

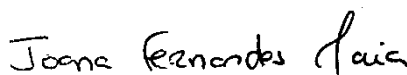
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO E MECÂNICO DE NOVAS ARGAMASSAS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS EM PAINÉIS DE FACHADA

FRANCISCO DE VILAR DOMINGUES E GONÇALVES CARNEIRO

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



Orientadora: Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho



Coorientadora: Doutora Joana Fernandes Maia

JULHO 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022.*

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

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

Para a minha família e amigos

Tudo vale a pena quando a alma não é pequena

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Quero começar por agradecer à minha orientadora Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho, por me ter ajudado e guiado ao longo do desenvolvimento desta tese e à minha coorientadora Doutora Joana Fernandes Maia pela disponibilidade e assistência cruciais na realização dos ensaios experimentais.

Um grande agradecimento à minha família, à minha mãe Cláudia Domingues e ao meu pai Jorge Carneiro por serem incansáveis no seu apoio durante estes meses e por nunca desistirem de mim, à minha avó Ana Vilar e ao meu avô Francisco Domingues por me motivarem a seguir os meus sonhos e à minha irmã Beatriz Carneiro por me ensinar a ser sempre melhor.

Tenho de fazer um agradecimento especial à minha segunda família (os “7K”), Gil “RETUNDAS” Valente, Filipe “Poutas” Ferreira, Diogo “Ilucado” Sebe, Diogo “Paqueton” Dias, Nuno “Matostas” Pires, Jóni “Eldo Ramiro” Gonçalves e Diogo “Bigodes” Moia, cuja presença diária na minha vida tem sido fundamental para o meu crescimento pessoal e ao meu segundo irmão Daniel “Melhor Demon Hunter PT Normal” Brito por me ter acompanhado em todas as etapas da minha vida.

Nada disto seria possível sem vocês.

Este trabalho foi financiado pelo projeto Circular2B - 37_CALL#2 - Construção circular em edifícios modulares e energeticamente eficientes através do Programa Ambiente, Alterações Climáticas e Economia de Baixo Carbono no âmbito do Mecanismo Financeiro do Espaço Económico Europeu EEA Grants 2014-2021.

"Através do Acordo sobre o Espaço Económico Europeu (EEE), a Islândia, o Liechtenstein e a Noruega são parceiros no mercado interno com os Estados-Membros da União Europeia. Como forma de promover um contínuo e equilibrado reforço das relações económicas e comerciais, as partes do Acordo do EEE estabeleceram um Mecanismo Financeiro plurianual, conhecido como EEA Grants. Os EEA Grants têm como objetivos reduzir as disparidades sociais e económicas na Europa e reforçar as relações bilaterais entre estes três países e os países beneficiários. Para o período 2014-2021, foi acordada uma contribuição total de 2,8 mil milhões de euros para 15 países beneficiários. Portugal beneficiará de uma verba de 102,7 milhões de euros." Saiba mais em eeagrants.gov.pt

RESUMO

O trabalho levado a cabo enquadra-se nas tarefas previstas no projeto Circular2B. Este projeto tem como objetivo combinar a eficiência energética com a recuperação de resíduos. Para isso, serão desenvolvidas e testadas novas argamassas com incorporação de resíduos que constituirão o núcleo de um painel de fachada do tipo SIP (*Structural Insulated Panel*) e o seu revestimento.

Nesta dissertação, procedeu-se à caracterização experimental das argamassas em desenvolvimento do ponto de vista das suas propriedades higrotérmicas e mecânicas, numa campanha experimental extensa que envolveu a produção de um elevado número de provetes das várias argamassas a testar.

Para a caracterização das propriedades higrotérmicas foram realizados os seguintes ensaios: medição da condutibilidade térmica de provetes das argamassas em estudo através do método da placa quente (*Guarded Hot Plate Method*) e através do método transiente modificado de fonte plana (*Modified Transient Plane Source Method*); avaliação da absorção de água por capilaridade segundo o procedimento da norma europeia EN-1015-18, adaptado; medição do teor de humidade a 50% de humidade relativa de acordo com a norma ISO 12571 e determinação da permeabilidade ao vapor com base na norma ISO 12572.

Quanto à caracterização das propriedades mecânicas, foi feita a avaliação da resistência ao arrancamento segundo a norma EN 1015-12 e da resistência ao impacto do corpo duro através da norma ISO 7892.

A análise dos resultados obtidos permitiu identificar as formulações das argamassas com os melhores desempenhos, bem como as principais fragilidades das soluções estudadas.

Em complemento à caracterização experimental, foi utilizado o programa WUFI que permite executar simulações de transferência de calor e humidade em regime variável, para avaliar o efeito da utilização de uma argamassa com resíduos como núcleo de um painel SIP, no desempenho higrotérmico deste, comparando-o com o desempenho de um painel SIP comum com EPS no seu núcleo.

PALAVRAS-CHAVE: Projeto Circular2B, Painel de fachada do tipo SIP, Propriedades higrotérmicas, Propriedades mecânicas, Programa WUFI.

ABSTRACT

The present work is part of the tasks foreseen in the Circular2B project. This project aims to combine energy efficiency with waste recovery. New mortars with incorporation of waste are under development and being tested and they are meant to be used as the core of a facade panel of the SIP type (Structural Insulated Panel) and its coating.

In this dissertation, the experimental characterization of the mortars under development from the point of view of their hygrothermal and mechanical properties was carried out, in an extensive experimental campaign that involved the production of a large number of specimens of the various mortars to be tested.

For the characterization of the hygrothermal properties the following tests were performed: measurement of the thermal conductivity of specimens of the mortars under study using Guarded Hot Plate Method and through the Modified Transient Plane Source Method; assessment of water absorption by capillarity according to the procedure of the European standard EN-1015-18, adapted; measurement of the moisture content at 50% relative humidity according to ISO 12571 and determination of vapor permeability based on ISO 12572.

As for the characterization of the mechanical properties, the pullout resistance was evaluated according to the EN 1015-12 standard and the impact resistance of the hard body according to the ISO 7892 standard.

The analysis of the obtained results allowed identifying the mortar formulations with the best performances, as well as the main weaknesses of the studied solutions.

In addition to the experimental characterization, the WUFI program was used, which allows the execution of heat and moisture transfer simulations in transient regime, to evaluate the effect of using a mortar with incorporation of waste as the core of a SIP panel, on its hygrothermal performance, comparing it to the performance of a regular SIP panel with EPS at its core.

KEYWORDS: Circular2B project, Façade panel of the SIP type, Hygrothermal properties, Mechanical properties, WUFI program.

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.1.1. Enquadramento	1
1.1.2. Economia circular	2
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
2. ESTADO DE ARTE	5
2.1. SISTEMAS DE FACHADA SIP (STRUCTURAL INSULATED PANEL)	5
2.1.1. O painel	5
2.1.2. Principais materiais constituintes dos SIP	8
2.1.3. Argamassas inovadoras	10
2.2. PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS E MECÂNICAS	11
2.2.1. Propriedades hígricas	11
2.2.2. Propriedades térmicas	13
2.2.3. Propriedades mecânicas	14
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL	17
3.1. MATERIAIS	17
3.2. PROVETES DE ENSAIO	20
3.2.1. Produção de provetes	20
3.2.2. Preparação dos provetes para os ensaios experimentais	20
3.3. MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS	24
3.3.1. Condutibilidade térmica	24
3.3.1.1. Método da placa quente (Guarded hot plate)	24
3.3.1.2. Método transiente modificado de fonte plana (modified transient plane source)	25
3.3.2. Absorção de água por capilaridade	27
3.3.3. Teor de humidade a 50% de humidade relativa	28
3.3.4. Permeabilidade ao vapor	28
3.4. MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	29

3.4.1. Resistência ao arrancamento	29
3.4.2. Resistência ao impacto de corpo duro	30

4. RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

33

4.1. PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS

33

4.1.1. Condutibilidade térmica.....

33

4.1.1.1. Método da placa quente.....

33

4.1.1.2. Método transiente modificado de fonte plana

34

4.1.1.3. Comparação dos dois métodos

34

4.1.2. Absorção de água por capilaridade

35

4.1.3. Teor de humidade a 50% de humidade relativa

36

4.1.4. Permeabilidade ao vapor

37

4.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

37

4.2.1. Resistência ao arrancamento

37

4.2.2. Resistência ao impacto de corpo duro

39

5. SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DOS SISTEMAS DE FACHADA EM ESTUDO

41

5.1. DESCRIÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO E DADOS DE ENTRADA

41

5.2. RESULTADOS OBTIDOS

44

6. CONCLUSÕES

47

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

47

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

49

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. – Etapas do projeto Circular2B(Circular2B 2021)	1
Fig. 2.1. – <i>Structural Insulated Panel Systems</i> (SIP) (HOUSEPLANSDIRECT)	5
Fig. 2.2. – Encaixe entre painéis (SIPS)	6
Fig. 2.3. – Sistema “ <i>hold-down</i> ” (SIMPSONStrong-Tie)	7
Fig. 2.4. – Espuma de carbono (AliExpress).....	7
Fig. 2.5. – <i>Oriented Strand Board</i> (OSB) (indiamart).....	8
Fig. 2.6. – Poliestireno expandido (EPS) (RESCUE7).....	9
Fig. 3.1. – Resíduos de cerâmica não tratados	18
Fig. 3.2. – Resíduos de cerâmica moídos.....	18
Fig. 3.3. – Escória não tratada	18
Fig. 3.4. – Escória moída	18
Fig. 3.5. – Resíduos de madeira	18
Fig. 3.6. – Resíduos de vidro	18
Fig. 3.7. – Resíduos de vidro moído	19
Fig. 3.8. – Aplicação da argamassa de reboco nas placas OSB	20
Fig. 3.9. – Provetestos para o início do processo de estufa	20
Fig. 3.10. – Estufa WTC Binder.....	21
Fig. 3.11. – Câmara VÖTSCH VC 4034	21
Fig. 3.12. – Balança SartoriusP 3100 S	21
Fig. 3.13. – Estado da formulação 2 após condicionamento na estufa	21
Fig. 3.14. – Serra circular elétrica	22
Fig. 3.15. – Estado dos provetesra o ensaio de absorção de água por capilaridade.....	22
Fig. 3.16. – Provetes com altura excessiva e irregular	23
Fig. 3.17. – Pré-corte dos provetes	23
Fig. 3.18. – Equipamento de medição da condutibilidade térmica pelo método da placa quente.....	24
Fig. 3.19. – Zona de colocação	24
Fig. 3.20. – Isomet 2114.....	25
Fig. 3.21. – Sonda de superfície	25
Fig. 3.22. – Caixa em acrílico.....	26
Fig. 3.23. – Recipiente usado para o ensaio.....	27
Fig. 3.24. – Estado dos provetes após revestimento com impermeabilizante.....	28

Fig. 3.25. – Realização do ensaio	28
Fig. 3.26. – Tina seca	29
Fig. 3.27. – Tina húmida.....	29
Fig. 3.28. – Pastilha metálica	29
Fig. 3.29. – Equipamento de ensaio Proceq DY-216.....	29
Fig. 3.30. – Argamassa após colagem da pastilha metálica.....	30
Fig. 3.31. – Realização do ensaio	30
Fig. 3.32. – Corpo pendular usado no ensaio (equipamento <i>Marinet Baronnie</i>)	31
Fig. 3.33. – Realização do ensaio	31
Fig. 4.1. – Diferença de peso ao longo do tempo	36
Fig. 4.2. – Argamassa 3	39
Fig. 4.3. – Reboco E1.....	39
Fig. 5.1. – Constituição do sistema 1	41
Fig. 5.2. – Constituição do sistema 2	42
Fig. 5.3. – Gráficos de humidade relativa e de temperatura ao longo do ano em Lisboa	43
Fig. 5.4. – Curvas sinusoidais do clima interior da simulação A.....	43
Fig. 5.5. – Gráficos de humidade relativa e de temperatura ao longo do ano em Trondheim	44
Fig. 5.6. – Curvas sinusoidais da situação B	44
Fig. 5.7. – Variação da humidade relativa no SIP comum, em Lisboa, numa semana de Inverno	45
Fig. 5.8. – Variação da humidade relativa no SIP comum, em Trondheim, numa semana de Inverno	45
Fig. 5.9. – Variação da humidade relativa no novo SIP, em Lisboa, numa semana de Inverno	46
Fig. 5.10. – Variação da humidade relativa no novo SIP, em Trondheim, numa semana de Inverno	46

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. - Interação entre o transporte de água e o tipo de poros do material.....	12
Quadro 2.2. – Condutibilidade térmica com 28 dias de cura no estado seco	14
Quadro 2.3. – Resultados da resistência à compressão	15
Quadro 3.1. – Constituição das argamassas para o núcleo SIP	19
Quadro 3.2. – Constituição das argamassas para reboco exterior.....	19
Quadro 3.3. – Normas e dimensões dos provetes utilizados em cada ensaio realizado	23
Quadro 4.1. – Método da placa quente.....	33
Quadro 4.2. – Método transiente modificado de fonte plana	34
Quadro 4.3. – Comparação de λ (W/m°C) dos dois ensaios	35
Quadro 4.4. – Absorção de água por capilaridade	35
Quadro 4.5. – Teor de humidade em função de 50% de humidade relativa	36
Quadro 4.6. – Permeabilidade ao vapor	37
Quadro 4.7. – Resistência ao arrancamento	38
Quadro 5.1. – Características das camadas de cada sistema simulado	42

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Símbolo	Unidade	Significado
Fig.	-	Figura
MFEE	-	Mecanismo Financeiro do Espaço Económico Europeu
CO ₂	-	Dióxido de carbono
FPL	-	<i>Forest Product Laboratory</i>
SIP	-	<i>Structural Insulated Panel</i>
SIPA	-	<i>Structural Insulated Panel Association</i>
OSB	-	<i>Oriented Strand Board</i>
EPS	-	Poliestireno Expandido
XPS	-	Poliestireno Extrudido
UF	-	<i>Urea-formaldehyde</i>
MUF	-	<i>Melamine-urea-formaldehyde</i>
CNF	-	<i>Celulose nanofiber</i>
SiO ₂	-	Dióxido de silício
Fe ₂ O ₃	-	Óxido de ferro
LNEC	-	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
A ^{EPS}	-	Argamassa com EPS
A ^{EPS+Ag}	-	Argamassa com aerogel de sílica
Al ₂ O ₃	-	Óxido de alumínio
CaO	-	Óxido de cálcio
Na ₂ O	-	Óxido de sódio
RCD	-	Resíduos de construção e demolição
ETICS	-	<i>External Thermal Insulation Composite System</i>
λ	W/m°C	Condutibilidade térmica
C	kg/m ² .min ^{0.5}	Coeficiente de absorção de água
δ	kg/(m·s·Pa)	Permeabilidade
μ	-	Fator de resistência à difusão
sd	m	Espessura da camada de ar de difusão equivalente

1

INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

1.1.1. Enquadramento

O trabalho levado a cabo enquadra-se nas tarefas previstas no projeto Circular2B. Este projeto tem como objetivo combinar a eficiência energética com a recuperação de resíduos. No seguimento desta ideia, serão desenvolvidos dois tipos novos de materiais que constituirão o núcleo do SIP e o seu revestimento, substituindo o material que é normalmente utilizado por outro tipo de materiais funcionalmente semelhantes. Pretende-se otimizar os materiais a desenvolver para uso comercial.

