como demonstrou ser frequente nos meses mais frios.

Solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha

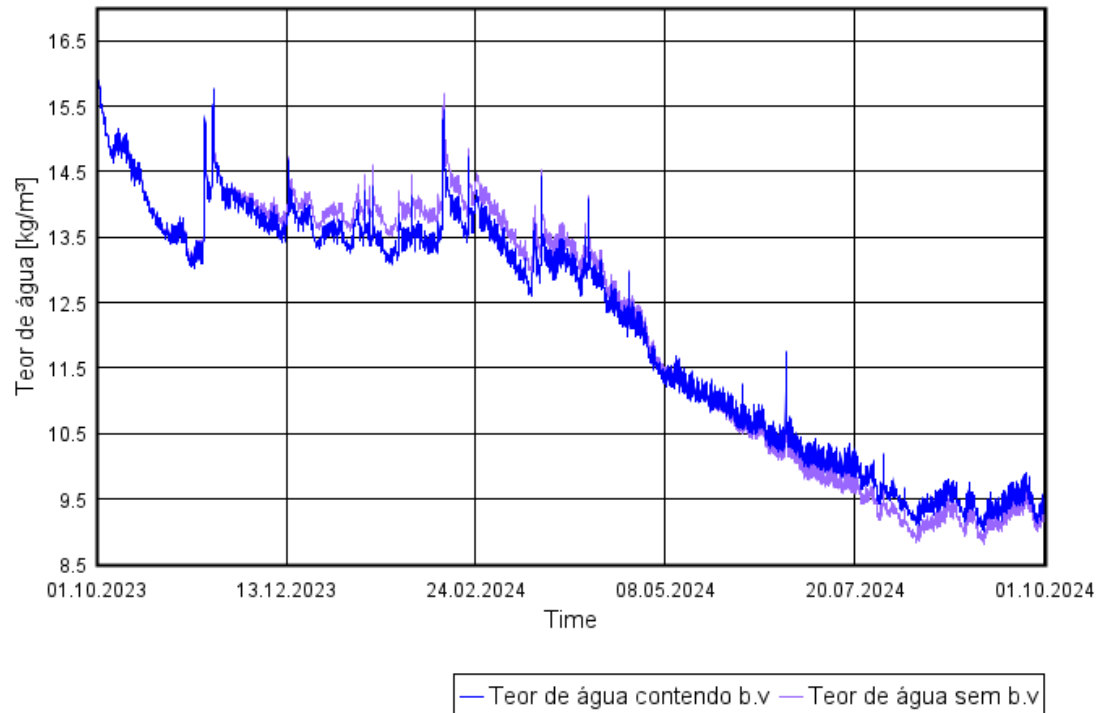


Figura 5-2: Evolução do teor de água da solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha.

Pela análise do gráfico da figura 5-3, correspondente à solução construtiva com fibras de cânhamo constata-se, desde uma fase inicial, um comportamento decrescente com afastamento significativo por parte da solução sem barreira ao vapor. Desde o início da simulação até ao mês de fevereiro, ambas as curvas permanecerem num intervalo de valores estável, tendo a solução com barreira ao vapor apresentado uma variação entre 26kg/m^3 e 29kg/m^3 e a solução sem barreira ao vapor entre 24kg/m^3 e 26kg/m^3 . A partir do mês de fevereiro, ambas as soluções iniciaram um movimento descendente mais acentuado comprovando-se, simultaneamente, um afastamento progressivo por parte da solução sem barreira ao vapor até valores mínimos de 16kg/m^3 , comparativos a valores de cerca de $21,3\text{kg/m}^3$, atingidos pela solução com barreira ao vapor. Inquestionavelmente, a solução sem incorporação de barreira ao vapor apresenta um comportamento fortemente vantajoso, estabelecendo condições mais secas ao longo de todo o ano, face à solução contendo barreira ao vapor.

Solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo

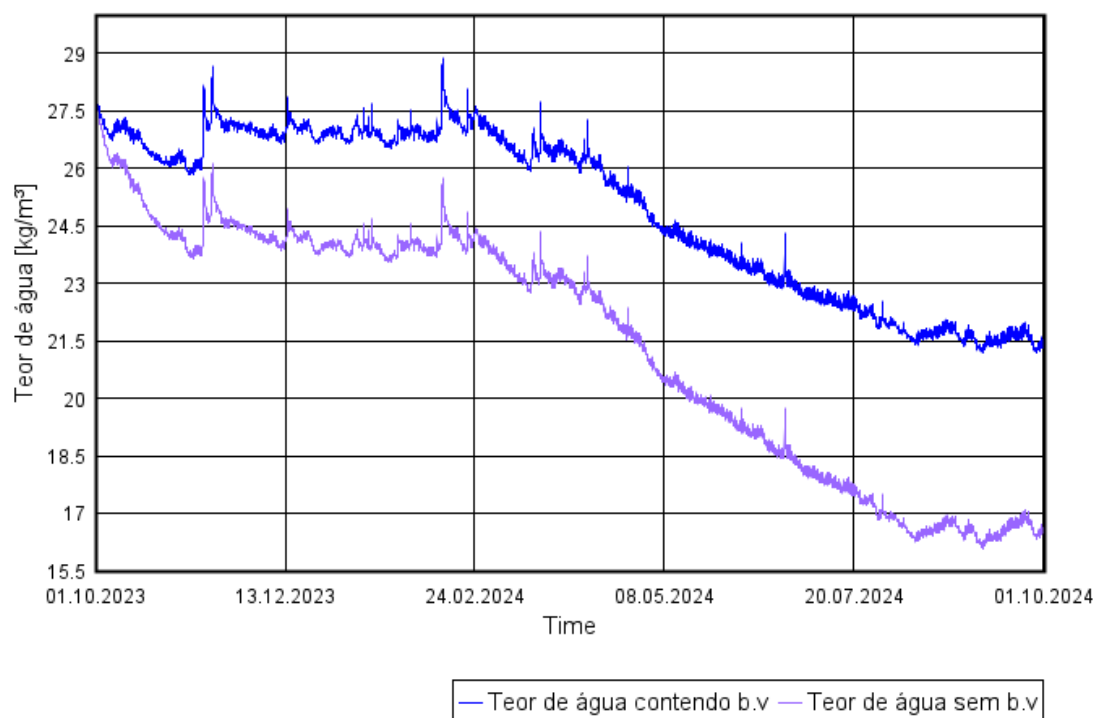


Figura 5-3: Evolução do teor de água da solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo.

Como apresentado anteriormente, no capítulo relativo à caracterização das soluções construtivas, estas, demonstram ser soluções de estanquidade, ou seja, impedirem a passagem de vapor de água através do elemento construtivo, de modo a estabelecerem condições saudáveis tanto para os materiais de construção como para os habitantes.

Pela análise dos gráficos de teor de água (figuras 5-1, 5-2 e 5-3), é possível constatar que, nos meses iniciais de simulação (outubro a fevereiro), as soluções construtivas com fibras de madeira e lã mineral de rocha, demonstram um comportamento semelhante, apresentando níveis de teor de água superiores na situação de não incorporação do extrato de barreira ao vapor. Sendo o teor de água de uma solução construtiva de parede exterior, a quantidade total de água presente em todos os materiais de construção que a constituem seria de esperar, no decorrer dos meses mais frios, uma gama de valores elevados associada a esta grandeza. O argumento anterior verifica-se, no entanto, perante a situação sem introdução de barreira ao vapor, a parede apresenta uma maior área de secagem, sendo facilitada a migração do vapor de água simultaneamente para as superfícies exterior e interior sendo este, um dado indicativo de obtenção de níveis de teor de água menores face ao cenário com barreira ao vapor.

O não cumprimento do comportamento esperado, pode ser esclarecido por duas vias. A primeira assenta na capilaridade dos próprios materiais de construção associada à ocorrência de fenómenos imprevistos de precipitação extrema na ausência da barreira ao vapor. A segunda via, pode estar fortemente associada às condições iniciais de simulação impostas no software WUFI, podendo estas, estar situadas num cenário desfasado face à resposta normal

dos materiais [36] e [85]. A mesma situação verifica-se para a grandeza de humidade relativa, como será possível constatar na respetiva análise mais à frente.

Relativamente ao primeiro cenário, nos meses mais frios do ano, verificam-se temperaturas no interior das habitações superiores à temperatura exterior, sendo a primeira considerada como zona quente. O vapor de água gerado no interior das habitações tem, desta forma, tendência a migrar para o interior da parede, sendo que, na ausência de barreira ao vapor, o seu transporte torna-se facilitado. Adicionalmente, após um período de precipitação extrema, ocorre um humedecimento direto da parede pela chuva incidente, levando ao aumento dos níveis de teor de água da mesma. A introdução de materiais de construção com características de higroscopicidade propícias a absorver e aprisionar vapor de água do ambiente envolvente perante níveis de humidade relativa muito elevados, pode originar o comportamento observado indicando que, apesar das soluções construtivas com fibras de madeira e lã mineral de rocha apresentarem características de secagem facilitada, os materiais isolantes de fibras de madeira e lã mineral de rocha respetivos poderão, eventualmente, durante os meses frios do ano, apresentar uma resposta inadequada em contexto de acumulação de teor de água.

Porém, visto a lã mineral de rocha ser, por norma, um material com propriedades hidrofóbicas e ser o que apresenta menor fator de resistência à difusão de vapor de água, é pouco provável a solução construtiva que a incorpora, incidir na primeira hipótese, pelo que, de forma a averiguar esta questão, efetuou-se uma simulação com um período total de 3 anos para as grandezas de teor de água e humidade relativa. Deste modo, é possível projetar o comportamento das soluções construtivas num período temporal maior e atenuar a influência das condições iniciais de simulação na resposta obtida.

No mesmo período de análise (outubro a fevereiro), a solução construtiva composta por isolamento de fibras de cânhamo, demonstra o comportamento que seria de esperar, apresentando valores de teor de água menores pela não incorporação da barreira ao vapor, indicando uma resposta saudável por parte deste material durante os meses mais frios onde se registam níveis de humidade relativa acrescidos. De notar que, apesar da solução construtiva com fibras de cânhamo ter apresentado um comportamento individual mais favorável, é necessário ter em atenção os resultados obtidos de teor de água em termos absolutos, podendo fazer variar a solução a optar.

Com aproximação aos meses mais quentes do ano, as três soluções construtivas (figuras 5-1, 5-2 e 5-3), respondem de forma expectável, demonstrando uma diminuição mais acentuada dos níveis de teor de água na situação de não utilização de barreira ao vapor. Este comportamento deve-se ao facto de, com o aumento gradual das temperaturas associado a uma maior área de secagem, a parede encontra-se em situação de secagem facilitada, levando a uma diminuição contínua do teor de água.

Na análise deste tipo de situações, é de grande importância adotar uma perspetiva de influência cíclica, ou seja, relacionar o comportamento presente com acontecimentos do passado. Desta forma, perante a dificuldade nos meses mais frios das soluções construtivas com fibras de madeira e lã mineral de rocha apresentarem níveis de teor de água menores sem barreira ao vapor regista-se, nos meses mais quentes e para a mesma situação, uma resistência acrescida na perda de água, registada por uma pequena amplitude entre curvas. Por outro

lado, a solução construtiva com fibras de cânhamo apresentou, desde uma fase inicial, níveis de teor de água sem barreira ao vapor consideravelmente menores face ao outro quadro pelo que, nos meses mais quentes, verifica-se uma maior facilidade na perda de água, exibida por uma grande amplitude entre curvas.

Tendo por base a avaliação realizada na secção anterior, optou-se pela seleção do caso sem incorporação de barreira ao vapor para as três soluções construtivas, de forma a estabelecer a presente análise comparativa.

Analisando o gráfico abaixo em termos de valores absolutos, observa-se um conjunto de dados fortemente vantajoso associado à solução construtiva com isolamento de lã mineral de rocha. Esta solução apresenta, ao longo do ano, uma variação com valor máximo cerca de $16\text{kg}/\text{m}^3$ e mínimo de $9\text{kg}/\text{m}^3$.

Relativamente aos restantes casos verifica-se, para a solução contendo isolamento de fibras de madeira, um intervalo de valores de $24\text{kg}/\text{m}^3$ até $17\text{kg}/\text{m}^3$ e para a solução contendo isolamento de fibras de cânhamo, uma variação de $28\text{kg}/\text{m}^3$ até cerca de $17\text{kg}/\text{m}^3$.

De forma geral, a solução construtiva com isolamento de fibras de cânhamo foi a que apresentou melhor resposta durante todo o período de simulação contendo, no entanto, níveis de teor de água superiores face à solução construtiva com isolamento de lã mineral de rocha.

Apesar desta última apresentar um comportamento qualitativo pouco favorável nos meses mais frios do ano, a partir do mês de fevereiro, apresenta uma tendência saudável, sendo que, em contexto de valores absolutos, é a solução que apresenta melhores resultados.

Teor de água

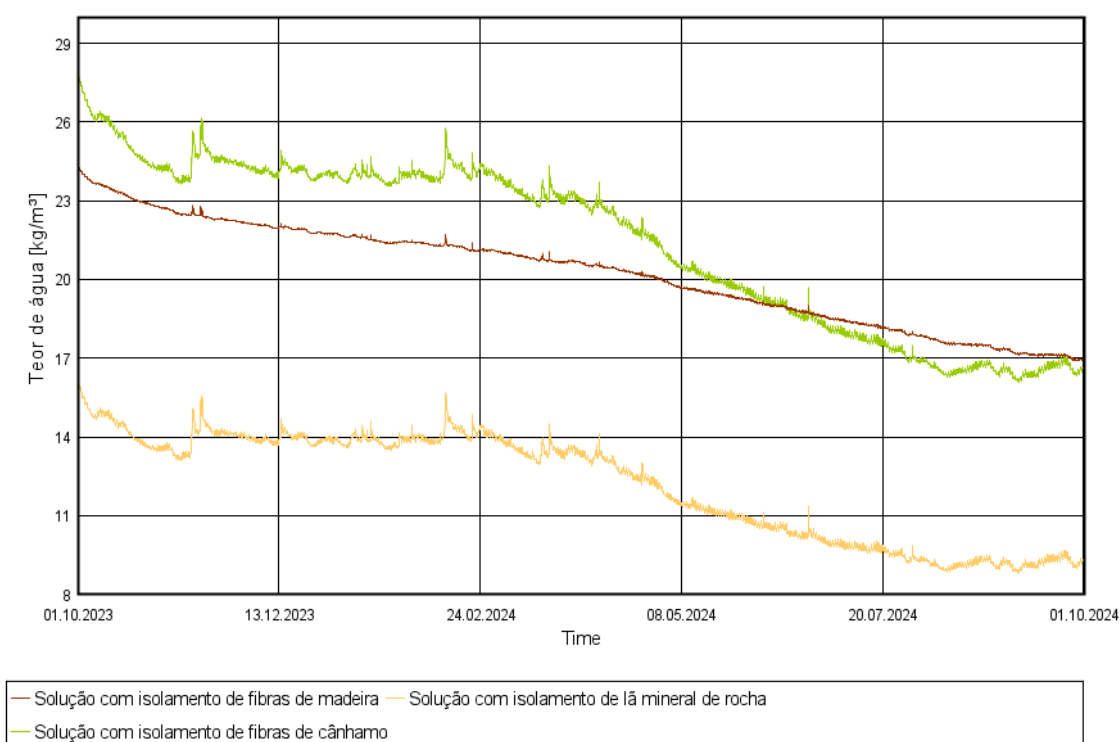


Figura 5-4: Análise comparativa das três soluções construtivas face à evolução do teor de água.

Pelo aumento do tempo de simulação para um período de três anos, constata-se aspectos relevantes que, no período de simulação anual, encontravam-se fora de visão.

Devido às condições iniciais de simulação impostas, o comportamento das três soluções construtivas adquire uma tendência inicial fortemente descendente o que, pela observação das curvas de teor de água, é indicativo de um caráter desfasado da realidade.

A partir dos meses mais quentes associados ao primeiro ano de simulação, é possível verificar, para as três soluções, uma gama de valores normalizada, tendo por base o comportamento demonstrado nos meses mais quentes do segundo e terceiro anos de simulação. No que diz respeito aos meses mais frios, os valores de teor de água máximos atingidos pelas três soluções, são notoriamente menores face aos atingidos no início da simulação, sendo possível verificar nos segundo e terceiro anos, valores máximos atingidos muito equiparados, suportando, novamente, a hipótese de que as condições iniciais impostas pelo software encontram-se afastadas da resposta natural dos elementos construtivos e que o comportamento inicial observado não deve ser tido em consideração para formulação de conclusões.

Em contexto de valores absolutos, a solução com lã mineral de rocha, continua a exibir o melhor comportamento com um valor mínimo de teor de água registado na ordem de $9\text{kg}/\text{m}^3$ para os meses mais quentes e de $14\text{kg}/\text{m}^3$ para os meses mais frios. Contrariamente ao observado no gráfico referente ao período anual de simulação, a solução com fibras de cânhamo, demonstra uma gama de valores superior face à construção com fibras de madeira atingindo, nos meses mais frios um valor cerca de $22\text{kg}/\text{m}^3$ e nos meses mais quentes um valor mínimo de $16\text{kg}/\text{m}^3$.

A construção com fibras de madeira, em contraste com o comportamento cíclico registado para as restantes, apresenta um desenvolvimento descendente ao longo dos três anos de simulação, indicando maior facilidade de secagem perante o teor de água adquirido com o passar das estações mais frias do ano. Apresenta um valor máximo de $17\text{kg}/\text{m}^3$ e mínimo de $14,5\text{kg}/\text{m}^3$.

Teor de água

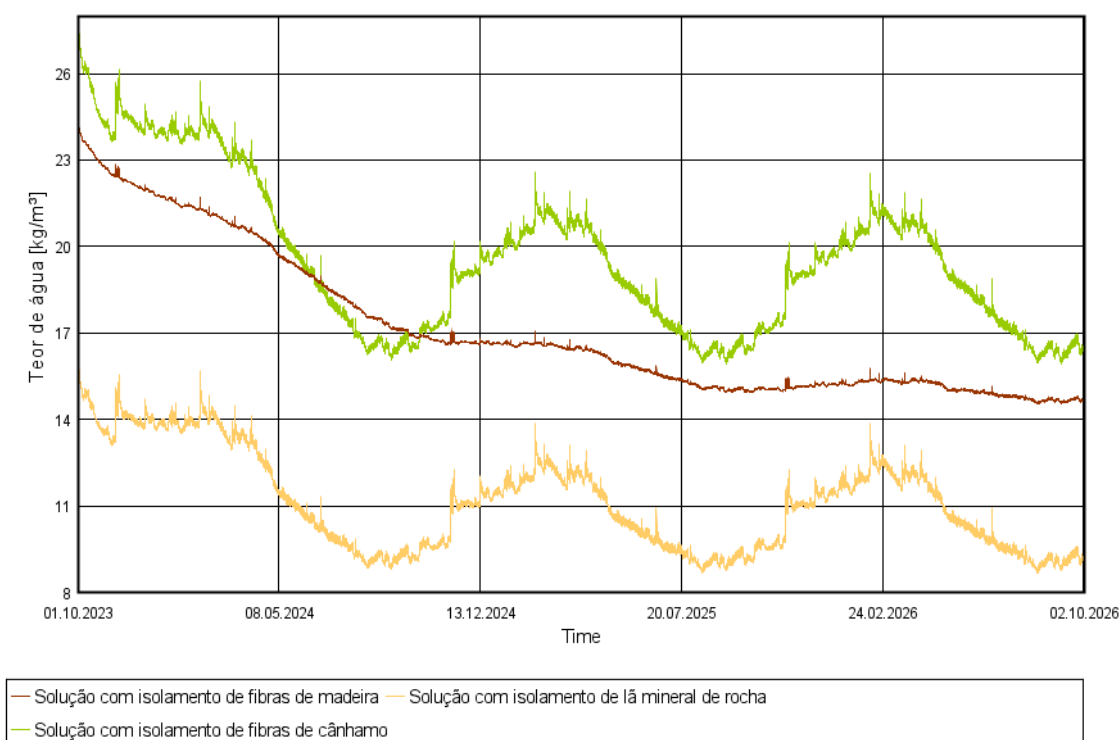


Figura 5-5: Análise comparativa das três soluções construtivas face à evolução do teor de água num período de três anos.

5.2. Humidade relativa- Análise global e comparativa

A humidade relativa, expressa a quantidade de vapor de água que o ar contém face ao valor máximo que pode adquirir a uma determinada temperatura. Deste modo, existe uma relação direta entre as grandezas de humidade relativa e teor de água dos materiais para a mesma temperatura, pois a humidade relativa do ar, estabelece a quantidade de água disponível a ser absorvida por parte dos vários materiais em forma de vapor ou, no caso de se verificarem condensações internas, em forma de gotículas de água.

