

**Monitorização experimental e simulação numérica de  
Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo  
Exterior (ETICS)**

**Francisco Lopes Gonçalves**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

**Orientadores**

Doutor Giovanni Borsoi

Doutora Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

**Júri**

Presidente: Doutor Vitor Faria e Sousa

Orientador: Doutora Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

Vogal: Doutora Maria da Glória De Almeida Gomes

**Julho, 2021**



## **Declaração**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.



## Agradecimentos

Esta dissertação representa o fim de uma das maiores etapas da minha vida, uma etapa que exigiu dedicação, esforço e perseverança.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Doutor Giovanni Borsoi, por toda a disponibilidade, conselhos e acompanhamento que me foi prestando durante toda esta jornada. A sua presença constante foi imprescindível para o sucesso deste trabalho.

À minha orientadora Professora Inês Flores-Colen pela transmissão de conhecimentos necessários à realização deste trabalho.

À Júlia Pereira pela disponibilidade, mesmo quando fora de horas, por todos os conselhos e simpatia que foram, sem dúvida, uma mais valia durante todo o processo. Ao João Parracha pela passagem de conhecimento e por ter facilitado a minha integração numa fase inicial do projeto.

À Sara Coimbra pela disponibilização dos dados da estação meteorológica situada na FCT, e ao IPMA pela disponibilização dos dados da estação meteorológica da Avenida Gago Coutinho.

À Dr.<sup>a</sup> Rosário Veiga do LNEC e à Prof.<sup>a</sup> Paulina Faria da FCT a possibilidade de acesso aos Edifícios para realização das medições.

Ao instituto Fraunhofer IBP pela possibilidade de trabalhar com o WUFI.

À CIN, WEBER e SECIL pela disponibilização das amostras de provetes utilizadas no âmbito da presente dissertação. Agradecer ainda à Fundação para a Ciência e Tecnologia, que financiou os projetos WGB\_Shield e Bi-Therm, em desenvolvimento entre o CERIS-IST e o LNEC, no qual se insere a dissertação.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer à minha mãe por todo o suporte emocional e financeiro, por me fazer acreditar que seria possível concluir com sucesso esta etapa, sem ela seria tudo bem mais difícil. Aos meus amigos por tornarem o processo mais leve e por me fazerem sentir que estão sempre lá para me amparar.



## Resumo

Os sistemas de isolamento térmico pelo exterior (ETICS) têm vindo a ser usados na Europa desde os anos 50, tanto em construções novas como em obras de reabilitação. Estes sistemas construtivos podem apresentar anomalias superficiais, entre as quais fissuras ou manchas. A degradação biológica, favorecida pela elevada humidade relativa da zona costeira atlântica e pelas características intrínsecas dos sistemas, é das patologias mais frequentes em Portugal. O estudo do desempenho higrotérmico dos sistemas ETICS, face à sua localização e composição, é, portanto, relevante. Neste sentido, foi efetuada uma campanha experimental com o objetivo de monitorizar diferentes sistemas de ETICS. As camadas destes sistemas variavam entre EPS, ICB e MW (isolante térmico), argamassa de cimento e cal (camada de base) e revestimento acrílico, cal e de silicato (camada de acabamento).

O estudo permitiu concluir que os sistemas situados na estação de envelhecimento localizada na zona semi-rural (FCT/UNL) registaram sempre temperaturas mais elevadas, quando comparadas com as da estação de envelhecimento localizada na zona urbana (LNEC), contribuindo assim para os menores valores de humidade relativa registados. A presença de humidade relativa na superfície do provete pode estar também relacionada com a capacidade de absorção de água que cada sistema possui, uma vez que os provetes com uma maior capacidade de absorção apresentavam um menor número de horas em que a humidade relativa superava os 100%. Adicionalmente, verificou-se que a presença de humidade na superfície dos sistemas está diretamente relacionada com o risco de desenvolvimento biológico. Por fim, foi feita uma comparação dos resultados obtidos com resultados simulados através do programa WUFI PRO, e verificou-se que os valores de temperatura simulados se encontram bastante próximos dos valores recolhidos experimentalmente através de sensores de humidade relativa e temperatura. No entanto, devido a algumas limitações do programa, não foi possível obter uma simulação da humidade relativa fidedigna.

**Palavras chave: ETICS; Sensores; Humidade relativa; Temperatura; Degradação biológica; WUFI PRO**





## Abstract

External thermal insulation systems (ETICS) have been used in Europe since the 1950s, both in new construction and in rehabilitation works. These constructive systems can, however, present surface anomalies over time, such as microcracks and stains. Biological colonization and degradation of the ETICS façades, favoured by the high relative humidity of the Atlantic coast and by the properties of the system, is among the most widely diffused anomalies in Portugal. It is, thus, necessary to study and understand the hygrothermal performance of ETICS in view of their location and characteristics. In this sense, an experimental campaign was carried out in order to monitor different ETICS systems. The layers of these systems ranged from EPS, ICB and MW (thermal insulation), cement and lime mortar (base layer) and acrylic, lime and silicate coating (finish layer).

Results showed that the specimens located in a semi-rural environment (FCT/UNL) recorded higher temperatures, thus contributing to the lowest relative humidity values recorded, if compared to the urban environment (LNEC). The presence of relative humidity on the surface of the specimen may also be related to the water absorption capacity that each system has, since the specimens with a higher absorption capacity had a lower number of hours in which the relative humidity exceeded 100%. It was also found that the presence of humidity on the surface of the systems is directly related to the risk of biological development. Furthermore, a comparison between the obtained results and the simulated results, using WUFI PRO, was carried out concluding that the simulated temperature values are closed to the experimental values. However, it was not possible to obtain a reliable simulation of the relative humidity, due to some limitations of the *software*.

**Keywords:** ETICS; Sensors; Relative humidity; Temperature; Biological colonization; WUFI PRO



# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>v</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice</b> .....	<b>xi</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>xv</b>
<b>Índice de tabelas</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Acrónimos</b> .....	<b>xix</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos .....	1
1.3. Organização e estrutura .....	2
<b>2. ETICS</b> .....	<b>3</b>
2.1. ETICS .....	3
2.1.1. Enquadramento.....	3
2.1.2. Aplicação .....	4
2.1.3. Composição .....	4
2.1.4. Vantagens e desvantagens.....	7
2.2. Estudos higrotérmicos em ETICS .....	8
2.2.1. Considerações iniciais .....	8
2.2.2. Condensação superficial em ETICS.....	9
2.2.3. Bio-susceptibilidade dos ETICS.....	13
2.4 Modelos de simulação numérica .....	15
2.4.1 Considerações iniciais .....	15
2.4.2 WUFI PRO .....	17
2.5. Síntese final .....	18
<b>3. Materiais e metodologia</b> .....	<b>19</b>
3.1. Considerações gerais .....	19
3.2. Materiais .....	20
3.2.1. Sistemas ETICS.....	20
3.2.2. Sensores de humidade à superfície dos provetes.....	23
3.2.3 Sensores de temperatura .....	23

3.2.4 Logger .....	24
3.3. Parte experimental.....	24
3.4. Modelação .....	27
3.4.1. Tratamento de dados.....	27
3.4.2. WUFI.....	29
<b>4. Resultados e discussão .....</b>	<b>35</b>
4.1. Considerações Gerais .....	35
4.2.1. Análise higrotérmica de provetes da mesma cobertura.....	36
4.2.1.1. Provetes na estação de envelhecimento natural LNEC .....	36
4.2.1.2. Estação de envelhecimento natural na FCT .....	38
4.2.1.3. Discussão dos resultados .....	41
4.2.2. Análise de provetes em coberturas diferentes - influência da localização.....	47
4.2.2.1. Comparação estações de envelhecimento natural (LNEC – FCT/UNL) .....	47
4.2.2.2. Discussão de resultados .....	48
4.3. Simulação de dados no WUFI PRO 6.5 .....	51
4.3.1. Limitações do trabalho realizado .....	54
<b>5. Conclusões e desenvolvimentos futuros .....</b>	<b>57</b>
5.1. Conclusões finais.....	57
5.2. Desenvolvimentos futuros .....	58
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>61</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>xxii</b>
A.1 Propriedades do material do Provede S2 obtido a partir das fichas técnicas e da base de dados do WUFI.....	xxii
A.2 Propriedades do material do Provede S4 obtido a partir das fichas técnicas e da base de dados do WUFI.....	xxii
A.3 Propriedades do material do Provede S8 obtido a partir das fichas técnicas e da base de dados do WUFI.....	xxiii
A.4 Propriedades do material do Provede S9 obtido a partir das fichas técnicas e da base de dados do WUFI.....	xxiii
A.5 Parâmetros de simulação e respetivos critérios/valores assumidos para os provetes estudados. ....	xxiv
A.6 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provede S2 do LNEC ao longo da campanha experimental .....	xxv

A.7 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S2 da FCT/UNL ao longo da campanha experimental .....	xxvi
A.8 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S4 do LNEC ao longo da campanha experimental .....	xxvii
A.9 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S4 da FCT/UNL ao longo da campanha experimental .....	xxviii
A.10 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S8 do LNEC ao longo da campanha experimental .....	xxix
A.11 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S8 da FCT/UNL ao longo da campanha experimental .....	xxx
A.12 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S9 do LNEC ao longo da campanha experimental .....	xxxi
A.13 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S9 da FCT/UNL ao longo da campanha experimental .....	xxxii
A.14 – Simulação da humidade relativa e temperatura do Provete S2 no WUFI .....	xxxiii
A.15 – Simulação da humidade relativa e temperatura do Provete S4 no WUFI .....	xxxiv
A.16 – Simulação da humidade relativa e temperatura do Provete S8 no WUFI .....	xxxv
A.17 – Simulação da humidade relativa e temperatura do Provete S9 no WUFI .....	xxxvi



## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Evolução da aplicação do sistema ETICS em Portugal [6].	3
<b>Figura 2:</b> 1. Revestimento delgado - Legenda: (1) Parede exterior; (2) Argamassa de colagem; (3) Isolamento térmico; (4) Argamassa de regularização; (5) Rede de fibra de vidro; (6) Argamassa de regularização; (7) Revestimento de acabamento; (8) Bucha de fixação [16].	5
<b>Figura 3:</b> Degradação do sistema do tipo ETICS devido ao impacto [3].	7
<b>Figura 4:</b> Termograma de uma fachada revestida com sistema ETICS [33].	9
<b>Figura 5:</b> Balanço radiativo de um edifício [3].	10
<b>Figura 6:</b> Influência da camada isolante e do reboco exterior na temperatura superficial [37].	10
<b>Figura 7:</b> Efeito simplificado de um obstáculo horizontal numa fachada [3].	12
<b>Figura 8:</b> Desenvolvimento biológico em fachadas do tipo ETICS [3].	13
<b>Figura 9:</b> Desenvolvimento biológico em fachadas do tipo ETICS [3].	14
<b>Figura 10:</b> <b>a)</b> Sistemas ETICS selecionados para o estudo, com os sensores colocados; <b>b)</b> Inclinação a 45° da estrutura metálica que sustenta os provetes, e respetiva caixa de proteção do logger.	19
<b>Figura 11:</b> Sistemas S2 e S4 relativos ao projeto WGB_Shield. <b>a)</b> e <b>b)</b> camada de acabamento de cada sistema; <b>c)</b> e <b>d)</b> secção transversal (no qual se distinguem camada de acabamento – CA; camada de base – CB; isolante térmico - IT).	21
<b>Figura 12:</b> Sistemas S8 e S9 relativos ao projeto WGB_Shield. <b>a)</b> e <b>b)</b> camada de acabamento de cada sistema; <b>c)</b> e <b>d)</b> secção transversal (no qual se distinguem camada de acabamento – CA; camada de base – CB; isolante térmico - IT).	22
<b>Figura 13:</b> <b>a)</b> Sensores de humidade Honeywell da série HIH-4000 [55]. <b>b)</b> Termopares do tipo T usados para medir a temperatura nos provetes.	23
<b>Figura 14:</b> <b>a)</b> Datalogger MZLOG04SAP utilizado para recolher e armazenar os dados provenientes dos sensores. <b>b)</b> Datalogger protegido por caixa de polipropileno.	24
<b>Figura 15:</b> Logger na caixa de polietileno após a sua montagem.	25
<b>Figura 16:</b> <b>a)</b> Menu inicial com os diferentes comandos de controlo do software HyperTerminal. <b>b)</b> Ativação do datalogger de acordo com o intervalo de tempo definido	25
<b>Figura 17:</b> Janela principal do HyperTerminal e comandos para capturar e descarregar os dados medidos pelos sensores.	26
<b>Figura 18:</b> Sensor de humidade, utilizado no projeto WGB_Shield, que apresentava oxidação superficial após uma semana de utilização contínua.	26
<b>Figura 19:</b> <b>a)</b> Fotografia de um dos sensores protegido na parte traseira e na cabelagem metálica com silicone. <b>b)</b> Fotografia de uma das amostras onde é possível observar o sensor de humidade protegido com tecido de polietileno e o sensor de temperatura no canto superior esquerdo da amostra, bem como o suporte da amostra pela estrutura metálica e por dois parafusos.	27
<b>Figura 20:</b> Dados de entrada: propriedades dos materiais.	29

<b>Figura 21: a)</b> Representação esquemática no WUFI das camadas do provete S2; <b>b)</b> Representação esquemática no WUFI das camadas do provete S4. ....	30
<b>Figura 22: a)</b> Representação esquemática no WUFI das camadas do provete S8; <b>b)</b> Representação esquemática no WUFI das camadas do provete S9. ....	30
<b>Figura 23:</b> Seleção do revestimento exterior do provete S9. ....	31
<b>Figura 24:</b> Dados de entrada: configuração do elemento construtivo. ....	32
<b>Figura 25:</b> Dados de entrada: coeficientes de transferência à superfície exterior e interior. ....	33
<b>Figura 26:</b> Coeficientes de dependência do vento. ....	33
<b>Figura 27:</b> Dados de entrada: Condições iniciais. ....	33
<b>Figura 28:</b> Dados de entrada: Condições climáticas – temperatura e humidade relativa. ....	34
<b>Figura 29:</b> Dados de entrada: Condições climáticas – análise do clima. ....	34
<b>Figura 30:</b> Temperaturas superficiais e de ponto de orvalho dos provetes da estação de envelhecimento do LNEC em três dias do mês de dezembro 2020. ....	37
<b>Figura 31:</b> Humidade relativa média registadas nos provetes monitorizados na estação de envelhecimento do LNEC durante a campanha experimental. ....	38
<b>Figura 32:</b> Temperaturas superficiais e de ponto de orvalho dos provetes da estação de envelhecimento da FCT/UNL em três dias do mês de dezembro 2020. ....	40
<b>Figura 33:</b> Humidade relativa média registadas nos provetes monitorizados na estação de envelhecimento da FCT/UNL durante a campanha experimental. ....	41
<b>Figura 34:</b> Temperatura máxima dos provetes monitorizados durante a campanha experimental. ....	42
<b>Figura 35:</b> Temperatura mínima dos provetes monitorizados durante a campanha experimental (setas destacam a diferença entre os valores mínimos de temperatura registados no LNEC e na FCT/UNL). ....	43
<b>Figura 36:</b> Registo fotográfico da condensação superficial visível no provete S2 da estação de envelhecimento da FCT/UNL. ....	43
<b>Figura 37:</b> Registo fotográfico da colonização biológica registada no provete S4 após 4 semanas de envelhecimento natural. ....	45
<b>Figura 38:</b> Temperatura média dos provetes monitorizados durante a campanha experimental (seta a vermelho indica a maior discrepância de valores registada no mês de dezembro). .....	47
<b>Figura 39:</b> Temperatura média anual em Portugal Continental - IPMA [69]. ....	49
<b>Figura 40:</b> Simulação higrótérmica do provete S2 entre os meses de setembro e dezembro de 2020. ....	51
<b>Figura 41:</b> Variação da humidade relativa e temperatura, in situ, no provete S2 em novembro de 2020. Os círculos a vermelho destacam os picos de humidade e temperatura. ....	51
<b>Figura 42:</b> Variação da humidade relativa e temperatura, no WUFI, no Provete S2 em novembro de 2020. Os círculos a vermelho destacam os picos de humidade e temperatura. ....	52