O projeto segue diretamente os objetivos estabelecidos pelo Mecanismo Financeiro do Espaço Económico Europeu (MFEEE) 2014-2021 e pelas estratégias nacionais atuais, tendo como prioridade certas áreas importantes como é o caso da energia, habitat, materiais, produção de sistemas avançados e serviços especiais através do desenvolvimento de materiais eco sustentáveis, ao reciclar resíduos e ao incorporá-los no sistema de construção com uma eficiência energética elevada. Espera-se que com este projeto haja uma promoção da economia circular e da descarbonização dentro das principais áreas de atividade do programa. A produção industrial de soluções sustentáveis e mais económicas, irá contribuir para melhoria das condições de vida, criando assim uma redução das disparidades económicas e sociais.

Existem 6 etapas incluídas neste projeto, representadas na figura 1.1.(o trabalho enquadra-se na tarefa A4):

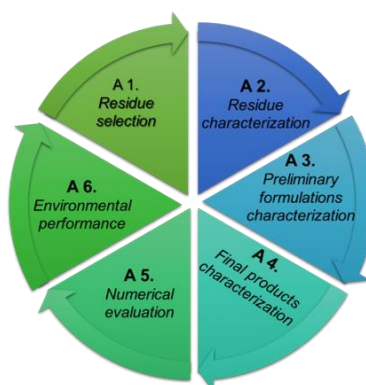


Figura 1.1. – Etapas do projeto Circular 2B (Circular2B 2021)

O projeto Circular 2B pretende:

- Redução de emissões de dióxido de carbono (CO₂) através de energia limpa e tecnologias sustentáveis e seguras;
- Redução da deposição em aterro de resíduos de construção por via da sua reutilização;
- Redução da necessidade energética através do melhoramento do desempenho higrotérmico;
- Redução dos custos das habitações através do desenvolvimento de soluções construtivas adaptáveis a diferentes grupos;
- Criação de emprego através de novas empresas com o objetivo de reciclar e produzir os materiais desenvolvidos neste projeto (Circular2B 2021).

1.1.2. Economia circular

Hoje em dia, o uso de recursos na construção de edifícios é uma área que precisa de ser melhorada, são usados recursos em demasia e ineficientemente. A aplicação dos princípios da economia circular visa a melhorar este uso de recursos num futuro próximo, é urgente que seja implementada o mais rapidamente possível. Contudo, embora na teoria seja um processo que à primeira vista parece ser facilmente implementado, na prática não é o caso, existe vários dilemas como por exemplo: flexibilidade contra longevidade, produtos simples contra produtos compostos, renovações contra novas construções, etc.

Existem 3 objetivos principais que a economia circular tenta atingir:

- Durabilidade – focar na manutenção e vida útil dos edifícios, planejar a construção para que seja possível manter os edifícios de médio a longo prazo;
- Adaptabilidade – continuação das funcionalidades dos edifícios ou realização de mudanças de maneira a estender a sua vida útil;
- Reduzir ou gerir o desperdício – como o nome indica “Economia Circular”, um dos seus maiores focos é a reutilização de elementos de edifícios (como componentes ou partes) e utilizá-las na construção com o objetivo de reduzir a utilização excessiva de desperdício e com um foco na reutilização de elementos de edifícios.
- Os princípios gerais da economia circular aplicada ao setor da construção são:
- Os princípios da economia circular e edifícios sustentáveis são aplicáveis a todos os intervenientes;
- Escolhas sustentáveis têm de ter em consideração os custos totais dos ciclos de vida, assim como o retorno financeiro e não-financeiro dos investimentos;
- Têm de existir ou ser desenvolvidos modelos económicos viáveis para cada operador económico;
- Têm de ser aplicados princípios quando se fala de proporcionalidade (benefícios têm de ser superiores aos custos);
- É necessário um maior conhecimento sobre técnicas de construção para facilitar a desconstrução e para melhorar a durabilidade e adaptabilidade dos edifícios;
- A durabilidade dos edifícios depende de um projeto melhor, uma melhor execução de produtos da construção e partilha de informação;
- Prevenção de demolição prematura de edifícios através de uma nova cultura de projeto; Criar produtos e sistemas de maneira que sejam facilmente reutilizados, reparados, reciclados e recuperados. (Comissão Europeia 2020)

1.2. OBJETIVOS

Neste trabalho o principal objetivo consiste em avaliar o desempenho higrotérmico e mecânico de novas argamassas térmicas, com incorporação de resíduos em painéis de fachada. Para atingir este objetivo principal definiram-se as seguintes tarefas:

- Avaliação do desempenho higrotérmico de novas argamassas térmicas com incorporação de resíduos, através da medição experimental das propriedades higrotérmicas mais relevantes, tais como: condutibilidade térmica no estado seco e em função do teor de humidade, teor de humidade, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água;
- Avaliação do desempenho mecânico de novos sistemas SIP, nomeadamente a aderência ao arrancamento, através da aplicação de diferentes materiais como primário, cola e argamassa adesiva, e a resistência ao impacto de corpo duro;
- Simulação do desempenho higrotérmico do novo painel SIP, para diferentes condições climáticas e de ambiente interior, e comparação com o desempenho de um painel SIP com EPS.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O presente trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1 – apresenta uma introdução sobre o tema em estudo, a motivação, nomeadamente o enquadramento no âmbito do projeto Circular2B, e a definição dos principais objetivos;
- Capítulo 2 – descreve o estado da arte dos principais assuntos avaliados na presente dissertação, nomeadamente os tipos de painéis de fachada e materiais constituintes, e as propriedades higrotérmicas e mecânicas de argamassas;
- Capítulo 3 – apresenta a campanha experimental levada a cabo descrevendo os materiais em estudo, a preparação das amostras e os métodos de ensaio realizados, referindo também os principais cuidados a ter na realização dos mesmos;
- Capítulo 4 – apresenta os resultados da campanha experimental realizada;
- Capítulo 5 – avalia o desempenho higrotérmico dos novos sistemas através de simulações numéricas efetuadas com recurso ao programa WUFI Pro.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. SISTEMAS DE FACHADA SIP (*STRUCTURAL INSULATED PANEL*)

2.1.1. O painel

Os sistemas SIP foram inicialmente criados em 1935 por *Forest Product Laboratory* (FPL) nos Estados Unidos. Este tipo de sistemas é caracterizado por duas camadas de materiais rígidos com um núcleo a servir de isolante. Este sistema foi estudado durante quase 20 anos e só começa a ser produzido industrialmente em 1952. Em 1990 foi criada a empresa *Structural Insulation Panel Association* (SIPA) que tinha como objetivo a comercialização do SIP. A procura deste sistema tem vindo a aumentar ao longo dos anos devido à sua eficiência e baixo custo monetário. (Panjehpour, Abang Ali et al. 2013)

A figura 2.1. apresenta um exemplo de um painel estrutural SIP. Na figura é possível observar 3 camadas (A constituição referida e apresentada na figura é da zona corrente. Nos painéis são também integrados montantes que lhes conferem a capacidade de suportar cargas.):



Figura 2.1. – *Structural Insulated Panels System* (SIP) (HOUSEPLANSDIRECT)

- Duas camadas de madeira exteriores que são constituídas por Oriented Strand Board (OSB). Este é o tipo de material mais usado neste tipo de sistemas devido às suas propriedades

mecânicas eficientes, também será o tipo de material utilizado ao longo do desenvolvimento desta tese para alguns dos casos estudados;

- Uma camada no meio que normalmente é constituída ou por poliestireno extrudido (XPS) ou por poliestireno expandido (EPS). A razão para a utilização destes materiais como núcleo vem do facto de serem excelentes isolantes térmicos e possuírem características mecânicas vantajosas.

De acordo com L.Brown et al., 2011, tem de ser utilizado um selante especial nas ligações entre painéis de maneira a evitar que haja infiltração de ar e perda de calor pelas juntas. Segundo o autor, a razão pela qual este tipo de materiais é constituído maioritariamente por madeira, é devido ao facto de a madeira ser de baixo custo e ser um bom isolante térmico.(Brown 2012)

W.H. Porter 2004, é o responsável por criar as ligações típicas da construção em madeira, este tipo de ligação passa por criar uma cavidade nas suas extremidades de maneira a ser possível conectar vários painéis SIP em série através da ajuda de grampos e pregos. (Porter 2004)

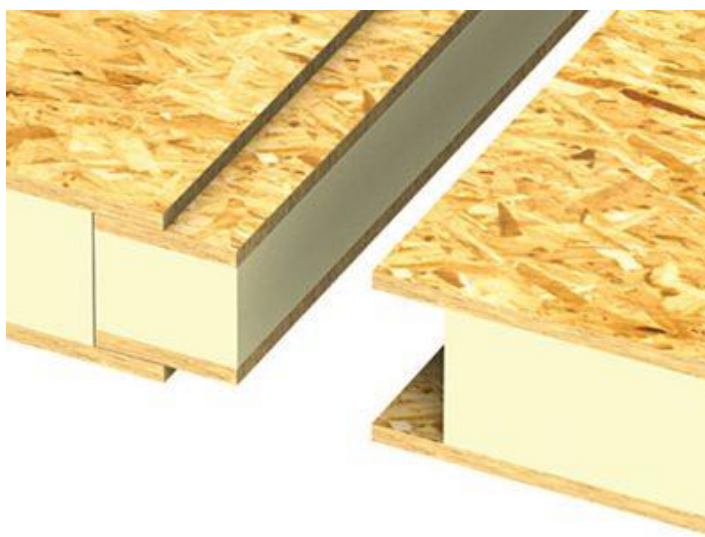


Figura 2.2. – Encaixe entre painéis (SIPS)

A figura 2.2. mostra um exemplo de ligação, o painel da direita possui a referida cavidade, esta é ligada ao painel da esquerda de forma que fiquem conectados. Repetindo este processo várias vezes obtemos vários painéis SIP em série ligados entre si.

Em 2009, W.K. Porter também tenta resolver outro dos problemas do SIP que é a sua dificuldade de aderência a paredes ou outro tipo de elementos construtivos, para tal, o autor sugere a utilização de sistemas “hold-down” que no fundo são perfis de metal que permitem a fácil conexão dos painéis SIP. (Porter 2009)



Figura 2.3. – Sistema “hold-down” (SIMPSON Strong-Tie)

A figura 2.3. representa um exemplo dos sistemas “hold-down”. Como é possível observar, o perfil de metal é colocado de lado na parede e instalado com pregos. Após a instalação, será possível conectar facilmente um painel SIP na parede, colocando-o no perfil de metal.

Relativamente ao tipo de materiais usados para a produção de SIP, existem casos em que se usam materiais diferentes dos típicos Oriented Strand Board (OSB) em madeira ou do XPS e EPS como núcleo, é o caso do estudo apresentado em Miller et al., 2010 em que o autor usa espuma de carbono como núcleo com o objetivo de obter um painel com um rácio de densidade e resistência à compressão enquanto mantém um peso relativamente baixo. A razão pela qual o autor decide usar espuma de carbono está relacionada com a porosidade deste isolante, possui uma porosidade entre 70% a 95%, os poros são esféricos e estão distribuídos uniformemente ao longo do material. (Miller, Lewis et al. 2010)



Figura 2.4. – Espuma de carbono (AliExpress)

A figura 2.4. mostra um exemplo do material em questão pela empresa AliExpress. Como é possível observar, é um material com uma porosidade bastante visível e elevada e que normalmente possui cor preta. Podem ser utilizados diferentes tamanhos de espuma de carbono com pequenas variações na porosidade como mostra a figura.

2.1.2. Principais materiais constituintes dos SIP

No início da década de 1970, nos Estados Unidos, começaram a ser produzidas placas de partículas de madeira que eram denominadas de “waferboard”. Estas placas foram inovadoras no sentido que para a sua produção, eram utilizadas partículas maiores em relação às partículas utilizadas para os materiais mais comuns. Na mesma década, foi produzido pela primeira vez, numa segunda geração, um material denominado de “Oriented Strand Board (OSB)”, este painel estrutural rapidamente dominou o mercado da altura devido às suas características mecânicas e passado pouco tempo, já era feita a produção em massa deste aglomerado na indústria de 1970. (Silva 2006)

O OSB é caracterizado por ser um painel que possui fibras de madeira cruzadas entre si e em camadas, o que faz com que aumente a sua resistência mecânica e rigidez, também é um excelente isolante, fazendo com que seja bastante usado na construção civil atual.



Figura 2.5. – *Oriented Strand Board (OSB)* (indiamart)

Na figura 2.5. é possível observar um exemplo construído pela empresa “indiamart” da constituição do material em questão, as diferentes lascas de madeira apresentadas na figura acima estão divididas em diversas camadas que variam dependendo da sua espessura.

Normalmente, são usados certos adesivos na fabricação do OSB que oferecem um grande número de vantagens ao material, estes adesivos são: *urea-formaldehyde* (UF) e *melamine-urea-formaldehyde* (MUF), contudo, (Veigel, Rathke et al. 2012) reparam que após certo tempo, começa a haver deformação das camadas de OSB (embora pequena) originadas nestes adesivos, que provocam um enfraquecimento nas ligações entre as diversas camadas da placa. Os autores afirmam que o uso de nanofibra de celulose

(*celulose nanofiber*) “CNF” é bastante promissor no que toca ao reforço dos adesivos UF. Veigel e Rathke testam então painéis de OSB com e sem CNF. Para isso consideram o seguinte:

- Misturas adesivas: na experiência foi usada uma mistura de CNF com diâmetro na ordem dos 35nm e reparou-se que a viscosidade aumentou nos painéis que possuíam UF e um aumento ainda maior nos painéis que possuíam MUF (o facto de a viscosidade aumentar rapidamente vai limitar a quantidade de CNF que pode ser adicionada à amostra);

- Propriedades mecânicas: a densidade de todas as amostras usadas foi de $0,77 \pm 0,03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Segundo os autores, houve um aumento de espessura de cerca de 40% nos painéis OSB. A adição de nanofibra de celulose mostrou ser bastante positiva pelas seguintes razões:

- Aumento da resistência à flexão de $50,8 \pm 5,7 \text{ MPa}$ para $59,0 \pm 6,1 \text{ MPa}$;
- Aumento da resistência à fractura em 28% (Veigel, Rathke et al. 2012).

Em conclusão, nota-se que o uso de CNF, embora possa aumentar a viscosidade do material, melhora bastante as propriedades mecânicas deste. Ao longo dos testes, os painéis que tiveram aplicação de CNF tiveram os melhores resultados, ou seja, o uso de nanofibra de celulose não só pode ajudar no problema de deformação das camadas do OSB como também pode melhorar as suas características mecânicas.