Perante o mesmo contexto de simulação e com base na informação mencionada, é possível correlacionar os valores adquiridos na fase de análise do teor de água com os valores referentes à humidade relativa das construções, de forma a potenciar a precisão de conclusões obtidas.

Neste sentido, pela observação do gráfico associado à solução construtiva com fibras de madeira (figura 5-6), evidencia-se uma clara tendência decrescente por parte das duas curvas ao longo do ano de simulação sendo observado, no período de outubro a fevereiro, uma gama de valores muito aproximados em ambos os cenários. Nos meses de outubro a dezembro, a solução sem introdução de barreira ao vapor, apresenta valores quase sempre superiores face à outra situação, sendo que, a partir deste último, demonstra um desenvolvimento favorável com valores sobrepostos no período de dezembro a janeiro e inferiores a partir de janeiro. Em

termos de valores de humidade relativa, nos meses de outubro a fevereiro, ocorreu uma variação no intervalo de 78,5% a 71,6%. Com entrada no período mais quente do ano, verifica-se uma diferenciação nítida de valores entre as duas curvas, sendo o elemento construtivo sem barreira ao vapor, o que demonstra uma tendência mais acentuada, afastando-se da outra situação para valores menores. Neste período, a variação de valores de humidade relativa, encontra-se inserida no intervalo de 74,4% e 63%, sendo este último, o menor valor de humidade relativa atingido pela solução sem barreira ao vapor.

Solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira

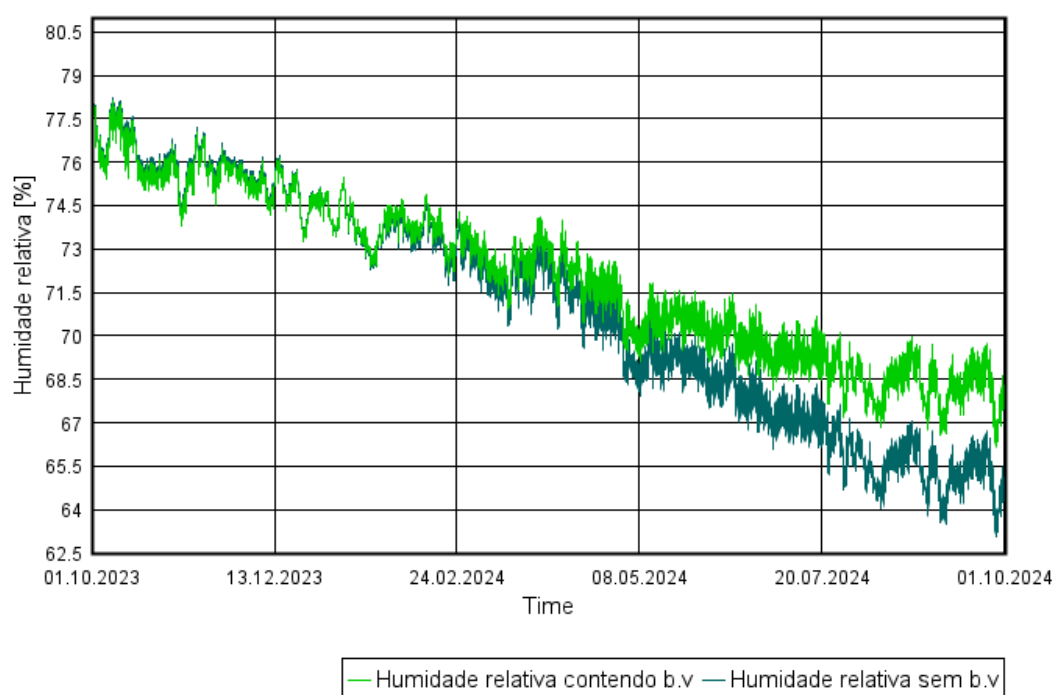


Figura 5-6: Evolução da humidade relativa da solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira.

Relativamente ao gráfico da solução construtiva com lã mineral de rocha (figura 5-7) verifica-se, de forma análoga ao observado na secção de análise de teor de água, um conjunto de valores superior nos meses mais frios do ano, associados à solução sem barreira ao vapor. De forma a averiguar a natureza deste comportamento apresenta-se, de modo semelhante, um gráfico com um período de análise de três anos para a grandeza de humidade relativa, na secção de análise comparativa.

No período de outubro a fevereiro, ambas as soluções demonstram um comportamento descendente, sendo que, a solução sem barreira ao vapor apresenta uma variação entre cerca de 79,5% e 64,5% e a solução com barreira ao vapor de 77,5% a 58,5%.

Verifica-se, nos meses de fevereiro a maio, uma aproximação de valores de ambas as curvas, com início de uma tendência decrescente mais acentuada, por parte da solução sem barreira ao vapor, no início de maio. Neste período, ocorre uma variação com intervalo de 65,5% a 70,5% para a solução sem barreira ao vapor e de 62,5% a 73,5% para a sua incorporação. A partir do mês de maio, com entrada nos meses mais quentes do ano, observa-se um

afastamento expectável entre as duas curvas, com ênfase na gama de valores inferior observada para a solução sem barreira ao vapor. No período de maio a setembro, a solução sem barreira ao vapor apresenta uma variação de 70% a 56,5% e a solução com barreira ao vapor uma variação de 73,5% a 58,5%. A partir do mês de setembro, a solução com barreira ao vapor tende, novamente, a apresentar valores muito semelhantes face ao outro panorama.

Solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha

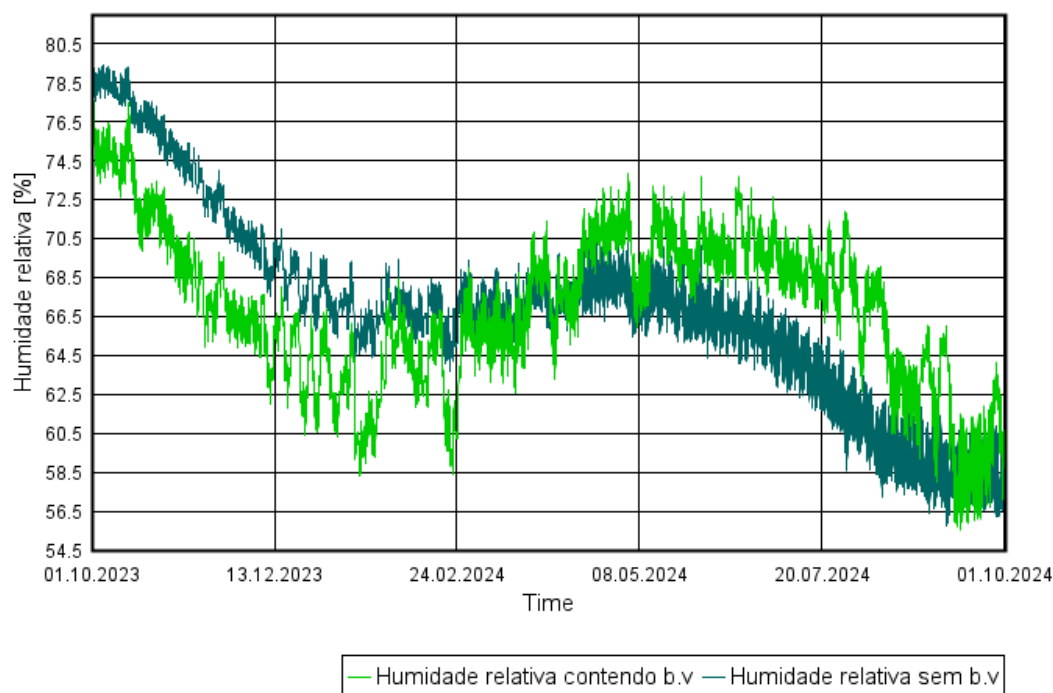


Figura 5-7: Evolução da humidade relativa da solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha.

Pela interpretação do gráfico da solução construtiva com fibras de cânhamo (figura 5-8) verifica-se, nos dias iniciais do processo de simulação, uma queda abrupta de humidade relativa por parte da solução sem barreira ao vapor, face a níveis mais estabilizados presentes na outra situação. Neste período, registou-se um intervalo de valores de 78% a 74% de humidade relativa para o caso de colocação de barreira ao vapor e de 78% a 67%, para a sua ausência. Observa-se que, em ambos os casos, depois de uma queda progressiva durante os meses de outubro a janeiro, os valores tendem a estabilizar, demonstrando um comportamento lateralizado no período de janeiro a maio com uma variação registada cerca de 74% a 75,7% com barreira ao vapor e de 67% a 69% sem a sua consideração. Após este último, ambas as soluções exibiram uma descida para valores mínimos anuais, sendo visível um claro afastamento da curva de humidade relativa sem barreira ao vapor para um valor mínimo de 58%, expresso pelo aumento de amplitude entre as duas curvas. Neste período anual, a solução com barreira ao vapor atinge um valor mínimo de humidade relativa de 71,5%.

Solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo

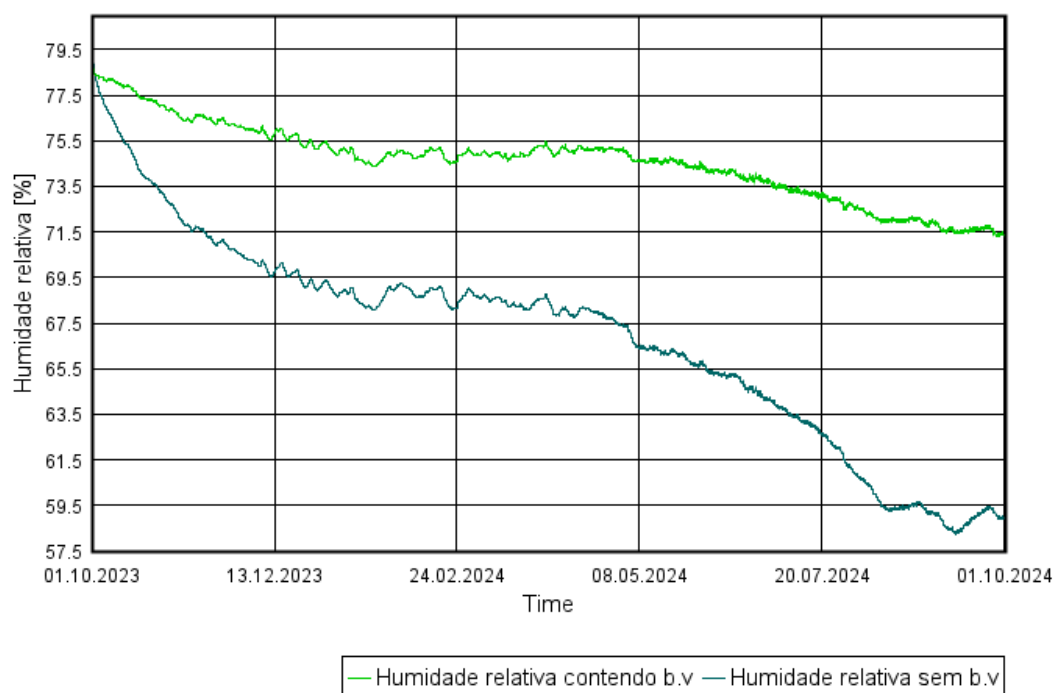


Figura 5-8: Evolução da humidade relativa da solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo.

Estabelecendo associação com os resultados obtidos na fase de análise do teor de água para as três soluções construtivas verificam-se, tendo em vista a relação existente entre as grandezas de teor de água e humidade relativa, aspetos comportamentais comparáveis.

Para as soluções construtivas contendo isolamento de fibras de madeira e lã mineral de rocha (figuras 5-1, 5-2, 5-6 e 5-7), observa-se um comportamento semelhante nos meses iniciais de simulação, estabelecendo-se um conjunto de valores superior para a situação sem colocação de barreira ao vapor, pelo que, nos meses mais quentes subsequentes e para o mesmo cenário, existe uma dificuldade acrescida na diminuição dos níveis de humidade relativa. A solução construtiva com isolamento de fibras naturais de cânhamo apresenta, desde uma fase inicial, um comportamento saudável, com afastamento significativo por parte da curva associada à situação sem barreira ao vapor para valores inferiores, alocando níveis menores de humidade relativa para os meses mais quentes seguintes. Associada a este comportamento, advém uma maior facilidade em diminuir os níveis de humidade relativa com o aumento da temperatura.

Em contexto de humidade relativa, a existência de uma zona de espaço de ar a par com a não colocação da barreira ao vapor, atribui uma influência significativa na oscilação de valores para o elemento construtivo, particularmente nos meses mais frios do ano, pelo que, é expectável, para as soluções construtivas com lã mineral de rocha e fibras naturais de cânhamo, uma resposta mais reativa e de maior amplitude no mesmo período. Devido à colocação de materiais de forma contínua, sem interrupção pela existência de uma zona de espaço de ar, é expectável, para a solução construtiva com fibras de madeira, uma resposta com carácter lateralizado e tendencialmente decrescente. A ausência de picos de humidade relativa,

faz com que o elemento construtivo não tenha de estabilizar o seu valor com a chegada dos meses mais quentes do ano.

Para proceder à análise comparativa da grandeza de humidade relativa optou-se, com base na avaliação anterior, pela escolha do cenário sem incorporação de barreira ao vapor para os três casos de estudo.

Evidencia-se na figura 5-9, para um período de simulação de um ano e em termos de valor absoluto, uma variação com valor máximo cerca de 78,5% e mínimo de 63% para a solução construtiva com isolamento de fibras de madeira. Para os restantes casos verifica-se, na solução contendo lã mineral de rocha, uma variação de 79,5% até 56,5% e para a solução contendo fibras naturais de cânhamo, uma variação de 78% até 58%.

Em termos qualitativos, a solução com fibras naturais de cânhamo, apresenta o melhor comportamento ao longo do ano, demonstrando uma resposta inicial expectável face às condições de simulação impostas, garantindo um comportamento saudável no decorrer dos meses mais quentes.

Apesar de, nos meses iniciais, as soluções com isolamento de fibras de madeira e lã mineral de rocha, apresentarem um comportamento questionável, tendem a progredir para valores normalizados com o passar dos meses, pelo que, em termos absolutos, a solução com fibras de madeira demonstra os níveis mais elevados de humidade relativa e as soluções compostas por lã mineral de rocha e fibras naturais de cânhamo apresentam os melhores resultados com valores muito semelhantes.

Humidade relativa

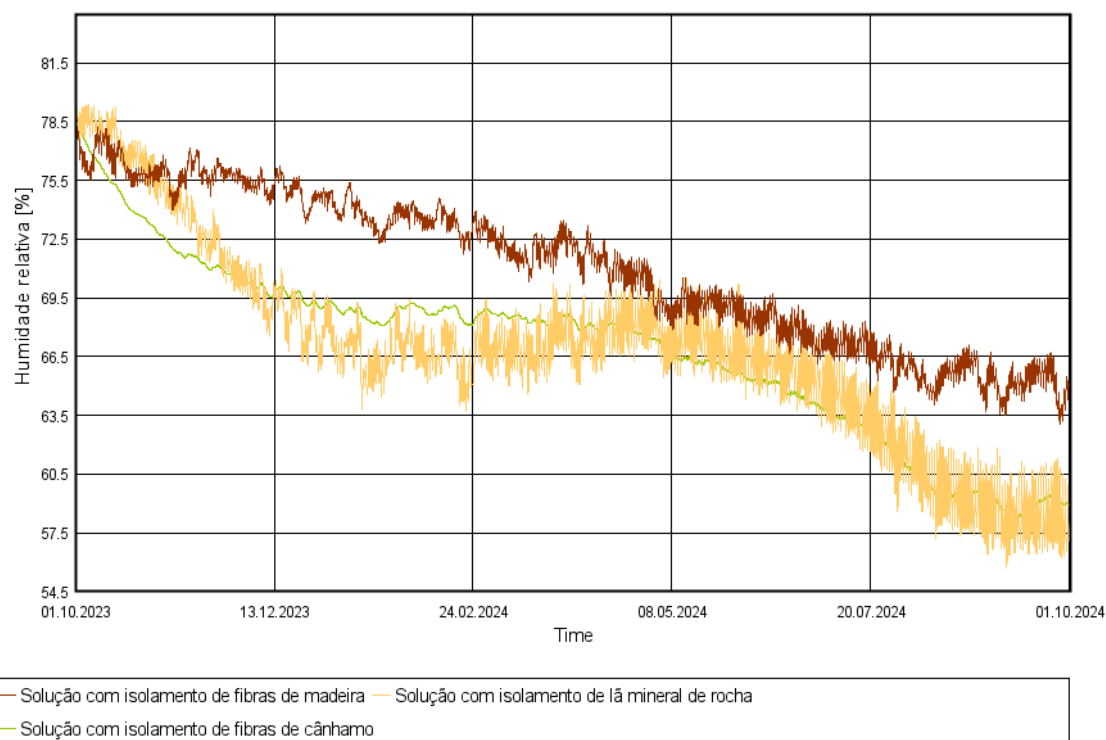


Figura 5-9: Análise comparativa das três soluções construtivas face à evolução da humidade relativa.

Pela análise da figura 5-10, é possível interpretar um conjunto de conclusões com elevada significância.

Tal como observado na análise do teor de água constata-se, para a grandeza de humidade relativa, um igual desfasamento do comportamento natural das construções nos meses iniciais de simulação, devido às condições iniciais impostas no software de análise. Observa-se uma dinâmica magnética para valores normalizados até cerca do mês de agosto de 2024, sendo que, a partir deste mês, regista-se um comportamento de carácter cíclico, sendo indicativo de normalização de valores.

Em termos de resultados absolutos, a solução com fibras de madeira tem uma variação de 78,5% a cerca de 55% de humidade relativa, demonstrando ao longo dos três anos de simulação, uma tendência decrescente sem momentos de grande amplitude nos meses mais frios de cada ano. Contrariamente, as soluções com isolamento de lã mineral de rocha e fibras naturais de cânhamo, a partir do mês de agosto de 2024, apresentam picos de humidade relativa nos períodos mais frios de cada ano, diminuindo progressivamente o seu valor com entrada nos meses mais quentes. A partir do mês de agosto de 2024, a solução com lã mineral de rocha tem uma variação cerca de 67% a cerca de 55% e a solução com fibras naturais de cânhamo entre cerca de 64% e cerca de 58%.

Nos meses mais frios de cada ano, o comportamento similar entre as soluções com lã mineral de rocha e fibras de cânhamo em contraste com o comportamento observado para a solução com fibras de madeira, pode ser explicado pela existência de uma zona de espaço de ar associada à inexistência do estrato de barreira ao vapor.

Durante o período onde as temperaturas exteriores são menores, regista-se um diferencial de pressões de vapor de água entre o interior da habitação e o meio exterior, sendo que, o ar quente e húmido gerado no interior, tem tendência a migrar, através do elemento construtivo, para o exterior. Estando a função principal da barreira ao vapor diretamente relacionada com o impedimento deste processo de migração de humidade interior, a sua ausência torna-o imediatamente facilitado. Neste sentido, apesar das soluções construtivas que apresentam na sua constituição uma zona de espaço de ar, adquirirão uma maior capacidade de secagem, poderá estar associado um período pontual de aumento de níveis de humidade relativa. Este aumento está associado com a natureza do ar proveniente do ambiente interior que, estando a uma temperatura superior à registada na interface entre a zona de espaço de ar e a placa de OSB, aloca uma maior capacidade de armazenamento de vapor de água. Ao atingir a interface mais fria na zona de espaço de ar, a temperatura do ar interior e a sua capacidade de armazenamento de vapor de água diminuem, levando diretamente ao aumento dos níveis de humidade relativa e é possível ocorrência de condensações.

Pela análise da figura 5-5, associada aos níveis de teor de água, observa-se um comportamento muito semelhante para as três soluções, sendo que, as soluções que compreendem uma zona de espaço de ar, atingem picos de teor de água nos mesmos períodos em que os níveis de humidade relativa são máximos e a solução em contínuo, contendo fibras de madeira demonstra, igualmente, um comportamento decrescente sem ocorrência de picos significativos.

A solução contendo lã mineral de rocha, apesar de demonstrar valores inferiores de água fisicamente presente na construção devido, maioritariamente, às propriedades do material isolante, apresenta níveis de humidade relativa superiores, nos meses mais frios, face à solução contendo fibras de madeira. A diferença de valores de humidade relativa nestes períodos, pode estar fortemente associada à conceção da solução construtiva.

No que se refere à solução contendo fibras naturais de cânhamo, para além de ser a solução que demonstra níveis mais elevados de teor de água ao longo dos três anos de análise, o seu comportamento, em contexto de humidade relativa, é desvantajoso nos meses mais frios de cada ano, pela existência de grandes picos de humidade relativa que, tal como a solução com lã mineral de rocha, poderão levar a condensações internas e consequente desenvolvimento de mofo e bolores, pondo em causa a integridade dos materiais.

A prorrogação do período de análise de um para três anos, demonstrou ser de elevado benefício pois, numa primeira observação anual, registou-se o pior comportamento associado ao elemento construtivo com isolamento de fibras de madeira., contudo, numa fase de normalização de valores e sem a influência das condições iniciais impostas, revelou-se como a opção mais praticável.