## Índice de tabelas

<b>Tabela 1:</b> <i>Elementos do sistema ETICS e respetiva descrição. Adaptado de [17].</i> .....	6
<b>Tabela 2:</b> Modelos higrotérmicos disponíveis no mercado para o público em geral [47]. .....	16
<b>Tabela 3:</b> Espessura média do sistema completo, isolante térmico, camada(s) de base e camadas(s) de acabamento para os vários sistemas de ETICS. ....	20
<b>Tabela 4:</b> Descrição dos sistemas utilizados e respetivas características técnicas. ....	22
<b>Tabela 5:</b> Valores de offset e slope, a uma temperatura de 25°C, de acordo com o erro associado.....	28
<b>Tabela 6:</b> Temperatura média (°C) registada ao longo da campanha experimental nos provetes da estação de envelhecimento do LNEC .....	36
<b>Tabela 7:</b> Número de horas em que a temperatura superficial mensal foi superada pela temperatura de ponto de orvalho em cada provete da estação de envelhecimento do LNEC. ....	37
<b>Tabela 8:</b> Temperatura média (°C) registada ao longo da campanha experimental nos provetes da estação de envelhecimento da FCT/UNL. ....	39
<b>Tabela 9:</b> Número de horas que a temperatura superficial foi superada pela temperatura de ponto de orvalho em cada provete da estação de envelhecimento da FCT/UNL .....	40
<b>Tabela 10:</b> Número de horas em que a HR média superou os 100% nos provetes da estação de envelhecimento do LNEC e na estação de envelhecimento da FCT/UNL. ....	46
<b>Tabela 11:</b> Humidade relativa média (%) registada ao longo da campanha experimental. ....	48
<b>Tabela 12:</b> Temperatura média dos provetes no período das 13h00 às 16h00 na estação de envelhecimento da FCT/UNL e do LNEC e respetiva diferença das temperaturas.....	48
<b>Tabela 13:</b> Médias das temperaturas mínimas (T. min), máximas (T. máx) e médias (T. méd) registadas pelas estações meteorológicas em Lisboa e na Caparica (dados IPMA). ....	50
<b>Tabela 14:</b> Valores médios, mínimos e máximos de temperatura [°C] medidos e simulados no provete S2 em novembro de 2020. ....	53
<b>Tabela 15:</b> Valores médios, mínimos e máximos de temperatura [°C] medidos e simulados no provete S2 durante a campanha experimental. ....	53
<b>Tabela 16:</b> Valores médios, mínimos e máximos de humidade relativa média [%] medidos e simulados no provete S2 em novembro de 2020. ....	54
<b>Tabela 17:</b> Valores médios, mínimos e máximos de humidade relativa média [%] medidos e simulados no provete S2 durante a campanha experimental. ....	54



## Acrónimos

<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>ATE</b>	Avaliação Técnica Europeia
<b>CE</b>	Conformidade Europeia
<b>CSTB</b>	<i>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment</i>
<b>EAD</b>	<i>European Approval Document</i>
<b>EIFS</b>	<i>Exterior Insulation Finishing System</i>
<b>EOTA</b>	<i>European Organization for Technical Approval</i>
<b>EPS</b>	Poliestireno expandido moldado
<b>ETA</b>	<i>European Technical Assessment</i>
<b>ETAG</b>	<i>European Technical Approval Guide</i>
<b>ETICS</b>	<i>External Thermal Insulation Composite System</i>
<b>FCT/UNL</b>	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
<b>FEUP</b>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
<b>IBP</b>	<i>Institute for Building Physics</i>
<b>ICB</b>	Aglomerado de cortiça expandida
<b>IPMA</b>	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
<b>LFC</b>	Laboratório de Física das Construções
<b>LNEC</b>	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
<b>MW</b>	Lã Mineral
<b>PTFE</b>	Politetrafluoretileno
<b>PDSI</b>	<i>Palmer Drought Severity Index</i>
<b>RCCTE</b>	Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios
<b>SCEE</b>	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCEE).
<b>WUFI</b>	<i>Wärme Und Feuchte Instationär</i>



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

Os sistemas de isolamento térmico pelo exterior (ETICS) têm vindo a ser usados na Europa desde os anos 50, tanto em construções novas como em obras de reabilitação. Em Portugal estes sistemas só começaram a ser utilizados quatro décadas mais tarde, uma vez que as condições climáticas, por não serem demasiado severas, não exigiam a procura urgente por outras soluções de isolamento térmico.

Os sistemas ETICS apresentam múltiplas vantagens quando comparados com outras técnicas de construção. Esta tecnologia garante a continuidade do isolamento, permite uma maior durabilidade das fachadas, bem como a diminuição da espessura das paredes. Para além disso, este sistema é bastante fácil de aplicar, o que é muito importante em obras de reabilitação, e apresenta um custo relativamente reduzido. No entanto, estes sistemas podem apresentar pontualmente perda de coesão e material, bem como uma baixa resistência ao impacto. Adicionalmente, os ETICS estão sujeitos a fenómenos de biocolonização e consequente biodeterioração ao longo do tempo, que pode influenciar o seu desempenho, e principalmente criar um notável impacto estético. Por estas razões, esta tecnologia em alguns casos ainda suscita algumas dúvidas aquando da aplicação.

Sabe-se que a degradação biológica de fachadas revestidas com ETICS, em Portugal, afeta um número bastante considerável de construções. Em Portugal, a manutenção das fachadas dos edifícios ainda não é considerada como uma prioridade e, por este motivo, há registo de inúmeros casos de alteração do aspeto das fachadas após poucos anos (5 a 7) da aplicação do sistema.

Os fenómenos que potenciam o desenvolvimento biológico na superfície dos ETICS têm sido parcialmente estudados nos últimos anos. Sabe-se que a humidade é o principal fator no que diz respeito à biocolonização das fachadas. O teor de humidade resulta do efeito conjugado de 4 fatores: humidificação pela chuva incidente na fachada; humidificação por condensação superficial exterior; as características do reboco, nomeadamente propriedades hídricas e térmicas; o processo de secagem da fachada.

## 1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como principais objetivos:

1. Monitorização ambiental em tempo real de provetes de ETICS: avaliação da humidade e temperatura superficial de provetes expostos na área metropolitana de Lisboa;
2. Proposta de índices de desempenho higrotérmico;
3. Simulação numérica após a recolha dos dados experimentais;
4. Avaliação do desempenho dos sistemas ETICS em função das variações higrotérmicas ambientais.

Para além de todos estes objetivos, pretende-se contribuir para a discussão das seguintes questões-alvo:

- Qual a influência da humidade e temperatura no desempenho e durabilidade dos ETICS?
- Qual a relação entre os parâmetros higrotérmicos de desempenho dos ETICS e a sua composição?
- Como a variação da condensação superficial influencia a formação de colonização biológica?

### **1.3. Organização e estrutura**

O presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos: introdução, estado de arte, materiais e metodologia experimental, resultados e discussão, e por último, as conclusões e perspetivas futuras.

O primeiro, e presente, capítulo corresponde à introdução, onde se apresenta uma visão geral do que se pode esperar deste trabalho, bem como os principais objetivos que se pretendem alcançar.

No segundo capítulo, apresenta-se o estado de arte sobre os sistemas do tipo ETICS, onde se explora com mais detalhe as características destes sistemas, bem como as suas utilizações, composição vantagens e desvantagens, estudos higrotérmicos realizados, entre outros.

O capítulo três, materiais e metodologia experimental, descreve a campanha experimental, incluindo os materiais utilizados, nomeadamente 4 provetes ETICS estudados, e a descrição sequencial e cronológica da campanha experimental.

No capítulo quatro, apresentam-se os resultados dos ensaios experimentais. Estes resultados são, também neste capítulo, analisados e discutidos com objetivo de comparar o desempenho higrotérmico com a composição de cada sistema estudado.

Finalmente, no capítulo 5, encontram-se as conclusões do trabalho, bem como perspetivas para trabalhos futuros. Após este capítulo apresentam-se as referências bibliográficas usadas para suportar a presente dissertação. bem como anexos que complementam o trabalho.

## 2. ETICS

### 2.1. ETICS

#### 2.1.1. Enquadramento

Os sistemas de isolamento térmico pelo exterior (ETICS) têm vindo a ser usados na Europa desde os anos 50 (inicialmente nos países nórdicos), e com mais frequência após a primeira crise energética na década de 70 [1]. Estes sistemas apresentam propriedades de isolamento térmicas, por vezes acústicas, relativa facilidade de aplicação e um custo moderado [2]. Em Portugal, os ETICS, normalmente identificados como sistema “capote” ou “capoto”, começaram a ser utilizados com mais frequência apenas a partir da década de 90 [1], [3]. Este atraso na sua aplicação é em parte justificado pelas condições climáticas menos agressivas e necessidades de conforto térmico menos rigorosas [3]. No entanto, a aplicação deste tipo de isolamento tornou-se comum em Portugal após o debate sobre a eficiência térmica das fachadas, promovido pelo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) em 1990, que contribuiu para o cumprimento das exigências dos edifícios revestidos por ETICS [4]. As estatísticas mostram que a utilização dos ETICS em Portugal cresceu de cerca de 200.000 m<sup>2</sup> de área aplicada até 2006, para cerca de 2.400.000 m<sup>2</sup> em 2010 [1] e cerca de 4.000.000 m<sup>2</sup> em 2015 (Figura 1) [5], muito devido ao Decreto-Lei nº118/2013 que aprovou o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCEE), em substituição do RCCTE.

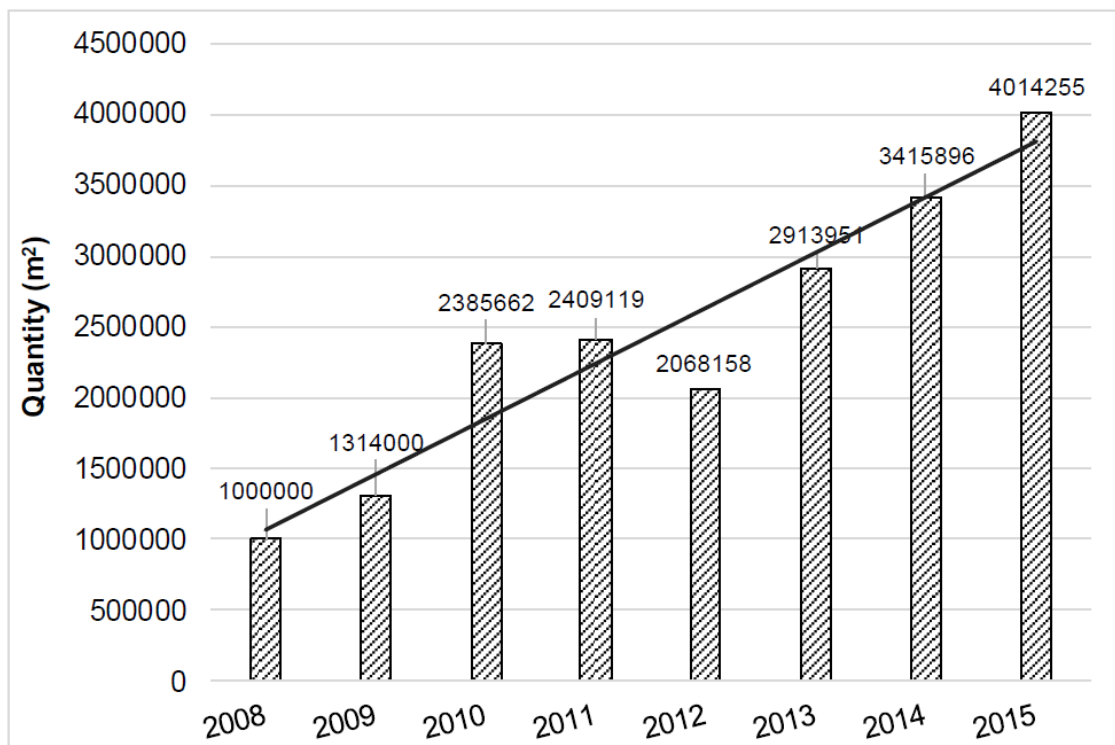


Figura 1: Evolução da aplicação do sistema ETICS em Portugal [6].

### **2.1.2. Aplicação**

Para uma correta aplicação dos sistemas ETICS, é imprescindível uma escolha adequada das placas isolantes e dos materiais necessários à preparação dos suportes, colagem, barramento e acabamentos, que conferem à parede exterior o aspeto final [7]. As superfícies sujeitas à aplicação dos ETICS, tais como alvenarias de blocos de betão, tijolo ou pedra, rebocos de ligantes hidráulicos ou ainda suportes pintados, devem apresentar-se limpos, isentos de sujidade, gordura ou qualquer outra substância que possa prejudicar a colagem das placas ao suporte [3], [8]. Igualmente, uma adequada execução em obra dos pormenores construtivos em zonas particulares do edifício, traduzem-se em condições fundamentais para garantir a durabilidade, o conforto térmico e consequentemente melhores resultados no panorama da poupança energética [7].

Estes sistemas podem ser aplicados em diversos tipos de suportes, no entanto, a colagem das placas isolantes é geralmente feita através da aplicação de argamassa adesiva na superfície das mesmas [9]. Para assegurar condições de estabilidade e secagem, não é aconselhável que se inicie este processo sem que tenha decorrido no mínimo um mês desde a aplicação do sistema ETICS sobre o suporte. No arranque do sistema, de forma a garantir não só a proteção mecânica à humidade, mas também o nivelamento da primeira fiada de painéis, é frequentemente utilizado um perfil de arranque [1], [10]. As condições climatéricas devem ser consideradas na aplicação do sistema, sendo que a temperatura atmosférica não deverá ser inferior a 5°C nem superior a 30°C. A presença de vento forte, chuva e incidência direta dos raios solares não são aconselháveis aquando da aplicação deste tipo de sistemas [11].

Os ETICS têm vindo a ser aplicados nos mais variados tipos de construção, nomeadamente em edifícios de habitação coletiva, habitações unifamiliares, edifícios públicos, entre outros [12]. Apesar da ampla diversidade de edifícios onde estes sistemas podem ser aplicados, existem algumas exceções. Em edifícios com paredes espessas e porosas (por ex. edifícios históricos) a aplicação deve ser evitada, uma vez que teores de humidade de água elevados, associados à baixa permeabilidade ao vapor de água do sistema, podem alterar o funcionamento do mesmo, originando ou acelerando processos de degradação [11], [12] assim como a alteração em termos de geometria arquitetónica e elementos com valor cultural.