O poliestireno expandido foi inicialmente comercializado em 1930, na Alemanha, pela empresa IG Farbenindustrie e tem sido muito usado na construção civil desde a sua criação devido às suas propriedades que permite que o material possa ser usado em diferentes áreas da construção. (Tessari 2006)

Poliestireno Expandido (EPS) – através da expansão da resina poliestireno forma-se um material de espuma rígida, esta espuma é recorrentemente utilizada como isolante térmico. (Tessari 2006)

Conforme foi anteriormente referido o EPS é corretamente usado como núcleo dos sistemas SIP.

A figura 2.6. mostra um exemplo de poliestireno expandido.



Figura 2.6. – Poliestireno expandido (EPS) (RESCUE7)

Tessari 2006, fez um estudo em que conduziu entrevistas a diversos tipos de empresa com o objetivo de saber a percentagem que usa EPS na construção, segundo este estudo, 88% das empresas utilizam EPS

enquanto 12% não utilizam. São resultados bastante esclarecedores no que toca à utilização do material na construção civil. A autora também questiona às empresas que utilizam o material, sobre que tipo de EPS é utilizado, isto é, se utilizam EPS reciclado ou virgem e os resultados foram os seguintes:

- Cerca de 18% das empresas apenas utiliza EPS virgem;
- Nenhuma empresa utiliza EPS apenas reciclado;
- 82% das empresas utiliza ambos reciclado e virgem.

Isto significa que uma grande percentagem das empresas acaba por usar o EPS reciclado, ou seja, o panorama ambiental parece ser bastante promissor, tendo em conta que o EPS é um material que não só pode ser reciclado como também é reciclado pela maior parte. Visto que nem todas as empresas utiliza EPS reciclado e mesmo as que o utilizam também o usam virgem, deverá haver um incentivo no futuro para que apenas se passe a usar reciclado para um futuro na construção civil mais sustentável. (Tessari 2006)

2.1.3. Argamassas inovadoras

Visto que no presente trabalho se pretende desenvolver argamassas térmicas com incorporação de resíduos para substituição do isolamento térmico em SIP é de grande importância perceber o seu contributo no desempenho térmico de fachadas, o EPS não será o único material utilizado como núcleo do painel SIP uma vez que se pretende testar a sua substituição por novos tipos de argamassa com incorporação de resíduos. Será também testada a adição de nano partículas, para que por comparação com os resultados obtidos com argamassa sem nano partículas, seja possível chegar a uma conclusão sobre a vantagem ou desvantagem da sua utilização.

(Li, Xiao et al. 2004) testa o efeito de nano partículas em argamassa, mais especificamente, nano-SiO₂ (dióxido de silício) e nano-Fe₂O₃ (óxido de ferro). Nesta experiência, foram testados 11 provetes:

- 1 provete sem nenhum tipo de adição;
- 3 provetes com nano-Fe₂O₃ e UNF (agente redutor de água);
- 3 provetes com nano-SiO₂ e UNF; 1 provete com nano-SiO₂, nano-Fe₂O₃ e UNF;
- 2 provetes com nano-Fe₂O₃, UNF e sílica ativa;
- 1 provete com UNF e sílica ativa.

Foram analisados os valores da resistência à compressão e os valores da resistência à flexão de cada provete no final de 7 dias e depois voltaram a ser analisados no final de 28 dias.

Relativamente à força de compressão, os resultados obtidos foram os seguintes: reparou-se que nos provetes que continham nano-Fe₂O₃ e UNF, o valor da força de compressão em MPa, estava indiretamente relacionado com a quantidade de nano-Fe₂O₃, ou seja, quanto maior fosse a quantidade de nano partículas presente no provete, menor era a sua força de compressão. No final dos 7 dias a diferença entre valores não era muito considerável, ao contrário dos valores analisados no final dos 28 dias.

Os provetes que continham nano-SiO₂ e UNF comportaram-se de uma maneira oposta aos provetes de nano-Fe₂O₃ e UNF, isto é, possuem uma relação diretamente proporcional com a quantidade de nano-SiO₂ presente nos provetes.

Relativamente aos valores da resistência à flexão, tanto os provetes contendo nano-SiO₂ como os provetes com nano-Fe₂O₃ apresentam um comportamento diretamente proporcional com a quantidade de nano partículas respetivas.

Em ambos os casos, os valores dos provetes com nano partículas foi superior ao provete que não possuía qualquer tipo de nano partícula.

Em conclusão, observa-se que a adição de nano partículas pode alterar bastante os valores das forças de compressão e de resistência à flexão, o que será algo que também vai ser aprofundado e confirmado no decorrer dos testes feitos nesta tese. (Li, Xiao et al. 2004)

(Maia, Pedroso et al. 2021) testam as propriedades de uma argamassa de aerogel que possui na sua constituição agentes reológicos, resinas, agentes hidrofóbicos, entre outros.

Após 28 dias foi aplicado um revestimento de multicamadas com uma espessura de cerca de 5 mm. O revestimento era composto por uma camada de base, malha de fibra de vidro, resinas acrílicas e um revestimento de acabamento.

O estudo compara a argamassa de aerogel com as argamassas com EPS que são normalmente utilizadas na construção civil. Tendo em conta que o aerogel possui uma baixa densidade, as argamassas que o possuem na sua constituição têm uma condutibilidade térmica baixa, por outro lado, a sua elevada porosidade resulta na absorção por capilaridade superior. Apesar de tudo, verificou-se que a condutibilidade térmica no estado de saturação era semelhante nas duas argamassas.

Relativamente aos valores de condutibilidade térmica no estado seco e saturado, o estudo compara os valores fazendo o rácio da argamassa de aerogel a dividir pelos valores da argamassa com EPS. Os valores obtidos foram os seguintes, para o estado seco, o rácio foi de 0,6 e para o estado saturado o rácio foi de 1. Assim, é possível concluir que a maior diferença de valores se encontra no estado seco, onde o valor da condutibilidade térmica da argamassa com EPS é superior à da argamassa de aerogel, por outro lado no estado saturado, o valor do rácio é de 1, o que significa que os valores são de facto iguais.

2.2. PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS E MECÂNICAS

O uso de argamassas em sistemas de fachada implica um conhecimento muito específico das suas propriedades mais relevantes no desempenho higrotérmico e mecânico dessas mesmas fachadas. Como tal, apresenta-se...

2.2.1. Propriedades hígricas

Os materiais usados, no setor da construção, apresentam um certo nível de porosidade. É através destes poros que a humidade se infiltra, modificando o teor de humidade do material e comprometendo a sua estabilidade e vida útil. Pode ocorrer adsorção através do ar principalmente em zonas que possuem uma quantidade elevada de vapor de água no seu meio (como é o caso de construções que se situem à beira do mar) ou então também pode haver absorção de água líquida quando esta entra em contacto com o material, como é o caso da chuva. Pode haver maior ou menor absorção dependendo do tipo de material, da sua constituição ou da sua massa volúmica. (Ramos 2000)

Existem dois tipos de porosidade nos materiais:

- Porosidade aberta: este tipo de porosidade é problemático visto que permite que haja circulação de água no material devido ao facto de os poros se interligarem;
- Porosidade fechada: ao contrário da porosidade aberta, os poros num material com este tipo não se encontram próximos uns dos outros nem estão interligados, estão afastados, fazendo com que a circulação de água no material seja impossível, tornando o material impermeável (de Azevedo 2013).

Segundo de Azevedo (2013) a interação entre poros e água dá-se da seguinte maneira:

Os poros capilares ou mesoporos formam uma rede que permite a circulação de água no estado líquido, os macroporos transportam a água no estado gasoso e, embora pouco significativo, também transportam água líquida, por último, os microporos não participam nem para o transporte de água líquida nem de água no estado gasoso.

Quadro 2.1. - Interação entre o transporte de água e o tipo de poros do material

	Mesoporos	Macroporos	Microporos
Transporte de água no estado líquido	Permite	Pouco Significativo	Não Permite
Transporte de água no estado gasoso	Não Permite	Permite	Não Permite

Teixeira, Coutinho et al. (2001) chega à conclusão que para a mesma rocha existem diferentes coeficientes de permeabilidade, ao analisar Basalto Denso, Basalto Diorito, Mármore, Granito e Arenito. (Teixeira, Coutinho et al. 2001)

A permeabilidade ao vapor é uma característica que os materiais possuem que permite uma maior ou menor difusão de vapor de água através deles. Define-se como a quantidade de vapor de água que, por unidade de tempo e espessura, atravessa por difusão um provete desse material, quando sujeito a uma diferença unitária de pressão de vapor entre as suas faces.

Faria (2011) conduz ensaios sobre a permeabilidade ao vapor em provetes que estiveram expostos ao ambiente de laboratório. Foram analisados dois tipos diferentes de composição, a composição 1 era composta por Cal Aérea, Metacaulino e aditivos e a composição 2 era composta por Cal Aérea, Pó de pasta cerâmica e aditivos. Cada composição foi analisada com 5 provetes em forma de disco no laboratório durante 12h e depois deixados em sacos hermeticamente fechados durante 5 dias com uma temperatura média de cerca de 21°C. (Faria 2011)

Os resultados de Faria (2011) concluem que a composição 1 possui boa permeabilidade ao vapor de água ($2,11 \times 10^{-9}$ Kg/m² .s.Pa) enquanto que a composição 2 apresentou um valor de permeabilidade ao vapor negativo ($-8,98 \times 10^{-9}$ Kg/m² .s.Pa). Um resultado negativo significa que existe uma absorção de água por parte do material em questão demasiado alta, e neste caso, é possível observar que em módulo, o valor da composição 2 é muito superior à da composição 1, ou seja, é possível concluir que as partículas da composição 2 possuem uma permeabilidade ao vapor muito reduzida. Segundo Faria (2011) uma possível razão para a composição 2 apresentar este valor pode dever-se à capacidade de absorção das partículas de cerâmica:

“A razão para esse comportamento pode estar relacionada com o facto das partículas de pó da pasta cerâmica, que não reagiram com a cal aérea terem a capacidade de absorver humidade com muita facilidade, assim o provete de argamassa absorve humidade do meio ambiente exterior.” – Faria (2011)

Temp, A. L. (2014) analisa os ensaios feitos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em argamassas, e chega à conclusão de que a permeabilidade ao vapor de água é afetada por diversos fatores como por exemplo: o tipo de areia, de composição e de cura. Também é importante referir que através do estudo realizado no LNEC e pela conclusão a que o autor chega, os materiais que possuem maior permeabilidade ao vapor de água são os rebocos não tradicionais enquanto os materiais que são menos permeáveis são as argamassas ricas em cimento ou com areia argilosa. (Temp 2014)

É interessante reparar que ambos os autores mencionados chegam a uma conclusão bastante parecida que é o facto de argamassas com alto teor em areia argilosa ou com pasta cerâmica são os materiais mais propícios a possuírem uma permeabilidade ao vapor bastante reduzida, como Faria refere, a razão para tal está muito provavelmente relacionada com o facto de o pó de pasta cerâmica não reagir com as outras componentes do material e acabar por absorver a maior parte da humidade do clima exterior.

2.2.2. Propriedades térmicas

Uma das propriedades térmicas analisadas será a condutibilidade térmica. A condutibilidade térmica é uma grandeza física que mede a condução de calor dos materiais.

(Rodrigues 2010) mede a condutibilidade térmica de diferentes tipos de provetes usando o sistema holometrix (mesmo sistema usado nesta tese). Foram analisados respetivamente provetes de poliuretano e argamassa com inertes de cortiça. No ensaio, os provetes foram analisados para diferentes valores de humidade relativa, respetivamente 50% e 90% e os resultados foram os seguintes:

- Os provetes da espuma de poliuretano tiveram uma média de condutibilidade térmica na ordem dos 0,038 [W/(m.K)] para uma humidade relativa de 50% e uma média de condutibilidade térmica de 0,067 [W/(m.K)] para uma humidade relativa de 90%;
- Os provetes de argamassa com inertes de cortiça tiveram uma média de condutibilidade térmica na ordem dos 0,176 [W/(m.K)] para uma humidade relativa de 50% e uma média de condutibilidade térmica de 0,233 [W/(m.K)] para uma humidade relativa de 90% (Rodrigues 2010).

Assim, é possível concluir que quanto maior for a humidade relativa, maior será a condutibilidade térmica, isto verifica-se em ambos os materiais, embora para o contexto desta dissertação seja mais importante o comportamento dos provetes da argamassa com inertes de cortiça.

(Gomes, Flores-Colen et al. 2018) medem a condutibilidade térmica usando o método transiente modificado de fonte plana (modified transiente plane source), os testes foram efetuados para uma temperatura média de 20 a 23 °C. Para que fosse possível evitar a condução de calor entre amostras, estas foram postas em cima de uma placa de poliestireno extrudido (XPS).

São medidas duas argamassas:

- Argamassa com EPS (A^{EPS});
- Argamassa com EPS e aerogel de sílica (A^{EPS+Ag}).

Os provetes foram testados após a cura ter sido feita em 28 dias e também foram testados no estado seco. Para o estado seco, as amostras foram colocadas numa estufa de 60°C por quatro dias

Os resultados estão representados na Quadro 2.2.:

Quadro 2.2. – Condutibilidade térmica com 28 dias de cura e no estado seco

	28 dias λ [W/m·K]	Seco λ [W/m·K]
A ^{EPS}	0,054	0,051
A ^{EPS+Ag}	0,041	0,040

Como é possível observar, para ambos os casos, a argamassa com EPS possui valores de condutibilidade térmica superiores aos da argamassa com EPS e aerogel de sílica, assim, é possível concluir que a presença de aerogel de sílica contribui para uma pior condutibilidade térmica nas argamassas.

O método transiente modificado de fonte plana (modified transiente plane source) será um dos métodos usados neste trabalho para determinação da condutibilidade térmica dos provetes testados, logo, será interessante ter os valores de (Gomes, Flores-Colen et al. 2018) como base para ter uma ideia do tipo de valores que serão obtidos.

2.2.3. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas são umas das componentes mais importantes das argamassas, é necessário garantir que a sua estrutura não se encontra comprometida.

(Zhao, Remond et al. 2015) analisam as propriedades mecânicas de provetes com cimento Portland como base, os provetes testados foram os seguintes:

- Argamassas recicladas secas;
- Argamassas recicladas saturadas;
- Argamassa calcária seca;
- Argamassa calcária saturada.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Em termos de resistência à flexão, as argamassas calcárias obtiveram valores superiores às argamassas recicladas, o intervalo de valores foi de 11,79 a 12,15 MPa e as argamassas recicladas obtiveram um intervalo de valores de 7,72 a 8,78 MPa;
- A resistência à compressão também foi superior nas argamassas calcárias, com um intervalo de valores de 66,75 a 72,00 MPa enquanto nas argamassas recicladas o intervalo de valores foi de apenas 41,96 a 49,84 MPa;
- Tanto a resistência à compressão como a resistência à flexão foram sempre superiores nas argamassas no estado saturado do que no estado seco.

Em conclusão, as argamassas calcárias têm uma resistência mecânica superior às argamassas recicladas, em todos os ensaios os seus valores foram superiores e em termos de condicionamento, também há uma clara diferença de valores do estado saturado para o estado seco, onde a resistência das argamassas quando saturadas é superior ao seu estado seco.