Embora as soluções construtivas contendo isolamento de lã mineral de rocha e fibras de cânhamo tenham apresentado um melhor comportamento, com uma gama de valores de humidade relativa menor face à solução com fibras de madeira em contexto anual, revelaram aspetos desfavoráveis, sobretudo nos meses mais frios de cada ano, com picos elevados.

Tendo presente que, para as grandezas higrotérmicas de teor de água e humidade relativa, o período de simulação de três anos demonstrou um conjunto de dados e comportamento mais vantajosos face ao período de simulação anual, considerou-se prudente, a adoção do mesmo período de análise de três anos para as grandezas de temperatura, pressão parcial do vapor de água e para a análise comparativa na zona do material isolante. Visto que o período anual de simulação, com elevada influência das condições iniciais impostas, demonstrou um comportamento desfasado do normal para as três soluções, ao adotá-lo, estaríamos a atribuir um peso incorreto aos resultados obtidos nesse intervalo, podendo levar a conclusões erradas.

Humidade relativa

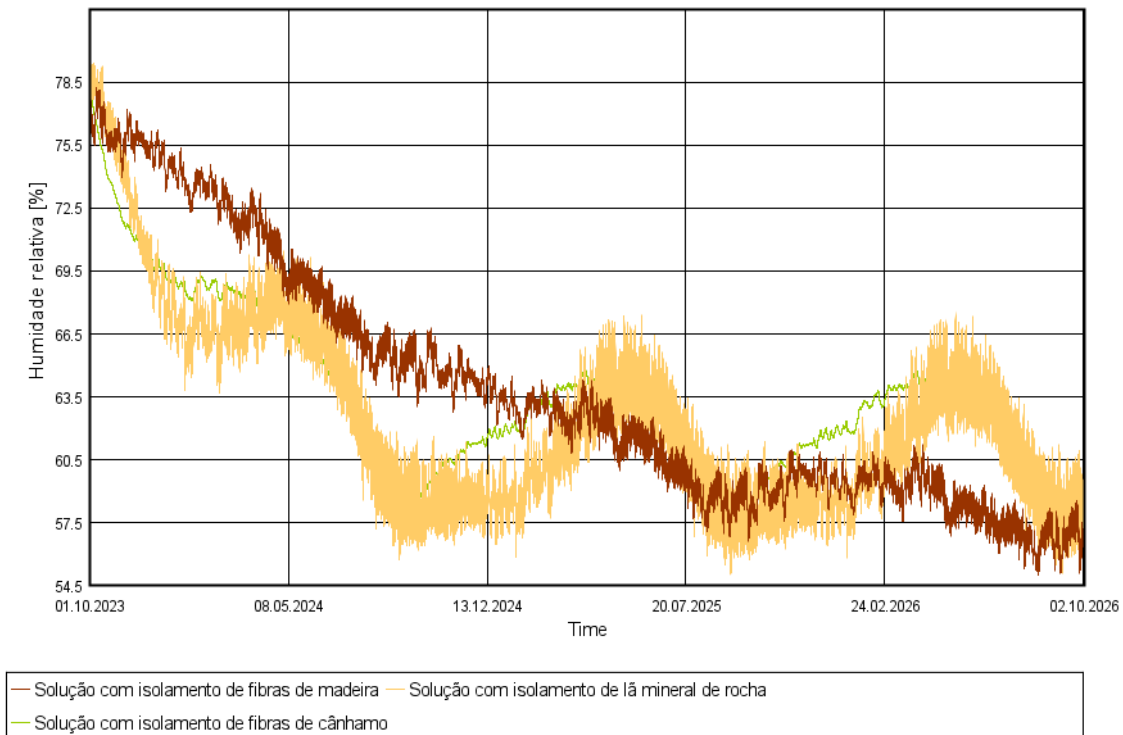


Figura 5-10: Análise comparativa das três soluções construtivas face à evolução da humidade relativa num período de três anos.

5.3. Temperatura- Análise global e comparativa

Em contexto de variação de temperaturas no elemento construtivo, a incorporação de um extrato de barreira ao vapor é um detalhe que, em primeira análise, poderá demonstrar influência nos resultados obtidos. Este material, como mencionado anteriormente, impede a passagem de vapor de água para o interior da construção, contribuindo para níveis de humidade relativa reduzidos, pelo que, para condições de humidade reduzida, está diretamente associada uma menor condutibilidade térmica e, consequentemente, uma maior estabilidade térmica ao longo da parede. Contrariamente, o aumento de níveis de humidade no interior da parede, poderá levar a condensações internas, sendo que, em domínio capilar, pela elevada capacidade térmica associada à água, existirão flutuações térmicas excessivas com impacto direto na integridade do material isolante.

A análise das grandezas de teor de água e humidade relativa efetuada anteriormente, indicou resultados inferiores associados à situação sem barreira ao vapor para as três soluções construtivas. Ora, o comportamento registado, remete-nos para um contexto de níveis reduzidos de humidade para ambos os quadros, sendo expectável uma variação de temperaturas muito correspondente [43].

Pela análise dos gráficos de temperatura associados às três soluções construtivas (figuras 5-11, 5-12 e 5-13), constata-se um comportamento idêntico, pois os valores obtidos sem incorporação de barreira ao vapor, são muito semelhantes aos obtidos pela sua colocação. Esta semelhança de resultados, suporta a informação anterior expectável e é indicativa de uma influência quase nula em termos de transmissão de calor por parte da barreira ao vapor.

Solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira

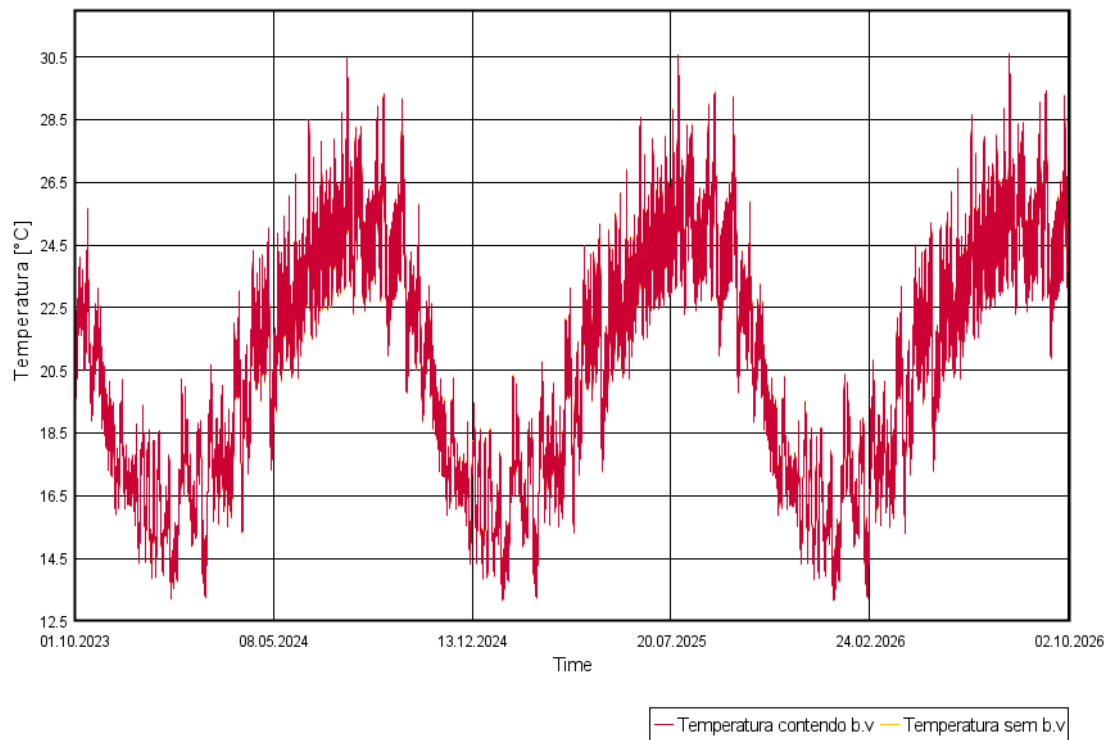


Figura 5-11: Evolução da temperatura da solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira.

Solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha

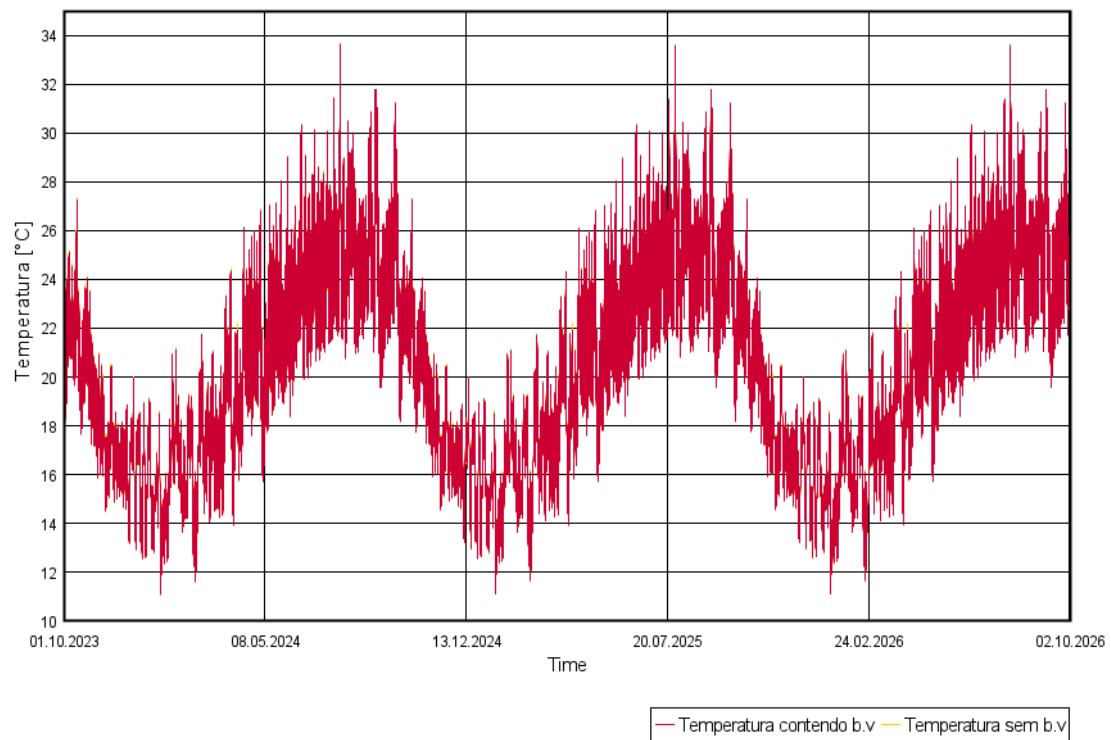


Figura 5-12: Evolução da temperatura da solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha.

Solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo

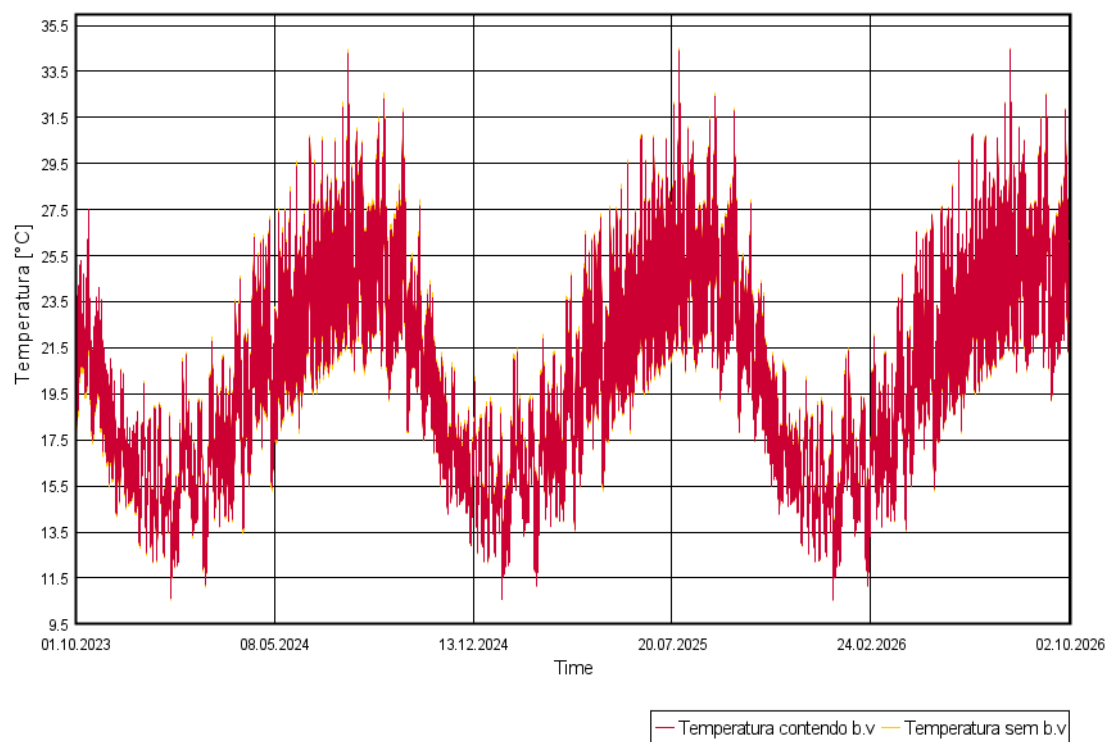


Figura 5-13: Evolução da temperatura da solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo.

Adicionalmente, a evolução dos perfis de temperatura para as três soluções (figura 5-14), demonstra um padrão cíclico ao longo dos três anos de simulação, sendo os valores máximos e mínimos do primeiro ano, atingidos e respeitados nos anos subsequentes.

Pela observação da figura 5-14, que reúne o comportamento das três soluções construtivas, é possível comprovar, em contexto de valores absolutos de temperatura, uma gama de resultados semelhante ao longo dos três anos, sendo que, a solução contendo isolamento de fibras de cânhamo, apresenta um valor mínimo de 10,5°C e máximo de 34,5°C, a solução contendo isolamento de lã mineral de rocha um mínimo de 11,1°C e máximo de 33,7°C e a solução contendo isolamento de fibras de madeira, uma temperatura mínima de 13,2°C e máxima de 30,6°C. Em termos qualitativos, estabelece-se um comportamento expectável, com diminuição gradual da temperatura nos meses mais frios de cada ano e aumento nos meses mais quentes.

De notar que a solução contendo fibras de madeira apresenta, em detrimento das restantes, um comportamento mais estável, ou seja, de menor amplitude e com picos menos acentuados, contribuindo de forma positiva para menores gradientes de temperatura. Uma solução construtiva que apresente características de amplitude térmica reduzidas é, no ponto de vista do desenvolvimento de anomalias, mais benéfica, na medida em que, associado a menores oscilações, os materiais de construção não irão contrair nem dilatar tanto, existirá menor risco de fissurações e existirá uma diminuição da agravante de problemas decorrentes destas anomalias.

No presente contexto, a solução com fibras de madeira, demonstra ser a opção mais praticável.

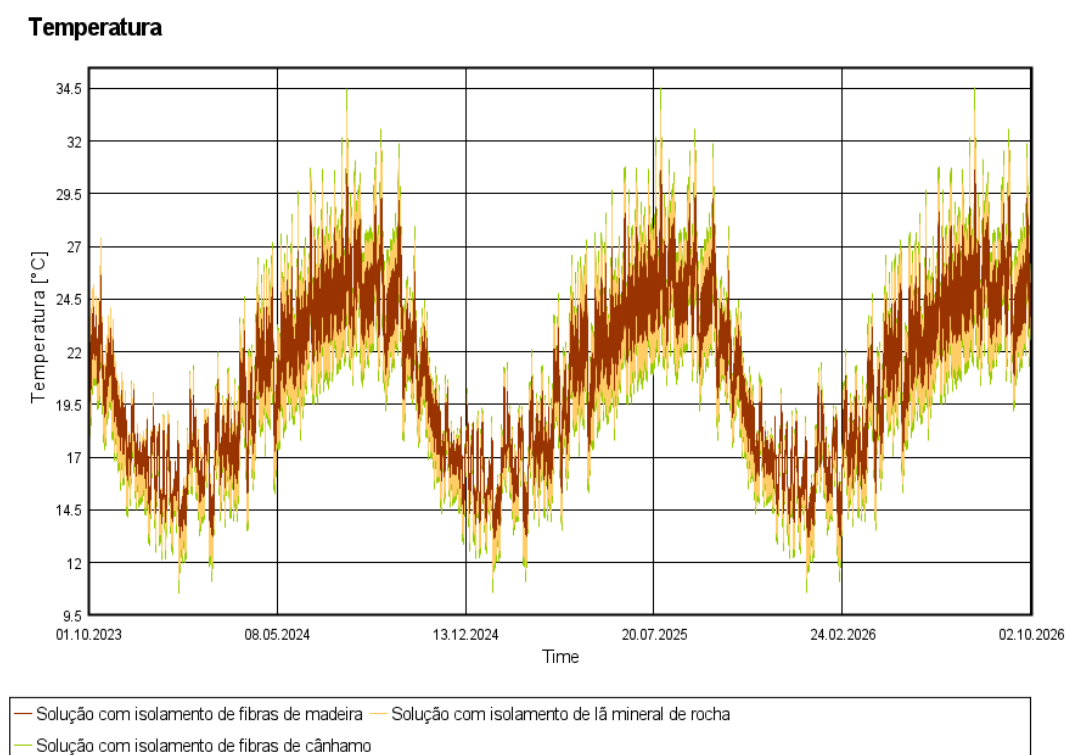


Figura 5-14: Análise comparativa das três soluções construtivas face à evolução da temperatura.

5.4. Pressão parcial do vapor de água- Análise global e comparativa

No contexto desta grandeza, é de grande interesse fazer referência à lei de Dalton, também conhecida como lei das pressões parciais [86].

De acordo com esta lei, a pressão total exercida por uma mistura de gases (ar), é igual à soma das pressões parciais de cada um dos seus gases constituintes, por isso, a pressão parcial do vapor de água, diz respeito à pressão exercida por este gás, de forma individual, na massa de ar que constitui.

Similarmente à secção de análise das temperaturas, as curvas de pressão parcial de vapor de água para as três soluções construtivas (figuras 5-15, 5-16 e 5-17), apresentam um comportamento errático ao longo de todo o período de simulação observando-se, na consideração de barreira ao vapor e na sua ausência para as três soluções, uma ligeira tendência decrescente de ano para ano.

Em todos os casos, a situação do elemento sem barreira ao vapor, apresenta menores valores de pressão parcial de vapor de água, podendo este comportamento ser suportado pela análise de teor de água e de humidade relativa onde, de igual forma, constatou-se um conjunto de valores inferiores na ausência de barreira ao vapor. Neste sentido, estando perante níveis de humidade relativa inferiores, seria expectável menores níveis de pressão parcial exercidos pelo vapor de água presente na construção.

Solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira

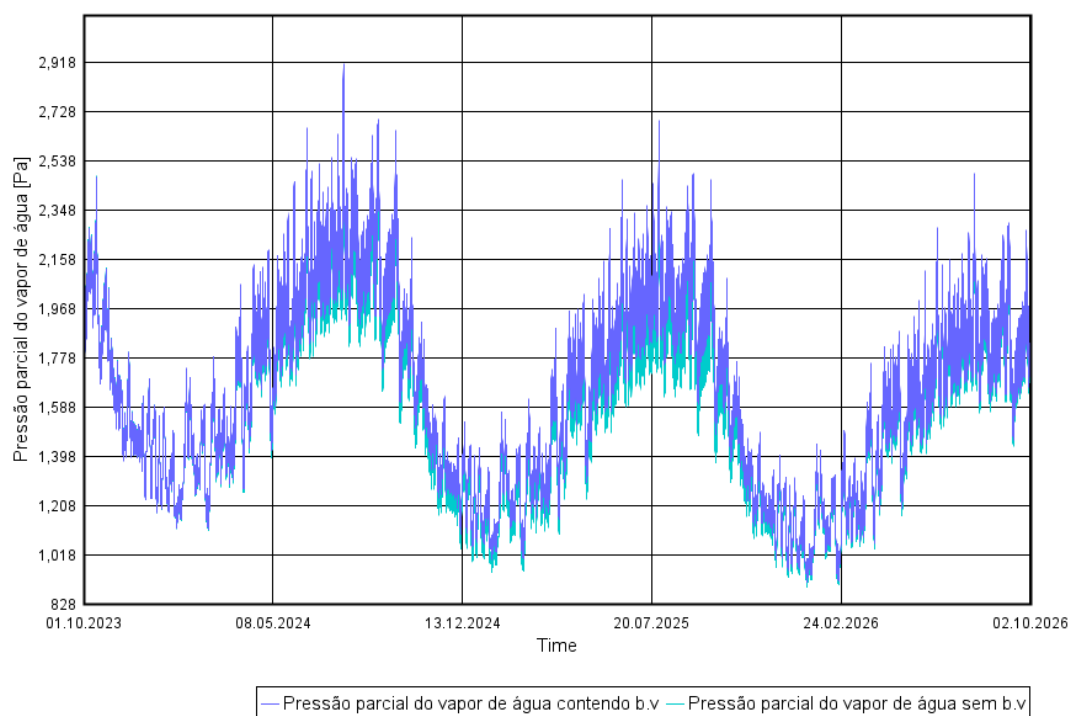


Figura 5-15: Evolução da pressão parcial do vapor de água da solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira.

Solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha

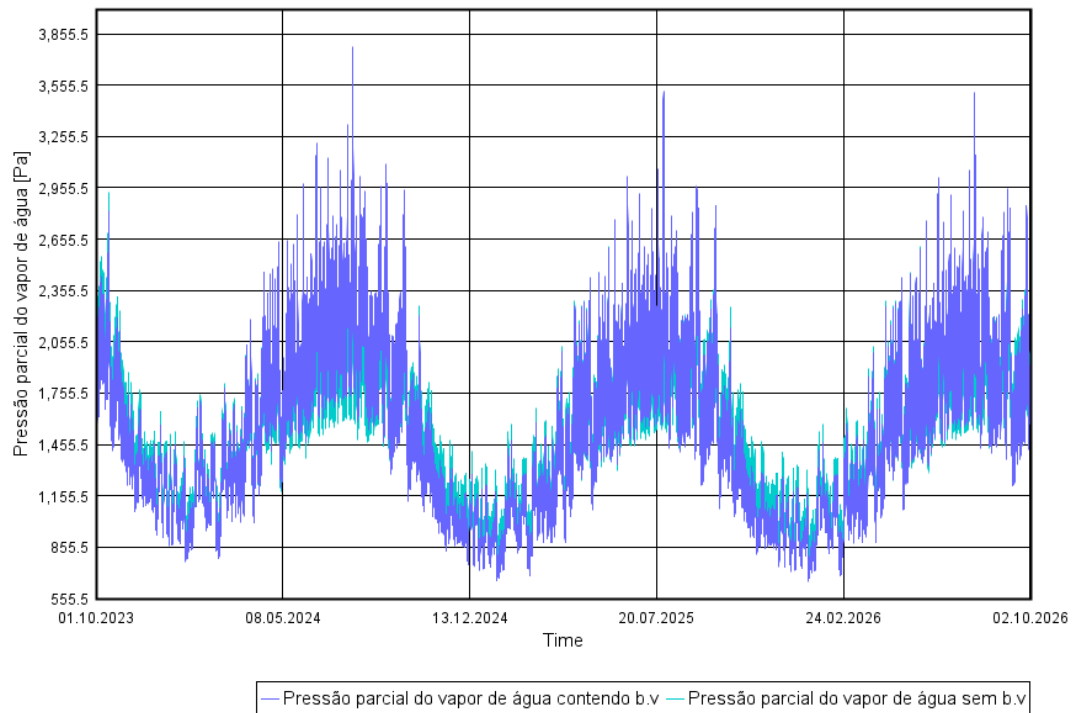


Figura 5-16: Evolução da pressão parcial do vapor de água da solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha.

Solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo

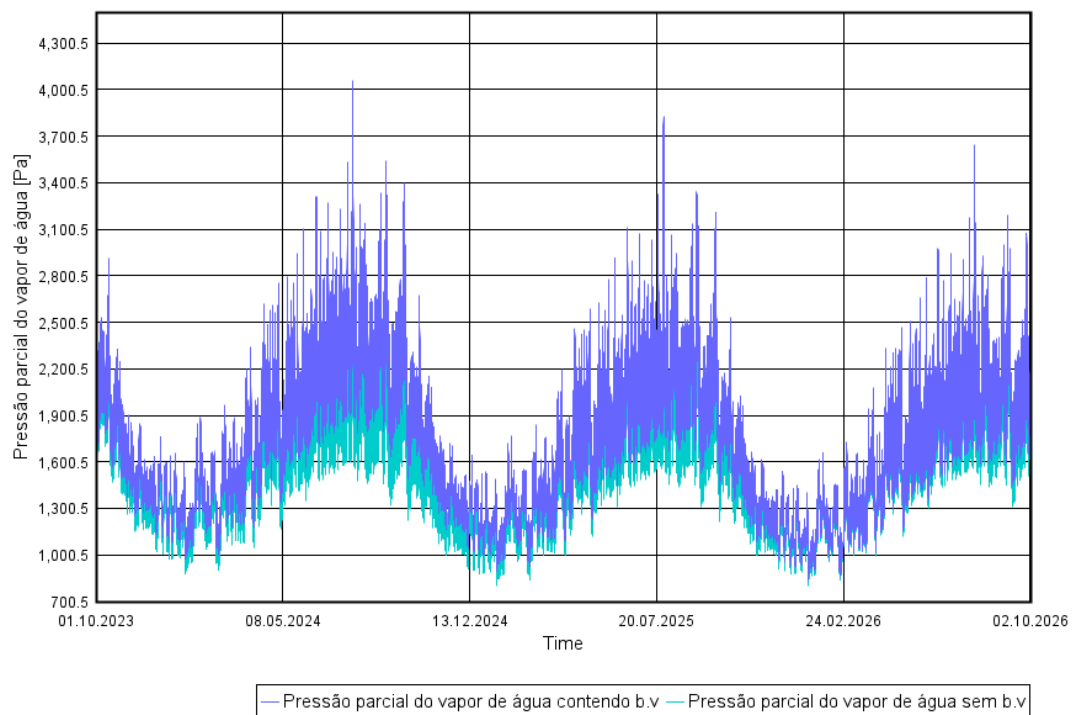


Figura 5-17: Evolução da pressão parcial do vapor de água da solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo.

[86]Em contexto de valores absolutos sem barreira ao vapor, a solução contendo isolamento de fibras de madeira apresenta um valor máximo de pressão parcial de vapor de água cerca de $2.913,8Pa$ e mínimo cerca de $891,2Pa$, a solução contendo isolamento de lã mineral de rocha um valor máximo cerca de $3.783,8Pa$ e mínimo cerca de $653,4Pa$ e a solução contendo isolamento de fibras de cânhamo um máximo cerca de $4.056,3Pa$ e mínimo cerca de $802,4Pa$ (valores máximos verificados através do software WUFI, devido a sobreposição de resultados).

O processo de difusão do vapor de água, é um processo lento que ocorre ao longo de todo o elemento construtivo. Como se pode observar pela figura 5-18, existe um claro desfaseamento temporal de resultados obtidos, no sentido em que, como as soluções construtivas ainda contém níveis consideráveis de vapor de água indexados ao início da simulação e aos meses mais frios, quando se estabelecem os meses mais quentes do ano e a consequente subida das temperaturas, manifestam-se níveis elevados de pressão parcial do vapor de água. Adicionalmente, no período frio seguinte, observa-se um declínio gradual de níveis de pressão parcial, sendo este comportamento proveniente de condições de secagem favoráveis a que as soluções foram submetidas durante o período de verão precedente.

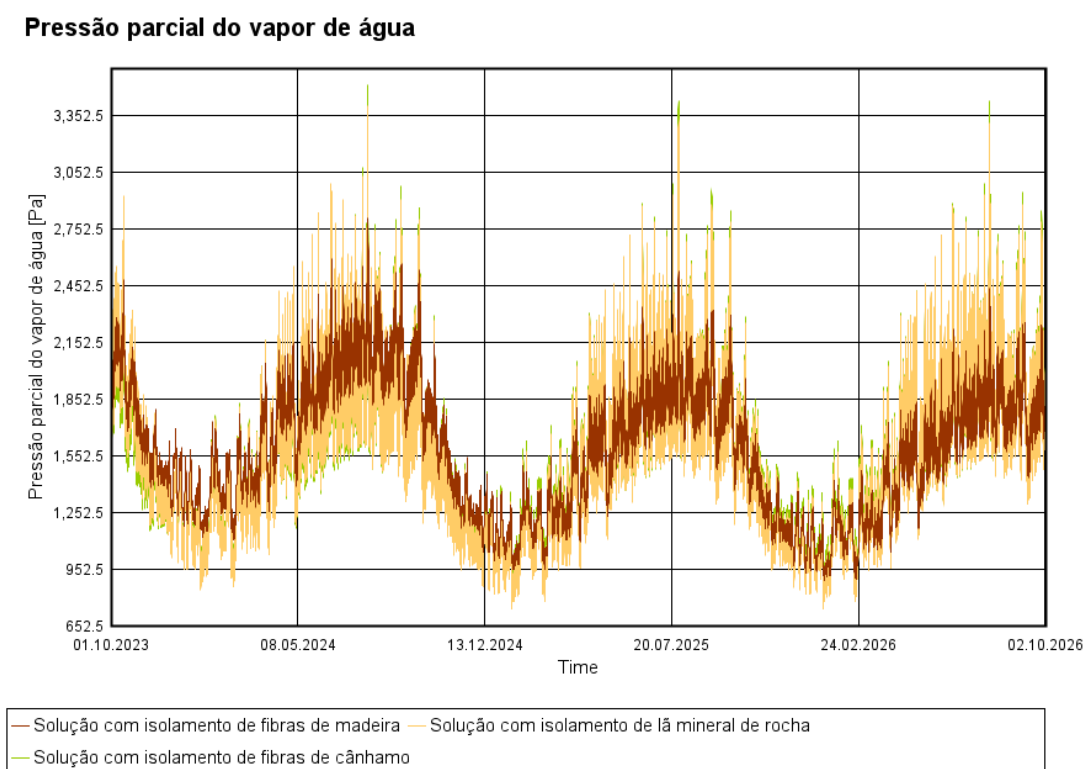


Figura 5-18: Análise comparativa das três soluções construtivas face à evolução da pressão parcial do vapor de água.

Comparando as figuras 5-14 e 5-18, associadas à análise das temperaturas e de pressões parciais de vapor de água constata-se que, ao longo do ano e nos períodos de temperaturas mais elevadas, as pressões parciais do vapor de água atingem, de igual modo, a gama de valores mais elevada no seu comportamento cíclico. Deste modo, é possível estabelecer uma

relação indireta entre os mecanismos de variação da temperatura e os resultados obtidos para as pressões parciais do vapor de água.

O aumento da temperatura está, de forma direta, relacionado com o aumento da capacidade de vapor de água que uma dada massa de ar possui e em estabelecer níveis acrescidos de pressão de saturação para a mesma massa de ar, pelo que, atua, de forma indireta, tanto na manifestação de valores elevados de humidade relativa, registados nos meses mais quentes pelo facto do processo de difusão de vapor de água ser um mecanismo gradual, como na manifestação de níveis elevados de pressão parcial exercida por este gás.

Nesta perspetiva, a solução contendo isolamento de fibras de madeira, em contraste com as restantes, apresenta a resposta mais estável ao longo dos três anos de simulação, com baixa amplitude de valores de pressão parcial do vapor de água e ocorrência de picos menos intensos. De forma semelhante ao mencionado na análise das temperaturas, um comportamento mais estável, é indicativo de menores oscilações na matriz interna dos materiais, evitando possíveis anomalias a longo prazo e preservando as suas propriedades [43].

5.5. Análise comparativa na zona do material isolante

5.5.1. Teor de água

É importante destacar que, para esta fase de análise, o material isolante selecionado para as três soluções construtivas, provém do ficheiro associado às construções sem colocação de barreira ao vapor. Deste modo, o processo de análise efetua-se no mesmo contexto que o realizado para o elemento construtivo como um todo.

Pela análise do gráfico associado aos níveis de teor de água na zona do isolamento térmico para as três soluções construtivas (figura 5-19) observa-se, de forma célebre, o comportamento da lã mineral de rocha demonstrando, ao longo de todo o período de estudo, valores absolutos bastante reduzidos com pequena taxa de flutuação.

Teor de água

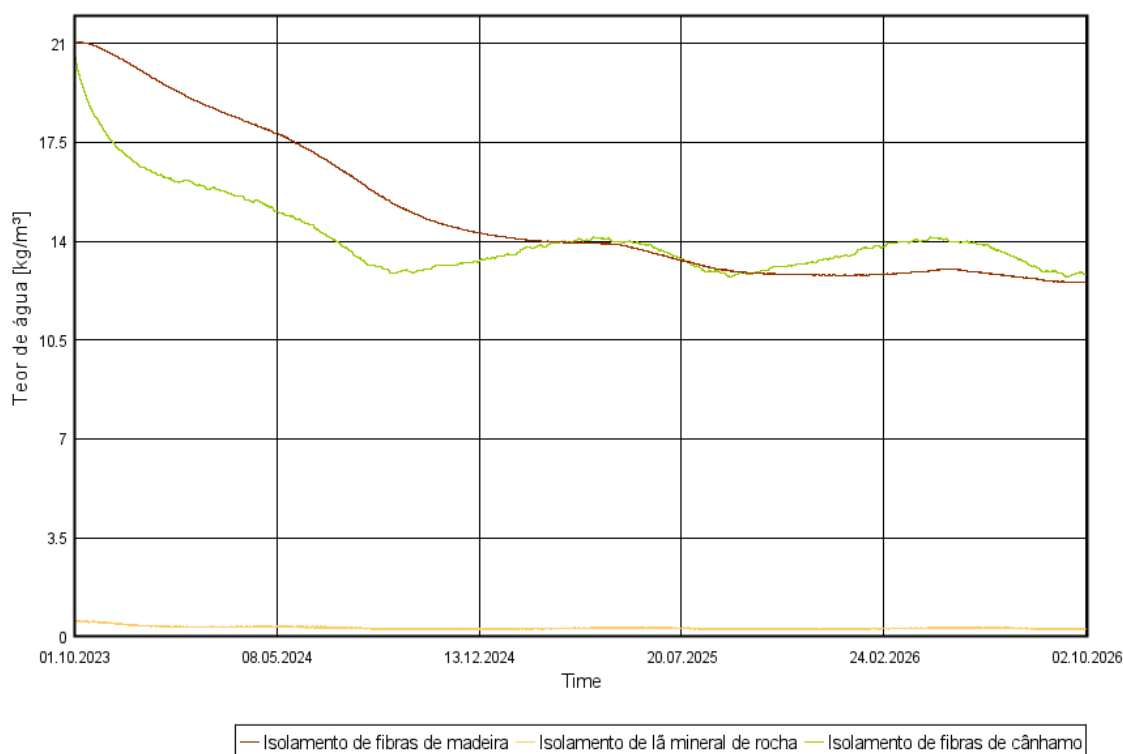


Figura 5-19: Análise comparativa das três soluções construtivas na zona do material isolante face à evolução do teor de água.

Efetuada a ponte com os valores obtidos para o teor de água na análise comparativa das soluções construtivas, estabelece-se um comportamento análogo. Verifica-se, neste contexto, um melhor desempenho por parte da solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha face às restantes soluções, tendo igualmente uma diferença significativa em termos de valores absolutos, sendo indicativo do melhor comportamento registado para esta grandeza.

No que se refere ao comportamento registado para os restantes materiais de isolamento, ambos demonstram valores de teor de água muito próximos ao longo de todo o ano com variação de 21kg/m^3 a $13,5\text{kg/m}^3$. As soluções construtivas nas quais estão incorporados, apresentam uma gama de valores equiparados, pelo que, surge como um ponto de fragilidade, visto que seria expectável o material isolante apresentar valores benéficos, fora da gama de valores registada para a respetiva solução construtiva. Tal acontece para a lã mineral de rocha que, face ao intervalo de teor de água da solução construtiva respetiva, 9kg/m^3 a 14kg/m^3 , apresenta valores num intervalo na ordem de 1kg/m^3 , sendo este, um indicador de bom desempenho do próprio material, por apresentar uma velocidade de secagem superior à da parede na sua totalidade.

À luz das características dos materiais de isolamento mencionadas na introdução do presente capítulo, verifica-se uma correspondência positiva. Sendo a lã mineral de rocha o material isolante com menor fator de resistência à difusão de vapor de água, maior grau de hidrofobia, baixa capilaridade e baixa higroscopicidade, obteve-se os resultados expectáveis, ou seja, níveis absolutos de teor de água e humidade relativa menores face aos materiais de

isolamento compostos por fibras de madeira e cânhamo que, por demonstrarem maior capilaridade e higroscopicidade, confirmam a gama de valores de teor de água e humidade relativa superior expectável.

No primeiro ano de simulação, observa-se um conjunto de resultados desfavoráveis para a solução contendo isolamento de fibras de madeira, contudo, a partir de dezembro de 2024, verifica-se uma aproximação de valores entre a sua curva respetiva e a curva associada às fibras de cânhamo. A partir dos meses de maio/junho, a solução com fibras de madeira, evidencia um comportamento mais vantajoso, estabelecendo-se numa gama de valores inferiores até ao término da simulação, colocando assim, a solução com fibras de cânhamo na posição mais desvantajosa a adotar.

Deste modo, em domínio capilar, o isolamento de lã mineral de rocha foi o que apresentou os melhores resultados, indicando que este material de isolamento, por demonstrar baixos níveis de teor de água, encontra-se mais seco que os restantes, estando assegurado um bom desempenho.

5.5.2. Humidade relativa

Apesar da lã mineral de rocha, em domínio capilar, demonstrar ser o material isolante que se encontra mais seco, com base na análise da figura 5-20, em domínio higroscópico, apresenta, na sua estrutura porosa, uma resposta mais reativa perante variações de níveis de humidade relativa. As curvas associadas aos isolamentos de fibras de madeira e fibras de cânhamo, demonstram um comportamento de carácter mais sinusoidal.

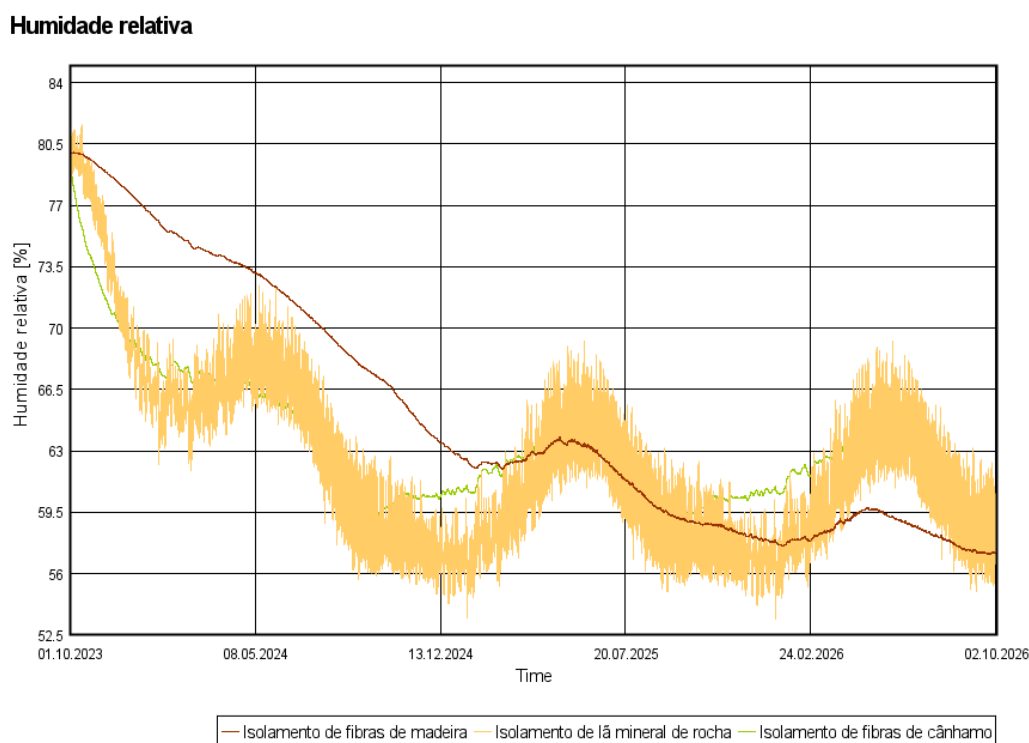


Figura 5-20: Análise comparativa das três soluções construtivas na zona do material isolante face à evolução da humidade relativa.

Avaliando a tabela 3-2, onde encontram-se expressas as propriedades dos materiais isolantes utilizados, verifica-se que, em termos de porosidade, os três materiais isolantes demonstram valores muito aproximados, porém, o fator de resistência à difusão do vapor de água, funciona como a propriedade que diferencia a lã mineral de rocha dos demais, sendo que, associado a este material isolante, está o menor valor desta grandeza.

Deve-se destacar o facto dos números de passos de simulação, encontrarem-se inseridos exatamente no mesmo registo para as três soluções, pelo que, o comportamento errático com momentos de maior amplitude registado para a lã mineral de rocha será, eventualmente, devido às características do próprio material.