### **2.1.3. Composição**

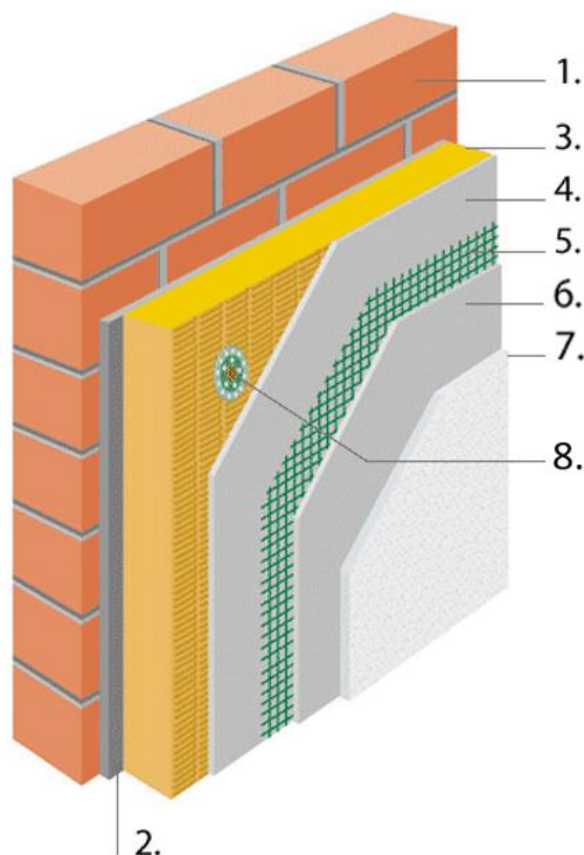
Os ETICS são usualmente aplicados em suportes (alvenaria ou betão) e compostos por: (i) isolamento térmico (geralmente constituído por poliestireno expandido - EPS, poliestireno extrudido - XPS, aglomerado de cortiça expandida – ICB, ou lã mineral - MW), aplicado diretamente sobre o suporte com argamassas de elevada capacidade adesiva; (ii) camada de base reforçada com rede; (iii) camada de acabamento protetora e decorativa. De modo a aumentar o desempenho e durabilidade do sistema multicamada, as diferentes propriedades que o compõem devem ser compatíveis [8].



No que diz respeito à fixação, os ETICS podem ser colados e/ou fixados mecanicamente [13]. Os elementos que compõem o sistema ETICS, tal como as suas propriedades, variam de acordo com o fabricante, e devem respeitar os requisitos definidos pelo *European Approval Document* (EAD) de forma a obter a respetiva *European Technical Assessment* (ETA) [13]. A tabela 1, especifica cada elemento e descreve os parâmetros mais relevantes a ter em conta.

No mercado português, os sistemas de isolamento térmico pelo exterior apresentam dois tipos de revestimentos, os espessos e os delgados [14]. Os revestimentos espessos são compostos por cimento, areia e adjuvantes diversos, e aplicados em camadas com 4 a 10 mm de espessura, de forma a garantir uma melhor resistência aos choques e à ação do fogo [14]. No entanto, a ocorrência de fendilhações neste tipo de revestimentos é mais provável do que em revestimentos de ligantes mistos [15]. Desta forma, a estanqueidade do sistema à água fica comprometida, e a aderência do revestimento ao isolamento térmico não é tão eficaz [14].

Os revestimentos delgados de ligantes mistos (Figura 2), com espessuras de 3 a 5 mm, são os mais utilizados em Portugal, e são compostos por cimento, resina e areia, permitindo não só a aderência às placas de isolamento térmico, bem como resistir aos problemas de fendilhação [14], [15].



**Figura 2:** 1. Revestimento delgado - Legenda: (1) Parede exterior; (2) Argamassa de colagem; (3) Isolamento térmico; (4) Argamassa de regularização; (5) Rede de fibra de vidro; (6) Argamassa de regularização; (7) Revestimento de acabamento; (8) Bucha de fixação [16].

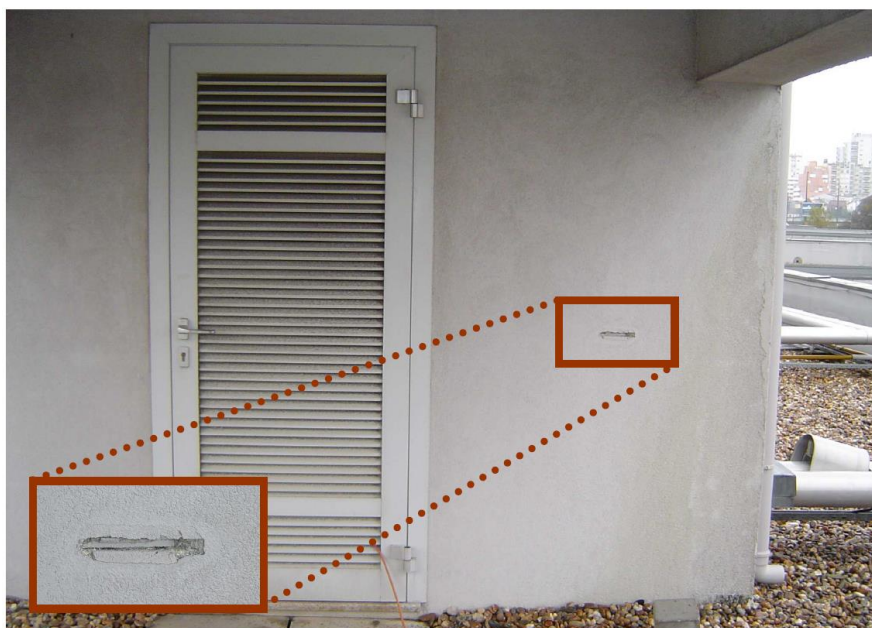
**Tabela 1: Elementos do sistema ETICS e respetiva descrição. Adaptado de [17].**

<b>Elemento do sistema</b>	<b>Descrição</b>
<b>Argamassa adesiva</b>	<p>Produto utilizado com finalidade de fixar, por aderência, o isolante térmico ao suporte. Em geral é um produto fornecido em:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pasta para mistura com cimento Portland;</li> <li>• Pó para mistura com um determinado ligante (por ex. resinas);</li> <li>• Pó para mistura apenas com água.</li> </ul>
<b>Isolante térmico</b>	<p>Os isolantes térmicos mais utilizados são o poliestireno expandido moldado (EPS), poliestireno expandido extrudado (XPS), aglomerado de cortiça expandida (ICB) e lã mineral (MW).</p> <p>Estes devem possuir as seguintes características fundamentais:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente ao fogo (em edifícios superiores a 28 m é necessário ter classe A1 ou A2 de reação ao fogo);</li> <li>• Condutibilidade térmica (<math>\lambda \leq 0,065</math> W/m. K);</li> <li>• Resistência mecânica suficiente para o tipo de ações a que estará sujeito.</li> </ul>
<b>Camada de base</b>	<p>A camada de base é composta pelo reboco (normalmente entre 2 a 5 mm de espessura), barrado sobre o isolamento térmico, de forma a permitir o completo recobrimento do reforço.</p>
<b>Reforço</b>	<p>O reforço (incorporado na camada de base) consiste, geralmente, no uso de uma ou mais redes de fibra de vidro. Este tipo de reforço deve ter um tratamento alcalino contra o ataque dos cimentos.</p> <p>Distinguem-se dois tipos de redes de reforço:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rede standard, que têm como função garantir a continuidade do reboco e melhorar a resistência mecânica;</li> <li>• Rede reforçada, que têm como função melhorar a resistência ao choque do reboco e são aplicadas como complemento das redes standard.</li> </ul>
<b>Camada de acabamento</b>	<p><b>Primário</b></p> <p>O primário é aplicado sobre a camada de base e consiste geralmente numa pintura em solução aquosa à base de resinas. O primário é utilizado para melhorar a aderência da camada de acabamento e controlar a absorção. De realçar que nem todos os sistemas incluem esta camada.</p>
	<p><b>Acabamento</b></p> <p>A camada de acabamento imprime um aspeto final decorativo (com inclusão de pigmentos específicos) e oferece a proteção que o sistema necessita contra os agentes climáticos. O acabamento pode conter aditivos hidrófugos, biocidas e de autolimpeza.</p>

#### 2.1.4. Vantagens e desvantagens

Uma das principais vantagens deste tipo de sistemas é a redução de pontes térmicas e perdas globais de calor. Essa redução assegura a continuidade do isolamento térmico no interior do edifício e reduz as condensações superficiais em pontos singulares [3], [17]. A longo prazo este sistema revela-se bastante económico e eficiente energeticamente, uma vez que reduz as necessidades de aquecimento e de arrefecimento do ambiente. Este facto traduz-se numa melhoria do conforto térmico durante o verão, devido à capacidade de regulação da temperatura interior, e também no inverno, por aumento dos ganhos solares úteis [3], [18]. Outra das vantagens consiste no aumento da durabilidade das estruturas do edifício, devido à melhoria da proteção da fachada às solicitações dos agentes atmosféricos [12], [19].

Por outro lado, os ETICS apresentam fraca resistência ao impacto. Este aspeto é especialmente crítico em zonas acessíveis, provocadas por situações quotidianas, tais como impactos acidentais de objetos (Figura 3) ou vandalismo (frequentes em escolas ou em zonas de alta densidade habitacional) e que pode levar, além das evidentes consequências estéticas, a pontos privilegiados de entrada de água. Para além disso, a degradação estética pode estar também associada à perda de coesão e material [11], formação de manchas e desenvolvimento de microrganismos, tais como algas e cianobactérias, que pode levar a biodeterioração da fachada. Como consequência, estas anomalias podem causar alterações no desempenho mecânico e térmico do sistema, para além do acentuado impacto visual e um aspeto de degradação. É de salientar que, a aplicação dos sistemas ETICS em parede simples, pode ser uma solução construtiva mais cara quando comparada com a tradicional parede dupla com isolamento. Assim sendo é importante que se façam contas rigorosas e que se pondere os custos e benefícios a longo prazo [3], [20]. Por estas razões, apesar do uso exponencial deste sistemas nos últimos anos, esta tecnologia ainda coloca entraves aquando da sua aplicação em alguns casos [8], [21].



**Figura 3:** Degradação do sistema do tipo ETICS devido ao impacto [3].

Além disso, do ponto de vista construtivo, permite a diminuição da espessura das paredes interiores e, conseqüentemente, o aumento da área útil e a diminuição do peso e cargas permanentes sobre a estrutura [3]. No caso de reabilitações de fachadas, a colocação em obra deste tipo de sistemas não implica perturbações para os ocupantes. O método construtivo é relativamente simples (apesar da necessidade de uma execução cuidadosa por parte de mão de obra especializada) [11], apresenta uma grande variedade de soluções de acabamento (conforme as necessidades do cliente) e facilidade de reparação de eventuais patologias, diretamente no exterior do edifício [3], [22].

## **2.2. Estudos higrotérmicos em ETICS**

### **2.2.1. Considerações iniciais**

Do ponto de vista tecnológico, encontram-se inúmeros dados sobre os sistemas do tipo ETICS. Na década 80, nos Estados Unidos da América, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) publicou estudos sobre *Exterior Insulation Finishing System* (EIFS), sigla americana utilizada para designar os sistemas ETICS. Estes documentos continham informação acerca das características dos materiais a utilizar, condições de aplicação, procedimento de manutenção e ainda os parâmetros de desempenho [23], [24].

Na mesma década, os estudos realizados pelo *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB), em França, possibilitaram definir os limites à sua utilização, as condições de aplicação e estabelecer os requisitos funcionais que devem ser garantidos [3], [25], [26]. O estudo permitiu ainda identificar as principais vantagens e desvantagens e definir requisitos construtivos, através de pormenores construtivos detalhados, para tratamento de pontos singulares [3], [26].

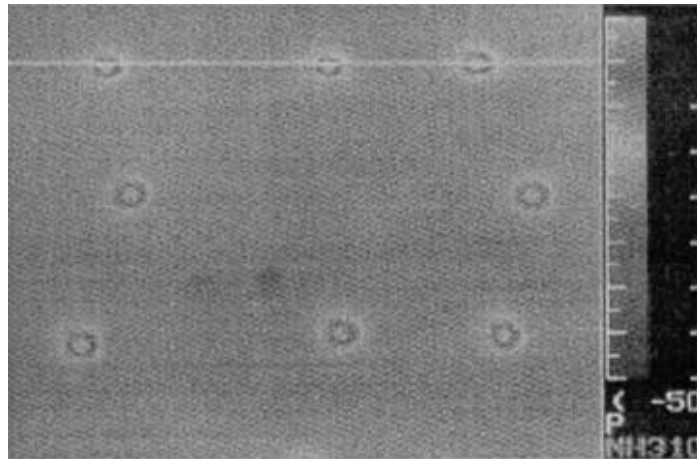
A partir da segunda metade dos anos 80, o LNEC também recolheu informações e ensaiou estes revestimentos de paredes, fornecendo uma descrição e classificação dos sistemas do tipo ETICS, bem como as suas necessidades funcionais e controlo de qualidade [27], [28]. Em 2000, o Guia de Aprovação Técnica Europeia dos sistemas ETICS (ETAG) foi publicado pela *European Organization for Technical Approval* (EOTA) [29], reformulado várias vezes até à versão atual: EAD 040083-00-0404 [29]. O EAD estipula os critérios e os ensaios para avaliar o desempenho dos sistemas do tipo ETICS, através dos requisitos básicos de desempenho dos materiais e do seu conjunto (ex. limites de absorção de água, reação ao fogo, resistência mecânica ao impacto). Para cada sistema é realizada uma Avaliação Técnica Europeia (ATE), com base nas indicações do EAD, que verifica a regularidade do desempenho do sistema e permite atribuir a marcação de Conformidade Europeia (CE) [30].

No que diz respeito ao desenvolvimento de microrganismos neste tipo de sistemas (não considerado no EAD), que causam um impacto no aspeto e, inevitavelmente, um impacto visual, os estudos até agora efetuados possibilitaram compreender o fenómeno físico e desenvolver modelos matemáticos para a sua previsão. No entanto, a única solução frequentemente utilizada, é uso de biocidas, que para além de serem caros, pouco ecológicos e portanto pouco sustentáveis, têm pouca durabilidade, o que obriga a aplicações periódicas [31], [32].

### 2.2.2. Condensação superficial em ETICS

Blaich [3], [33], do Empa – *Laboratories for Materials Science and Technology*, na Suíça, foi um dos primeiros a estudar o comportamento higrotérmico dos sistemas ETICS. Os seus estudos permitiram definir a humidificação da superfície como causa determinante no aparecimento e desenvolvimento de microrganismos. A humidificação provinha não só da condensação superficial, devida à redução da temperatura durante a noite, mas também da chuva incidente na fachada.

Através de termogramas realizados a fachadas revestidas com sistemas fixos mecanicamente ao suporte (Figura 4), o autor destacou a influência das condensações superficiais. Os termogramas revelaram que, quando comparadas com zonas correntes de isolamento térmico, as fixações mecânicas possibilitavam um maior fluxo de calor, traduzindo-se num aumento de cerca de 1º C da temperatura superficial. O autor verificou que este aumento podia impedir o desenvolvimento de microrganismos [3], [33].