(Li, Xiao et al. 2004) realizaram um estudo sobre o estudo das propriedades mecânicas em argamassas com a adição de nano partículas.

Foram analisadas 3 argamassas com nano-SiO₂ denominadas por A-5, A-6 e A-7 e 3 argamassas com nano-Fe₂O₃ denominadas por A-2, A-3 e A-4, as argamassas possuíam a mesma quantidade de nano partículas para que fosse possível a comparação de resultados.

A quantidade de nano partículas em cada argamassa era a seguinte:

- A-2 – 13.8 kg/m³ de nano-Fe₂O₃;
- A-3 – 23 kg/m³ de nano- Fe₂O₃;
- A-4 – 46 kg/m³ de nano- Fe₂O₃;
- A-5 – 13.8 kg/m³ de nano-SiO₂;
- A-6 – 23 kg/m³ de nano- SiO₂;
- A-7 – 46 kg/m³ de nano- SiO₂.

As argamassas fizeram a cura à temperatura do laboratório durante 7 dias e 28 dias e os resultados à resistência da compressão estão representados na Quadro 2.3.:

Quadro 2.3. – Resultados da resistência à compressão

	Resistência à compressão (MPa)	
	Dia 7	Dia 28
A-2	21,4	36,4
A-3	20,6	33,1
A-4	21,1	30,0
A-5	18,6	32,9
A-6	21,3	33,8
A-7	21,3	36,4

Como é possível observar, para a mesma quantidade de nano partículas, as argamassas com nano-SiO₂ possuem valores de resistência à compressão superiores. A exceção é a argamassa A-2 e A-5 onde se verifica que neste caso, a argamassa com nano-Fe₂O₃ é a que possui um maior valor de resistência à compressão, uma possível explicação poderá ser o facto de estas argamassas serem as que possuem a menor quantidade de nano partículas, logo, não se notará uma diferença tão significativa de valores.

3

CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1. MATERIAIS

No presente trabalho desenvolveram-se argamassas com incorporação de diferentes resíduos de várias origens, de acordo com o estipulado no projeto Circular2B, com o objetivo de obter formulações com boas características higrotérmicas e mecânicas, sem adição de cimento. Os resíduos apresentados resultam de diferentes processos industriais, como é o caso da produção de mobília de madeira, isolamento de edifícios, incineração de resíduos sólidos urbanos, resíduos de construção e demolição e, finalmente, produção de plástico e vidro. Os resíduos foram os seguintes:

- **Resíduo Cerâmico** – devido à sua granulometria dispersa inicial, este material teve de ser moído por 32 h, ficando com uma granulometria entre $0,9\mu\text{m}$ e $175\mu\text{m}$. O elemento em maior percentagem na sua constituição é o dióxido de silício (SiO_2) com cerca de 70,98%, entre outros, como por exemplo o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o óxido de cálcio (CaO). As figuras 3.1. e 3.1. representam o material antes e depois do tratamento.
- **Escória** – resultante da incineração de resíduos sólidos urbanos, com uma granulometria inferior a 2,0 mm. Foi necessário peneirar o material de maneira que a sua granulometria baixasse significativamente, para $63\mu\text{m}$ e $50\mu\text{m}$. A constituição do material possui magnésio, potássio, sódio, cálcio e ferro. As figuras 3.3. e 3.4. apresentam o material antes e depois de tratamento.
- **Resíduo de Madeira** – apenas foi usado material com uma granulometria superior a $63\mu\text{m}$ após a peneiração. O resíduo foi seco e armazenado em sacos de plástico de maneira a evitar contaminação e variações de humidade. A figura 3.5. representa o material depois de tratamento.
- **Poliuretano** – o resíduo de poliuretano foi fornecido com uma variação de granulometria, logo, foi necessário usar uma peneira de 1.60 mm. O poliuretano obtido através de placas de poliestireno.
- **Resíduo de Vidro** – possui uma granulometria entre $0,9\mu\text{m}$ e $175\mu\text{m}$ e é composto por óxido de sódio (Na_2O), SiO_2 , Al_2O_3 , e CaO como os elementos químicos em maior quantidade. As figuras 3.6. e 3.7. apresentam o material antes e depois de tratamento.
- **Cinzas Volantes** – as cinzas volantes possuem na sua constituição SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 em maior percentagem.
- **Mármore e Granito** – os materiais foram secos e peneirados com peneiras de 2,0 mm e $500\mu\text{m}$, assim, foi possível fazer com que as partículas de maior dimensão desagregassem e os materiais metálicos de menor dimensão provenientes do processo de corte fossem removidos.

Foram desenvolvidos dois tipos de materiais com recurso aos resíduos escolhidos:

- Argamassas não cimentícias para o núcleo do SIP, que se pretendia que tivessem um bom desempenho térmico;

- Argamassa não cimentícia de reboco exterior.

No projeto foram desenvolvidas várias formulações de argamassas para reboco exterior mas para este trabalho apenas se avaliou uma que será descrita nos subcapítulos seguintes.



Figura 3.1. – Resíduos de cerâmica não tratados



Figura 3.2. – Resíduos de cerâmica moídos



Figura 3.3. – Escória não tratada



Figura 3.4. – Escória moída



Figura 3.5. – Resíduos de madeira



Figura 3.6. – Resíduos de vidro

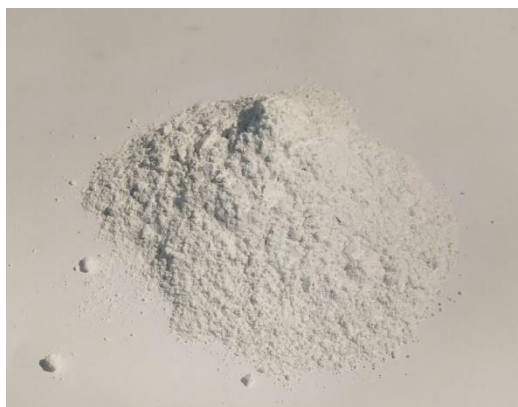


Figura 3.7. – Resíduos de vidro moído

Apresenta-se no quadro 3.1. a constituição das argamassas desenvolvidas para o núcleo do SIP (1, 2, 3, 4 e 5).

Quadro 3.1. – Constituição das argamassas para o núcleo SIP

Argamassa	Percentagem de resíduo							
	Mármore	Granito	Cinzas Volantes	Escória	Resíduo Cerâmico	Resíduo de Vidro	Poliuretano	Resíduo de Madeira
1					77%	17%	3%	3%
2		45%	45%				5%	5%
3			90%				5%	5%
4	24%		24%	46%			3%	3%
5	45%		45%				5%	5%

O quadro 3.2. contém a constituição da argamassa para reboco exterior (E1), onde “RCD” significa resíduos de construção e demolição.

Quadro 3.2. – Constituição das argamassas para reboco exterior

Argamassa	Percentagem de resíduo		
	Cinzas volantes	Vidro moído	RCD
E1	25%	25%	50%

3.2. PROVETES DE ENSAIO

3.2.1. Produção dos provetes

Os provetes necessários para a caracterização das argamassas foram produzidos na Universidade de Trás-Os-Montes, parceiro do projeto Circular2B responsável por essa tarefa. As figuras seguintes mostram a preparação das argamassas usadas para os ensaios. Após a mistura da argamassa, foram produzidos os diversos provetes necessários para a campanha experimental, como por exemplo para a realização de ensaios de arrancamento: na figura 3.8. demonstra-se a aplicação da argamassa de reboco nas placas de OSB e na figura 3.9. os provetes prontos para iniciar o processo de cura em estufa a 85 °C.



Figura 3.8. – Aplicação da argamassa de reboco nas placas de OSB



Figura 3.9. – provetes prontos para o início do processo de estufa

3.2.2. Preparação dos provetes para os ensaios experimentais

Todos os provetes foram previamente condicionados de acordo com as condições necessárias para os ensaios a realizar. Para a secagem dos provetes (para obtenção do estado seco) o condicionamento foi feito numa estufa (WTC Binder como mostra a figura 3.10.) a 90 °C e para as condições de 23 °C e 50% de humidade relativa foi feito numa câmara climática (VÖTSCH VC 4034 como mostra a figura 3.11.). O condicionamento termina assim que os provetes estejam em equilíbrio com as condições em que se encontra, ou seja, assim que a massa dos mesmos (medida através de uma balança Sartorius BP 3100 S como mostra a figura 3.12.) não apresenta uma variação maior do que 0.1% entre três pesagens consecutivas no espaço de 24h. Tanto o condicionamento como os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Física das Construções da FEUP.

A formulação 2 após condicionar na estufa encurvou (ver figura 3.13.) o que inviabilizou a medição da sua condutibilidade térmica através do método da placa quente. Os provetes para este ensaio necessitam de possuir uma face lisa e plana para garantir que a interface de contacto com o equipamento não fique comprometida.



Figura 3.10. – Estufa WTC Binder



Figura 3.11. – Câmara VÖTSCH VC 4034



Figura 3.12. – Balança Sartorius BP 3100 S



Figura 3.13. – Estado da formulação 2 após condicionamento na estufa

Para a medição da condutibilidade térmica através do método transiente modificado de fonte plana, prepararam-se três amostras de cada formulação de forma a obter provetes com 10x10 cm, garantindo as dimensões necessárias para medição. Para tal, foi usada uma serra circular elétrica (ver figura 3.14.).



Figura 3.14. – Serra circular elétrica

Para a preparação dos provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade, recorreu-se ao uso da serra elétrica e de um serrote para obter provetes com as dimensões requeridas pela norma do ensaio (160x160x40 mm, posteriormente partidos a meio como se pode ver na figura 3.15.).



Figura 3.15. – Preparação dos provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade

Na preparação dos provetes para os ensaios de arrancamento foi necessário proceder ao tratamento da superfície superior de forma que se apresentasse plana. Além disso, durante o processo de cura, os provetes expandiram além da espessura admissível para realizar o ensaio (Figura 3.16.). Foi, portanto, necessário reduzir a espessura para que a serra circular conseguisse realizar os pré-cortes (ver figura 3.17.) até ao OSB, assim, a solução foi cortar os provetes de lado de maneira a retirar o excesso, após o excesso ter sido retirado, foi necessário garantir que a superfície dos provetes estava lisa para não interferir com o ensaio, para isso foi necessário limar.



Figura 3.16. – Provetes com altura excessiva e Irregular



Figura 3.17. – Pré-corte dos provetes

Salienta-se que alguns dos ensaios só foram realizados para a argamassa 3 tendo em conta que esta foi a argamassa escolhida no projeto para posteriormente ser usada para a produção de painéis SIP. A argamassa de reboco só foi avaliada em termos mecânicos.

O quadro 3.3. indica as normas usadas para cada ensaio assim como as dimensões dos provetes e o tipo de argamassa testado.

Quadro 3.3. – Normas e dimensões dos provetes utilizados em cada ensaio realizado

Método	Norma de ensaio	Dimensões dos provetes (mm)	Material
Condutibilidade térmica – Método da Placa Quente	EN 12667	300x300x30	Argamassas de núcleo: 1, 3, 4 e 5
Condutibilidade térmica – Método Transiente modificado de fonte plana	EN 1745	100x100x30	Argamassas de núcleo: 1, 2, 3, 4 e 5
Absorção de água por capilaridade	1015-18 / ISO 15148	160x40x40	Argamassa de núcleo: 3
Teor de humidade a 50% HR	ISO 12571	100x100x30	Argamassas de núcleo: 1, 2, 3, 4 e 5
Permeabilidade ao vapor de água	ISO 12572	100x100x20	Argamassa de núcleo: 3
Resistência ao arrancamento	EN 1015-12	200x200	Argamassa de núcleo: 3 Argamassa de reboco
Resistência ao impacto de corpo duro	ISO 7892	200x200	Argamassa de núcleo: 3 Argamassa de reboco

3.3. MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS

3.3.1. Condutibilidade térmica

3.3.1.1. Método da placa quente (*Guarded hot plate method*)

Para a determinação da condutibilidade térmica pelo método da placa quente, seguiu-se a norma EN 12667:2001. (CEN 2001)

O objetivo do ensaio é estabelecer um fluxo térmico unidirecional constante e uniforme nas amostras que estejam em contacto com o aparelho e que possuam faces lisas e paralelas tendo em conta que estas medidas ocorrem no centro do aparelho. O aparelho possui sensores de temperatura na sua superfície que medem a diferença de temperatura.

Neste trabalho foi usado o equipamento de marca Holometix (ver figura 3.18.). Existem dois tipos diferentes de equipamentos: para medição com duas amostras e com uma amostra. Neste trabalho, foi usado o equipamento de duas amostras, que é constituído da seguinte forma:

- Unidade de aquecimento: placa lisa circular ou quadrada (neste caso, quadrada), entre as duas amostras a ensaiar, composta por um elemento de aquecimento, que estabelece uma densidade de fluxo de calor constante e uniforme e está rodeada por uma zona de proteção (Figura 3.19.);
- Unidades de arrefecimento: placas lisas isotérmicas com o mesmo formato que a placa da unidade de aquecimento, cuja temperatura deve ser mantida de uma forma constante e uniforme (Figura 3.19.).

Para a seleção das duas amostras, foi necessário confirmar que ambas não possuíam uma diferença de espessura superior a 2%. Para tal foi necessário medir a espessura de cada uma e, neste caso, limar o excesso se necessário. Também era necessário que cada amostra tivesse uma dimensão suficiente para cobrir por completo a unidade de aquecimento sem exceder os 3% da dimensão desta.



Figura 3.18. – Equipamento de medição da condutibilidade térmica pelo método da placa quente



Figura 3.19. – Zona de colocação

Foram ensaiadas as argamassas 1, 3, 4 e 5, sendo os provetes condicionados na estufa a 90 °C de maneira a serem analisados secos. O processo de condicionamento consistiu em pesagens diárias consecutivas na balança Sartorius até a massa estar estabilizada (como indicado na figura 3.12.).

3.3.1.2. Método transiente modificado de fonte plana (*modified transient plane source*)

Para a determinação da condutibilidade térmica pelo método transiente modificado de fonte plana, seguiu-se a norma CEN, EN 1745: 2012 (CEN 2012). O equipamento utilizado foi da marca ISOMET modelo 2114 (Figura 3.20.). As medidas são efetuadas através da análise da temperatura do material como resposta aos impulsos do fluxo de calor. O fluxo de calor é induzido por aquecimento elétrico através da sonda que está em contacto direto com o provete. A avaliação da condutibilidade térmica e o calor específico volumétrico é realizada com base em amostras de valores de temperatura tirados periodicamente em função do tempo:

O aparelho de medição ISOMET possui um alcance que permite medir uma grande variedade de materiais desde espumas macias até rochas. De maneira a obter valores de medição o mais fidedignos possível, são usados dois tipos de sondas: de agulha e de superfície.