A particularidade deste material exibir o menor valor de fator de resistência à difusão do vapor de água, permitindo um processo de difusão de vapor de água mais facilitado, torna-o mais volátil na resposta a variações de níveis de humidade relativa. Adicionalmente, o comportamento registado, pode ser indicativo de uma organização da matriz porosa que origina uma resposta mais tortuosa, levando a que o processo de difusão de vapor de água não se dê de forma tão linear e que a sua passagem através do material seja mais turbulenta.

Neste sentido, com base na caracterização dos materiais disponibilizada pelo software, mediante os resultados obtidos e as propriedades dos materiais testadas, é expectável que este comportamento seja consequência da informação mencionada.

Em contexto de valores absolutos, verifica-se a influência negativa por parte das condições iniciais impostas, pelo facto da zona de valores normalizados, encontrar-se significativamente abaixo da zona de valores iniciais [50]. O isolamento de fibras de madeira, demonstra um comportamento decrescente ao longo dos três anos, nunca atingindo os máximos registados no ano anterior. Contrariamente, os restantes materiais isolantes, a partir de dezembro de 2024, demonstram um comportamento lateralizado, respeitando os máximos e mínimos impostos ao longo do tempo.

Para as fibras de madeira, registou-se um valor máximo de humidade relativa cerca de 80% e mínimo cerca de 57,5%, para a lã mineral de rocha um máximo cerca de 81% e mínimo cerca de 53% e para as fibras de cânhamo um máximo cerca de 80% e mínimo de 61%.

No primeiro ano de análise, as fibras de madeira alegavam ser a opção mais desvantajosa a adotar, porém, a partir do mês de junho de 2024 e sem influência das condições iniciais de simulação, este material posicionou-se numa gama de valores inferior comparativamente às fibras de cânhamo.

Apesar da lã mineral de rocha apresentar os valores mínimos de humidade relativa de entre os três materiais, o seu comportamento instável ao longo do tempo com picos de grande amplitude, pode contribuir para o desenvolvimento de anomalias no próprio material, desafiando o bom funcionamento das suas valências, pelo que, o isolamento em fibras de madeira, ao apresentar um comportamento estável, uma tendência decrescente e valores mínimos muito aproximados dos da lã mineral de rocha, intervém como a solução mais benéfica a adotar-se.

5.5.3. Temperatura

Mediante a observação do gráfico de perfis de temperatura para os três materiais isolantes (figura 5-21) constata-se, de modo semelhante à análise do elemento construtivo na sua totalidade, um conjunto de resultados muito correspondentes para as três situações, sendo que, as fibras de cânhamo, apresentam a resposta mais instável com picos de maior amplitude tanto para valores máximos como para valores mínimos e o isolamento de fibras de madeira, exibe a resposta mais estável ao longo dos três anos. As três curvas apresentam um desenvolvimento sinusoidal, sendo respeitados os valores mínimos e máximos impostos em cada ano.

Os vários materiais que incorporam a solução construtiva e a sua sequência de posicionamento influenciam, em certa medida, as condições de resposta do material isolante, pelo que, recorrer às suas propriedades, eleva a qualidade de conclusões formuladas.

Temperatura

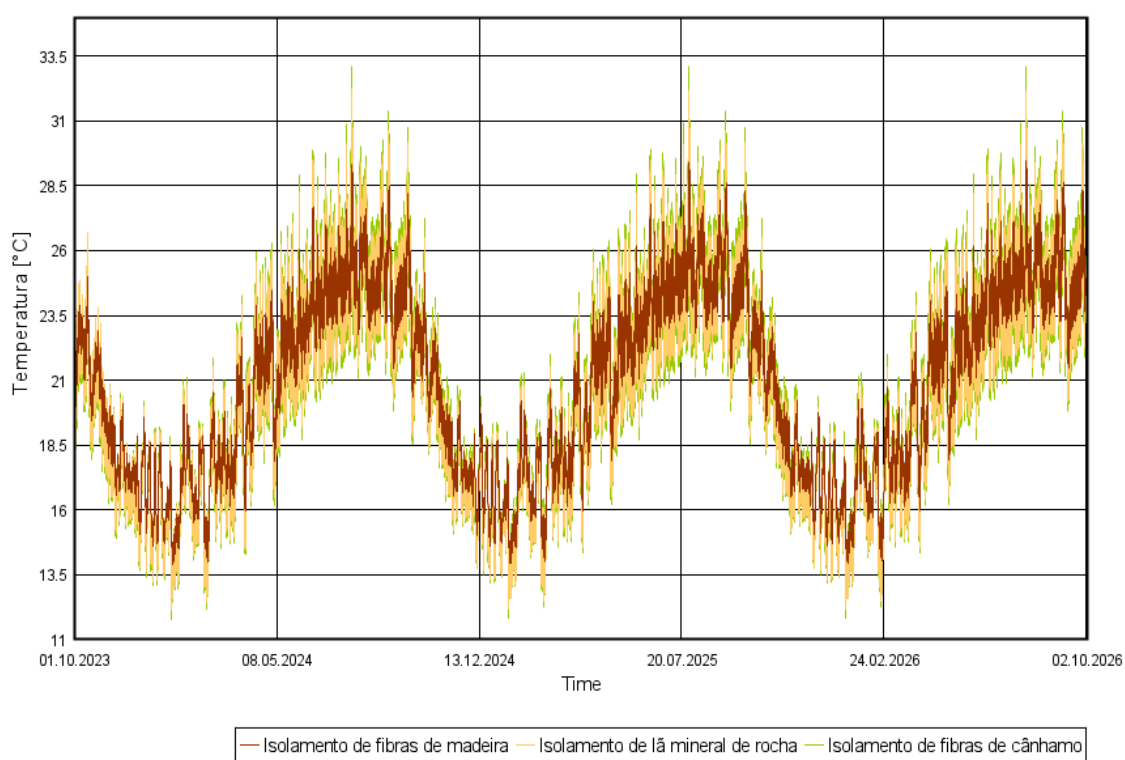


Figura 5-21: Análise comparativa das três soluções construtivas na zona do material isolante face à evolução da temperatura.

Os três materiais isolantes, exibem um valor de condutibilidade térmica muito aproximado, não podendo esta grandeza, ser tida em consideração como objeto de diferenciação. Neste sentido, o comportamento mais estável associado às fibras de madeira face aos restantes materiais, pode estar relacionado com a colocação de materiais em contínuo, sem existência de zona de espaço de ar, substituindo-a por uma placa de cortiça que apresenta menor valor de condutibilidade térmica ($0,0397 \text{ W/mK}$), face ao conjunto zona de espaço de ar+placa de madeira e cimento presente nas restantes soluções, com valor total de condutibilidade térmica

de $0,53 \text{ W/mK}$. Adicionalmente, a existência de uma zona de espaço de ar, contribui para que o processo de transferência de calor seja mais facilitado para o interior da parede, para além de funcionar como uma zona mais próxima do material isolante e, portanto, de influência acrescida, onde se registam temperaturas semelhantes às do exterior.

Visto que os isolamentos de fibras de cânhamo e lã mineral de rocha, apresentam um valor de condutibilidade térmica muito semelhante, a pequena diferença de valores de temperatura registada para estes materiais poderá, eventualmente, estar relacionada com a ausência de uma placa de OSB, no sentido para o interior, na solução que incorpora isolamento de fibras de cânhamo. A ausência deste material, implica um aumento de transferência de calor através da parede, dando origem a picos mais elevados no material isolante.

Em termos de valores absolutos, a solução com fibras de madeira, apresenta um valor de temperatura máximo cerca de 29°C e mínimo cerca de 14°C , a solução com lã mineral de rocha um máximo cerca de 32°C e mínimo cerca de 12°C e a solução com fibras de cânhamo um valor máximo cerca de 33°C e mínimo cerca de $11,5^{\circ}\text{C}$.

Face ao presente contexto, o material isolante composto por fibras de madeira, manifesta ser o mais adequado face aos pressupostos assumidos no presente estudo, por apresentar o comportamento mais estável ao longo dos três anos. Existem diversos benefícios envolvidos como um menor risco de condensações na estrutura interna do isolante, menor expansão e contração térmica, menor risco de degradação do material e conservação de eficácia térmica e acústica.

5.5.4. Pressão parcial do vapor de água

De forma comparável ao registado para as três soluções construtivas na sua fase de análise integral (figura 5-22), verifica-se um comportamento semelhante demonstrado pelas grandezas de temperatura e pressão parcial do vapor de água, sendo que, na presente análise, a resposta dos três materiais isolantes, é idêntica à das soluções construtivas nas quais encontram-se inseridos, sendo possível reforçar a elevada influência desta secção de revestimento.

Entre os meses frios de outubro de 2023 e abril de 2024, inseridos no período inicial de simulação, as curvas associadas aos materiais isolantes de lã mineral de rocha e fibras de cânhamo, encontram-se numa gama de valores inferior face à curva referente ao isolamento de fibras de madeira, porém, a partir de maio de 2024, observa-se um aumento significativo de amplitude de valores para as duas primeiras e uma resposta tendencialmente mais estável associada ao isolamento de fibras de madeira. É possível aferir o comportamento anterior pelo facto da lã mineral de rocha e fibras de cânhamo, apresentarem uma resposta lateralizada ao longo dos três anos, enquanto se observa uma diminuição contínua de valores para o isolamento de fibras de madeira, com aproximação aos mínimos das restantes curvas e valores máximos cada vez menores.

Pressão parcial do vapor de água

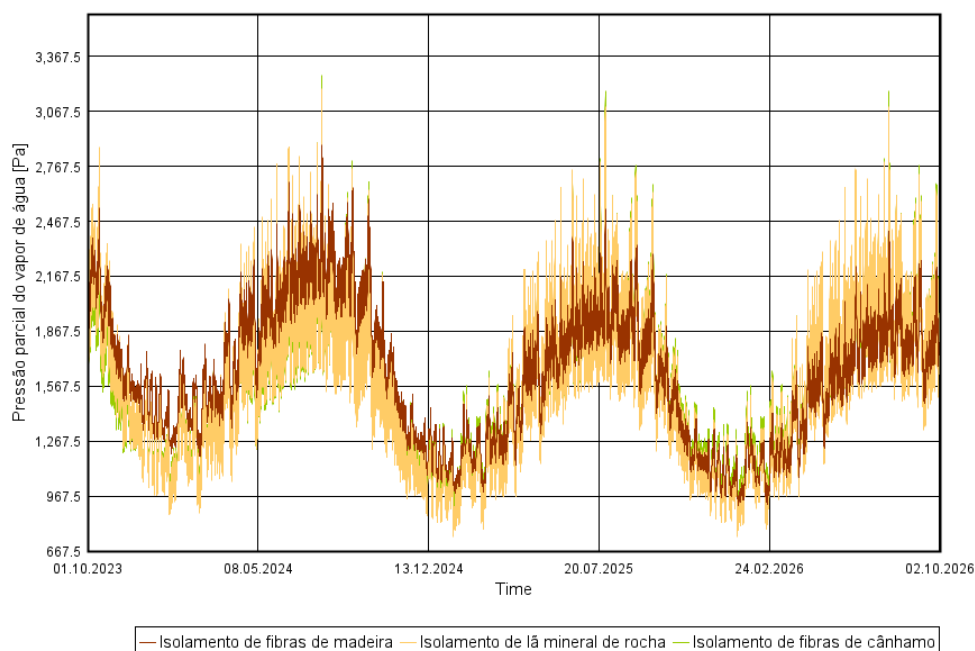


Figura 5-22: Análise comparativa das três soluções construtivas na zona do material isolante face à evolução da pressão parcial do vapor de água.

Como mencionado anteriormente, o aumento da temperatura influencia, de forma indireta, os níveis de pressão parcial do vapor de água, contribuindo para a sua manifestação, pelo que, associados a valores elevados de pressão parcial do vapor de água, encontram-se níveis superiores de humidade relativa presente na construção.

Apesar dos gráficos de temperatura e pressão parcial do vapor de água apresentarem, desde uma fase inicial, uma elevada concordância de resposta e o gráfico de humidade relativa, um desfasamento temporal inicial mais significativo, a partir do mês de maio de 2024, a comparação das três grandezas, converge para conclusões plausíveis. A partir desta data e nos meses onde se registam maiores temperaturas, assinalam-se níveis elevados de humidade relativa, sendo que, os isolamentos de lã mineral de rocha e fibras de cânhamo, apresentam níveis de humidade mais elevados face às fibras de madeira o que, torna expectável, níveis de pressão parcial do vapor de água igualmente superiores para os isolamentos de lã mineral de rocha e fibras de cânhamo. Pela análise do gráfico das pressões parciais, observa-se o comportamento expectável, tendo os isolamentos de lã mineral de rocha e fibras de cânhamo níveis superiores, nos meses mais quentes, face às fibras de madeira.

Perante este comportamento, é possível associar as condições iniciais de simulação à obtenção de valores irreais e seleccionar o isolamento de fibras de madeira como a opção mais vantajosa pela sua resposta mais estável e tendencialmente compensadora ao longo do tempo.

5.6. Análise de risco de ocorrência de condensações internas

Quando num ponto qualquer situado no interior de uma parede, a pressão parcial do vapor de água que atravessa o elemento construtivo por difusão, iguala o valor da pressão de saturação a uma certa temperatura nesse mesmo ponto, o ar não consegue acumular mais humidade em forma de vapor, dando origem a fenómenos de condensações internas [5]. Neste cenário, os materiais que compõem o elemento construtivo, encontram-se expostos a condições facilitadas de absorção de água sendo, naturalmente, uma situação prejudicial para a integridade da estrutura. Neste sentido, é de enorme importância, no estudo de implementação de uma solução construtiva, avaliar o risco de ocorrência de condensações internas, com o objetivo de assegurar condições saudáveis no interior da parede.

Para a presente análise, recorreu-se ao método de Glaser. A aplicação desta abordagem, permite avaliar o risco de ocorrência de condensações internas ao longo de uma parede, sendo necessário dispor de várias informações, como a espessura de todos os materiais de construção que constituem o elemento, propriedades dos materiais relacionadas com a permeabilidade ao vapor de água e dados associados à variação das grandezas de temperatura e pressão parcial do vapor de água num período temporal definido.

O método implica, numa fase inicial, o cálculo direto de valores de pressão de saturação a partir de valores de temperatura retirados do software de simulação, utilizando a fórmula de Tetens, apresentada posteriormente. Seguidamente, em contexto de difusão de vapor de água e para cada material de construção, calcula-se a espessura da camada de ar de difusão equivalente, com principal objetivo de substituir a espessura de um material, pela espessura de uma camada de ar que apresente o mesmo valor de permeância [5]. Para esse efeito, com base no fator de resistência à difusão do vapor de água para cada material retirado da tabela 3 e o valor médio da permeabilidade ao vapor de água do ar, em unidades SI, de $1,9 \times 10^{-10} \text{ kg/m.s.Pa}$, é possível calcular a permeabilidade ao vapor de água do material em questão e o respetivo valor da camada de ar de difusão equivalente.

Em seguimento do contexto apresentado, a equação de Tetens para cálculo das pressões de saturação (Equação 5-1), a equação para cálculo da permeabilidade do material (Equação 5-2) e a equação de cálculo da camada de ar de difusão equivalente (Equação 5-3) são, respetivamente:

$$P_s = 610,5 \times e^{\frac{17,269 \times T}{237,3 + T}} \quad (5-1)$$

Onde:

P_s Pressão de saturação [Pa];

T Temperatura [°C].

$$\mu = \frac{\delta_{ar}}{\delta_{material}} \quad (5-2)$$

Onde:

μ Fator de resistência à difusão do vapor de água [-];
 δ_{ar} Valor médio da permeabilidade ao vapor de água do ar ($1,9 \times 10^{-10}$) [kg/m.s.Pa];
 $\delta_{material}$ Permeabilidade ao vapor de água do material [kg/m.s.Pa].

$$Sd = 1,9 \times 10^{-10} \times \frac{d}{\delta_{material}} \quad (5-3)$$

Onde:

Sd Camada de ar de difusão equivalente [m];
 d Espessura do material [m];
 $\delta_{material}$ Permeabilidade ao vapor de água do material kg/m.s.Pa.

Como referido na secção de análise higrotérmica das soluções construtivas, observa-se um desfasamento temporal em termos de valores de pressão parcial de vapor de água, levando à manifestação de resultados elevados desta mesma grandeza, no período de temperaturas mais altas. Apesar de se verificarem níveis menores de pressão parcial de vapor de água nos meses mais frios, o risco de ocorrência de condensações internas também existe, podendo mesmo ser superior, devido ao efeito de temperaturas mais baixas nos meses de inverno.

Sob este prisma, tendo como referência inicial o período de simulação de três anos, estabeleceram-se dois intervalos de análise focados nos meses quentes e frios entre o segundo e terceiro anos de simulação, mais concretamente entre 1 de maio de 2025 e 1 de outubro de 2025 e entre 1 de outubro de 2025 e 1 de maio de 2026 respetivamente, onde, adicionalmente, o efeito das condições iniciais impostas é quase inexistente.

No período de meses mais quentes selecionou-se, para cada solução, o dia e a respetiva hora, onde o valor de pressão parcial do vapor de água demonstrou um resultado máximo tendo, de igual modo, atenção ao valor de temperatura associado a essa medição.

Para cada solução construtiva, no período de meses mais frios, procurou-se identificar o dia e a hora onde registou-se menor valor de temperatura, retirando o respetivo valor de pressão parcial do vapor de água. Nas situações em que a temperatura mínima prevaleceu por mais de uma hora no mesmo dia, selecionou-se a hora que apresentou maior valor de pressão parcial do vapor de água.

A procura das condições mais propícias à ocorrência de condensações ao longo da parede, tendo por base os dados recolhidos da resposta do elemento como um todo, insere cada um dos vários materiais num contexto desfavorável e alvo de análise.

Neste sentido, para o período quente, a solução contendo isolamento de fibras de madeira apresentou, para o dia 28/07/2025 às 19h00, um valor máximo de pressão parcial do vapor de água de 2989Pa com um valor de temperatura associado de 30,3°C, a solução contendo isolamento de lã mineral de rocha, exibiu um valor máximo de pressão parcial de 3717Pa com temperatura de 33,5°C às 18h00 do dia 28/07/2025 e, por fim, no dia 28/07/2025 às 18h00, a solução contendo isolamento de fibras de cânhamo, apresentou um valor máximo de pressão parcial de 3734Pa com uma temperatura associada de 34,4°C.

Na época de meses mais frios, a solução contendo isolamento de fibras de madeira, recaiu sobre o dia 16/01/2026, apresentando um valor mínimo de temperatura de 13,2°C e pressão parcial do vapor de água de 1131,3Pa às 05h00 da manhã, a solução contendo isolamento de lã mineral de rocha, demonstra um valor mínimo de temperatura de 11,2°C com valor de pressão parcial associado de 883,6Pa para o dia 14/01/2026 às 08h00 da manhã e, por fim, para o dia 14/01/2026 às 08h00 da manhã, a solução contendo isolamento de fibras de cânhamo, apresentou um valor mínimo de temperatura de 10,5°C com valor de pressão parcial associado de 915,8Pa.

Para cada hora selecionada, avaliar-se-á as condições de temperatura e pressão na superfície de cada material.

De notar a proximidade das datas selecionadas em cada período, como indicativo de uma resposta enquadrada no tempo e uma comparação de resultados favorável.

Avaliou-se, para os períodos referidos, a resposta por parte das três soluções construtivas sem incorporação de barreira ao vapor, sendo que, para cada solução desenvolvida, estabeleceu-se um gráfico de perfil de temperaturas e de pressões (pressão de saturação e pressão parcial do vapor de água) ao longo da espessura da parede, estando esta, dividida, consoante a camada de ar de difusão equivalente de cada material, favorecendo uma representação linear.

Para cada uma das soluções (figuras 5-23, 5-24, 5-25), os gráficos de perfil de temperaturas (a1) e pressões (b1), referentes ao período frio de análise, encontram-se posicionados na coluna da esquerda e os gráficos de perfil de temperaturas (a2) e pressões (b2), para o período quente de análise, encontram-se posicionados na coluna da direita.

Pela observação dos gráficos de perfis de temperatura e pressões de vapor associados à solução contendo isolamento de fibras de madeira (figura 5-23, a1 e b1), não se observa ocorrência de fenómenos de condensações internas ao longo da parede, tanto para o dia frio selecionado como para o dia quente, pela não interseção das curvas de pressão parcial e pressão de saturação em ambos os cenários.

Relativamente ao dia inserido no período frio, as temperaturas apresentam um decréscimo significativo, do interior para o exterior, ao longo da espessura da parede, sendo que, na placa de gesso cartonado registou-se uma temperatura de 19,5°C e na placa de cortiça um valor de temperatura de 4,8°C, sendo indicativo de que a construção perdeu calor de forma expressiva do interior da habitação para o meio exterior.