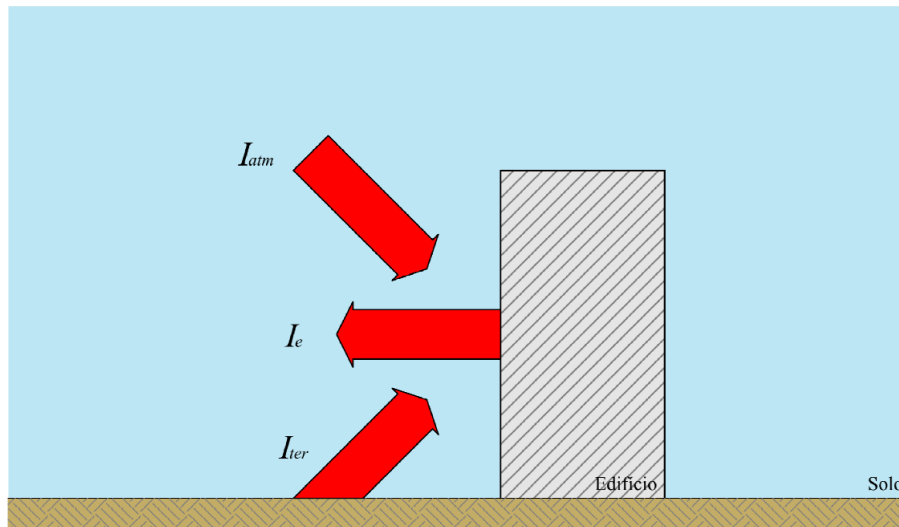


**Figura 4:** Termograma de uma fachada revestida com sistema ETICS [33].

O instituto Fraunhofer – *Institute for Building Physics* (IBP) [31], [34], na Alemanha, também realizou estudos através de dados experimentais, mas principalmente através de simulações numéricas. Concluiu que o teor de humidade à superfície resultava da chuva incidente na fachada, pela ação do vento, mas também da condensação superficial, de acordo com o que já havia sido referido por Jurgen Blaich. Os estudos permitiram ainda determinar que as propriedades dos materiais que compõem o sistema e o seu processo de secagem eram um fator determinante no teor de humidade à superfície.

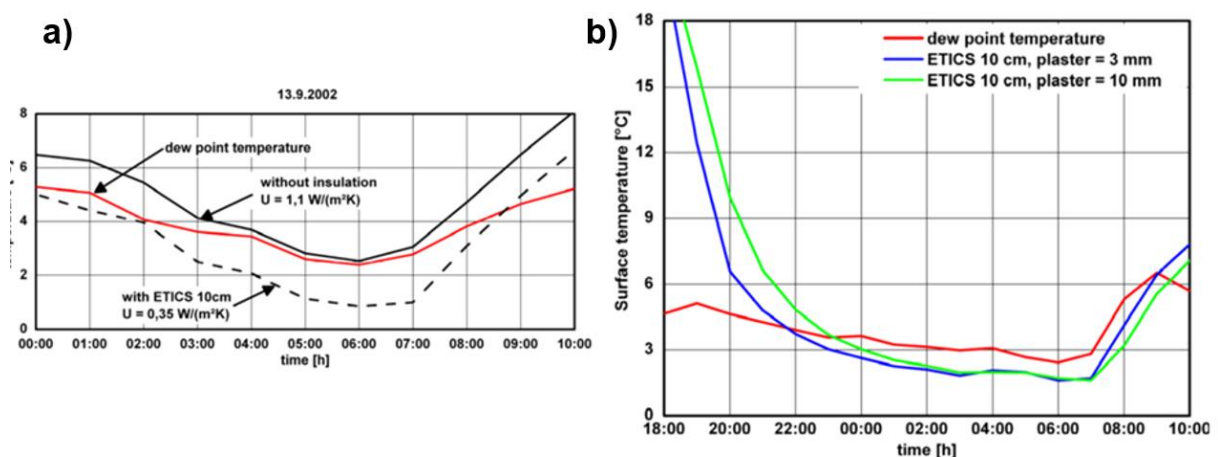
Os investigadores do IBP dedicaram a maior parte dos seus estudos à análise das condensações superficiais, uma vez que estas têm consequências muito críticas nos sistemas do tipo ETICS. Perceberam que estas ocorriam sobretudo quando a temperatura de ponto de orvalho era superior à temperatura da superfície exterior [31]. Perceberam também que, apesar deste fenómeno se verificar em todas as superfícies exteriores, tinha repercussões mais acentuadas em sistemas com uma camada exterior de reduzida espessura e com uma baixa condutibilidade térmica, bem como em sistemas com uma espessura de isolamento térmico significativa, que impedia o fluxo de calor proveniente do interior, como é o caso dos ETICS [31].

A acentuada diminuição da temperatura superficial resultava de um balanço energético negativo na superfície exterior da fachada. Neste contexto, Andreas Holm, um investigador do IBP, mencionou três principais parâmetros no balanço energético da fachada de um edifício: a radiação emitida pelo céu,  $I_{atm}$ , a radiação emitida pelo edifício,  $I_e$ , e a radiação emitida pelas superfícies terrestres que se localizavam na proximidade do edifício,  $I_{ter}$  (Figura 5) [35].



**Figura 5:** Balanço radiativo de um edifício [3].

Estar ciente da existência deste fenómeno físico possibilitou a introdução de mais uma variável ao modelo existente de transferência de calor, ar e humidade, desenvolvido pelo Fraunhofer - IBP [36]. A exaustiva utilização do *Wärme Und Feuchte Instationär (WUFI)* possibilitou compreender a ação das variáveis e dos parâmetros no arrefecimento noturno das superfícies exteriores dos sistemas do tipo ETICS, responsável pela ocorrência de condensações. Verificou-se que a reduzida espessura do reboco, que conferia ao sistema uma baixa capacidade térmica, agravava as condensações, em comparação a rebocos com uma espessura mais elevada (Figura 6) [37].



**Figura 6:** Influência da camada isolante e do reboco exterior na temperatura superficial [37].

Os investigadores do IBP [31], [34], [35], [37] referiram ainda que a temperatura superficial era influenciada pela orientação das fachadas, não só durante o dia, por consequência da radiação solar incidente, mas também durante a noite. As fachadas (no centro da Europa) viradas a Este apresentavam um menor risco de ocorrência de condensações, ao contrário das fachadas viradas a Oeste. As fachadas Norte e Sul apresentavam valores médios idênticos, no entanto a fachada Norte apresentava mais horas com condensação.

Demonstraram também que uma elevada espessura do isolamento térmico aumentava a probabilidade de ocorrerem condensações, uma vez que o fluxo de calor proveniente do interior do edifício era inferior. Comprovaram também que rebocos com diferentes cores tinham diferentes comportamentos, nomeadamente um reboco com cor mais clara tinha maior probabilidade de ocorrência de condensações do que um reboco de cor escura, devido ao coeficiente de absorção solar (maior em cores escuras) [34], [35].

As tintas de baixa emissividade, obtidas através da adição de pigmentos metálicos, aplicadas como revestimento dos sistemas do tipo ETICS também foram estudadas pelo IBP. Verificou-se que quando aplicadas reduziam significativamente o risco de ocorrência de condensações devido ao aumento da temperatura superficial durante a noite. No entanto estas não devem ser utilizadas, uma vez que ganham uma tonalidade cinzenta quando expostas aos agentes climáticos, independentemente da sua cor inicial [37], [38].

Putterman *et al.* [39], [40] estudaram amostras de reboco recolhidas *in situ*, e concluíram que as que apresentavam maior teor de humidade, eram aquelas que também apresentavam um maior desenvolvimento de microrganismos biológicos. De forma a perceber a origem da humidade, os autores realizaram diferentes simulações numéricas.

As simulações numéricas permitiram concluir que, em sistemas do tipo ETICS, o teor de humidade no reboco era mais elevado do que em paredes monolíticas, principalmente quando a temperatura de ponto de orvalho era superior à temperatura superficial. No entanto, a humidade relativa nunca atingia os 100% nesses períodos. De forma a perceber a variação de humidade relativa, os autores estudaram duas propriedades com influência direta - a permeabilidade ao vapor e a difusividade térmica. Concluíram que a permeabilidade ao vapor não criava variações na humidade relativa. Por outro lado, quando a difusividade térmica diminuía, a humidade relativa à superfície aumentava, existindo períodos com saturação de humidade à superfície (humidade relativa a 100%) [39], [40].

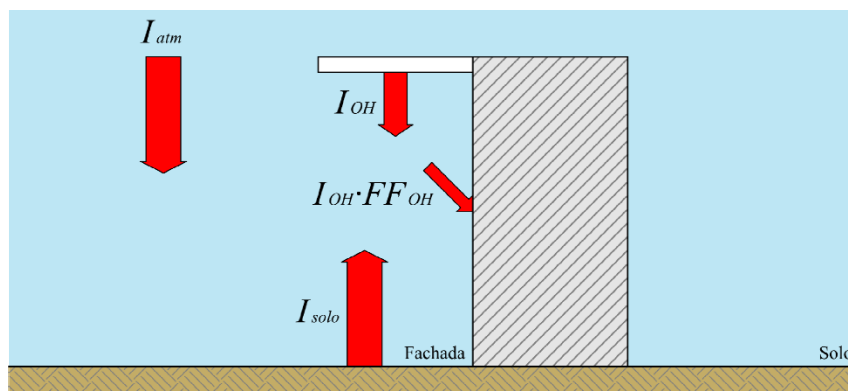
Concluíram que, apesar da difusividade higríca ter alguma influência no teor de humidade à superfície, uma vez que limitava a variação da água condensada para o interior, as propriedades térmicas do sistema é que condicionavam maioritariamente a ocorrência de condensações superficiais. Após ensaios experimentais e simulações numéricas, concluíram que o teor de humidade à superfície ao longo do ano, era maior em sistemas ETICS do que em sistemas sem isolamento térmico. Assim como outros autores, a única solução apresentada foi o uso de biocidas na camada de acabamento, uma vez

que a redução da camada de isolamento reduzia o conforto térmico e o aumento da difusividade higríca reduzia a resistência do reboco face à água líquida (por exemplo, no caso da chuva) [39], [40].

Von Werder *et al.* [41], [42] através de ensaios laboratoriais e ensaios *in situ* avaliaram as propriedades higrícas de dois tipos de reboco (sintéticos e minerais). Após determinar o coeficiente de absorção dos diferentes rebocos, concluíram que os rebocos sintéticos absorviam significativamente menos água do que os minerais, e que a sua secagem era mais rápida. A implementação de sondas nas amostras monitorizadas, permitiu avaliar a humidade relativa à superfície e os respetivos períodos de saturação. Os resultados indicaram que os rebocos com menor coeficiente de absorção eram aqueles que apresentavam valores de humidade relativa mais elevados por períodos de tempo maiores.

Barreira [3], através de ensaios experimentais e simulações numéricas, estudou o comportamento higrotérmico de fachadas revestidas com sistemas ETICS, viradas aos quatro pontos cardeais, localizadas na cobertura de um dos edifícios da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). As simulações numéricas permitiram concluir que as condensações nas superfícies exteriores eram condicionadas pela humidade relativa exterior, radiação atmosférica incidente e pela temperatura do ar exterior. A autora evidenciou ainda que a quantidade de chuva incidente nas fachadas era influenciada pela sua orientação, pela direção e velocidade do vento e altura do edifício [43].

Os ensaios experimentais realizados *in situ*, possibilitaram concluir que diferenças de 0,5°C eram suficientes para limitar ou aumentar a ocorrência de condensações superficiais [44]. O estudo mostrou ainda que a orientação das fachadas não influenciava muito a variação da temperatura superficial durante a noite. Por outro lado, durante o dia, tinha alguma influência devido a radiação solar direta [43]. Os ensaios *in situ* permitiram ainda concluir que a presença de obstáculos influenciava o comportamento higrotérmico das fachadas (Figura 7) [45]. A sua presença resultava num aumento da temperatura superficial noturna das fachadas e, conseqüentemente, numa diminuição das condensações superficiais [45]. Através do conhecimento deste fenómeno, Eva Barreira definiu um modelo de cálculo que permite simular o efeito dum obstáculo de qualquer natureza (vertical ou horizontal) na temperatura superficial de fachadas [3]. O modelo tem em conta a Radiação emitida pela atmosfera ( $I_{atm}$ ), Radiação emitida e refletida pelo solo ( $I_{solo}$ ), Radiação emitida pelo obstáculo que incide na fachada ( $I_{OH}$ ), e o fator de forma entre superfícies perpendiculares ( $FF_{OH}$ ).



**Figura 7:** Efeito simplificado de um obstáculo horizontal numa fachada [3].



### 2.2.3. Bio-susceptibilidade dos ETICS

Blaich [33] evidenciou que os ligantes sintéticos integrados no reboco, intensificavam o problema do desenvolvimento de microrganismos, uma vez que a água no estado líquido permanecia durante mais tempo à superfície. Por outro lado, em rebocos à base de ligantes minerais o desenvolvimento biológico é menos propício, uma vez que estes têm maior capacidade de absorção. Em conclusão, o autor aponta como única solução a utilização de biocidas [3], [32].

O instituto alemão Fraunhofer IBP [38], [46]., através das inúmeras simulações numéricas no WUFI, percebeu que, uma vez que durante a noite não existia radiação solar para compensar o balanço energético, este tornava-se negativo, provocando uma diminuição da temperatura superficial na fachada do edifício que se mantinha, até que a perda de calor por radiação solar fosse compensada pelo transporte de calor por condução ou convecção. Sempre que a temperatura de ponto de orvalho fosse superior à temperatura superficial, o teor de humidade à superfície aumentava, por consequência da acumulação da água condensada, proporcionando, assim, as condições ideais para o crescimento biológico. Quando o processo de secagem era demasiado lento, o teor de humidade à superfície permanecia elevado durante longos períodos de tempo, aumentando a possibilidade de desenvolvimento de microrganismos (Figura 8).



**Figura 8:** Desenvolvimento biológico em fachadas do tipo ETICS [3].

Putterman *et al.* [40] e Becker [39] efetuaram ensaios laboratoriais de resistência ao desenvolvimento de microrganismos em diferentes tipos de acabamentos. No entanto, não referiram em qual dos tipos de acabamento (mineral ou sintético) era mais propício o aparecimento e conseqüente desenvolvimento de microrganismos. Apenas é mencionado que os acabamentos com tratamento biocida não apresentavam desenvolvimento biológico.

Von Werder *et al.* [41], [42] utilizaram diversas amostras de sistemas ETICS, com rebocos de diferentes características, para realizar um conjunto de ensaios *in situ* de longa duração. Concluíram que os rebocos de ligantes minerais eram menos suscetíveis ao desenvolvimento biológico do que os rebocos à base de ligantes sintéticos. Contudo, os rebocos à base de ligantes sintéticos (quando não tinham qualquer tipo de biocida incorporado) eram afetados mais rapidamente.

Os autores referiram que o elevado período de tempo em que a água líquida, resultante de condensações ou da incidência da chuva, permanecia na superfície, era a causa para uma maior tendência do desenvolvimento de microrganismos em rebocos sintéticos face aos rebocos minerais. As propriedades hidrófugas dos rebocos sintéticos restringiam mais a absorção de água para o interior do sistema, que se mantinha à superfície, favorecendo o desenvolvimento biológico (Figura 9) [41], [42].