- Sondas de agulha – podem ser utilizadas em materiais sólidos macios onde é possível simplesmente colocar a agulha da sonda no material analisado ou onde é possível perfurar uma abertura para a agulha. A exatidão da medição ao usar as sondas de agulha não é comprometida, mesmo que se analise, por exemplo, espumas de poliuretanos de baixa condutibilidade térmica. Contudo, esta pode ser afetada em materiais mais duros devido à imprecisão da abertura. A espessura expectável mínima dos materiais em torno da agulha é de 20 mm a 40 mm. O sensor da sonda começa 15 mm desde a ponta da sonda e possui 50 mm de comprimento. A parte da agulha da sonda tem de estar completamente inserida na abertura de maneira a obter o resultado de maior exatidão, contudo, na maior parte dos casos, 80 mm é suficiente.
- Sondas de superfície – são usadas para medições em materiais sólidos e rígidos. Uma superfície plana de pelo menos 60 mm é suficiente para a sonda. A exigência de uma superfície plana aumenta com o incremento do valor da condutibilidade térmica do material analisado. O valor da espessura mínima do material analisado é de 20 mm a 40 mm dependendo da sua condutibilidade.

As sondas de superfície podem ser utilizadas para espumas com condutibilidade extremamente baixa. Contudo, as propriedades da superfície da camada do material podem ser bastante diferentes das propriedades interiores da estrutura.

Para este ensaio, apenas foi necessário usar a sonda de superfície (ver figura 3.21.) devido ao intervalo de medição que se esperava, de acordo com os resultados previamente medidos através do método da placa quente.



Figura 3.20. – Isomet 2114



Figura 3.21. – Sonda de superfície

Um dos objetivos de avaliar a condutibilidade térmica com métodos diferentes é para que seja possível a comparação de resultados, de forma a perceber as vantagens e desvantagens da utilização de cada método. Contudo, o método da placa quente efetuou as medições para uma temperatura média de 10 °C enquanto o método transiente modificado de fonte plana para uma temperatura média de cerca de 30 °C. Para que fosse possível a comparação dos valores dos dois métodos, foi necessário converter os resultados do método transiente modificado de fonte plana de 30 °C para 10 °C usando a norma ISO/TC 163/SC 2, ISO 10456: 2007. (ISO 2007)

Usou-se a equação (3.1.) para a conversão da temperatura:

$$F(T) = e^{fT(T_2-T_1)} \quad (3.1.)$$

Em que:

fT – é o coeficiente de conversão de acordo com a tabela A.11. da ISO 10456 para um betão leve com condutibilidade térmica de 0.1 W/m °C (0.003), pois sendo novos materiais procurou-se um que apresentasse características semelhantes;

T_1 – é o valor referente às condições de temperatura que se pretende considerar (10 °C);

T_2 – é o valor da temperatura média obtida através do método transiente.

Foram medidas as argamassas 1, 2, 3, 4 e 5, sendo os provetes secos a 90 °C em estufa para medição no estado seco e condicionados em câmara climática a 50% Humidade Relativa (HR) e 23 °C para medição em função do teor de humidade, como indicado em 3.2.2..

Dada a sensibilidade do aparelho utilizado neste ensaio, a medição ocorreu em ambiente controlado dentro de uma caixa em acrílico (ver figura 3.22.) para que as variações de temperatura fossem reduzidas.



Figura 3.22. – Caixa em acrílico

3.3.2. Absorção de água por capilaridade

Para a medição da absorção de água por capilaridade seguiu-se o procedimento da norma europeia EN 1015-18 (CEN 2002a). No entanto, para se proceder ao cálculo do coeficiente de absorção de água por capilaridade (A_w), usado como dado de entrada para simulação higrotérmica, adaptou-se o ensaio de forma a medir vários instantes como indicado na norma ISO 15148. (ISO 2002b)

Segundo a norma 1015-18, o coeficiente de absorção de água por capilaridade é medido em provetes de argamassa mantidos em condições de pressão atmosférica controladas. Após a secagem, uma das faces do provete é mergulhada em água com uma profundidade de 5 mm a 10 mm por um certo período de tempo e a massa do provete é medida. O recipiente onde se colocou a água e os provetes deve conter no mínimo 20 mm de profundidade. As dimensões que os provetes possuíam eram as seguintes: 160 mm x 40 mm x 40 mm. No entanto, de acordo com a norma de ensaio, os mesmos devem ser quebrados a meio sendo a face quebrada a que deverá estar em contacto com a água. Este procedimento foi realizado de acordo com o especificado no ponto 3.2.2.. O ensaio consiste em medir a massa dos provetes exatamente 10 minutos após terem sido colocados em água. Este processo repete-se novamente aos 90 minutos.

Segundo a norma ISO 15148, a absorção de água por imersão parcial é determinada pela medição da diferença de massa do provete analisado, que é absorvida através da face inferior que fica em contacto com a água num período de pelo menos 24 h. A água que adere à face inferior do provete e que não é absorvida tem de ser removida com um pano ou uma esponja antes de se proceder à pesagem. Os provetes foram colocados dentro de um recipiente com água em cima de suportes, tal como deve ser efetuado de acordo com a EN 1015-18, e de seguida medidos nos seguintes intervalos de tempo: 5 min, 20 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e por fim 24 h.

A figura 3.23. mostra o recipiente usado para o ensaio.

De forma a garantir o fluxo de água unidirecional, apenas através da face interior em contacto com a água, as faces laterais dos provetes foram seladas com um impermeabilizante à base de resinas epóxi (Figura 3.24.). A figura 3.25. mostra a realização do ensaio.



Figura 3.23. – Recipiente usado para o ensaio



Figura 3.24. – Estado dos provetes após revestimento com impermeabilizante



Figura 3.25. – Realização do ensaio

3.3.3. Teor de humidade a 50% de humidade relativa

A medição do teor de humidade foi realizada de acordo com a norma ISO 12571 (ISO 2000a). O condicionamento dos provetes foi efetuado numa câmara climática nas seguintes condições: 23 °C e 50% de humidade relativa na qual permaneceram até atingirem o equilíbrio. Os provetes foram previamente secos na estufa antes de serem colocados na câmara climática. A massa constante é atingida quando a diferença de peso entre 3 pesagens consecutivas feitas de 24 em 24 horas for menor ou igual a 0.1% da massa total do provete.

Os provetes devem ter uma massa de pelo menos 10 g. Provetes de materiais com uma densidade seca menor que 300 kg/m³ devem ter uma área de pelo menos 100 mm x 100 mm, que foi a área considerada.

O teor de humidade é calculado pela seguinte expressão 3.2.:

$$u = (m - m_0) / m_0 \quad (3.2.)$$

Em que:

u – é o teor de humidade (kg);

m – é a massa do provete após condicionamento na câmara climática a 50% de HR (kg);

m_0 – é a massa inicial do provete no estado seco (kg).

3.3.4. Permeabilidade ao vapor

Para a determinação da permeabilidade ao vapor de água usou-se como base a norma ISO 12572 (ISO 2000b), a qual especifica o método para determinar o regime permanente da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco de acordo com EN 998-1 (CEN 2008).

O ensaio consiste em determinar a permeabilidade ao vapor para duas condições distintas: tina seca (Figura 3.26.) e tina húmida (Figura 3.27.). A tina seca possui um composto de cloreto de cálcio (CaCl₂) no seu interior e a tina húmida possui uma solução saturada de nitrato de potássio (KNO₃). As tinas são colocadas na câmara climática VÖTSCH VC 4034 com um ambiente controlado de 23 °C e 50% de humidade relativa. Estas condições, interior e exterior das tinas, é o que permite criar dois tipos de sentido de fluxo de vapor de água e daí, através das pesagens consecutivas, obter a permeabilidade ao vapor de água.



Figura 3.26. – Tina seca

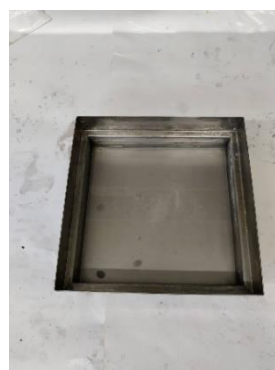


Figura 3.27. – Tina húmida

Os provetes foram cuidadosamente colocados em cima de cada tina, foi necessário centralizar os provetes para que não ficassem demasiado perto da tina de maneira dificultar a colocação da parafina e também para evitar que a parafina escorresse para o fundo da tina. De seguida colocou-se um pedaço de papel em cima de cada provete para que a parte de cima não ficasse suja com parafina, caso a parafina ficasse em cima dos provetes, iria secar e afetar a porosidade dos provetes, alterando assim os valores finais do resultado. Após estes cuidados, procedeu-se a preencher o espaço entre os provetes e as tinas metálicas com parafina líquida (que seca após alguns segundos passando rapidamente para o estado sólido novamente) de forma a selar por completo as folgas. Durante o ensaio em tina húmida foi necessário ter cuidado no manuseamento do provete. Como as tinas húmidas possuíam uma solução aquosa na parte inferior se os movimentos fossem bruscos poderia haver o risco de molhar o provete.

3.4. MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.4.1. Resistência ao arrancamento

O ensaio de arrancamento foi realizado usando a norma EN 1015-12 (CEN 2000). O ensaio de arrancamento testa a aderência que um dado material tem a um suporte. Para tal, é necessário realizar pré-cortes no material até ao suporte e efetuar a colagem de uma pastilha metálica com 50 mm x 50 mm (Figura 3.28.), na qual se encaixará o equipamento de arrancamento da marca Proceq DY-216 (Figura 3.29.). A figura 3.30. mostra o estado dos provetes após a colagem da pastilha metálica e na figura 3.31. é possível observar a realização do ensaio.



Figura 3.28. – Pastilha metálica



Figura 3.29. – Equipamento de ensaio Proceq DY-216



Figura 3.30. – Argamassa após colagem da pastilha metálica

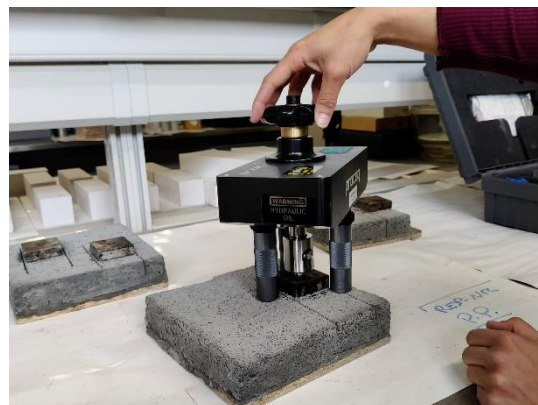


Figura 3.31. – Realização do ensaio

Primeiro cola-se a pastilha metálica na zona dos pré-cortes com uma cola à base de resina epóxi, depois encaixa-se o equipamento Proceq DY-216 à placa de tração e procede-se ao ensaio. A aderência é determinada como máxima tração aplicada diretamente na perpendicular da superfície da argamassa. A carga de tração é aplicada através da placa de tração colada à superfície. A força adesiva obtida é determinada através do quociente entre a carga de falha e a área de teste.

Existem dois tipos de resultados possíveis:

1º - Rotura Coesiva: será este tipo de rotura que se espera obter, pois dá-se no seio da argamassa, o que significa que a força adesiva da argamassa é superior ao valor de ensaio;

2º - Rotura adesiva: ao contrário da rotura coesiva, a rotura adesiva dá-se na interface da argamassa com o suporte (neste caso, o OSB) o que significa que a força adesiva da argamassa é igual ao valor de ensaio.

Para avaliar a resistência ao arrancamento da argamassa ao OSB, a mesma foi aderida ao OSB de diferentes formas:

- Aplicação direta na placa de OSB;
- Aplicação de um primário universal na placa de OSB antes da colocação da argamassa;
- Colagem da placa de OSB à argamassa através de uma cola de poliuretano, usada habitualmente na colagem de placas de EPS ao OSB;
- Colagem da placa de OSB à argamassa através de uma argamassa adesiva, habitualmente usada na colagem de placas EPS em sistemas *External Thermal Insulation Composite System* (ETICS).

3.4.2. Resistência ao impacto de corpo duro

A resistência ao impacto de corpo duro foi avaliada através da norma ISO 7892:2012 (ISO 1988). O ensaio consiste no impacto de um corpo pendular que cai contra o provete numa posição pré-definida. Em caso de ressalto, o corpo pendular deve ser segurado de maneira a evitar um segundo impacto. O equipamento que representa a estrutura de um elemento de um edifício deve ser fixado de maneira a reproduzir condições de suporte e que a energia absorvida no impacto não seja modificada.

O corpo pendular (Figura 3.32.) possui um peso de 0.5 kg que é o peso indicado pela norma para testar corpos duros como é o caso da argamassa para reboco exterior, de forma a provocar uma energia de impacto de 3 Joule com o corpo pendular num ângulo de 90° com o provete.

Foram usados dois tipos de materiais: a argamassa 3 (Quadro 3.1.) e o reboco E1 (ver quadro 3.2.). A figura 3.33. mostra a realização do ensaio.



Figura 3.32. – Corpo pendular usado no ensaio (equipamento *Mariné Baronnie*)



Figura 3.33. – Realização do ensaio

4

RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1. PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS

4.1.1. Condutibilidade térmica

4.1.1.1. Método da placa quente

O quadro 4.1. mostra os resultados obtidos para as quatro argamassas ensaiadas onde “ λ ” representa o valor da condutibilidade térmica obtido para uma temperatura média de cerca de 10 °C.

Quadro 4.1. – Método da placa quente

Argamassa	Temperatura media (°C)	λ (W/m°C)	Densidade após secar (Kg/m ³)	Classificação EN 998-1
1	10,17	0,113	733,24	T2
3	9,85	0,103	660,82	T2
4	9,87	0,119	689,66	T2
5	9,79	0,089	485,50	T1

A argamassa que possui um maior valor de condutibilidade térmica é a argamassa 4 que tem na sua constituição 24% de mármore, 24% de cinzas volantes, 46% de escória, 3% de poliuretano e 3% de madeira. Por outro lado, a argamassa que possui uma condutibilidade térmica menor é a argamassa 5 que tem 45% de mármore, 45% de cinzas volantes, 5% de poliuretano e 5% de resíduo de madeira. Uma das grandes diferenças entre as duas argamassas é a presença de escória na constituição da argamassa 4, o que determina também diferentes percentagens dos outros constituintes, ou seja, pode-se concluir que a substituição de uma parcela dos outros constituintes por escória conduziu a um aumento do valor da condutibilidade térmica da argamassa. É possível observar que as argamassas 1, 3 e 4 possuem valores próximos de condutibilidade térmica e valores próximos de densidade após secagem, enquanto a argamassa 5 que possui uma condutibilidade térmica mais baixa que as outras três, também possui uma densidade após secagem mais baixa.

De acordo com EN 998-1, as argamassas com condutibilidade inferior a 0,1 W/m°C têm classificação de T1 e entre 0,1-0,2 têm classificação T2. Acima de 0,2 já não são consideradas argamassas térmicas.

4.1.1.2. Método transiente modificado de fonte plana

O quadro 4.2. mostra os resultados do ensaio quando os provetes estão no estado seco e também para um teor de humidade a 50% HR. O valor “ λ ” representa o valor da condutibilidade térmica obtido no ensaio do método transiente modificado de fonte plana para uma temperatura média de cerca de 30 °C e “ λ_2 ” representa o mesmo valor após conversão através da norma ISO 10456 para uma temperatura média de 10 °C.