As pressões parciais, numa fase inicial, tendem a aumentar ligeiramente, atingindo o seu valor máximo na camada de OSB de 1823Pa, sendo que, após contacto com o material

isolante, decrescem progressivamente até à camada de cortiça exterior, tendo sido atingido um valor mínimo de 660Pa.

Relativamente ao dia inserido no período quente de análise (figura 5-23, a2 e b2), o elemento construtivo demonstra uma variação de temperatura considerável, sendo que, registou-se uma temperatura de 24,8°C na placa de gesso cartonado e de 40,8°C na placa de cortiça à vista. Neste cenário, o processo de transferência de calor estabelece um sentido do exterior para o interior, aumentando diretamente os níveis de pressão de saturação em todos os materiais.

As pressões parciais, demonstram um aumento contínuo até à camada de OSB próxima do ambiente exterior, onde registou-se um valor máximo de pressão parcial de 4422Pa. Ao atravessar a camada de cortiça, observa-se uma queda repentina de pressões parciais. O declínio observado, pode estar diretamente relacionado com a elevada permeabilidade da cortiça à difusão do vapor de água e do seu posicionamento em contacto direto com o ambiente exterior. Deste modo, a migração do vapor de água através do material torna-se facilitada, sendo o mesmo direcionado para um ambiente onde se estabelece um equilíbrio favorável de pressões entre a interface da cortiça e o ambiente exterior.

O posicionamento da cortiça em contacto com o exterior, força a saída do vapor de água do interior da construção, impedindo a sua acumulação nos restantes materiais e diminuindo o risco de ocorrência de condensações internas [46].

Considerando que o risco de ocorrência de condensações internas é maior, quanto menor for a diferença entre as duas grandezas de pressão, no período frio, o maior risco estabelece-se no material isolante e na placa de cortiça e no período quente, na placa de OSB próxima do domínio interior da fração.

Em termos absolutos, verifica-se uma maior diferença entre os valores das duas curvas de pressão para o período quente, pelo facto do aumento de temperatura, aumentar consideravelmente os níveis de pressão de saturação estando associado, a este período, um menor risco.

5.6.1. Solução contendo isolamento de fibras de madeira

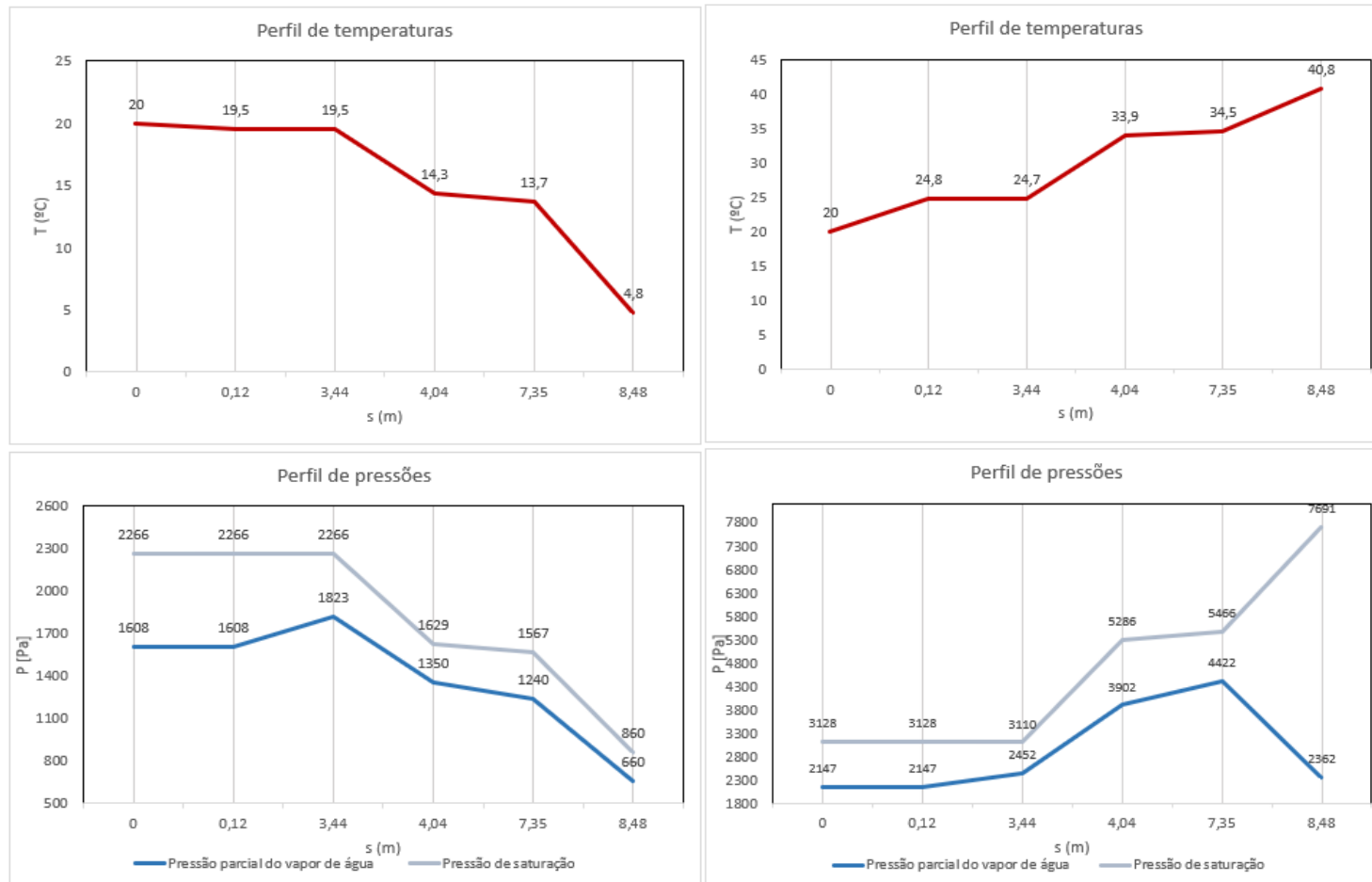


Figura 5-23: Análise do risco de ocorrência de condensações internas para os períodos frio e quente, associada à solução contendo isolamento de fibras de madeira.

Analisando os gráficos de perfis de pressão e temperatura para a solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha (figura 5-24) constata-se, de forma explícita, um risco muito elevado de ocorrência de fenômenos de condensações internas no período frio de análise, pelo diferencial muito reduzido entre as curvas de pressão parcial e de saturação (figura 5-24, b1), mais concretamente, na interface entre o material isolante e a placa de OSB.

Para este período, em contexto de temperaturas (figura 5-24, a1), registou-se uma amplitude térmica significativa entre o material em contacto com o meio interior e o material que interage com o exterior, sendo que, para a placa de gesso cartonado, obteve-se uma temperatura de 19,3°C e para a placa de madeira e cimento uma temperatura de 1,5°C.

De notar a diminuição abrupta de valores de temperatura ao longo da espessura do material isolante, estando relacionada, de forma direta, com as propriedades térmicas do material. Sendo a lã mineral de rocha, um bom isolante térmico com baixo valor de condutibilidade térmica, impede que o fluxo de calor, proveniente do interior da habitação, migre para os restantes materiais. Apesar desse comportamento ser vantajoso em termos de conforto térmico, o facto de ocorrer de forma tão repentina e instável, pode conduzir a níveis de temperatura abaixo das condições do ponto de orvalho, resultando na formação de gotículas de água na matriz do material isolante e após o isolamento térmico.

Em contexto de pressões, para o mesmo período, a pressão parcial do vapor de água registada para a placa de gesso cartonado foi de 1502Pa e para a placa de madeira e cimento de 315Pa. Verifica-se o impacto direto do decréscimo da temperatura em ambas as grandezas de pressão, na camada do material isolante. A diminuição rápida da temperatura, reflete um decréscimo, igualmente rápido, da pressão de saturação, podendo estabelecer-se perto ou abaixo da pressão parcial que, pelo facto de o ar demonstrar menor capacidade de armazenamento de vapor de água, também exibe valores reduzidos. Perante este comportamento volátil, poderão reunir-se condições em que a pressão parcial exceda a pressão de saturação e ocorram condensações.

Relativamente ao dia inserido no período quente de análise (figura 5-24, a2 e b2), registou-se um aumento de temperatura de 25,4°C, na placa de gesso cartonado, até 44,3°C na placa de madeira e cimento.

No sentido do exterior para o interior, o material isolante impede que o calor proveniente do meio exterior, migre para as camadas mais internas da parede, garantido um ambiente mais fresco para os ocupantes. No entanto, como é possível verificar-se na interface entre o material isolante e a placa de OSB, ocorre um processo análogo ao descrito no período frio, apontando esta região como a mais crítica para ocorrência de condensações internas, mas com menor probabilidade de ocorrência face à zona destacada no período frio [87].

5.6.2. Solução contendo isolamento de lã mineral de rocha

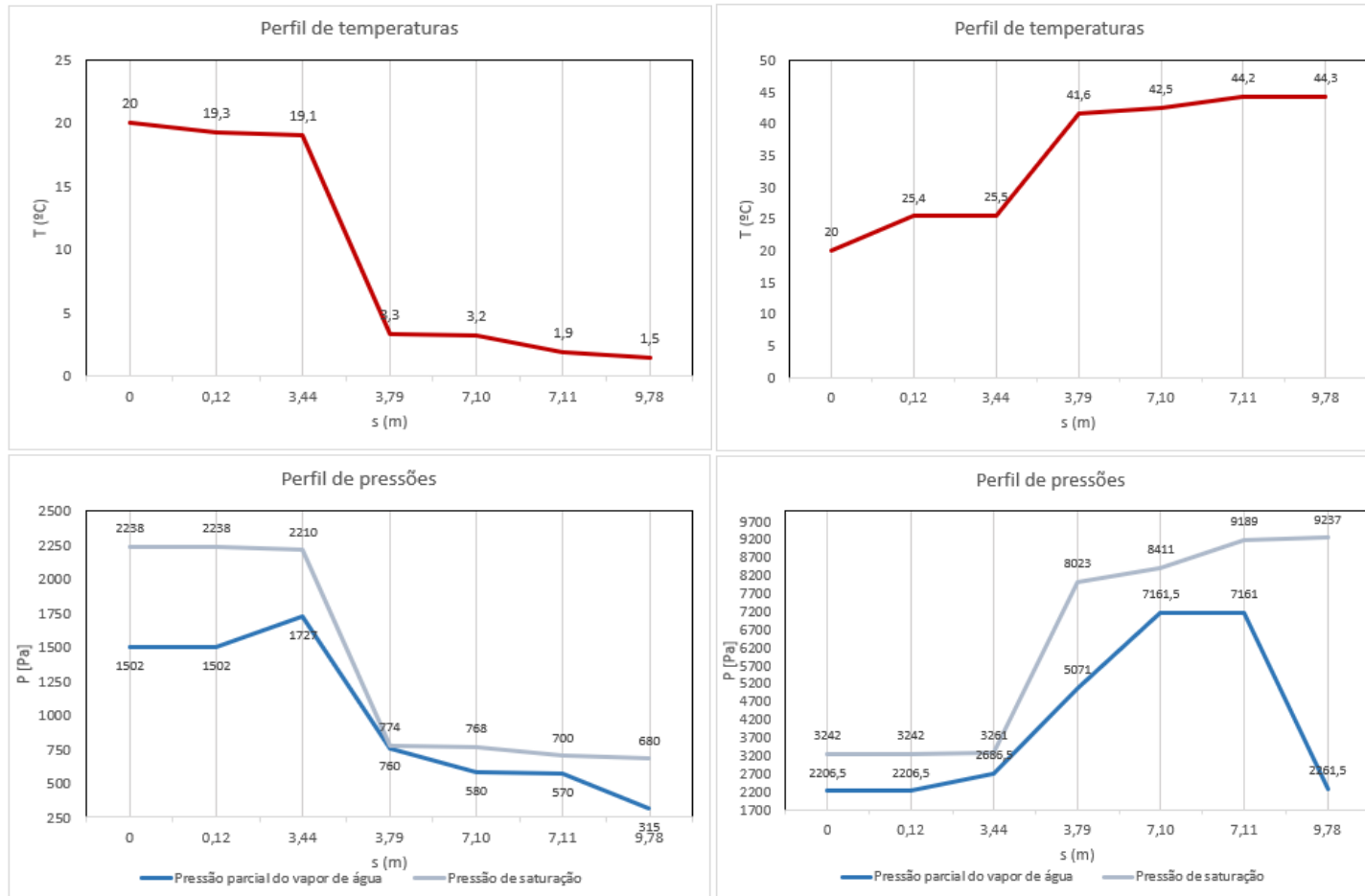


Figura 5-24: Análise do risco de ocorrência de condensações internas para os períodos frio e quente, associada à solução contendo isolamento de lã mineral de rocha.

Mediante a análise dos gráficos de perfis de pressão e temperatura associados ao elemento construtivo com isolamento de fibras de cânhamo (figura 5-25), identifica-se um comportamento semelhante ao observado na solução contendo isolamento de lã mineral de rocha.

Tendo por base a explicação dos mecanismos físicos presentes ao longo da espessura da parede, mencionados na análise anterior, verifica-se que, no dia inserido no período frio de análise (figura 5-25, a1 e b1), o risco de ocorrência de condensações internas é maior na interface entre o material isolante e a placa de OSB e para o dia inserido no período quente de análise, na interface entre o material isolante e o revestimento interior de placa de gesso cartonado.

Individualizando o período frio de análise, em contexto de temperaturas (figura 5-25, a1), registou-se uma temperatura de 19,2°C para o material de revestimento interior e uma temperatura de 1,6°C para o material em contacto com o meio exterior, tendo ocorrido uma diminuição abrupta de valores de temperatura ao longo do material isolante, sendo indicativo de que, tal como a lã mineral de rocha, as fibras de cânhamo demonstram um comportamento reativo, à passagem do fluxo de calor e, por isso, um maior risco de ocorrência de condensações internas. As fibras de cânhamo, conduziram a uma diminuição de temperatura de 19,2°C para 4°C.

Na passagem do material isolante para a placa de OSB, o diferencial de pressões é mínimo, tendo sido obtido um valor de pressão parcial de 675Pa e de pressão de saturação de 813Pa (figura 5-25, b1).

Relativamente ao período quente de análise, o perfil de temperaturas (figura 5-25, a2), exibe uma temperatura de 25,4°C para a placa de gesso cartonado, com aumento até um valor de 44,7°C para a placa de madeira e cimento. Ao longo do material isolante, a temperatura variou de 25,4°C até 41,5°C.

Em contexto de pressões (figura 5-25, b2), mais concretamente na passagem do material isolante para o revestimento interior, registou-se um valor de pressão parcial de 2395,5Pa e de pressão de saturação de 3242Pa, sendo esta, a região com maior aproximação de valores de pressão ao longo da espessura da parede.

De modo geral, o risco de ocorrência de condensações internas é menor no período quente face ao período frio, pelo facto de se registarem temperaturas elevadas ao longo de toda a espessura da parede, estabelecendo condições acima da temperatura do ponto de orvalho. Em adição ao aumento de níveis de pressão de saturação pelo aumento da temperatura, a existência da zona de espaço de ar, contribui como região estabilizadora de pressões parciais de vapor de água, aumentando o intervalo entre as duas curvas de pressão e, conseqüentemente, diminuindo consideravelmente a formação de gotículas no estado líquido [36].

5.6.3. Solução contendo isolamento de fibras de cânhamo

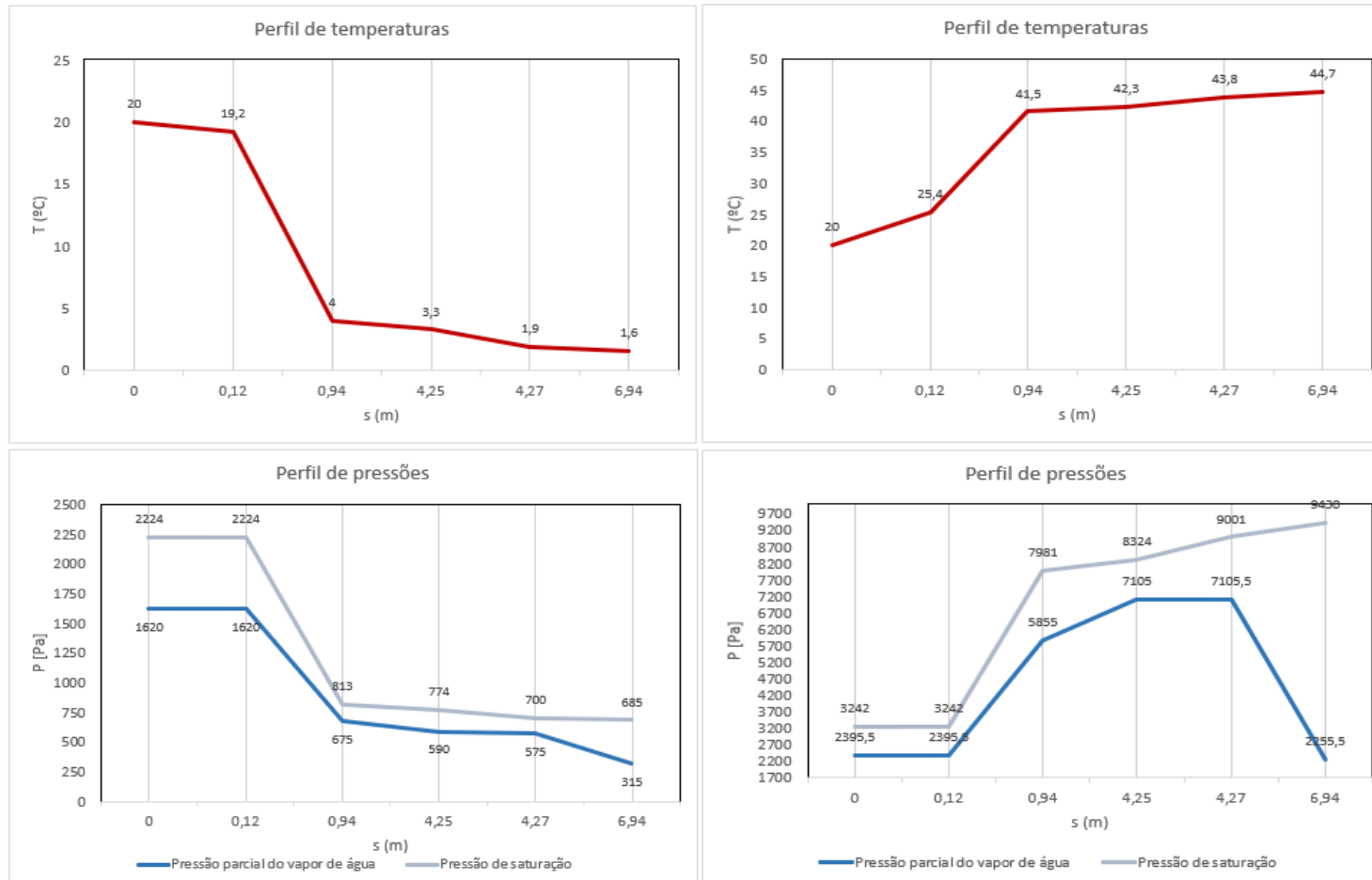


Figura 5-25: Análise do risco de ocorrência de condensações internas para os períodos frio e quente, associada à solução contendo isolamento de fibras de cânhamo.

5.7. Análise de vulnerabilidade ao desenvolvimento de microrganismos fúngicos

Em seguimento da análise do risco de ocorrência de condensações internas, considerou-se benéfico estabelecer um estudo, com vista a demonstrar a vulnerabilidade ao desenvolvimento de microrganismos fúngicos ao longo da superfície interior da parede, para as três soluções construtivas.

Para além do possível risco de ocorrência de condensações no interior da parede, existem patologias com origem no desenvolvimento de fungos e bolores, que poderão levar a um conjunto de efeitos prejudiciais, como a degradação dos vários materiais, desenvolver sérios problemas estruturais em zonas de acumulação de humidade, afetar a aparência estética da parede, pelo aparecimento de manchas, causar problemas respiratórios aos ocupantes e diminuir a qualidade do ar pela sua proliferação e presença em ambiente interior, entre outros.

A utilização de materiais de origem natural no dimensionamento das soluções construtivas, confere um ambiente propício ao desenvolvimento destes microrganismos, pela existência de proteínas na sua constituição, atuando como fonte de alimento para os mesmos, pelo que, na presença acrescida de níveis significativos de humidade relativa, reúnem-se condições ótimas para o seu rápido desenvolvimento.