**Figura 9:** Desenvolvimento biológico em fachadas do tipo ETICS [3].

Barreira [3], estabeleceu uma metodologia para avaliar o desempenho de fachadas revestidas com sistemas ETICS e estimar o risco de degradação biológica. Definiu o modelo BIO.MOD, uma ferramenta que permite antecipar o risco de degradação biológica de fachadas revestidas com ETICS, que pode ser útil dependendo das condições específicas de utilização [3].

A comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os resultados do modelo, permitiu mostrar que a influência da chuva incidente é pouco significativa na alteração do risco de degradação biológica, tendo um efeito mais evidente apenas em períodos de chuva muito elevada. A autora refere ainda que o modelo não tem em consideração a escorrência da água pela superfície da fachada, bem como a sua acumulação junto de pontos singulares, fenómenos que podem agravar o desenvolvimento biológico [3].

O modelo demonstrou ainda que o processo de secagem é preponderante na degradação do aspeto, uma vez que as fachadas apresentavam degradações biológicas distintas, consoante a sua orientação cardeal [3].

## 2.4 Modelos de simulação numérica

### 2.4.1 Considerações iniciais

É conhecido que a presença de humidade em edifícios pode induzir a danos, o que exige cada vez mais a necessidade de recorrer a modelos de simulação numérica para avaliar o seu comportamento higrotérmico. Nas últimas seis décadas, vários modelos de simulação numérica foram desenvolvidos ou aprimorados [47].

Delgado *et al* [47], referiram que entre os 14 programas de simulação higrotérmica disponíveis para o público em geral (Tabela 2), o WUFI PRO e o HAM-Tools eram os programas que mais se adequavam à simulação higrotérmica de paredes revestidas com ETICS, uma vez que trabalham com fluxos unidirecionais (1D). Barreira [3] referiu que ambos os programas incluíam o balanço explícito da radiação de onda longa incidente na superfície exterior nos seus cálculos, e que a grande diferença estava no cálculo de cada parcela do balanço explícito. Enquanto que o WUFI PRO considera o efeito do solo na reflexão e emissão da radiação atmosférica, o HAM-Tools não contabiliza esse efeito [47].

Além disso, o WUFI PRO viabiliza também as seguintes opções [48]:

- Uma base de dados bastante ampla (cerca de 600 materiais), e a possibilidade de o utilizador inserir novos materiais;
- Facilidade de utilização, com uma interface muito intuitiva;
- Campos de ajuda bastante pormenorizados, incluídos no programa, e ainda um fórum de discussão e ajuda online;
- Dados climáticos para cerca de 149 locais, incluindo Lisboa – Portugal.

O Fraunhofer IBP disponibiliza outros programas para além do WUFI PRO, nomeadamente o WUFI 2D e o WUFI PLUS. O WUFI 2D é uma expansão do WUFI PRO, que realiza uma análise bidimensional em geometrias mais complexas, tais como os cantos dos edifícios ou zonas perto de janelas. O WUFI PLUS é a ferramenta de simulação de calor e humidade mais completa de todos os *softwares* do WUFI. Para além de simular condições higrotérmicas em componentes de edifícios, simula o ambiente interior e é, portanto, adequado para abordar o conforto e o consumo de energia em edifícios.

Existe ainda modelos que simulam o desenvolvimento biológico (WUFI Bio e WUFI Mould Index VTT). O modelo matemático prevê o crescimento de microrganismos em função dos materiais que compõem o sistema, da temperatura e da humidade relativa do ar.

**Tabela 2:** Modelos higrotérmicos disponíveis no mercado para o público em geral [47].

<b>Nome do modelo</b>	<b>Tipo de transferência</b>	<b>Autores do modelo</b>
GLASTA	1D calor + humidade	Physibel, Maldegem, Bélgica
UMIDUS	1D calor + humidade	Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Brazil
EMPTIED	1D calor + ar + humidade	CMHC, Canadá
HygIRC – 1D	1D calor + ar + humidade	Universidade Concordia, Canadá
MATCH	1D calor + ar + humidade	Thermal Insulation Institute, Dinamarca
BSim2000	1D calor + humidade	Danish Building Research Institute, Dinamarca
DELPHIN 5	1/2D calor + ar + humidade	Universidade Técnica de Dresden, Alemanha
HAMLab	1/2/3D calor + ar + humidade	Universidade Tecnológica de Eindhoven, Holanda
1D – HAM	1D calor + ar + humidade	Universidade Técnica de Chalmers, Suécia e Universidade de Lund, Suécia
HAM – Tools	1D calor + ar + humidade	Universidade Técnica da Dinamarca e Universidade Técnica de Chalmers, Suécia
IDA – ICE	1D calor + ar + humidade	EQUA Simulation AB, Suécia
MOIST	1D calor + humidade	National Institute of Standards and Testing, USA
MOIST – EXPERT	1/2D calor + ar + humidade	Oak Ridge National Laboratory, USA
WUFI PRO	1D calor + humidade	Fraunhofer IBP
WUFI 2D	1/2D calor + humidade	Fraunhofer IBP
WUFI PLUS	1/2/3D calor + humidade	Fraunhofer IBP

## 2.4.2 WUFI PRO

WUFI é um acrónimo em alemão para *Wärme Und Feuchte Instationär*, que traduzido, significa “calor e humidade transiente”. Este *software* dispõe de um conjunto de programas que possibilitam o cálculo do comportamento higrotérmico em paredes ou em outros elementos construtivos, compostos por diferentes camadas e expostos ao clima natural [49].

O *software* simula a transferência de humidade e calor e permite simulações realistas do impacto dos fatores higrotérmicos. Foi desenvolvido pelo IBP na década de 90, e divulgado em Portugal pelo Laboratório de Física das Construções (LFC), da FEUP [50].

Diversos autores utilizaram o WUFI para validar os seus resultados ou simular o comportamento de diferentes tipos de materiais. Reich *et al* [51], utilizaram o *software* para simular a influência do teor de humidade na durabilidade de 16 conjuntos de paredes, com diferentes tipos de isolamentos e materiais. Após a simulação compararam os resultados experimentais com os simulados e concluíram que o programa era bastante preciso, que a principal discrepância ocorria no período inicial da simulação.

Linden *et al* [52], recorreram também a este *software* para simular uma fachada ventilada, e prever o impacto que a quantidade de água infiltrada, através de fissuras, pode ter na biocolonização. Neste caso, o pior cenário possível foi assumindo: uma fissura de 40 mm em que toda a água infiltrada atingiu a camada de isolamento da fachada. Através das simulações higrotérmicas conseguiram provar que o risco de crescimento biológico está proporcionalmente relacionado com a percentagem de água infiltrada na fachada.

Barreira [3] recorreu ao WUFI para validar os resultados obtidos *in situ* com os resultados das simulações numéricas. O desempenho higrotérmico de fachadas ETICS viradas a Oeste, Norte, Este e Sul foi simulado, considerando a chuva incidente, a humidade relativa superficial e as temperaturas superficiais. A utilização exaustiva do *software* permitiu a autora perceber que a influência de obstáculos nas temperaturas superficiais noturnas não era considerada no programa. Desta forma, desenvolveu um modelo de cálculo (MOD.O) que permite calcular esse efeito. Em relação às propriedades simuladas, a autora destaca a dificuldade em simular a variação da humidade relativa, uma vez que o programa não considera o período de tempo em que a fachada ainda está molhada, após ter terminado a humidificação causada pela chuva.

## 2.5. Síntese final

Neste capítulo pretendeu-se resumir os princípios teóricos associados ao desempenho dos sistemas de isolamento térmico pelo exterior. Pretendeu-se ainda sintetizar o atual conhecimento científico do comportamento higrotérmico de sistemas ETICS, e consequente degradação do aspeto devido ao desenvolvimento de microrganismos biológicos.

Os trabalhos de monitorização realizados por diversos autores permitiram identificar o teor de humidade à superfície como causa direta para o desenvolvimento de microrganismos. Ficou também demonstrado que a chuva incidente, a condensação superficial, o processo de secagem e as propriedades do sistema, estão diretamente relacionadas com o teor de humidade à superfície. No entanto, a contribuição que cada um destes fatores tem está ainda pouco explorada.

Os estudos de monitorização *in situ*, realizados por diferentes autores, permitiram validar os resultados obtidos através de simulações numéricas. O domínio da física das construções e o maior conhecimento do comportamento de fachadas revestidas com sistemas ETICS, permitiu identificar falhas e ajustar os modelos de simulações numéricas existentes, de forma a obter resultados mais próximos da realidade. Um avanço significativo nestes modelos, foi a inclusão de sub-rotinas no cálculo da temperatura superficial exterior durante o período noturno, devido ao efeito de obstáculos na proximidade dos edifícios.

A influência da localização destes estudos também deve ser tida em conta. A grande maioria dos estudos referidos foram realizados no Centro e Norte da Europa. As condições climáticas de Portugal são bastante diferentes das do resto da Europa, com temperaturas amenas (16,8°C) e humidades relativas elevadas (76%) ao longo de todo o ano. Assim sendo, o comportamento higrotérmico dos sistemas ETICS, tendo em conta as condições climáticas em Portugal, precisa de ser estudado mais em detalhe através de abordagens experimentais e simulações numéricas.

A degradação biológica dos sistemas do tipo ETICS é um problema bastante relevante, uma vez que a grande maioria dos autores refere que a solução passa exclusivamente pelo uso de biocidas. No entanto, estes produtos são nocivos para o ambiente e têm um custo relativamente elevado. Assim sendo, o estudo do comportamento higrotérmico dos sistemas ETICS é de grande importância, de forma a criar um conjunto de parâmetros que garantam a sua eficácia, durabilidade e sustentabilidade. No próximo capítulo, é apresentada a metodologia de investigação seguida nesta dissertação.

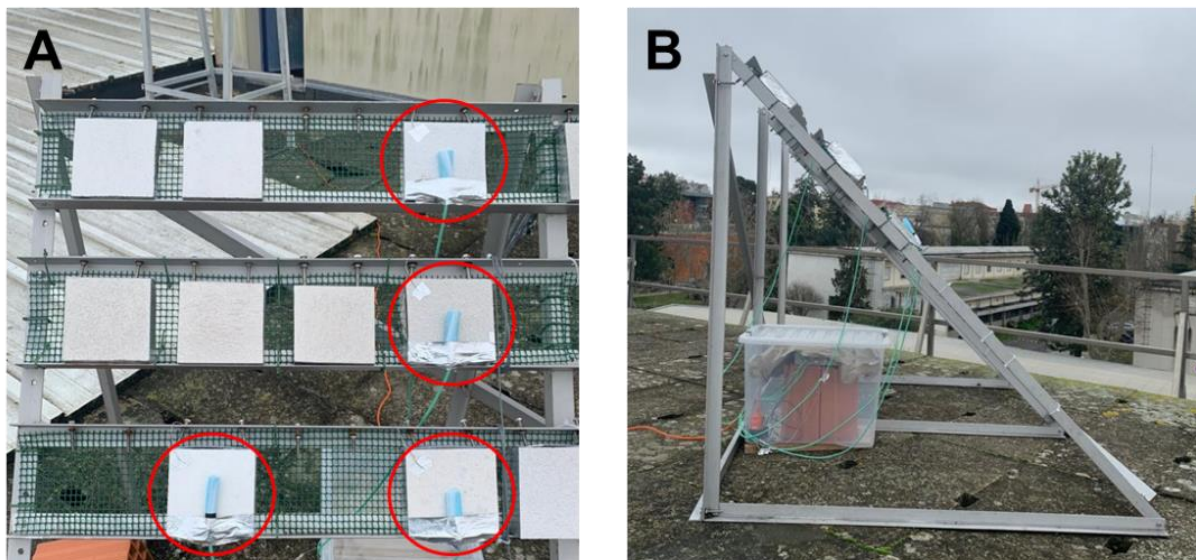
### 3. Materiais e metodologia

#### 3.1. Considerações gerais

Neste capítulo pretende-se abordar os materiais utilizados bem como o procedimento experimental realizado no âmbito da presente dissertação.

De forma a realizar uma campanha experimental, que contemplasse períodos que incluíssem várias estações do ano, foram monitorizados diferentes sistemas de ETICS utilizando equipamentos e sensores para a medição de temperatura e humidade.

Na campanha experimental foram escolhidos 4 sistemas (Figura 10A), com 15 x 15 cm de área e espessura variável, consoante o tipo de sistema (Tabela 3), possuindo diferentes composições e características (Tabela 4). As amostras foram colocadas numa estrutura metálica com uma inclinação de 45°, viradas a sul, de forma a maximizar o número de horas de exposição solar (Figura 10B). No âmbito do projeto de investigação WGB\_Shield [53], foram colocados dois conjuntos equivalentes de provetes em dois ambientes diferentes. Nomeadamente, nas estações de envelhecimento do edifício do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do LNEC, e do pavilhão de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL). As estações de envelhecimento encontram-se em condições ambientais distintas, nomeadamente, a do LNEC insere-se num ambiente urbano, próximo do Aeroporto de Lisboa e da 2ª circular, e, portanto, com uma concentração potencialmente mais elevada de poluentes. Por outro lado, a da FCT/UNL encontra-se num ambiente semi-rural e marítimo, próximo da Costa da Caparica.



**Figura 10:** **a)** Sistemas ETICS selecionados para o estudo, com os sensores colocados; **b)** Inclinação a 45° da estrutura metálica que sustenta os provetes, e respetiva caixa de proteção do logger.

## 3.2. Materiais

### 3.2.1. Sistemas ETICS

Para a realização da campanha experimental, foram escolhidos 4 sistemas representativos (S2; S4; S8 e S9) do tipo ETICS de um conjunto mais amplo de 13 sistemas, estudados no âmbito do projeto WGB\_Shield [53]. A seleção foi feita com base na composição do sistema, nomeadamente o isolante térmico, a camada de base e a camada de acabamento. Desta forma, foram escolhidos todos os elementos constitutivos dos sistemas, nomeadamente EPS, ICB e MW como isolamentos térmicos, cimento e/ou cal hidráulica natural como camadas de base e cal aérea, acrílicos ou silicatos como camadas de acabamento.

**Tabela 3:** Espessura média do sistema completo, isolante térmico, camada(s) de base e camadas(s) de acabamento para os vários sistemas de ETICS.

Sistema ETICS	Espessura média [mm]			
	Sistema completo	Isolante térmico	Camada(s) de base	Camada(s) de acabamento
S2	40,57	37,70	1,75	1,12
S4	65,85	58,83	4,87	2,15
S8	61,34	56,83	3,33	1,18
S9	43,91	38,57	1,24	4,10

Na tabela 4 encontram-se resumidas as composições e características dos 4 sistemas ETICS utilizados ao longo da campanha experimental, e também algumas informações técnicas. Nas figuras 11 e 12 é possível observar as microfotografias da camada de acabamento e da seção transversal dos ETICS estudados. A composição das várias camadas dos diferentes sistemas ETICS pode ser resumida como especificado em seguida, de acordo com a informação disponível nas respetivas fichas técnicas.