Quadro 4.2. – Método transiente modificado de fonte plana

Proвете	Estado seco			Condicionado a 50% HR		
	Temperatura média (°C)	λ (W/m°C)	λ_2 (W/m°C)	Temperatura média (°C)	λ (W/m°C)	λ_2 (W/m°C)
1	31,009	0,101	0,107	31,861	0,104	0,111
2	30,938	0,102	0,109	31,483	0,109	0,116
3	30,518	0,117	0,125	31,313	0,127	0,136
4	31,146	0,159	0,169	31,597	0,181	0,193
5	31,128	0,087	0,093	31,710	0,093	0,099

Segunda a norma EN 998-1, todos os provetes são classificados como T2, mesmo quando a uma HR de 50%.

Como era de esperar, os valores de condutibilidade térmica aumentam com o teor de humidade, quando testados para 50% de HR.

O provete que obteve maior valor médio de valores foi o provete 4 (24% de mármore, 24% de cinzas volantes, 46% de escória, 3% de poliuretano e 3% de madeira) e o que obteve o menor valor foi o provete 5 (45% de mármore, 45% de cinzas volantes, 5% de poliuretano e 5% de resíduo de madeira).

Relativamente ao aumento do valor da condutibilidade térmica quando testados para condições de 50% HR, o provete que teve o maior aumento foi a argamassa 4 com uma diferença de 0.023 W/m°C e o provete que aumentou menos foi o provete 1 com uma diferença de 0.004 W/m°C, embora a argamassa 5 também possua uma diferença muito baixa (0.006 W/m°C). Em conclusão, observa-se que embora tenha aumentado, a variação é muito pequena, logo, para uma humidade relativa de 50% os materiais mantêm valores próximos do seco.

4.1.1.3. Comparação dos dois métodos

O quadro 4.3. compara os resultados dos dois ensaios realizados.

Quadro 4.3. – Comparação de λ (W/m°C) dos dois ensaios

Provete	Método da placa quente	Método transiente modificado de fonte plana	Variação percentual da condutibilidade
	Estado seco	Estado seco	
1	0,113	0,107	-5,3%
3	0,103	0,125	+21,4%
4	0,119	0,169	+42,0%
5	0,089	0,093	+4,5%

Tendo em conta que os provetes analisados foram os mesmos, era de esperar que os resultados fossem semelhantes e como é possível observar nos resultados de ambos os métodos de ensaio, o provete 4 é o que possui maior condutibilidade térmica e o provete 5 é o que possui menor condutibilidade térmica.

Comparando os resultados dos dois métodos, as argamassas 1 e 5 são as argamassas que possuem valores semelhantes, por outro lado, as argamassas 3 e 4 são as que possuem uma maior variação, em especial a argamassa 4 que chega a possuir uma variação de 42%. As maiores diferenças podem estar relacionadas com o facto de os provetes não serem homogéneos. Na argamassa 4 um dos 3 provetes (usados para o método transiente) tinha uma massa volúmica consideravelmente superior o que em valores médios fez aumentar a condutibilidade.

4.1.2. Absorção de água por capilaridade

O quadro 4.4. mostra os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade da argamassa 3 onde “C” é o coeficiente de absorção de água, determinado pela norma EN 1015-18.

Quadro 4.4. – Absorção de água por capilaridade

C (kg/m ² .min ^{0.5})	
Média	0,373
Desvio padrão	0,022

A figura 4.1. representa a média da diferença de peso dos provetes ao longo do tempo.

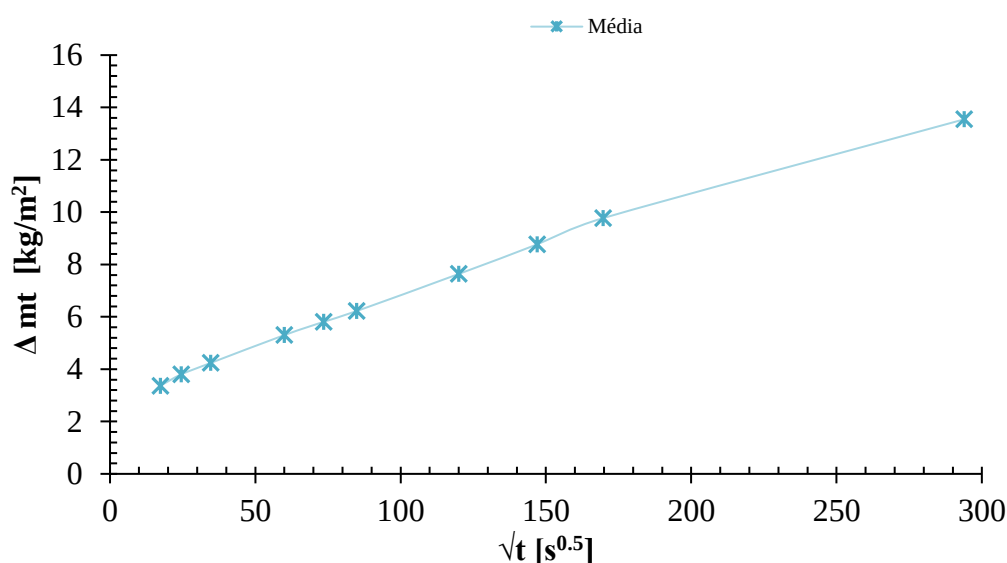


Figura 4.1. – Diferença de peso ao longo do tempo

Como é possível observar, os valores obtidos do coeficiente de absorção de água dos provetes ensaiados estiveram próximos uns dos outros, tendo em conta que o valor de desvio padrão é muito baixo (0.022), os provetes pertenciam todos à mesma argamassa (argamassa 3), logo, o facto dos valores terem uma baixa variação é esperado. Segundo a norma EN 998-1, a argamassa 3 enquadra-se na categoria W1, visto que o valor do coeficiente de absorção de água é inferior a $0.40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$ e superior a $0.20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$.

Através da análise da figura 4.1. observa-se que a variação do peso dos provetes apresenta uma tendência linearmente crescente.

4.1.3. Teor de humidade a 50% de humidade relativa

O quadro 4.5 representa o teor de humidade a 50% HR de cada argamassa.

Quadro 4.5. – Teor de humidade em função de 50% de humidade relativa

Argamassa	Teor de humidade a 50% de HR (kg/m^3)
1	6,79
2	11,08
3	12,16
4	26,31
5	16,19

Como é possível observar, a argamassa que possui o teor de humidade mais elevado é a 4 (24% de mármore, 24% de cinzas volantes, 46% de escória, 3% de poliuretano e 3% de madeira) e o que possui o menor valor é a argamassa 1 (77% de resíduo cerâmico, 17% de resíduo de vidro, 3% de poliuretano e 3% de resíduo de madeira).

Assim, é possível concluir que o resíduo cerâmico e o resíduo de vidro contribuem para uma diminuição do teor de humidade a 50% de HR tendo em conta que o provete 1 era o único provete que possuía estes resíduos na sua constituição e não só foi o que obteve um menor valor de teor de humidade como também a diferença de valor para os outros provetes é significativa. Por outro lado, o provete 4 era o único provete que possuía escória na sua constituição e foi o provete que obteve o maior valor de teor de humidade (chegando a ser o dobro de outros resultados), ou seja, ao contrário dos resíduos de vidro e cerâmico, a escória contribui para o aumento do teor de humidade a 50% de HR.

4.1.4. Permeabilidade ao vapor

O quadro 4.6. indica os valores do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, do fator de resistência à difusão e da espessura de camada de ar de difusão equivalente obtidos no ensaio da argamassa 3.

Quadro 4.6. – Permeabilidade ao vapor

Método de ensaio	Permeabilidade δ [kg/(m·s·Pa)]	Fator de resistência à difusão μ [-]	Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m]
Ensaio em tina seca	$2,24 \times 10^{-11}$	8,7	0,22
Ensaio em tina húmida	$3,16 \times 10^{-11}$	6,1	0,15

Como era de esperar, os resultados do ensaio em tina seca mostram que a permeabilidade é inferior ao ensaio em tina húmida. De acordo com a EN 998-1, os rebocos térmicos devem ter um fator de resistência inferior à difusão a 15, neste caso os valores são 8.7 e 6.1, logo, estão dentro dos valores aceites na norma.

4.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

4.2.1. Resistência ao arrancamento

O quadro 4.7 mostra os resultados do ensaio de resistência ao arrancamento.

Quadro 4.7. – Resistência ao arrancamento

	Provetes	Tensão de aderência (MPa)	Tipo de rotura
Sem primário	3.1.	0,17	100% coesivo no seio da argamassa
	3.2.	0,25	40 % coesivo no seio da argamassa; 60% adesiva na interface como OSB
	3.3.	0,18	80 % coesivo no seio da argamassa; 20% adesiva na interface com a pastilha (falha de colagem)
	E1.1.	-	
	E1.2.	-	100% adesiva na interface como OSB
	E1.3.	-	
Com primário	3.1.	0,12	
	3.2.	0,15	100% coesivo no seio da argamassa
	3.3.	0,23	
	E1.1.	-	
	E1.2.	-	100% adesiva na interface com o OSB
	E1.3.	-	
Com cola de poliuretano	3.1.	0,26	
	3.2.	0,33	100% coesivo no seio da argamassa
	3.3.	0,33	
	E1.1.	0,22	50% adesivo no OSB e 50% coesivo na cola
	E1.2.	0,23	100% coesivo na cola
	E1.3.	0,29	25% adesivo no OSB, 15% adesivo na interface cola-OSB e 60% coesivo na cola
Argamassa adesiva	3.1.	0,17	100% adesivo na interface da argamassa de colagem-OSB
	3.2.	0,22	100% adesivo na interface da argamassa de colagem-argamassa núcleo
	3.3.	0,19	100% coesivo no seio da argamassa

Argamassa 3: esta argamassa obteve um bom comportamento no geral. No caso sem primário, os resultados dos provetes foram de 40% a 100% de coesão no seio da argamassa e no caso com primário houve 100% de coesão no seio da argamassa em todos os casos. É possível concluir que a presença de primário tem um impacto positivo bastante significativo.

Com cola de poliuretano os resultados foram semelhantes aos resultados com primário mas com tensões de aderência superiores.

No que toca à argamassa adesiva, houve variação de resultados, sendo 100% adesivo nuns provetes e 100% coesivo noutro provete, logo, não será uma boa argamassa para uso.

Argamassa E1: a argamassa para reboco exterior apresentou resultados muito diferentes dos da argamassa 3. Sem primário houve um comportamento 100% adesivo onde a argamassa descolou totalmente com manuseamento e/após um pré-corte. Com primário o comportamento continuou a ser 100% adesivo na interface com o OSB onde a argamassa descolou totalmente ao fazer os pré-cortes (comportamento ligeiramente melhor do que sem primário, pois só descolou após os pré-cortes completos).

Com cola de poliuretano, os resultados foram simultaneamente adesivos e coesivos.

4.2.2. Resistência ao impacto de corpo duro

Foram feitos três impactos de corpo duro no provete de argamassa 3 e no provete do reboco E1. As marcas no provete da argamassa 3 possuíam um diâmetro de 13.42 mm, 15.08 mm e 14.05 mm de cada um dos impactos realizados, por outro lado, o provete da argamassa de reboco E1 partiu-se logo no primeiro impacto. A figura 4.2. mostra a localização dos impactos na argamassa 3 e a figura 4.3. mostra o resultado do ensaio no provete de reboco E1.



Figura 4.2. – Argamassa 3



Figura 4.3. – Reboco E1

Neste ensaio os resultados foram bastante diferentes, por um lado temos a argamassa 3 que se comportou bem ao impacto, não se partiu nem apresenta qualquer tipo de fissura, por outro lado temos o reboco E1 que fissurou e partiu em todos os impactos ensaiados. Uma possível razão para o comportamento do reboco E1 poderá ter a ver com a sua constituição, é um provete bastante rígido, que poderá contribuir para a sua fratura. No entanto, não é possível comentar em termos da rigidez do mesmo quantitativamente uma vez que não foi medido o módulo de elasticidade.

Podemos concluir que o reboco E1 não apresenta um comportamento indicado para ser usado como revestimento de fachadas tendo em conta que aparenta ser demasiado rígido e poderá quebrar ou fissurar facilmente com pequenos deslocamentos.

Relativamente à argamassa 3, os valores apresentados estão todos próximos uns dos outros sendo as massas muito ligeiras sem fissuração.

5

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DOS SISTEMAS DE FACHADA EM ESTUDO

5.1. DESCRIÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO E DADOS DE ENTRADA

No presente trabalho pretende-se levar a cabo um determinado número de simulações que ajudem a analisar o comportamento higrotérmico dos sistemas de fachada em estudo. Para que seja possível obter resultados úteis terão de ser impostas condições igualmente realistas aos cenários a que se espera que os sistemas sejam expostos.

O software utilizado para a análise do desempenho das argamassas foi o WUFI Pro. Este programa foi desenvolvido pelo *Fraunhofer Institute for Building Physics* e permite a realização de simulações dinâmicas de transferências de calor e humidade.

Dentro das potencialidades do WUFI Pro, os parâmetros analisados foram os seguintes:

- Temperatura;
- Humidade relativa;
- Teor de humidade;
- Existência de condensações.

Serão analisados dois tipos diferentes de sistemas (SIP comum e novo SIP):

- Um sistema composto por OSB, EPS e placa de gesso como mostra a figura 5.1. (sistema 1);



Figura 5.1. – Constituição do sistema 1

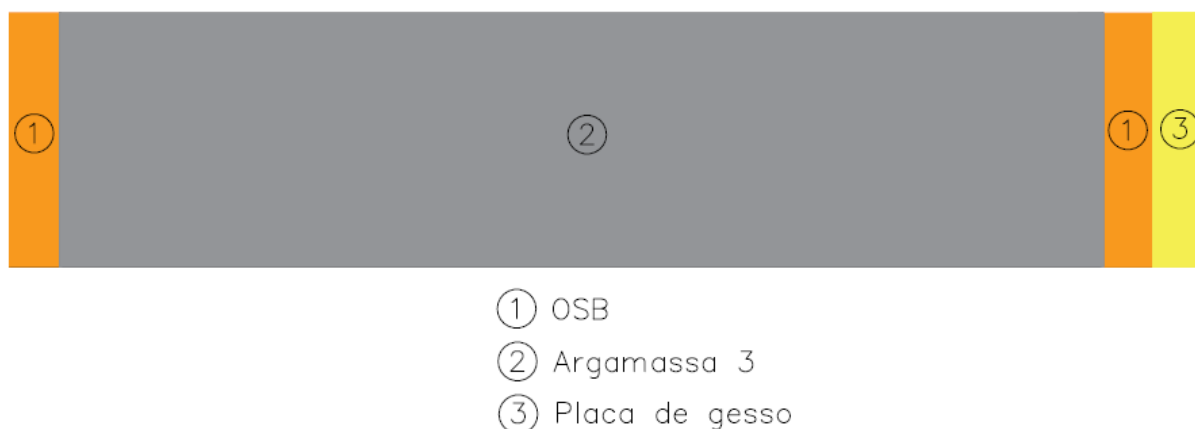


Figura 5.2. – Constituição do sistema 2

Em ambos os sistemas existe uma fina camada de argamassa de acabamento no paramento exterior (não representada nas figuras).