De modo a averiguar a presente questão, conjugou-se pontos obtidos pelo cruzamento de valores de humidade relativa e temperatura, com níveis de isopletas, sendo estes últimos, designados nas figuras 5-26, 5-27 e 5-28, como LIM1 e LIM2. O nível de isopleta LIM1, representa a zona mínima de padrões climáticos de humidade e temperatura onde ocorrerá um eventual desenvolvimento de fungos, ou seja, valores obtidos abaixo desta linha, indicam baixa probabilidade de crescimento de microrganismos e valores obtidos acima desta linha e abaixo da isopleta LIM2, representam probabilidade moderada de crescimento de fungos. A isopleta LIM2, estabelece a zona a partir da qual, o desenvolvimento de microrganismos é considerado crítico e acelerado, pelo que, valores obtidos acima deste nível, requerem ação imediata.

De notar que os níveis de isopletas encontram-se, regularmente, associados às propriedades higrotérmicas de um material que favorecem o crescimento de microrganismos na sua superfície, sendo que, diferentes materiais com características de resposta distintas, possuem diferentes níveis de isopletas. Neste sentido, perante a análise de uma parede exterior composta por vários materiais de construção, o software WUFI, disponibiliza níveis de isopletas ajustados às propriedades conjugadas e interação de todos os materiais, permitindo uma análise completa ao longo de toda parede.

Pela análise do gráfico da figura 5-26, referente à solução construtiva composta por isolamento de fibras de madeira, observa-se uma elevada concentração de resultados abaixo das isopletas LIM1 e LIM2, mais concretamente no intervalo de 12.8°C a 25.6°C de temperatura e 53.5% a cerca de 66% de humidade relativa, sendo indicativo de que, predominantemente, as condições ao longo da parede, encontram-se fora da zona de risco de desenvolvimento de

microrganismos fúngicos e que os materiais utilizados, são eficazes em controlar a sua proliferação.

Junto à isopleta LIM1, ocorre uma ligeira concentração de valores, pelo que, para condições específicas de temperatura e humidade relativa, a presente solução demonstra um risco moderado de desenvolvimento de fungos, sendo aconselhável um monitoramento contínuo desta região com vista a garantir níveis estáveis de temperatura e humidade relativa. Adicionalmente, para uma temperatura cerca de 20°C e nível de humidade relativa de 80%, o elemento construtivo apresenta resultados próximos da isopleta LIM2, remetendo para condições críticas de desenvolvimento de fungos, sendo aconselhável, para os valores referidos, uma atenção especial às condições dos vários materiais de construção.

No que se refere à solução construtiva com isolamento de lã mineral de rocha (figura 5-27), a probabilidade de desenvolvimento de organismos fúngicos permanece baixa em grande parte do tempo de análise pela concentração, abaixo de ambas as isopletas, da maioria dos resultados obtidos [44].

Verifica-se uma acumulação considerável de valores próxima da região estabelecida por ambas as isopletas, eventualmente derivada de períodos de chuva que elevam os níveis de humidade relativa da parede, sendo que, a maior percentagem reside junto à isopleta LIM1, atribuindo um risco de desenvolvimento moderado. Existe o risco crítico de desenvolvimento de microrganismos pela existência de valores muito próximos de isopleta LIM2. Neste sentido, para a presente solução, o intervalo de valores conjugado de temperatura e de humidade relativa de aproximadamente 19°C a 28°C e de 74.7% a 80% respetivamente, desempenha um papel de área vulnerável.

De um modo geral, a predominância de resultados abaixo da isopleta LIM1, indica uma resposta estável dos materiais em manter condições que previnem o aparecimento de fungos, porém, a concentração de valores observada entre as duas isopletas, exige uma monitorização acrescida, particularmente nos períodos de chuvas intensas.

Analisando o gráfico da figura 5-28, correspondente à solução construtiva com isolamento de fibras de cânhamo, constata-se, de igual modo aos gráficos das restantes soluções, uma concentração predominante de resultados abaixo das isopletas LIM1 e LIM2, sugerindo condições saudáveis dentro da parede durante grande parte do tempo. No intervalo de valores de temperatura e humidade relativa cerca de 18°C a 25°C e cerca de 76% a 80% respetivamente, verifica-se a existência de valores que ultrapassam a curva da isopleta LIM1, estabelecendo um grau moderado de desenvolvimento de microrganismos.

As condições mais frequentes de temperatura e humidade relativa obtidas no interior da parede, pela ocorrência de maior número de resultados, encontram-se nos intervalos de 21.6°C a 28.8°C e de 61.3% a 66.6%, respetivamente.

Com vista a sugerir a solução mais praticável e apresentar a que demonstra pior resultado, é importante ter em consideração não só a concentração de valores obtidos em relação às isopletas como o posicionamento, em termos de valores absolutos, das mesmas.

Em termos de concentração de resultados na região entre as isopletas LIM1 e LIM2, as soluções contendo isolamento de fibras de madeira e lã mineral de rocha, demonstram um acúmulo mais significativo face à solução contendo fibras de cânhamo, o que, numa primeira

análise, colocaria as duas primeiras soluções numa situação de maior risco de desenvolvimento de microrganismos fúngicos, sendo preferível a escolha da solução com isolamento de fibras de cânhamo. Contudo, entrando em consideração com o posicionamento absoluto das isopletras para as três soluções deteta-se que, apesar da solução com fibras de cânhamo demonstrar a menor concentração de resultados na zona mencionada anteriormente, as suas isopletras estabelecem os maiores níveis de humidade relativa, estando associado um maior risco de condensações, pelo que, atua como a opção menos vantajosa.

As isopletras associadas às soluções contendo isolamento de fibras de madeira e lã mineral de rocha, definem uma região muito semelhante de risco moderado de desenvolvimento de fungos (zona entre LIM1 e LIM2), pelo que, valores inseridos na mesma faixa de humidades relativas, mais precisamente no intervalo de 74.7% a 80%, são alvo de comparação. Para o mesmo intervalo, a solução contendo lã mineral de rocha demonstrou, face à solução com fibras de madeira, uma maior concentração de valores acima da isopleta LIM1 e maior ocorrência de resultados junto à isopleta LIM2, elevando significativamente a vulnerabilidade ao desenvolvimento de fungos e sugerindo a adoção da solução com fibras de madeira como a mais praticável, por apresentar uma distribuição de pontos mais controlada e menor risco de condensações associado.

Isopletras

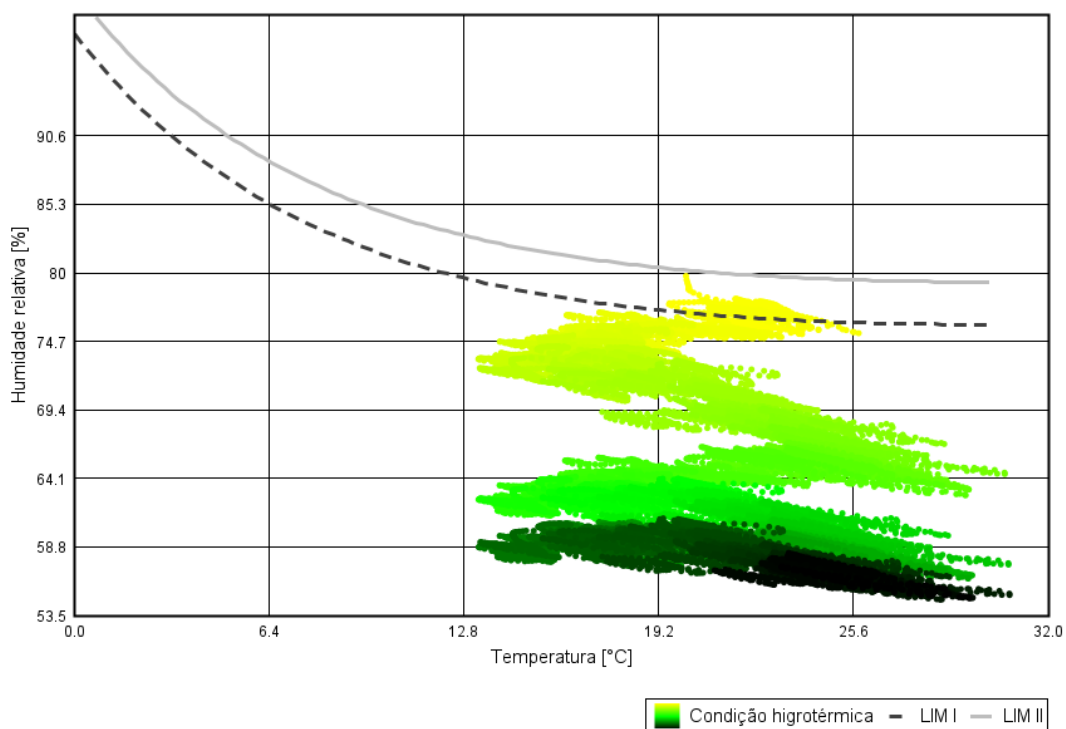


Figura 5-26: Risco de desenvolvimento de organismos fúngicos da solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira.

Isopletas

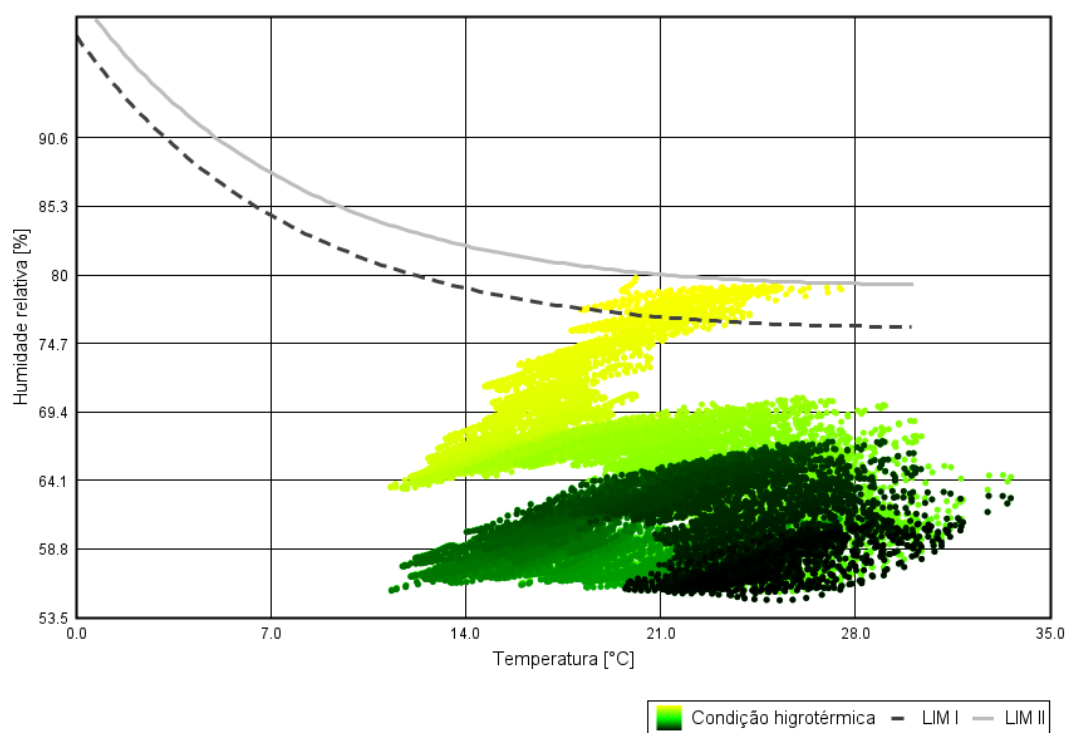


Figura 5-27: Risco de desenvolvimento de organismos fúngicos da solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha.

Isopletas

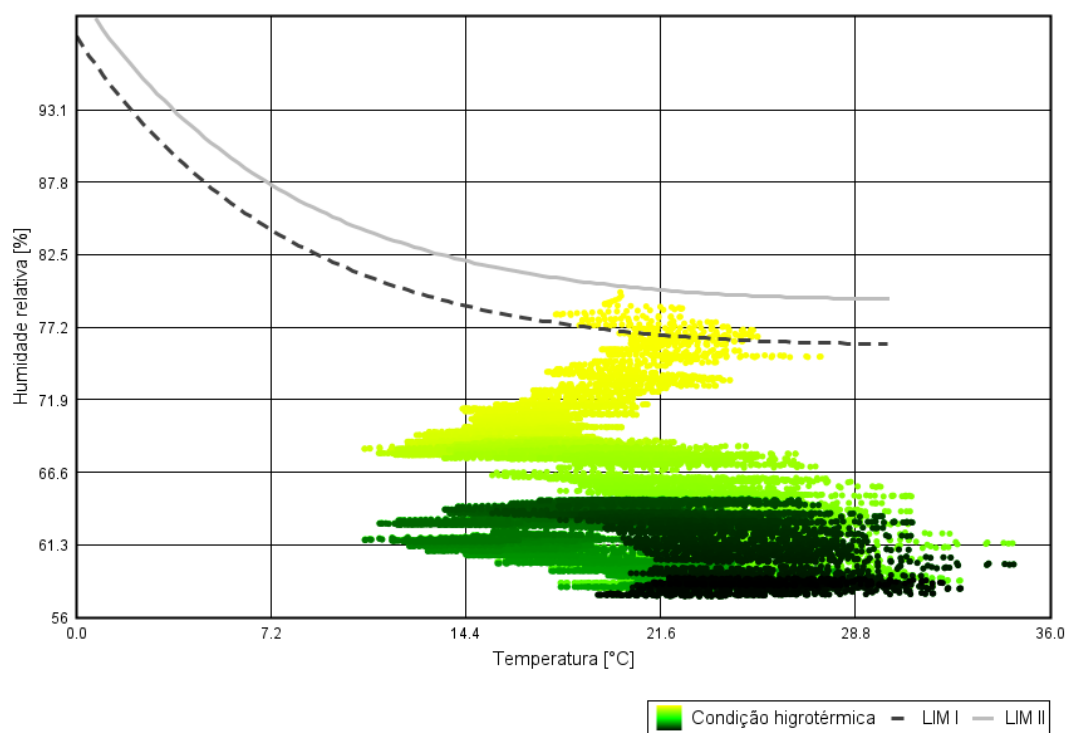


Figura 5-28: Risco de desenvolvimento de organismos fúngicos da solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo.

Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros

6.1. Conclusões

Com vista a apresentar toda a informação de forma clara, as principais conclusões inerentes ao estudo efetuado, encontram-se organizadas por grandeza de análise.

Em contexto de níveis de teor de água, para as três soluções integrais, concluiu-se que a solução contendo isolamento de lã mineral de rocha, adquiriu o menor conjunto de valores absolutos ao longo de todo o período de simulação. Contrariamente ao registado no período de simulação anual, a solução contendo isolamento de fibras de cânhamo passou a demonstrar, ao longo dos três anos de simulação, níveis de teor de água superiores face à solução com fibras de madeira.

A solução com fibras de madeira, em contraste com o comportamento cíclico registado para as restantes, exibiu um desenvolvimento descendente e equilibrado, com reduzida amplitude de valores, indicando uma resposta mais estável da construção e maior facilidade de secagem perante o teor de água adquirido ao longo do período frio de cada ano.

No domínio dos materiais isolantes, as fibras de cânhamo e as fibras de madeira, demonstraram uma gama de valores obtidos de teor de água muito aproximada. A lã mineral de rocha, em consonância com o comportamento obtido para a solução na qual se encontra inserida, demonstrou os menores níveis de teor de água, sendo indicativo de que este material, encontra-se tendencialmente mais seco que os restantes.

Em contexto de níveis de humidade relativa, as soluções que compreendem uma zona de espaço de ar, atingiram picos de teor de água máximos, no mesmo período onde registaram-se níveis máximos de humidade relativa. A solução em contínuo, contendo isolamento de fibras de madeira, à semelhança do mencionado na análise de teor de água anterior, demonstrou um comportamento decrescente sem ocorrência de picos significativos.

Apesar da solução com lã mineral de rocha apresentar menor quantidade de água fisicamente presente na construção, exhibe, nos meses mais frios de cada ano, níveis de humidade relativa superiores, face à solução contendo isolamento de fibras de madeira. A solução con-

tendo isolamento de fibras de cânhamo, para além de ser a que demonstra níveis mais elevados de teor de água, em termos de humidade relativa e no decorrer dos meses mais frios, exhibe picos de humidade relativa de amplitude significativa.

Associado às três soluções construtivas conduziu-se, primeiramente, um processo de análise higrotérmica com duração de um ano, no entanto, devido ao facto desse período de análise não facultar resultados normalizados, devido às condições iniciais impostas no software de simulação serem desviadas do normal funcionamento das soluções, ampliou-se a análise para um período de três anos. Neste sentido, para a grandeza de humidade relativa, a prorrogação do período de análise de um para três anos, providenciou conclusões mais assertivas pois, numa primeira análise anual, o pior comportamento encontrava-se associado à solução com fibras de madeira, sendo que, acabou por demonstrar ser a solução mais praticável.

Em contexto de análise individual dos materiais isolantes, tendo por base o período de análise de três anos, a lã mineral de rocha apresentou os menores níveis de humidade relativa de entre os três materiais, contudo, devido ao seu comportamento irregular característico, pode contribuir para o desenvolvimento de anomalias na sua matriz interna, pelo que, o isolamento térmico à base de fibras de madeira, ao demonstrar uma resposta mais estável e valores mínimos muito semelhantes aos da lã mineral de rocha, atua como a opção mais vantajosa a adotar-se.

Relativamente às grandezas de temperatura e pressão parcial do vapor de água, tanto para as soluções integrais como em contexto de análise individual dos isolantes térmicos, constatou-se um cenário de valores semelhante, para cada uma das três soluções.

Para ambas as grandezas, observou-se um comportamento mais estável associado à situação com isolamento de fibras de madeira, com valor de temperatura máximo de 30,6°C e mínimo de 13,2°C e valor máximo de pressão parcial de vapor de água de 2.913,8Pa e mínimo de 891,2Pa, em detrimento das restantes que, de forma equivalente, exibiram uma resposta mais irregular, composta por momentos de maior amplitude tanto para valores máximos como para valores mínimos, sendo que, a solução com lã mineral de rocha, exibiu um valor máximo de temperatura de 33,7°C e mínimo de 11,1°C e valor máximo de pressão parcial de vapor de água de 3.783,8Pa e mínimo de 653,4Pa e a solução com fibras de cânhamo, um valor máximo de temperatura de 34,5°C e mínimo de 10,5°C e valor máximo de pressão parcial de vapor de água de 4.056,3Pa e mínimo de 802,4Pa.

Adicionalmente, considerando os resultados obtidos para a temperatura e pressão parcial do vapor de água, registou-se um claro desfaseamento temporal de resultados, podendo estar diretamente relacionado com o facto do processo de difusão do vapor de água, ser um processo lento e gradual ao longo da espessura da parede.

Sob o ponto de vista de avaliação do risco de ocorrência de condensações internas, as três soluções construtivas desenvolvidas não exibiram, ao longo da espessura da parede, condições para a manifestação deste fenómeno físico, contudo, em certas regiões, observou-se aspetos importantes a ter em consideração. De notar, que para a solução com lã mineral de rocha, no período frio de análise (figura 5-24, b1), a pressão de saturação é quase atingida, fenómeno que não acontece nas outras soluções.

Para as soluções contendo isolamento de lã mineral de rocha e fibras de cânhamo, mais concretamente ao longo da região do material isolante, verificou-se, para os períodos frio e quente de análise, uma variação brusca associada ao perfil de temperaturas, naturalmente relacionada com as características do próprio material. Este comportamento, provocou um aumento significativo do risco de ocorrência de condensações internas, pela diminuição do diferencial entre a pressão de saturação a uma dada temperatura e a pressão parcial do vapor de água, no mesmo ponto.

Relativamente à solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira, constatou-se um comportamento mais estável do ponto de vista higrotérmico. Para ambos os períodos de análise, as fibras de madeira, exibiram uma resposta equilibrada face a variações de temperatura, pelo que, em termos de pressões de vapor, a probabilidade de ocorrência de condensações internas diminuiu, estando associado um maior diferencial entre as duas grandezas de pressão, pelo facto de as temperaturas não alterarem de forma tão repentina para um cenário abaixo das condições do ponto de orvalho.

Em relação à análise de vulnerabilidade ao desenvolvimento de microrganismos fúngicos, é essencial ter presente o posicionamento absoluto das isopletas LIM1 e LIM2, de cada uma das soluções construtivas. A solução com fibras de cânhamo, exhibe isopleas situadas em níveis mais elevados de humidade relativa, face às restantes soluções, pelo que, estabelece as condições menos vantajosas e conseqüente maior risco de perda de performance térmica e desenvolvimento de anomalias.

O posicionamento das isopleas das soluções com fibras de madeira e lã mineral de rocha, enquadra-se numa gama de valores semelhante, contudo, em termos de concentração de resultados, a solução com lã mineral de rocha, exibiu uma maior concentração de valores acima da isoplea LIM1 e maior ocorrência de resultados junto à isoplea LIM2, elevando o risco de desenvolvimento de microrganismos fúngicos. A solução com fibras de madeira, demonstra ser a opção mais exequível e segura, por exhibir menor concentração de resultados junto à região das isopleas e uma distribuição de valores mais controlada.