No caso do Sistema S2:

- Isolante térmico EPS 100: Placas de poliestireno expandido moldado;
- Argamassa com base em cimento, resinas sintéticas e aditivos minerais;
- Rede de fibra de vidro normal (com abertura da malha de 5 mm x 4 mm) (de acordo com o documento de homologação 918).
- Primário texturado aquoso de base acrílica;
- Revestimento aquoso, copolímero acrílico, pó de mármore e pigmentos;
- Tinta aquosa 100% acrílica.

No caso do Sistema S4:

- Isolante térmico ICB: Placas de aglomerado de cortiça expandida;
- Cal hidráulica NHL, cimento, ligante pozolânico, ligante polimérico, cargas minerais, resinas, fibras sintéticas e aditivos;
- Cal aérea, ligante hidráulico, cargas minerais, pigmentos e aditivos específicos;

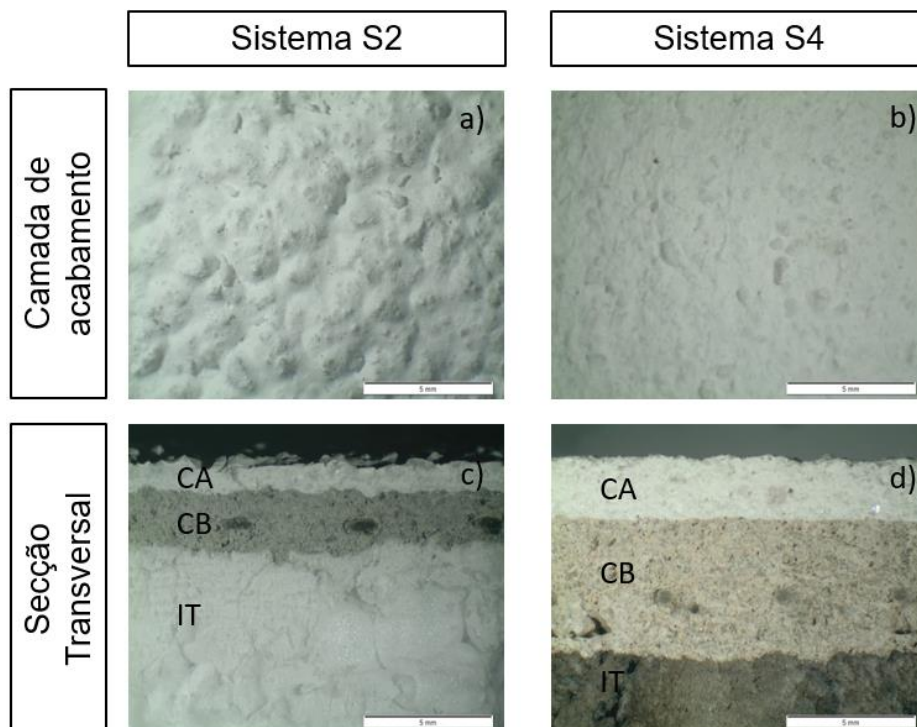


No caso do Sistema S8:

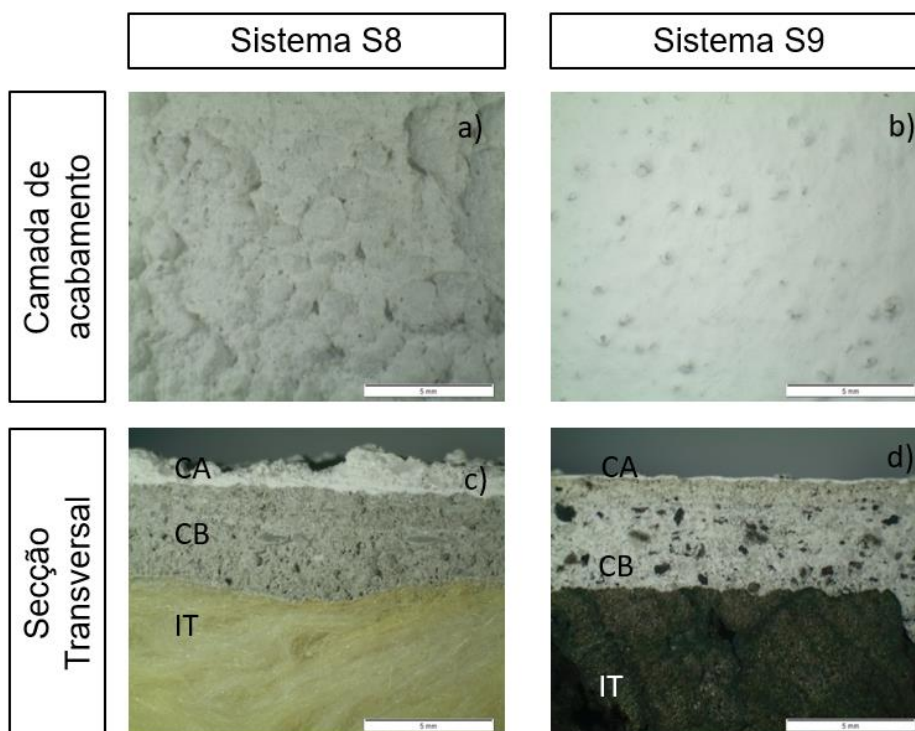
- a) Isolante térmico MW: Placas isolantes de lã de vidro;
- b) Argamassa de colagem e revestimento de placas isolantes, formulada com cimento, cargas minerais selecionadas, resinas, fibras sintéticas e aditivos especiais;
- c) Cargas minerais, dispersão aquosa de copolímero acrílico e aditivos específicos;
- d) Acabamento colorido com textura média (M) ou fina (F), com resinas acrílicas em dispersão aquosa, cargas minerais, pigmentos e aditivos

No caso do Sistema S9:

- a) Isolante térmico ICB: Painel compacto em aglomerado negro de cortiça expandida;
- b) Argamassa de colagem e regularização superficial, formulada a partir de ligantes mistos, agregados de cortiça e Cal Hidráulica Natural;
- c) Rede constituída por fios 100% Fibra de Vidro, com a certificação ISO 9001.
- d) Primário alcalino aquoso de silicato;
- e) Tinta aquosa de silicato à base de silicatos de potássio, pigmentos inorgânicos e adjuvantes selecionados.



**Figura 11:** Sistemas S2 e S4 relativos ao projeto WGB\_Shield. **a) e b)** camada de acabamento de cada sistema; **c) e d)** secção transversal (no qual se distinguem camada de acabamento – CA; camada de base – CB; isolante térmico - IT).



**Figura 12:** Sistemas S8 e S9 relativos ao projeto WGB\_Shield. **a) e b)** camada de acabamento de cada sistema; **c) e d)** secção transversal (no qual se distinguem camada de acabamento – CA; camada de base – CB; isolante térmico - IT).

**Tabela 4:** Descrição dos sistemas utilizados e respetivas características técnicas.

Sistemas	Isolante térmico	Camada de base (composição - produto)	Camada de acabamento (composição - produto)	
			Primário	Acabamento
<b>S2</b>	EPS -Poliestireno Expandido	Argamassa de cimento com inclusão de rede fibra de vidro	Primário acrílico	a) Revestimento acrílico b) Tinta acrílica
<b>S4</b>	ICB -Aglomerado de cortiça expandida	Cal hidráulica + Cimento com inclusão de rede standard ou reforçada	Cal aérea + ligante hidráulico	
<b>S8</b>	MW - Lã Mineral	Argamassa de cimento com inclusão de rede standard ou reforçada	Co-polímero acrílico + Cargas minerais	Acabamento acrílico
<b>S9</b>	ICB - Aglomerado de cortiça expandida	Argamassa de cal hidráulica natural + agregados cortiça com inclusão rede de fibra de vidro	Primário aquoso de silicato	Tinta aquosa de silicato

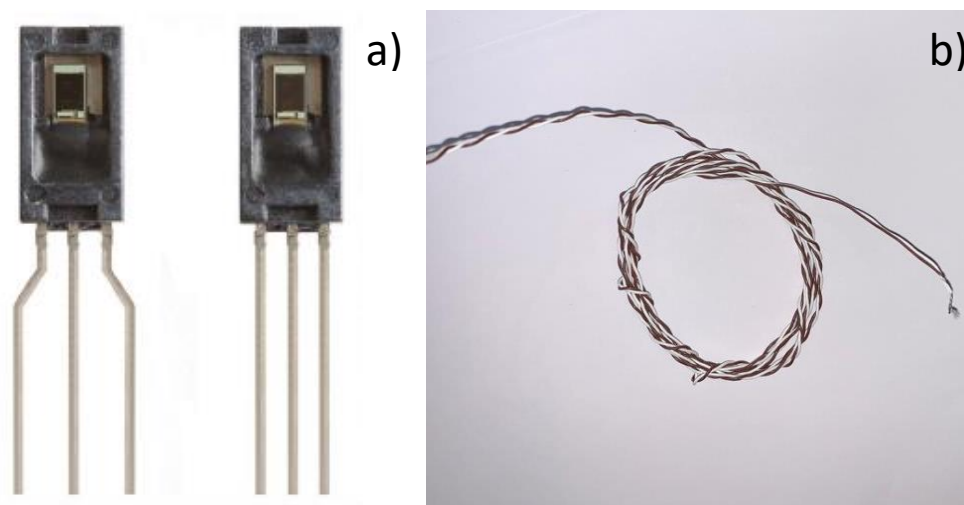
### 3.2.2. Sensores de humidade à superfície dos provetes

De forma a monitorizar o teor de humidade à superfície dos diferentes sistemas ETICS, foram utilizados sensores Honeywell da série HIH-4000 (Figura 13a). Estes sensores capacitivos de humidade relativa, são constituídos por um polímero termofixo com condicionamento de sinal integrado num microchip à base de silício. A ligação destes sensores a um dispositivo torna-se possível devido ao output de voltagem linear dado pelo sensor. Os sensores da série HIH-4000 possuem um consumo de corrente elétrica de 200  $\mu$ A, sendo assim ideais para sistemas de baixo consumo operados também por bateria [54], [55]. A construção em multicamada destes sensores, pode conferir-lhes uma resistência a agentes que causem danos, tais como poeira, água, sujidade, poluição atmosférica e produtos químicos [54].

### 3.2.3 Sensores de temperatura

Foram também utilizados sensores de temperatura, nomeadamente termopares (*Twin Twisted Pair Thermocouple Cable*, Figura 13b) de tipo T de 0,2 mm, revestido de PTFE (politetrafluoretileno). Os termopares são frequentemente utilizados em processos de medição de temperatura devido à sua simplicidade e baixo custo [56]. Estes sensores são constituídos por dois metais diferentes, neste caso de cobre e constantan (liga de cobre e níquel) que se encontram unidos numa das extremidades. É possível construir um sensor termopar com quaisquer dois metais diferentes, no entanto utilizam-se apenas algumas combinações já conhecidas, uma vez que possuem tensões de saída previsíveis e sustentam elevadas gamas de temperatura.

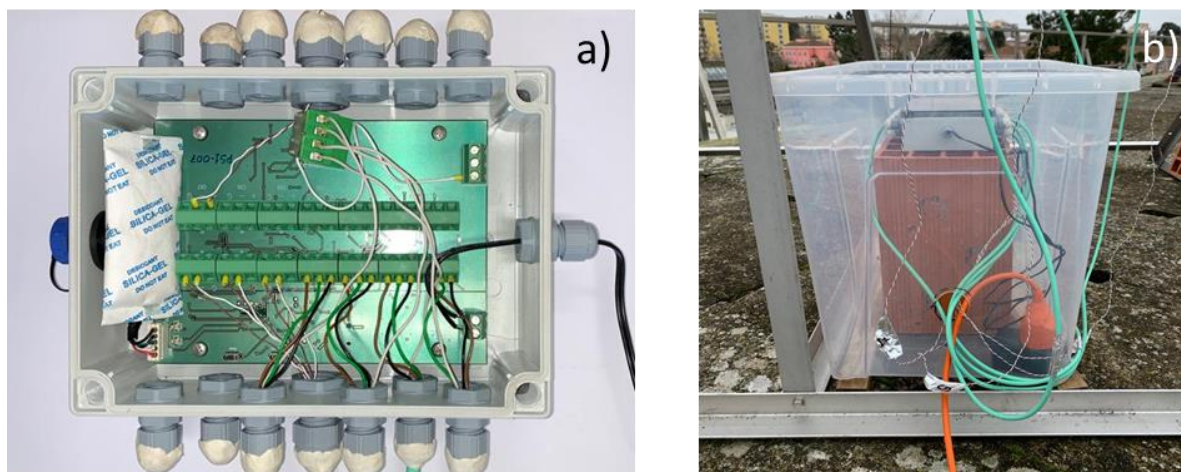
O funcionamento deste equipamento baseia-se no efeito de *seebeck* [57], que assenta no facto de que a junção de dois metais gera uma tensão elétrica. Assim que é detetada uma diferença de temperatura entre as extremidades unidas e as extremidades livres dos metais, gera-se uma diferença de potencial que é medida através de um voltímetro, e assim a temperatura pode ser estimada [56]. Estes sensores são indicados para medições na ampla gama dos -270 °C a 400 °C [58].



**Figura 13:** a) Sensores de humidade Honeywell da série HIH-4000 [55]. b) Termopares do tipo T usados para medir a temperatura nos provetes.

### 3.2.4 Logger

O dispositivo utilizado para recolher e armazenar os dados é um datalogger MZLOG04SAP da Meção - Telecomunicações e Eletrónica, Lda., Oeiras (Figura 14), que foi construído de forma experimental e num número limitado de exemplares. O datalogger permite monitorizar 14 canais analógicos em paralelo, para sensores com saída em tensão entre 0 e 8  $\mu\text{V}$ , como é o caso dos sensores de humidade e temperatura usados nesta campanha experimental. O logger foi configurado para registar uma medição num intervalo de tempo de 1 minuto, e ao fim de 10 minutos executa a média dos dez valores registados. As catorze entradas do datalogger são diferenciais em modo de tensão, permitindo a ligação de sensores com massas diferenciadas e eliminando ruído eletromagnético induzido nos cabos de ligação [59]. O MZLOG04SAP encontra-se ligado a uma fonte de tensão externa (não foi usada bateria para alimentação autónoma), tendo um consumo de corrente de cerca de 140 mA. Os valores registados por este dispositivo apresentam um erro absoluto em tensão correspondente a 2  $\mu\text{V}$ . O logger tem uma capacidade de armazenamento que possibilita a realização de 14.560 registos com data e hora [59]. A recolha dos dados registados pelo logger é feita através da conexão USB a um computador portátil, e usando um *software* dedicado (HyperTerminal – Versão 7.0).



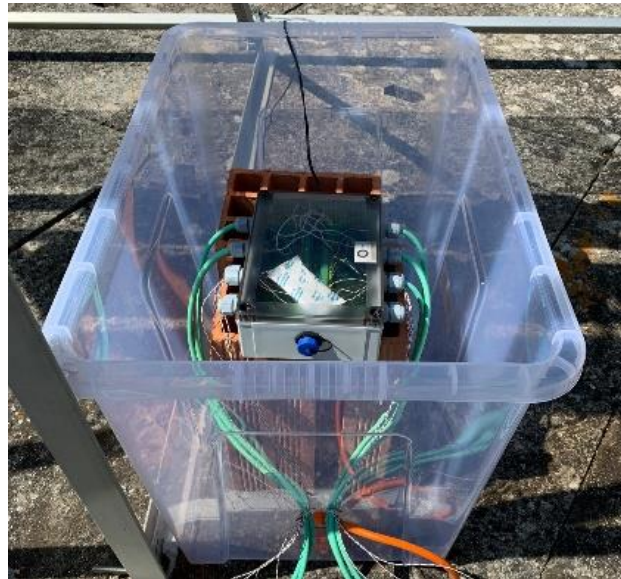
**Figura 14:** a) Datalogger MZLOG04SAP utilizado para recolher e armazenar os dados provenientes dos sensores. b) Datalogger protegido por caixa de polipropileno.