O quadro 5.1. contém as características das camadas dos sistemas simulados. A resistência térmica superficial exterior (lado esquerdo) é de $0,04 [(m^2 \cdot ^\circ C)/W]$ e para a superfície interior (lado direito) é de $0,13 [(m^2 \cdot ^\circ C)/W]$ para ambos os casos.

Quadro 5.1. – Características das camadas de cada sistema simulado

Camada	Espessura (m)	Densidade aparente (kg/m ³)	Condutibilidade térmica (W/m ² ·°C)	Porosidade (m ³ /m ³)	Calor específico (J/kgK)	Fator de resistência à difusão de vapor de água (-)
Acabamento exterior	0,0025	1250	0,450	0.25	1000	12
OSB	0,0120	630	0,130	0.6	1500	650
EPS	0,1000	15	0,040	0.95	1500	30
Placa de gesso	0,0125	850	0,200	0.65	850	8.3
Argamassa 3	0,2500	644	0.103	0.76	1111	8.7

O software WUFI Pro é um sistema que permite a simulação simultânea da transferência de calor e umidade. As simulações dos elementos analisados possuem parâmetros e condições climáticas realistas. O programa contém informações sobre diferentes climas com parâmetros higrotérmicos importantes, para isso, é necessário dar a seguinte informação ao programa:

- Orientação;
- Inclinação;
- Propriedades higrotérmicas dos materiais;

- Coeficientes de transferência;
- Condições iniciais de temperatura e humidade relativa.

Para cada um dos sistemas foram levadas a cabo duas simulações:

- Simulação A: o clima exterior definido foi o de Lisboa (pré-definido no programa) com os gráficos de humidade relativa e temperatura ao longo do ano apresentados na figura 5.3.. O clima interior foi definido através das curvas sinusoidais com um valor médio de temperatura de 18 °C (variando entre 14 °C e 22 °C) e com um valor médio de 65% para a humidade relativa (variando entre 40% e 90%) (Figura 5.4.).

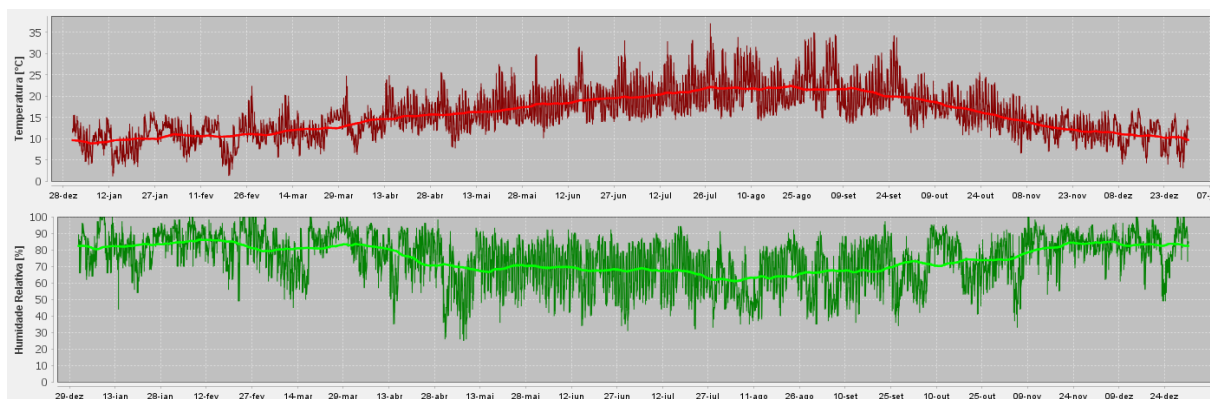


Figura 5.3. – Gráficos de humidade relativa e de temperatura ao longo do ano em Lisboa

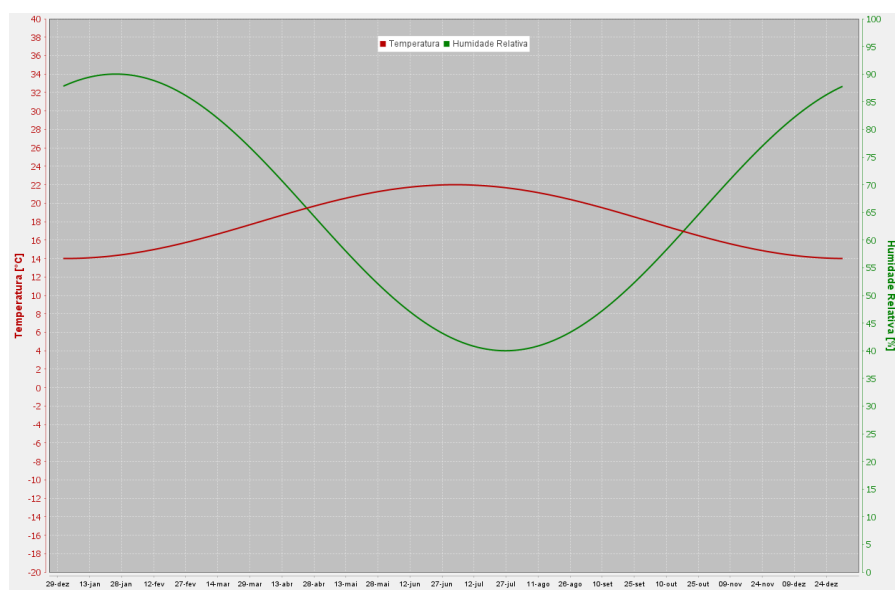


Figura 5.4. – Curvas sinusoidais do clima interior da simulação A

- Simulação B: de maneira a simular condições climáticas extremas, o clima exterior foi o de Trondheim na Noruega (pré-definido no programa) com os gráficos de humidade relativa e temperatura ao longo do ano apresentados na figura 5.5.. O clima interior foi definido através das curvas sinusoidais com um valor médio de temperatura de 20 °C (variando entre 18 °C e 22 °C

°C) e com um valor médio de 50% para a humidade relativa (variando entre 40% e 60%) (Figura 5.6.).

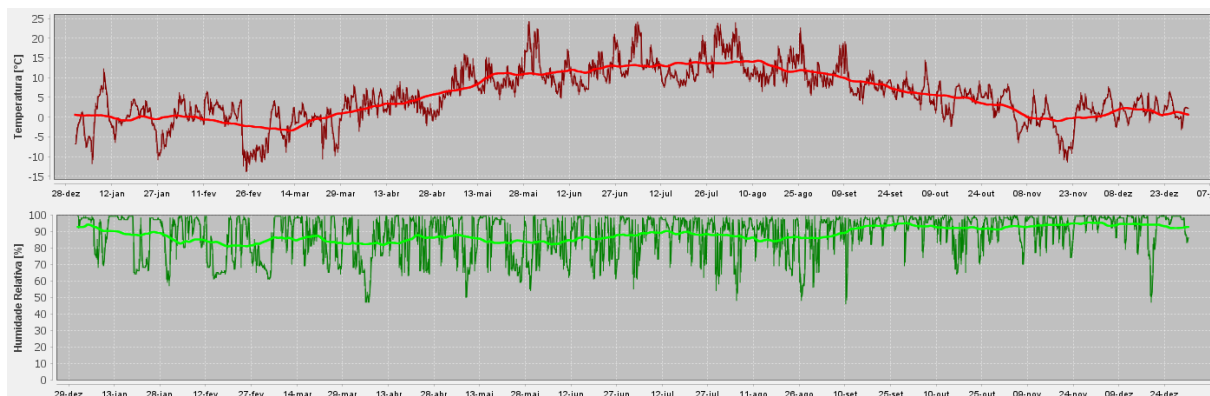


Figura 5.5. – Gráficos de humidade relativa e de temperatura ao longo do ano em Trondheim

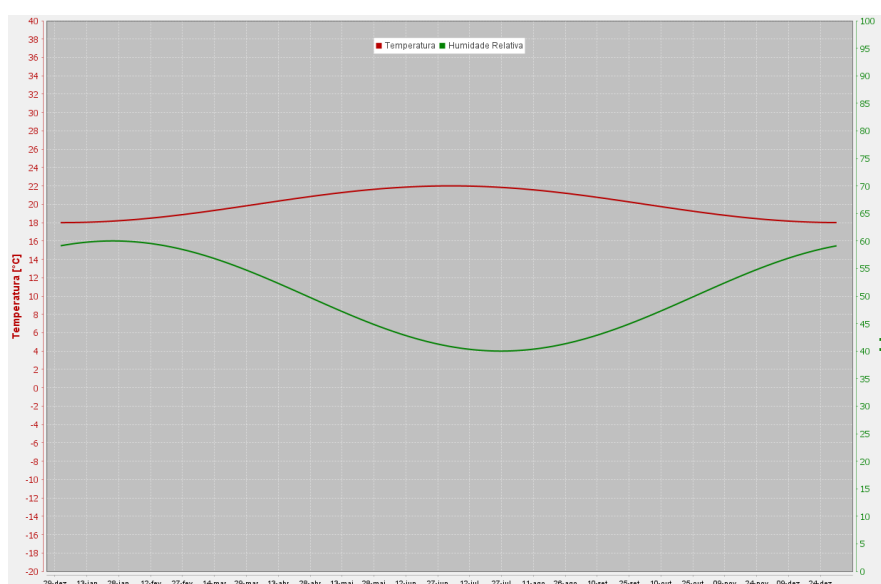


Figura 5.6. – Curvas sinusoidais do clima interior da simulação B

5.2. RESULTADOS OBTIDOS

No presente trabalho foi analisada a variação da humidade relativa das interfaces das superfícies interior e exterior, ao longo de um ano.

São apresentados de seguida os resultados obtidos, para uma semana de Inverno, para as quatro simulações efetuadas:

- SIP comum, em Lisboa (Figura 5.7.);
- SIP comum, em Trondheim (Figura 5.8.);
- Novo SIP, em Lisboa (Figura 5.9.);
- Novo SIP, em Trondheim (Figura 5.10.).

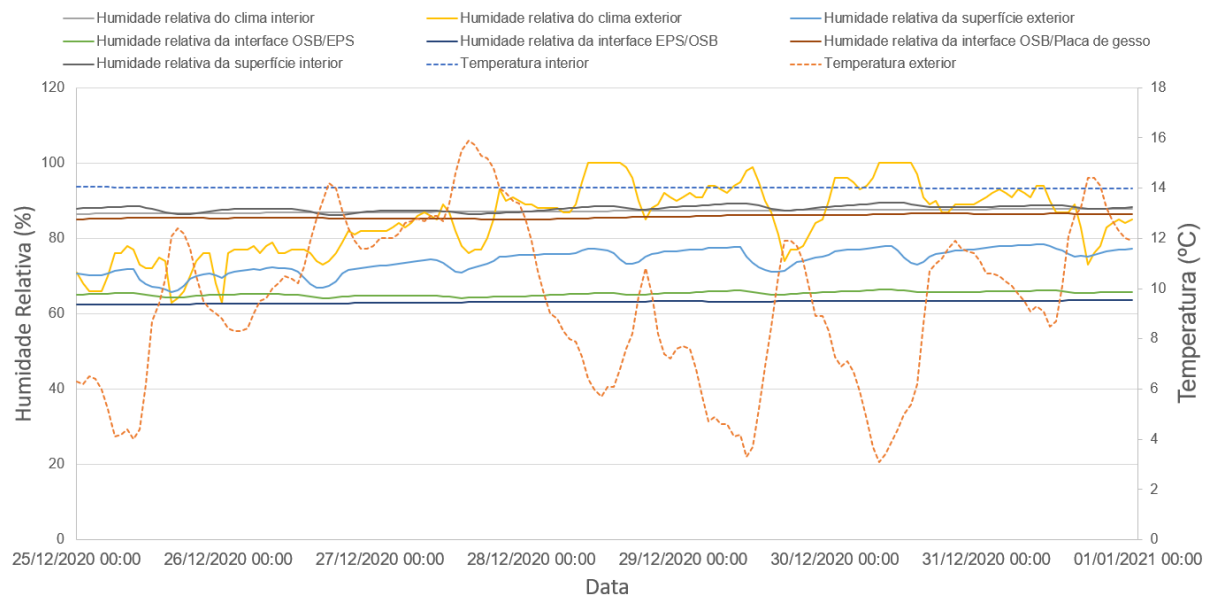


Figura 5.7. – Variação da humidade relativa no SIP comum, em Lisboa, numa semana de Inverno

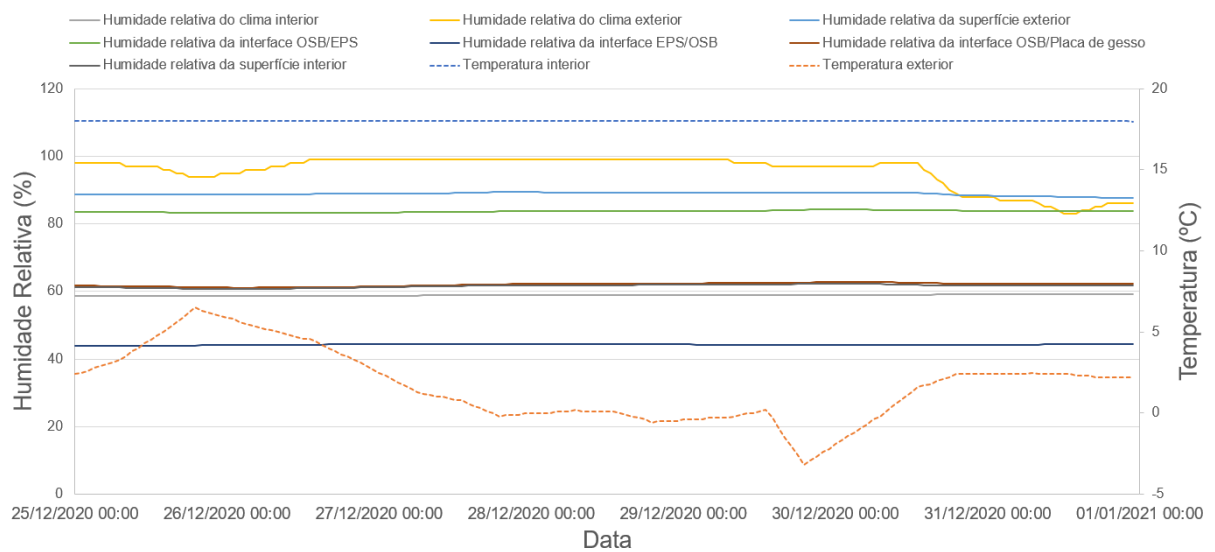


Figura 5.8. – Variação da humidade relativa no SIP comum, em Trondheim, numa semana de Inverno