Tendo em consideração o conjunto de conclusões apresentado anteriormente, a solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira, por ter menor risco de desenvolvimento de anomalias associadas à humidade, é expectável que tenha maior durabilidade e menor necessidade de manutenção sendo, por isso, a opção mais viável tecnicamente e sustentável a longo prazo. A solução contendo isolamento de lã mineral de rocha, intervém como a seguinte escolha a efetuar, pelo que, a solução contendo isolamento térmico de fibras de cânhamo, posiciona-se como a solução de pior performance para os pressupostos considerados no presente estudo.

Em contexto de limitações detetadas, observou-se uma forte influência, perante o ficheiro climático introduzido no programa, das condições iniciais de simulação, nos resultados obtidos em fase inicial de análise.

Para as três soluções construtivas, mais concretamente em termos das grandezas higrométricas de teor de água e humidade relativa, os resultados obtidos para um período de simulação de um ano, apresentaram um desenvolvimento pouco claro e desviado do expectável, pelo que, procedeu-se ao prolongamento do período de simulação de um para três anos.

Constatou-se uma imediata estabilização e normalização de valores para condições de carácter expectável, tendo sendo possível a obtenção e interpretação de resultados, num cenário mais representativo da realidade.

Adicionalmente, para a análise complementar direta do risco de ocorrência de condensações internas ao longo da espessura da parede, para as três soluções, adotou-se um procedimento com base na seleção de zonas específicas de grelha dos vários materiais e na exportação dos valores obtidos, decorrentes da zona de grelha selecionada, para um ficheiro Excel, visando a construção de gráficos de perfis de pressão e temperatura.

Decidiu-se, por fim, concatenar toda a informação recolhida numa tabela de conclusões e atribuir uma classificação para cada solução integral e material isolante, perante as variáveis de estudo, com o intuito de proporcionar uma componente conclusiva visual, do estudo efetuado.

	Teor de água	Humidade relativa	Temperatura	Pressão parcial do vapor de água	Risco de ocorrência de condensações internas	Vulnerabilidade ao desenvolvimento de microrganismos fúngicos
Solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira	✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓
Solução construtiva contendo isolamento de lã mineral de rocha	✓ ✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓	✓	✓ ✓
Solução construtiva contendo isolamento de fibras de cânhamo	✓	✓ ✓	✓	✓	✓ ✓	✓
Fibras de madeira	✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	N/A	N/A
Lã mineral de rocha	✓ ✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓	N/A	N/A
Fibras de cânhamo	✓ ✓	✓ ✓	✓	✓	N/A	N/A

Legenda: ✓✓✓ - Comportamento promissor

✓✓ - Comportamento satisfatório

✓ - Comportamento insatisfatório

Figura 6-1: Tabela comparativa de conclusões

6.2. Propostas de trabalho futuros

Relativamente a sugestões para desenvolvimentos futuros, definiu-se um conjunto de aspetos de estudo, de elevado benefício, ligados ao avanço e incentivo da temática abordada.

Apesar das soluções construtivas, na situação de incorporação de barreira ao vapor, terem demonstrado resultados menos favoráveis comparativamente à não colocação deste material, seria importante averiguar o quão negativas serão essas condições, ou seja, pelo facto de não ocorrerem fenómenos de condensações internas sem introdução de barreira ao vapor, não é indicativo de que, com a sua colocação, aconteçam, pelo que, sugere-se um estudo paralelo com a incorporação deste material com o objetivo de esclarecer estes pormenores. Para utilização frequente de soluções de parede exterior com incorporação de barreira ao vapor, é essencial este tipo de análise complementar.

Visto que a solução construtiva contendo isolamento de fibras de madeira, demonstrou ser a solução mais praticável, sugere-se o estudo e simulação análogos, de uma solução contendo os mesmos materiais de construção, com o adicional de uma zona de espaço de ar. Deste modo, adquirem-se condições de ventilação melhoradas, maior controlo de níveis de humidade no interior da parede, redução de níveis de pressão parcial do vapor de água e a consequente diminuição do risco de ocorrência de condensações internas, o que, poderá originar um conjunto de resultados fortemente promissores.

As soluções construtivas desenvolvidas, estão inseridas numa estrutura principal em madeira, pelo que, existem regiões, ao longo da espessura da parede, compostas unicamente por este material, funcionando como zonas de ponte térmica plana com elevada exposição ao desenvolvimento de anomalias. Para além do estudo realizado em zona comum, ao longo da espessura do elemento, a análise destas regiões pertencentes à moldura circundante do elemento monolítico, é essencial para garantir a segurança estrutural a longo prazo, obter uma previsão das condições dos vários materiais de construção e monitorizar o eventual aparecimento de anomalias.

Sugere-se a realização de uma análise energética associada às três soluções construtivas, em consonância com uma avaliação completa do ciclo de vida das mesmas (Life cycle analysis- LCA), com o principal objetivo de desenvolver metodologias que aumentem a eficiência energética das soluções e diminuam o impacto ambiental ao longo de todo o processo construtivo.

Referências Bibliográficas

- [1] IEA, “Energy system buildings,” <https://www.iea.org/energy-system/buildings>.
- [2] R. Bevan, T. Woolley, I. Pritchett, R. Carpenter, P. Walker, and M. Duckett, “HEMP LIME CONSTRUCTION A guide to building with hemp lime composites,” 2008.
- [3] European Comission, “Nearly zero-energy buildings,” https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en.
- [4] “Diário da República, 1.^a série PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS.”
- [5] F. Henriques, *HUMIDADE EM PAREDES*, 4th ed. Lisboa, 2007.
- [6] H. T. Thai, T. Ngo, and B. Uy, “A review on modular construction for high-rise buildings,” Dec. 01, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.istruc.2020.09.070.
- [7] Modularis Offsite Building, “Construção modular é flexível e evita desperdício. Resultado é comprovado mundialmente,” <https://modularis.com.br/construcao-modular-e-flexivel-e-evita-desperdicio-resultado-e-comprovado-mundialmente/>.
- [8] E. E. Cunha, Q. Luiz, and R. B. Lia, “INTRODUÇÃO À TRANSFERÊNCIA DE CALOR.”
- [9] V. D. Shmakov, “Unconventional gas,” *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta, Seriya Geologiya i Geografiya*, vol. 2010, no. 1, pp. 32–35, 2010, doi: 10.1016/b978-0-12-809570-6.00003-5.
- [10] C. Santos and L. Matias, *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*, 1^o. Lisboa: LNEC, 2006.
- [11] Diário da República, “AMBIENTE E AÇÃO CLIMÁTICA E INFRAESTRUTURAS E HABITAÇÃO,” 2021.
- [12] ISO, “INTERNATIONAL STANDARD First edition Building components and building elements-Thermal resistance and thermal transmittance-Calculation method Composants et parois de batiments-Rkstance thermique et coefficient de transmission thermique-M&hode de calcul,” 1996.
- [13] adene, “Guia SCE-Parâmetros de Cálculo,” 2020.
- [14] M. S. Abbas, F. McGregor, A. Fabbri, and M. Y. Ferroukhi, “The use of pith in the formulation of lightweight bio-based composites: Impact on mechanical and hygrothermal properties,” *Constr Build Mater*, vol. 259, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120573.
- [15] A. V Arundel, E. M. Sterling, J. H. Biggin, and T. D. Sterling, “Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments,” 1986.
- [16] R. Nascimento, A. Lima, C. Vidal, D. Melo, and G. Raulino, “ADSORÇÃO: aspectos teóricos e aplicações ambientais,” 2014, *Fortaleza*.
- [17] B. V. Zhmud, F. Tibergh, and K. Hallstenson, “Dynamics of capillary rise,” *J Colloid Interface Sci*, vol. 228, no. 2, pp. 263–269, Aug. 2000, doi: 10.1006/jcis.2000.6951.

- [18] S. E. Vollset *et al.*, “Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: a forecasting analysis for the Global Burden of Disease Study,” *The Lancet*, vol. 396, no. 10258, pp. 1285–1306, Oct. 2020, doi: 10.1016/S0140-6736(20)30677-2.
- [19] A. M. Ribeiro, A. Arantes, and C. O. Cruz, “Barriers to the Adoption of Modular Construction in Portugal: An Interpretive Structural Modeling Approach,” *Buildings*, vol. 12, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.3390/buildings12101509.
- [20] L. Santana, “Construção Modular: O que é isso, afinal?,” <https://pt.linkedin.com/pulse/constru%C3%A7%C3%A3o-modular-o-que-%C3%A9-isso-afinal-leonardo-santana>.
- [21] J. M. Alves, “Desenvolvimento de soluções logísticas para um sistema de prefabricação de habitações modulares,” Universidade do Minho Escola de Engenharia, 2022.
- [22] WEG, “Entenda como funciona a construção modular,” <https://www.weg.net/tomasdas/blog/arquitetura/entenda-como-funciona-a-construcao-modular/>.
- [23] DUAL D Engenharia, “Você sabe o que é construção modular?,” <https://pt.linkedin.com/pulse/voc%C3%AA-sabe-o-que-%C3%A9-constru%C3%A7%C3%A3o-modular-dualdengenharia>.
- [24] N. Bertram, S. Fuchs, J. Mischke, R. Palter, G. Strube, and J. Woetzel, “Modular construction: From projects to products,” 2019.
- [25] N. Lu and T. Korman, “Implementation of Building Information Modeling (BIM) in Modular Construction: Benefits and Challenges,” 2010.
- [26] A. Alwisy, M. Al-Hussein, and S. H. Al-Jibouri, “BIM Approach for Automated Drafting and Design for Modular Construction Manufacturing,” 2012.
- [27] idealista/news, “O que é o BIM e que vantagens traz para a construção?,” <https://www.idealista.pt/news/imobiliario/construcao/2021/12/27/50277-o-que-e-o-bim-e-que-vantagens-traz-para-a-construcao>.
- [28] “Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios,” 2010.
- [29] Direção-Geral e Energia e Geologia, “Desempenho energético de edifícios,” <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/desempenho-energetico-de-edificios/>.
- [30] A. Alwisy, S. Bu Hamdan, B. Barkokebas, A. Bouferguene, and M. Al-Hussein, “A BIM-based automation of design and drafting for manufacturing of wood panels for modular residential buildings,” *International Journal of Construction Management*, vol. 19, no. 3, pp. 187–205, May 2019, doi: 10.1080/15623599.2017.1411458.
- [31] P. J. Cameron, “PIECING TOGETHER MODULAR: UNDERSTANDING THE BENEFITS AND LIMITATIONS OF MODULAR CONSTRUCTION METHODS FOR MULTIFAMILY DEVELOPMENT Submitted to the Department of Architecture and the Department of Urban Studies and Planning in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of,” 2007.
- [32] RCM Modular Solutions, “Modular Constructions That Work for You,” <https://www.rcmgroupe.com/en/>.

- [33] KUKA, “Construção civil modular automatizada,” <https://www.kuka.com/pt-pt/ramos-de-atividade/constru%C3%A7%C3%A3o-civil-modular-automatizada>.
- [34] Flexmade, “Como é o transporte de uma construção off-site,” <https://flexmade.com.br/como-e-o-transporte-de-uma-construcao-off-site/>.
- [35] Diário da República, “Decreto-Lei n.º 133/2010, de 22 de dezembro,” Dec. 2010.
- [36] A. Shea, M. Lawrence, and P. Walker, “Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building,” *Constr Build Mater*, vol. 36, pp. 270–275, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.123.
- [37] O. Douzane, G. Promis, J. M. Roucoult, A. D. Tran Le, and T. Langlet, “Hygrothermal performance of a straw bale building: In situ and laboratory investigations,” *Journal of Building Engineering*, vol. 8, pp. 91–98, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.jobbe.2016.10.002.
- [38] N. Chennouf, B. Agoudjil, A. Boudenne, K. Benzarti, and F. Bouras, “Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date palm fibers,” *Constr Build Mater*, vol. 192, pp. 348–356, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.089.
- [39] M. Lawrence, A. Shea, P. Walker, and P. de Wilde, “Hygrothermal performance of bio-based insulation materials,” *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, vol. 166, no. 4, pp. 257–263, Aug. 2013, doi: 10.1680/coma.12.00031.
- [40] AHLBORN, “AHLBORN,” <https://www.ahlborn.com/en/>.
- [41] AHLBORN, “AMR Win Control Software for data acquisition and measured data processing,” <https://www.ahlborn.com/en/products/amr-win-control-software-for-data-acquisition-and-measured-data-processing>.
- [42] AHLBORN, “AMR WinControl the software for all ALMEMO ® measuring instruments.” [Online]. Available: www.akrobit.de.
- [43] M. Rahim, R. Djedjig, D. Wu, R. Bennacer, and M. EL Ganaoui, “Experimental investigation of hygrothermal behavior of wooden-frame house under real climate conditions,” *Energy and Built Environment*, vol. 4, no. 1, pp. 122–129, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.enbenv.2021.09.002.
- [44] F. Fedorik, S. Alitalo, J. P. Savolainen, I. Räinen, and K. Illikainen, “Analysis of hygrothermal performance of low-energy house in Nordic climate,” *J Build Phys*, vol. 45, no. 3, pp. 344–367, Nov. 2021, doi: 10.1177/1744259120984187.
- [45] B. Zegen Reich, H. Ge, and J. Wang, “Effect of vapor diffusion port on the hygrothermal performance of wood-frame walls,” *Journal of Building Engineering*, vol. 39, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102280.
- [46] H. Fu, Y. Ding, M. Li, H. Li, X. Huang, and Z. Wang, “Research on thermal performance and hygrothermal behavior of timber-framed walls with different external insulation layer: Insulation Cork Board and anti-corrosion pine plate,” *Journal of Building Engineering*, vol. 28, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2019.101069.
- [47] A. Santos, N. M. M. Ramos, J. Maia, and J. M. P. Q. Delgado, “Hygrothermal performance of Brazilian gypsum walls,” *J Build Phys*, vol. 42, no. 4, pp. 605–626, Jan. 2019, doi: 10.1177/1744259118779021.

- [48] D. Bastien and M. Winther-Gaasvig, "Influence of driving rain and vapour diffusion on the hygrothermal performance of a hygroscopic and permeable building envelope," *Energy*, vol. 164, pp. 288–297, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.07.195.
- [49] S. Liuzzi, C. Rubino, and P. Stefanizzi, "Use of clay and olive pruning waste for building materials with high hygrothermal performances," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, Sep. 2017, pp. 234–241. doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.145.
- [50] P. Pihelo, H. Kikkas, and T. Kalamees, "Hygrothermal Performance of Highly Insulated Timber-frame External Wall," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2016, pp. 685–695. doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.128.
- [51] Y. Goto, K. Ghazi Wakili, Y. Ostermeyer, A. Sasic Kalagasidis, and H. Wallbaum, "Hygrothermal performance of a vapor-open envelope for subtropical climate, field test and model validation," *Build Environ*, vol. 110, pp. 55–64, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.09.026.
- [52] E. Latif, M. A. Ciupala, S. Tucker, D. C. Wijeyesekera, and D. J. Newport, "Hygrothermal performance of wood-hemp insulation in timber frame wall panels with and without a vapour barrier," *Build Environ*, vol. 92, pp. 122–134, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.04.025.
- [53] A. S. Tártaro, T. M. Mata, A. A. Martins, and J. C. G. Esteves da Silva, "Carbon footprint of the insulation cork board," *J Clean Prod*, vol. 143, pp. 925–932, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.028.
- [54] I. Cetiner and A. D. Shea, "Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings," *Energy Build*, vol. 168, pp. 374–384, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.019.
- [55] O. Vololonirina, M. Coutand, and B. Perrin, "Characterization of hygrothermal properties of wood-based products - Impact of moisture content and temperature," *Constr Build Mater*, vol. 63, pp. 223–233, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.014.
- [56] J. F. Baptista, S. Kokare, A. V. Francisco, R. Godina, and D. Aelenei, "A comparative life cycle assessment of ETICS and ventilated façade systems with timber cladding," *Energy Build*, vol. 304, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113842.
- [57] T. Silveira, "Eucalipto é a espécie mais representativa em Portugal, mas foi a que mais ardeu," *Público*, Dec. 2020.
- [58] BANEMA, "Painéis de madeira OSB," <https://www.banema.pt/pt/produtos/painéis-de-madeira/osb/osb/>.
- [59] E. Sugahara *et al.*, "Study of the Influence of Heat Treatment on OSB Panels Produced with Eucalyptus Wood in Different Layer Compositions," *Forests*, vol. 13, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/f13122083.
- [60] Diário da República, "Decreto-Lei n.º 92/2019, de 10 de julho," Jul. 2019.
- [61] B. Esteves, A. V. Marques, I. Domingos, and H. Pereira, "Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood," *Wood Sci Technol*, vol. 41, no. 3, pp. 193–207, Mar. 2007, doi: 10.1007/s00226-006-0099-0.
- [62] H. Palma Nunes and T. DE Conclusão De Curso, "UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONTRUÇÃO CIVIL

- CURSO DE ENGENHARIA CIVIL ESTUDO DA APLICAÇÃO DO DRYWALL EM EDIFICAÇÃO VERTICAL,” 2015.
- [63] constrUBIZ, “Placa de Gesso Cartonado,” <https://www.construbiz.com/pt/placa-de-gesso-cartonado>.
 - [64] ALBIMAG, “O que é o pladur?,” <https://albimag.com/nacional/blog/pladur-vantagens-desvantagens-pladur-hidrofugo/#>.
 - [65] FIBROSOM, “ISOLAMENTOS,” <https://www.fibrosom.com/Produtos.aspx?id=1>.
 - [66] Volcalis, “Gama de produtos- Lã Mineral,” <https://volcalis.pt/>.
 - [67] Volcalis, “lã mineral isolamento eficiente e seguro,” Aveiro.
 - [68] C. C. Pavel and D. T. Blagoeva, “Competitive landscape of the EU’s insulation materials industry for energy-efficient buildings Revised edition,” European Union, 2018, pp. 1–24. doi: 10.2760/750646.
 - [69] SOMAPIL madeiras do mundo, “SOMAPIL,” <http://www.somapil.com/pt>.
 - [70] Viroc by Investwood, “Cement Wood Board.”
 - [71] Banema madeiras+derivados, “Fachadas Fichas de Aplicação.”
 - [72] F. C. Jorge, C. Pereira, and J. M. F. Ferreira, “Wood-cement composites: A review,” Oct. 2004. doi: 10.1007/s00107-004-0501-2.
 - [73] B. Na, Z. Wang, H. Wang, and X. Lu, “WOOD-CEMENT COMPATIBILITY REVIEW,” Nanjing, 2014.
 - [74] M. Li, V. Nicolas, M. Khelifa, M. El Ganaoui, V. Fierro, and A. Celzard, “Modelling the hygrothermal behaviour of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork,” *Ind Crops Prod*, vol. 142, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111784.
 - [75] hempitecture, “HempWool.”
 - [76] hempitecture, “HEALTHY, NON-TOXIC INSULATION,” <https://www.hempitecture.com/hempwool/>.
 - [77] hempitecture, “Natural Fiber Thermal Insulation.”
 - [78] hempitecture, “HempWool 2020 Lookbook.”
 - [79] D. M *et al.*, “EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE THERMAL BEHAVIOR OF THREE DIFFERENT INSULATION MATERIALS: WOOD, POLYSTYRENE AND HEMP WOOL,” *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 3536–3546, Oct. 2017, doi: 10.21817/ijet/2017/v9i5/170905037.
 - [80] M. Dlimi, O. Iken, R. Agounoun, A. Zoubir, and K. Sbai, “Experimental and numerical investigations on the thermal performance of hemp such a bio-sourced insulation material: Application to a Moroccan Mediterranean climate,” *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, vol. 7, no. 1, pp. 157–164, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i1.9090.
 - [81] Fraunhofer institute, “WUFI,” <https://wufi.de/en/>.
 - [82] Fraunhofer institute, “WUFI product overview,” <https://wufi.de/en/software/product-overview/>.
 - [83] Fraunhofer institute, “WUFI 2D software,” <https://wufi.de/en/software/wufi-2d/>.
 - [84] IPMA, “Valores diários de Humidade relativa do ar, por concelho,” <https://www.ipma.pt/pt/agrometeorologia/humidade>.

- [85] M. S. Abbas, E. Gourdon, P. Glé, F. McGregor, M. Y. Ferroukhi, and A. Fabbri, "Relationship between hygrothermal and acoustical behavior of hemp and sunflower composites," *Build Environ*, vol. 188, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107462.
- [86] L. Spencer Lima, "Lei de Dalton," *Revista de Ciência Elementar*, vol. 3, no. 1, Mar. 2015, doi: 10.24927/rce2015.093.
- [87] Z. Pavlík and R. Černý, "Hygrothermal performance study of an innovative interior thermal insulation system," *Appl Therm Eng*, vol. 29, no. 10, pp. 1941–1946, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.09.013.



2024

JOÃO PEDRO MADEIRA DIAS

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE
SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NÃO TRADICIONAIS