### 3.3. Parte experimental

Os sistemas ETICS escolhidos foram colocados nas estações de envelhecimento do LNEC e da FCT, numa estrutura metálica virada a Sul que possui uma inclinação de 45°, visando a maximização do número de horas de exposição (em média 12 horas diárias) das amostras à radiação solar. Em cada uma das 8 amostras (4 no LNEC e 4 na FCT/UNL) fixadas na estrutura com parafusos (Figura 20b), foram colocados dois sensores, um de humidade e outro de temperatura, ambos conectados ao logger. Estes foram colocados na superfície de cada amostra através de fita metálica adesiva. Após a conexão de todos os sensores ao logger, este foi colocado dentro de uma caixa de polietileno (com furos no fundo da caixa, para ventilar e evitar condensações nos dias de maior humidade ou durante a noite),



de forma a ficar protegido face às condições climatéricas. Adicionalmente, foi colocada uma saqueta de sílica gel dentro do próprio logger (Figura 15) para evitar a condensação de humidade no circuito ou nas cablagens.

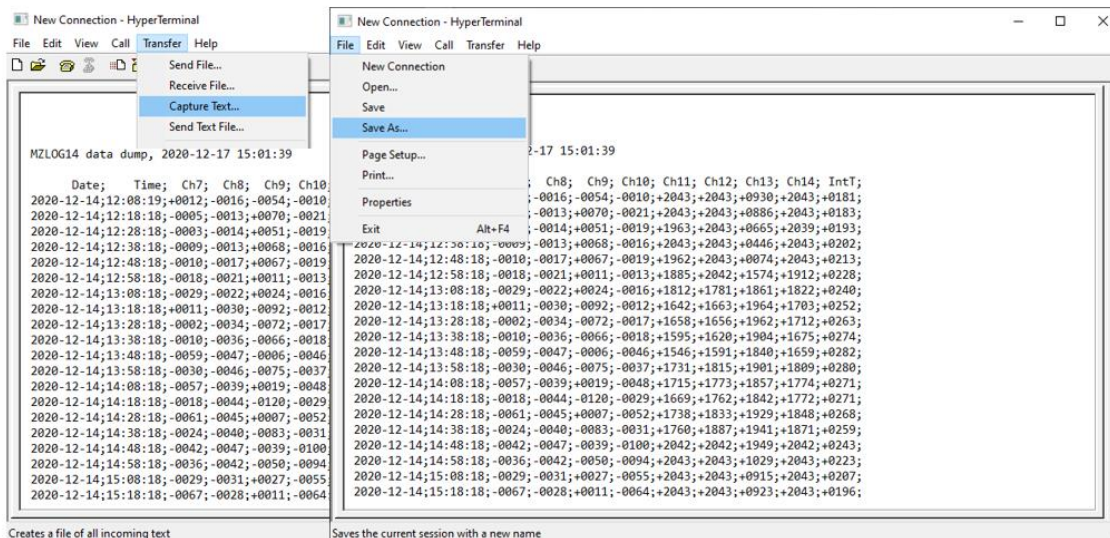


**Figura 15:** Logger na caixa de polietileno após a sua montagem.

Após a montagem, inicia-se a recolha de dados através do programa HyperTerminal – versão 7.0. Após a conexão ao computador portátil, o menu do *software* fica disponível (Figura 16a) e a recolha de dados inicia-se ativando o datalogger, após a configuração dos intervalos de medição pretendidos (Figura 16b). Antes de iniciar a transferência de dados para o computador, por questões de segurança e bom funcionamento, interrompia-se a recolha de dados, desligando o datalogger. Os dados recolhidos (Figura 17) ficam dispostos na janela principal do programa, mostrando a respetiva voltagem medida em cada sensor, a data e hora a que foi registada a medição e a temperatura interna do logger. Para transferir os dados do HyperTerminal para o computador portátil, basta capturar o texto disposto na janela principal e gravar na memória do computador (Figura 17).

<pre>f: Menu m: Measure p: Config l: Start log s: Stop log d: Dump data c: Clear data t: Timestamp z: Set clock b: Show first 23 RTC ram bytes x: Show memory status u: Undelete full memory q: Quit w: set TCAL</pre>	a)	<pre>l: Logging will start Measure interval: 00h01m00s Log interval: 00h10m00s  ENGN Technologies MZLOG 14 V1R2 build 1_03, 03/09/2020 Battery voltage: 38,78V Log is ON  m: ACH1; ACH2; ACH3; ACH4; ACH5; ACH6; ACH7; Temp; +0960;+1028;+0995;-0070;-0054;-0067;-0056;+0370;  ACH8; ACH9;ACH10;ACH11;ACH12;ACH13;ACH14; Vbat; +0002;+0002;+0002;+0002;+1130;+0002;+0002;+1658;</pre>	b)
--	----	---	----

**Figura 16:** a) Menu inicial com os diferentes comandos de controlo do software HyperTerminal. b) Ativação do datalogger de acordo com o intervalo de tempo definido



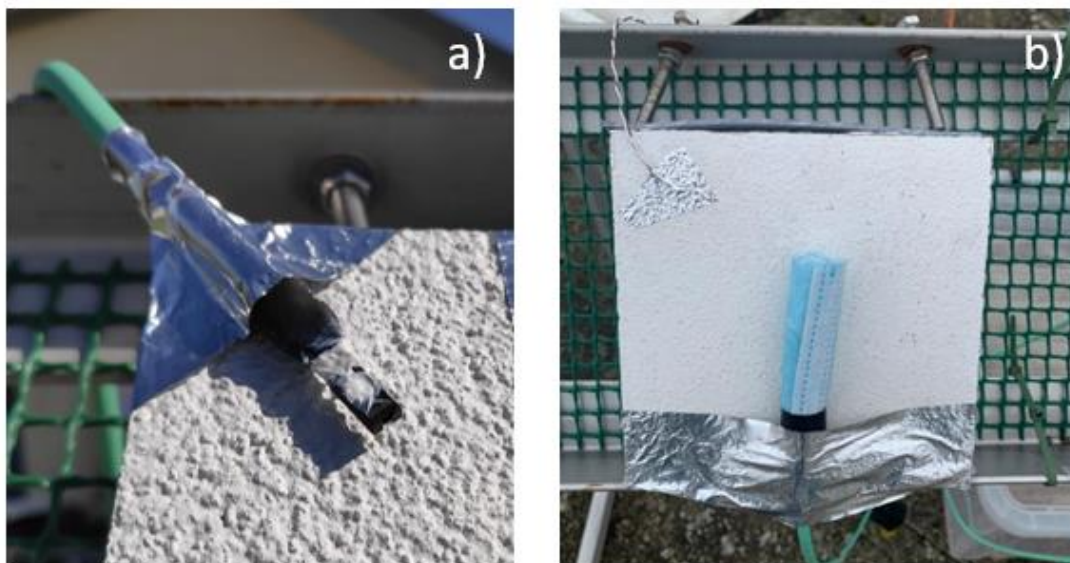
**Figura 17:** Janela principal do HyperTerminal e comandos para capturar e descarregar os dados medidos pelos sensores.

Uma vez que o dispositivo tem capacidade para armazenar mais de 14 mil dados, o equivalente a mais de 3 meses de dados recolhidos sem interrupção, não foi necessário proceder à recolha diária de dados. No entanto, recolheram-se dados pelo menos duas vezes por semana, de forma a ser possível detetar algum erro nos sensores ou simplesmente verificar o desempenho dos mesmos. De notar que, após alguns testes iniciais e conforme indicado na ficha técnica, se verificou que os sensores de humidade utilizados eram altamente sensíveis à luz solar. Quando expostos a raios solares diretos ou refletidos, os sensores registavam valores próximos do zero (em mV) e não significativos. Destes valores resultavam, após conversão, valores negativos de humidade relativa (em percentagem). Adicionalmente, os sensores começaram a apresentar alguma oxidação superficial (Figura 18), devido à condensação noturna e possivelmente à exposição direta ao sol, alterando a sua calibração.

Assim sendo, optou-se por substituir os sensores oxidados e usar um tecido de polietileno, que impedia a passagem da água, mas permitia a permeabilidade ao vapor, para proteger os sensores (Figura 19a). Além disso, na parte traseira do sensor e na cablagem metálica não protegida foi usado um silicone termorresistente.



**Figura 18:** Sensor de humidade, utilizado no projeto WGB\_Shield, que apresentava oxidação superficial após uma semana de utilização contínua.



**Figura 19:** a) Fotografia de um dos sensores protegido na parte traseira e na cabeçagem metálica com silicone. b) Fotografia de uma das amostras onde é possível observar o sensor de humidade protegido com tecido de polietileno e o sensor de temperatura no canto superior esquerdo da amostra, bem como o suporte da amostra pela estrutura metálica e por dois parafusos.

### 3.4. Modelação

#### 3.4.1. Tratamento de dados

Os dados recolhidos pelo logger são importados em formatos *.txt* através do HyperTerminal, e seguidamente tratados no programa Excel. Uma vez que estes dados são medidos em microvolts, é necessário convertê-los para temperatura (°C) e para humidade relativa (%).

Para a conversão da temperatura, conforme as indicações do fabricante dos sensores, aplica-se a seguinte formula [60], [61]:

$$T = \frac{p_1 \cdot (V - V_0) + p_2 \cdot (V - V_0)^2 + p_3 \cdot (V - V_0)^3 + p_4 \cdot (V - V_0)^4}{1 + q_1 \cdot (V - V_0) + q_2 \cdot (V - V_0)^2 + q_3 \cdot (V - V_0)^3} + T_0 + T_{int}. \quad (3.1)$$

Onde:

$T$	[°C]	Temperatura à superfície do provete
$V$	[mV]	Voltagem medida no sensor de temperatura
$T_{int}$	[°C]	Temperatura interna do logger
$p_1; p_2; p_3; p_4$	[-]	Coefficientes de ajuste de volt para temperatura
$V_0$	[mV]	Coefficiente da voltagem inicial
$T_0$	[°C]	Coefficiente de temperatura inicial
$q_1; q_2; q_3$	[-]	Coefficientes de ajuste de volt para temperatura

No caso da humidade relativa, a fórmula aplicada é a seguinte [55]:

$$HR = \frac{V - offset}{slope} \quad (3.2)$$

Onde:

$HR$	[%]	Humidade relativa à superfície do provete a 25°C
$V$	[V]	Voltagem medida no sensor de humidade
$offset$	[V]	Parâmetro de cálculo
$slope$	[V/%HR]	Parâmetro de cálculo

Os valores de  $offset$  (deslocamento) e  $slope$  (declive) (Tabela 5) estão relacionados com o erro associado aos sensores de humidade. Os sensores podem apresentar erros de  $\pm 5\%$  para valores de humidade relativa entre 0% e 60% ou de  $\pm 8\%$  para gamas de valores de humidade relativa superiores a 60% [55], [62]. É ainda necessário remover o erro de temperatura, uma vez que os valores nominais de  $offset$  e  $slope$  referem-se a 25 °C. Para corrigir este erro aplica-se a seguinte fórmula [55]:

$$HR_{final} = \frac{HR}{1,0546 - 0,00216 \cdot T} \quad (3.3)$$

Onde:

$HR_{final}$	[%]	Humidade relativa à superfície do provete
$T$	[°C]	Temperatura à superfície do provete

**Tabela 5:** Valores de  $offset$  e  $slope$ , a uma temperatura de 25°C, de acordo com o erro associado.

Erro	-8%	-5%	0%	5%	8%
Offset	0,7360	0,7600	0,8000	0,8400	0,8640
Slope	0,0285	0,0295	0,0310	0,0326	0,0335

De forma a estimar o número de horas de ocorrência de condensações superficiais, é necessário calcular a temperatura de ponto de orvalho. Para tal, foi usada a fórmula de Magnus que tem por base a temperatura do ar e a humidade relativa para calcular a temperatura de ponto de orvalho [63], [64].

$$\Upsilon(T, RH) = \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{b \cdot T}{c + T} \quad (3.4)$$

$$T_{po} = \frac{c \cdot \Upsilon(T, RH)}{b - \Upsilon(T, RH)} \quad (3.5)$$

Onde:

$HR$	[%]	Humidade relativa à superfície do provete
$T$	[°C]	Temperatura à superfície do provete
$b$ (18,68); $c$ (257,14)	[-]	Coeficiente de cálculo
$T_{po}$	[°C]	Temperatura de ponto de orvalho



### 3.4.2. WUFI

Entre os 4 programas que o WUFI disponibiliza, foi escolhido o WUFI PRO, que se foca na análise de elementos com várias camadas, como é o caso do ETICS. Este *software* permite determinar o desempenho higrotérmico do sistema compósito de isolamento sob condições climáticas externas e internas especificadas reais [48], [65].

Este modelo higrotérmico unidimensional realiza os cálculos tendo em conta as descobertas mais recentes sobre difusão de vapor e transporte de humidade nos materiais de construção [49]. Para a realização do estudo em questão, foi solicitada uma licença de estudante para utilização durante um ano.

Para realizar as simulações no WUFI PRO, o programa necessita de alguns dados de entrada no que diz respeito ao elemento construtivo, às condições de cálculo e ao clima a que irá estar sujeito. Relativamente às características do elemento construtivo, é necessário indicar quais as camadas e respetivas espessuras (Figura 20).

Sempre que se define uma camada que não se encontre na base de dados do programa, é necessário especificar algumas propriedades, nomeadamente: densidade aparente [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]; porosidade [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]; calor específico [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]; condutibilidade térmica [ $\text{W}/\text{mK}$ ]; fator de resistência à difusão de vapor de água [-]; valor típico da humidade de construção [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]. No âmbito deste trabalho, não foram introduzidas novas camadas no programa, mas foram alteradas algumas propriedades dos materiais escolhidos da base de dados, de forma a reproduzir exatamente os materiais estudados.

Nas imagens 21 e 22 estão representadas as diferentes camadas dos quatro provetes inseridas no *software*. As propriedades dos diferentes materiais de cada camada encontram-se descritas no Anexo A1 a A4.