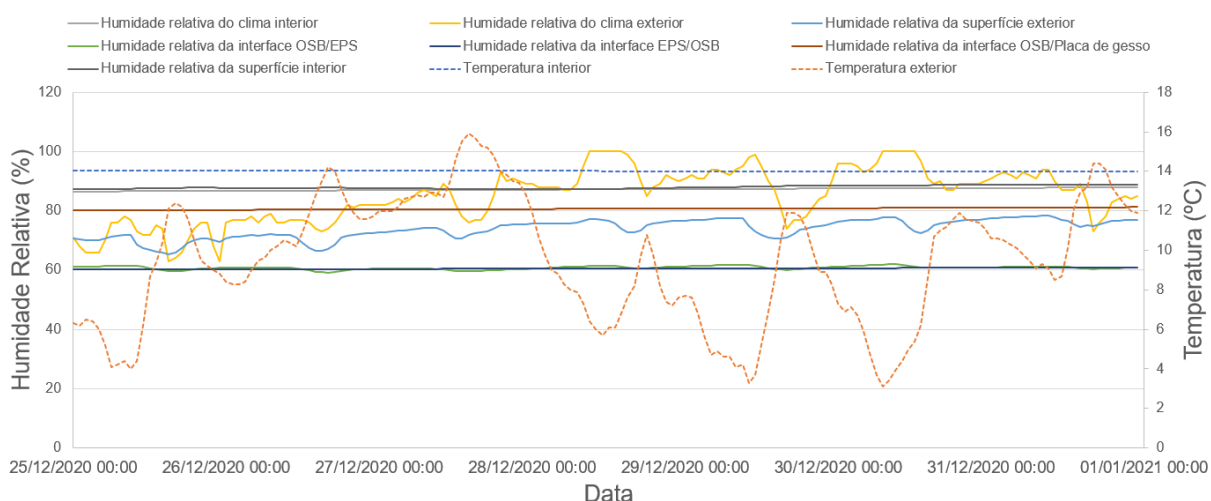


Figura 5.9. – Variação da humidade relativa no novo SIP, em Lisboa, numa semana de Inverno

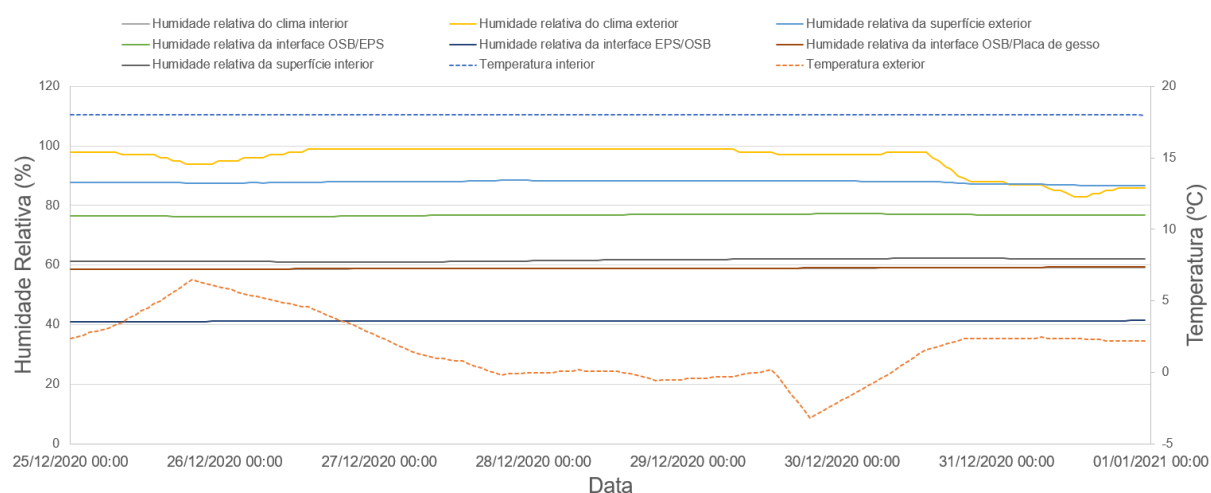


Figura 5.10. – Variação da humidade relativa no novo SIP, em Trondheim, numa semana de Inverno

Como é possível observar, para a semana apresentada, não ocorreram condensações, quer superficiais quer internas, em nenhuma das situações simuladas, uma vez que a humidade relativa nunca atingiu os 100%. O mesmo aconteceu ao longo de todo o ano.

Os valores das humidades relativas nos diversos pontos do sistema variam muito pouco ao longo desta semana, no sistema 2, em ambos os cenários climáticos. No sistema 1, a variação de valores é mais acentuada embora também não seja muito elevada.

Note-se que os valores da humidade relativa atingidos nos diversos pontos dos sistemas são mais elevados no sistema 1 do que no sistema 2, para as mesmas condições climáticas. Assim, do ponto de vista do risco de ocorrência de condensações, os resultados mostram que o novo SIP em estudo apresenta um menor risco do que o SIP comum.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido nesta dissertação contribuiu para aumentar o conhecimento sobre novas argamassas com incorporação de resíduos e sem adição de cimento, com foco na caracterização higrotérmica e mecânica, cumprindo assim o principal objetivo proposto. Além disso, permitiu complementar a avaliação da viabilidade de um novo painel SIP, com um novo núcleo constituído por uma das argamassas desenvolvidas, para ser usado em construção modular.

Como principais conclusões da caracterização higrotérmica das argamassas para o núcleo do painel SIP, destaca-se o seguinte:

- Para a realização dos ensaios experimentais é de grande importância o controlo da qualidade dos provetes de forma a obter resultados fiáveis, como por exemplo, a planeza para a determinação da condutibilidade térmica e da resistência ao arrancamento, espessura adequada para efetuar os pré-cortes com a profundidade necessária, a selagem total das laterais dos provetes para determinação da absorção de água por capilaridade e da permeabilidade ao vapor de água;
- A incorporação de resíduos permitiu obter resultados muito satisfatórios de condutibilidade térmica, a rondar os 0.11 W/m.°C, permitindo uma classificação de argamassa térmica T2 em quatro das argamassas e até mesmo T1 na argamassa com menor massa volúmica;
- O aumento do teor de humidade nas argamassas levou a um aumento da condutibilidade térmica, como seria expectável. No entanto, esse aumento não foi significativo continuando as argamassas a apresentar a classificação de argamassa térmica;
- Verificou-se uma ligeira diferença na condutibilidade térmica nos dois métodos de medição usados que poderá estar relacionada com alguma falta de homogeneidade dos provetes, já que os resíduos, principalmente de madeira e poliuretano que apresentam maiores dimensões, têm alguma variabilidade;
- Registou-se um maior teor de humidade, a 50 % de HR, na argamassa com escória na composição, o que era até possível verificar ao tato;
- A absorção de água por capilaridade apresentou valores adequados, tendo uma classificação de W1 de acordo com a EN 998-1, principalmente sendo usada como núcleo de um painel SIP, não estando à partida em contacto direto com a ação da água;
- A argamassa testada para o núcleo do painel apresentou uma boa permeabilidade ao vapor de água, obtendo valores do fator de resistência à difusão de vapor de água inferiores a 15, como indica a norma EN 998-1 para argamassas térmicas;

Da caracterização mecânica realizada na argamassa de núcleo do painel SIP aplicada na placa de OSB, destaca-se o seguinte:

- Verificou-se que a resistência ao arrancamento é altamente dependente do material usado para aumentar a aderência, como os utilizados: primário, cola de poliuretano e argamassa adesiva;
- A aderência do reboco exterior à placa de OSB apresentou-se 100% adesiva na interface, mesmo com a aplicação de primário. A substituição do primário por cola de poliuretano melhorou ligeiramente os resultados, mas continuando a verificar-se roturas adesivas desta vez na placa de OSB (laminando a placa) e coesivas na cola expansiva de poliuretano, o que não se considerou aceitável;
- Considerando a argamassa do núcleo, a aplicação de uma camada de promoção da aderência, como o caso do primário, revelou ser efetivamente necessária, visto que com primário as roturas foram todas coesivas no seio da argamassa. Apesar de os valores não serem muito elevados, são aceitáveis para argamassas térmicas;
- Com a aplicação da cola de poliuretano, a argamassa de núcleo continuou a apresentar roturas totalmente coesivas no seu seio além de apresentar um incremento da tensão de aderência. Ao contrário da argamassa adesiva, que apresentou maioritariamente roturas adesivas na interface com o OSB. Assim sendo, conclui-se que a cola de poliuretano, usada habitualmente na colagem das placas de EPS às placas de OSB para a produção de painéis SIP, apresentou resultados muito satisfatórios;
- A resistência ao impacto de corpo duro apresentou resultados completamente distintos entre a argamassa de núcleo e a argamassa de reboco exterior, como seria de esperar. Apesar de não se conhecerem os módulos de elasticidade das argamassas, o reboco exterior fissurou completamente, ao contrário da argamassa de núcleo que apresentou mossas muito ligeiras, o que poderá ser indicativo de uma elevada rigidez. Nesse sentido, não se aconselha o uso desta argamassa de reboco para revestimento exterior, pois poderá fissurar muito facilmente devido à elevada rigidez.

Quanto às simulações numéricas realizadas é possível concluir o seguinte:

- O novo painel SIP, com uma argamassa com resíduos como núcleo, apresenta um desempenho higrotérmico muito satisfatório. No clima de Lisboa, na ausência de aquecimento do ambiente interior, considerando uma temperatura interior mínima de 14 °C e uma humidade relativa máxima de 90%, o que configura uma situação algo crítica, não se verificam condensações em nenhum ponto do painel estudado. O mesmo acontece para o clima particularmente frio de Trondheim, no Norte da Noruega;
- Comparando o desempenho higrotérmico do novo painel SIP com o desempenho do painel SIP mais comum, com EPS, conclui-se que os seus desempenhos são bastante semelhantes, até com uma possível ligeira vantagem para o novo SIP que apresenta valores de humidade relativa mais baixos para as situações analisadas.

Considerando os resultados higrotérmicos obtidos, nomeadamente a baixa condutibilidade térmica para a massa volúmica que possuem, a baixa permeabilidade ao vapor de água e uma absorção capilar aceitável (inferior a $0.40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$), pode concluir-se que as argamassas desenvolvidas poderão ser uma boa alternativa aos isolamentos térmicos tradicionais. Uma das principais vantagens deste novo painel consiste na substituição do material isolante habitualmente usado nos painéis SIP, o poliestireno expandido à base de plástico, por uma nova argamassa que incorpora diversos resíduos. Nesse sentido, para além da redução do uso de EPS, há também uma valorização dos resíduos como parte constituinte de materiais de construção, indo de encontro aos princípios de economia circular para a obtenção de materiais de construção mais sustentáveis.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Na sequência do trabalho desenvolvido, podem identificar-se possíveis desenvolvimentos futuros:

- Caracterização experimental de diferentes tipos de argamassas com incorporação de diferentes resíduos e avaliação da sua possível utilização em novas soluções construtivas (coberturas, elementos de construção modular, etc.);
- Aprofundamento do estudo do desempenho higrotérmico dessas novas soluções através da simulação com o programa WUFI Pro, para diferentes cenários;
- Avaliação do ciclo de vida de novas soluções construtivas incorporando argamassas com resíduos;
- Avaliação das propriedades higrotérmicas e mecânicas de argamassas com nano partículas para núcleo SIP e para reboco exterior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Correia, J. T. d. J. M. (2013). Avaliação da higroscopicidade de materiais correntes, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

de Azevedo, J. M. C. B. (2013). "Absorção por capilaridade de soluções aquosas salinas em materiais porosos."

Ramos, N. M. M. (2000). "Modelação da variação da humidade relativa no interior dos edifícios."

Teixeira, V. G., et al. (2001). "Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno." *Química nova* **24**: 808-818.

AliExpress. from <https://pt.aliexpress.com/item/32818962631.html>.

Brown, M. L. (2012). Structural insulated panel system, Google Patents.

CEN (2000). "Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates."

CEN (2001). "Desempenho térmico de materiais e produtos de construção. Determinação da resistência térmica pelos métodos de placa quente protegida e de fluxometria de calor. Produtos de resistência térmica elevada e média."

CEN (2002a). "Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar."

CEN (2008). "Part 1: Definitions and requirements."

CEN (2012). "Methods for determining thermal properties."

Circular2B (2021). "Construção circular em edifícios modulares e energeticamente eficientes." from <https://paginas.fe.up.pt/~circular2b/o-projeto/>.

Comissão Europeia (2020). "Economia Circular."

Faria, J. P.-T., F.; Jalali, Said (2011). "Desenvolvimento de argamassas para a reabilitação de edifício antigos : Parte 2 : comportamento á água."

Gomes, M. G., et al. (2018). "Thermal conductivity measurement of thermal insulating mortars with EPS and silica aerogel by steady-state and transient methods." *Construction and Building Materials* **172**: 696-705.

HOUSEPLANSDIRECT. "Ten Minute Guide to Structural Insulated Panels (SIPs)." from <https://houseplansdirect.co.uk/product/ten-minute-guide-to-structural-insulated-panels/>.

indiamart from <https://www.indiamart.com/proddetail/oriented-strand-board-osb-21675106330.html>.

ISO (1988). "Vertical building elements. Impact resistance tests. Impact bodies and general test procedures."

ISO (2000a). "Determination of higroscopic sorption properties: International Standard."

ISO (2000b). "Hygrothermal performance of building materials and products."

ISO (2002b). "Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water absorption acoefficient by partial immersion."

ISO (2007). "Building material and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values."

Li, H., et al. (2004). "A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials." Cement and Concrete research **34**(3): 435-438.

Li, H., et al. (2004). "Microstructure of cement mortar with nano-particles." Composites part B: engineering **35**(2): 185-189.

Maia, J., et al. (2021). "Hygrothermal performance of a new thermal aerogel-based render under distinct climatic conditions." Energy and Buildings **243**: 111001.

Miller, D. J., et al. (2010). Carbon foam structural insulated panel, Google Patents.

Panjehpour, M., et al. (2013). "Structural Insulated Panels: Past, Present, and Future." Journal of Engineering, Project & Production Management **3**(1).

Porter, W. H. (2004). Structural insulated panel building system, Google Patents.

Porter, W. K. (2009). Structural insulated panel with hold down chase, Google Patents.

RESCUE7. from <https://www.rescuecursos.com/ensaio-em-poliestireno-expandido-eps/>.

Rodrigues, M. I. N. (2010). "Caracterização de materiais e sistemas construtivos através de ensaios laboratoriais e" In Situ".

Silva, A. J. P. d. (2006). Aplicação de partículas longas e orientadas de bagaço de cana-de-açúcar na produção de painel particulado similar ao OSB, Universidade de São Paulo.

SIMPSONStrong-Tie. "HDU Heavy Duty Holdown." from <https://strongtie.co.nz/products/hdu-heavy-duty-holdown>.

SIPS. "Installing SIPs - Strustural Insulated Panel Jointing System Explained."

Temp, A. L. (2014). "Avaliação de revestimentos de argamassa à permeabilidade ao vapor de água."

Tessari, J. (2006). "Utilização de poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos na construção civil."

Veigel, S., et al. (2012). "Particle board and oriented strand board prepared with nanocellulose-reinforced adhesive." Journal of Nanomaterials **2012**.

Zhao, Z., et al. (2015). "Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars." Construction and Building Materials **81**: 179-186.