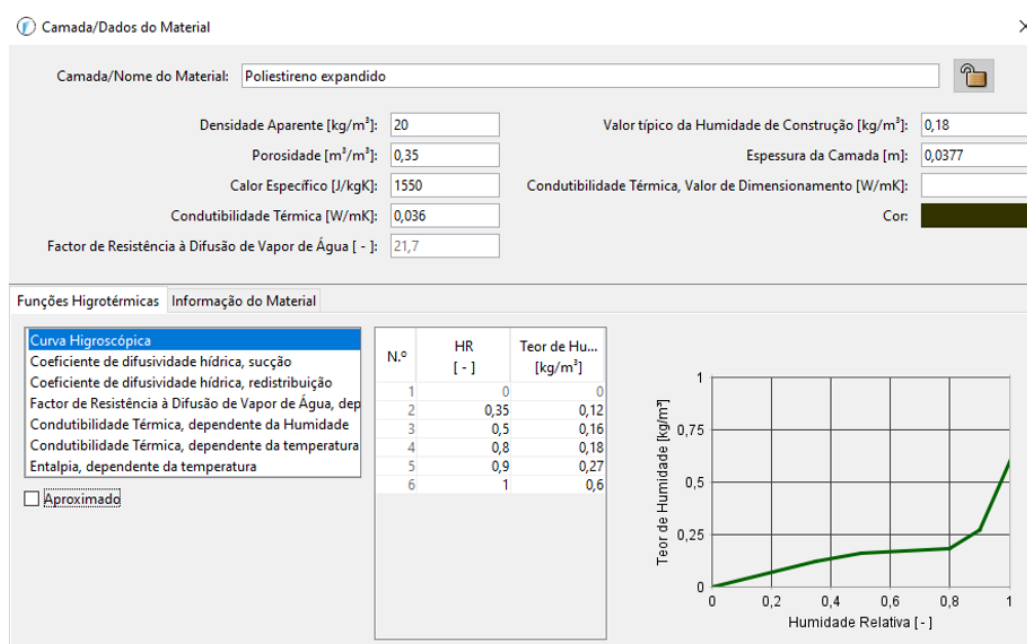
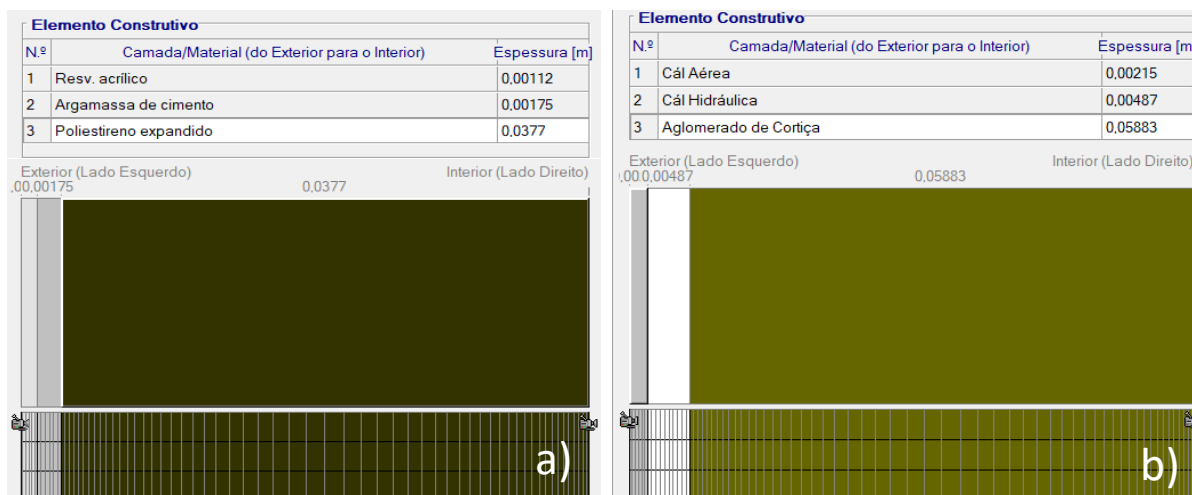
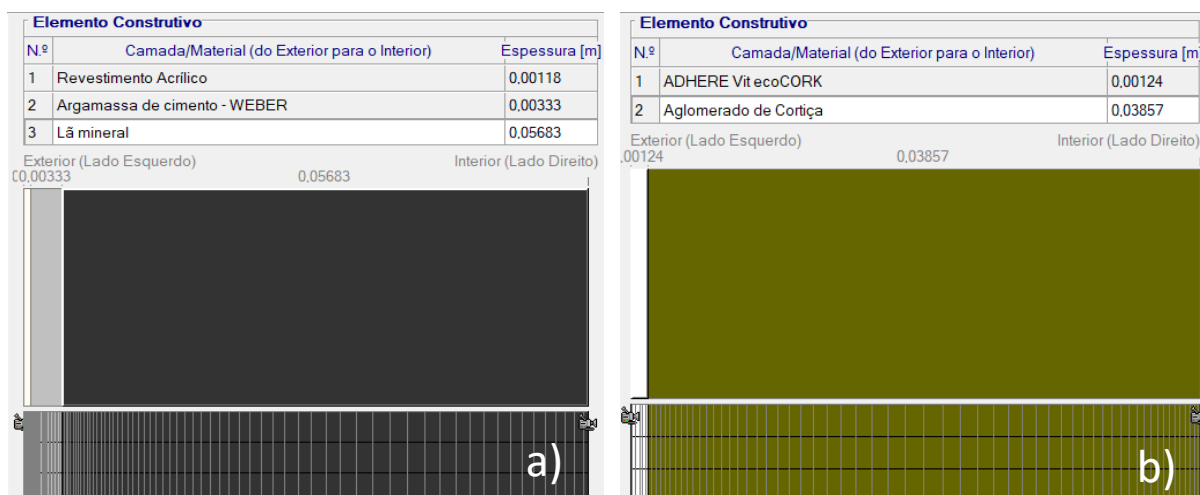


Figura 20: Dados de entrada: propriedades dos materiais.



**Figura 21:** a) Representação esquemática no WUFI das camadas do provete S2; b) Representação esquemática no WUFI das camadas do provete S4.



**Figura 22:** a) Representação esquemática no WUFI das camadas do provete S8; b) Representação esquemática no WUFI das camadas do provete S9.

Uma vez que não existe qualquer tipo de revestimento à base de tinta de silicatos na base de dados do WUFI PRO 6.5 (camada de revestimento do provete S9), o *software* sugere que, por ser uma camada de revestimento, se defina separadamente do elemento construtivo. As camadas de revestimento podem não afetar o comportamento térmico do sistema, mas podem alterar a difusão de vapor de água, como poderia ser o caso da tinta de silicatos [53].

Deste modo, esta camada, cuja espessura ( $\approx 4$  mm) tem implicações mínimas no desempenho térmico do sistema, é adicionada quando se define os coeficientes de transferência à superfície (Figura 23) e tem em conta, o valor de difusão do vapor de água (valor de  $s_d$ ). Este valor descreve a resistência, em termos de espessura (em metros), que uma camada de ar estagnada precisaria para ter a mesma resistência à difusão de vapor de água.

Superfície Exterior (Lado Esquerdo)

Valor de sd [m]  Tinta de Silicatos

Absorção (Radiação de Onda Curta) [-]

Emissividade (Radiação Onda Longa) [-]

Definido pelo utilizador

Sem revestimento

Feltro betuminosos com alumínio

Feltro betuminosos com PVC

Papel Kraft com gesso cartonado

Película de metal

Reboco de acrilico (sem condução de água)

Reboco mineral (sem condução de água)

Revestimento exterior de alumínio (incl. dobras)

Telhas

Tinta acrilica para betão

Tinta acrilica para fachada

Tinta de Silicatos

Tinta Látex 1 Valor de sd = 0.01 m

Tinta Látex 2

Reflectividade do solo (Onda Curta) [-]  Valor padrão

**Figura 23:** Seleção do revestimento exterior do provete S9.

É também necessário especificar a orientação, inclinação e a altura do elemento construtivo (Figura 24). Estes 2 últimos parâmetros são utilizados para obter os coeficientes que permitem calcular a chuva incidente, através da Equação (3.6) [66]:

$$C_i = P \cdot (R_1 + R_2 \cdot V_v) \quad (3.6)$$

Onde:

$C_i$	[kg/(m <sup>2</sup> · s)]	Chuva incidente na superfície
$P$	[kg/(m <sup>2</sup> · s)]	Precipitação
$R_1$	[-]	Coefficientes de chuva incidente 1
$R_2$	[s/m]	Coefficientes de chuva incidente 2
$V_v$	[m/s]	Velocidade do vento perpendicular à superfície

Como já referido anteriormente, a orientação dos provetes está a Sul e a inclinação é de 45°. Em relação à altura do edifício, o WUFI PRO apenas pede para a especificar se a inclinação for igual a 90°, uma vez que se torna bastante complexo definir os coeficientes de chuva incidente se esta tiver um valor diferente. Relativamente a este último ponto, o programa assume  $R_1 = 0$  e  $R_2 = 1$ , ou seja, que a chuva incidente é comparável à chuva moderada, o que equivale a uma intensidade entre 2 e 10 mm/h [67].

The image shows a software interface for configuring a building element. It is divided into three main sections:

- Orientação (Orientation):** A compass rose showing cardinal directions (N, S, E, W). A yellow arrow points towards the South (S). Below the compass is a dropdown menu with 'Sul' selected.
- Inclinação (Inclination):** A diagram showing a brown rectangular element tilted at an angle. Below it is a text input field labeled 'Inclinação [°]' with the value '45' entered.
- Altura do Edifício/Coefficientes de Chuva Incidente (Building Height/Incident Rain Coefficients):**
  - A checkbox labeled 'Chuva incidente calculada segundo a Norma ASHRAE 160' is unchecked.
  - Input fields for 'R1 [-]' (value: 1) and 'R2 [s/m]' (value: 0).
  - A note below: 'Nota: Intensidade da Chuva = Precipitação \* (R1 + R2 \* Velocidade)'

**Figura 24:** Dados de entrada: configuração do elemento construtivo.

Seguidamente, é fundamental indicar os coeficientes de transferência à superfície exterior e à superfície interior (Figura 25). Para o exterior, os coeficientes são: resistência térmica, que depende do vento; espessura de difusão de vapor (valor de Sd); absorção; emissividade; refletividade do solo e fator de redução da chuva incidente (Anexo A.5)

No que diz respeito à resistência térmica, esta pode levar em consideração a dependência do vento, como referido acima. Quando se ativa esta opção, o campo de edição para um coeficiente de resistência térmica constante fica desativado (Figura 25). Ao invés, é possível definir os coeficientes apropriados para a dependência do vento (Figura 26), onde o modelo de cálculo simplificado assume uma dependência linear da velocidade do vento. Para a simulação em questão foram assumidos os valores padrão do WUFI PRO 6.5.

O valor de Sd, como já referido anteriormente, apenas é considerado no provete S9. Este valor pode ser considerado nos coeficientes de transferência à superfície (como é o caso do provete S9), ou então considerado quando se define a camada de revestimento do elemento construtivo (Figuras 21a, 21b e 22a). Quanto aos valores de absorção e emissividade, foram considerados os valores padrão para uma superfície clara (Figura 25). Foi também assumido o valor padrão para a refletividade do solo, e para o fator de redução da chuva incidente foi considerada a dependência da inclinação do elemento construtivo (Figura 25).

Por fim, define-se as condições de humidade e temperatura iniciais para o início da simulação (Figura 27). Uma vez que estes valores devem ser o mais aproximado da realidade, de forma a não influenciar os resultados, assumiu-se um valor de 60% de humidade relativa e uma temperatura de 20°C para todas as simulações.

Orientação/Inclinação/Altura | **Coefficiente de Transferência à Superfície** | Condições Iniciais

**Superfície Exterior (Lado Esquerdo)**

Resistência Térmica [(m² K)/W] ----- Parede exterior

Inclui Parte da Radiação de Onda Longa [W/(m² K)] -----

dependente do vento  ...

---

Valor de sd [m] ----- Sem revestimento

Nota: Esta definição não afecta a absorção de chuva

---

Absorção (Radiação de Onda Curta) [-] 0.2 Claro

Emissividade (Radiação Onda Longa) [-] 0.9

Balanco Radiativo Explícito  ... Nota: Esta opção considera o arrefecimento radiativo devido à emissão de onda longa. Casos específicos podem precisar de dados de radiação de onda longa mais precisos, no ficheiro climático.

---

Reflectividade do solo (Onda Curta) [-] 0.2 Valor padrão

---

Factor de redução da chuva incidente [-] 1.0 Dependente da inclinação do elemento construt

**Figura 25:** Dados de entrada: coeficientes de transferência à superfície exterior e interior.

Resistência à Transferência de Calor dependente da Velocidade do Vento

1 [(m² K)/W]

$$\alpha_{conv} + \alpha_{rad} + \frac{f_{Barlavento}}{f_{Sotavento}} * V_{wind}$$

$\alpha_{conv}$  [W/(m² K)] 4.5 +  $\alpha_{rad}$  [W/(m² K)] 6.5 +  $f_{Barlavento}$  1.6 \*  $f_{Sotavento}$  0.33 \*  $V_{wind}$  [m/s]

Nota:  
Os resultados dependem do formato do ficheiro climático  
 $V_{wind}$ =Velocidade do Vento

OK Cancelar Ajuda

**Figura 26:** Coeficientes de dependência do vento.

Orientação/Inclinação/Altura | Coeficiente de Transferência à Superfície | **Condições Iniciais**

Humidade inicial no elemento construtivo

Constante através do elemento construtivo

Em cada Camada

Ler do Ficheiro

Temperatura inicial

Constante através do elemento construtivo

Ler do Ficheiro

Humidade Relativa inicial [-] 0,6 Temperatura inicial [°C] 20

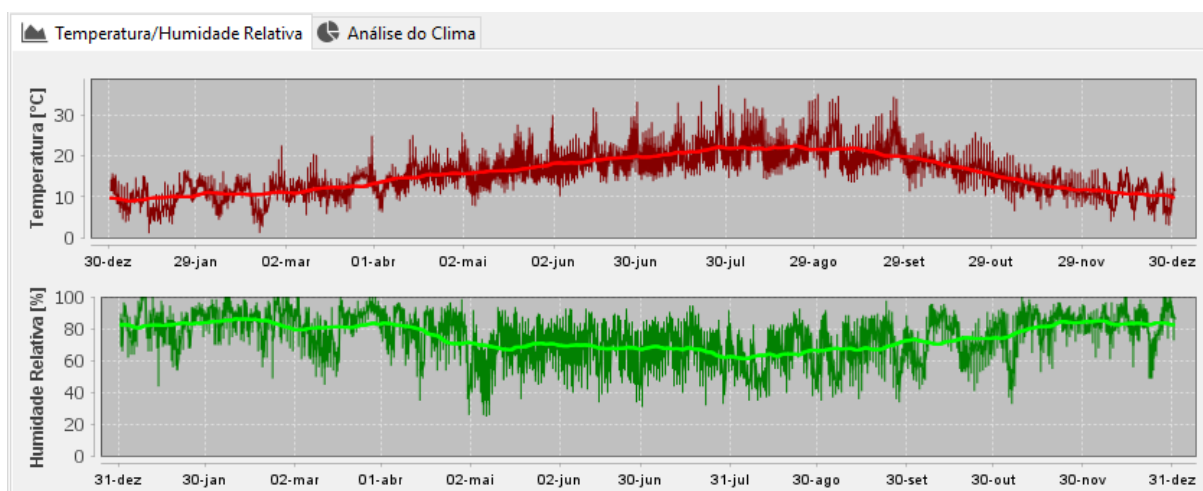
Teor de Humidade Inicial nas diferentes Camadas

N.º	Material Camada	Espessura [m]	Humidade Teor [kg/m³]
1	Resv. acrílico	0.00112	68.21
2	Argamassa de cimento	0.00175	49.95
3	Poliestireno expandido	0.0377	0.17

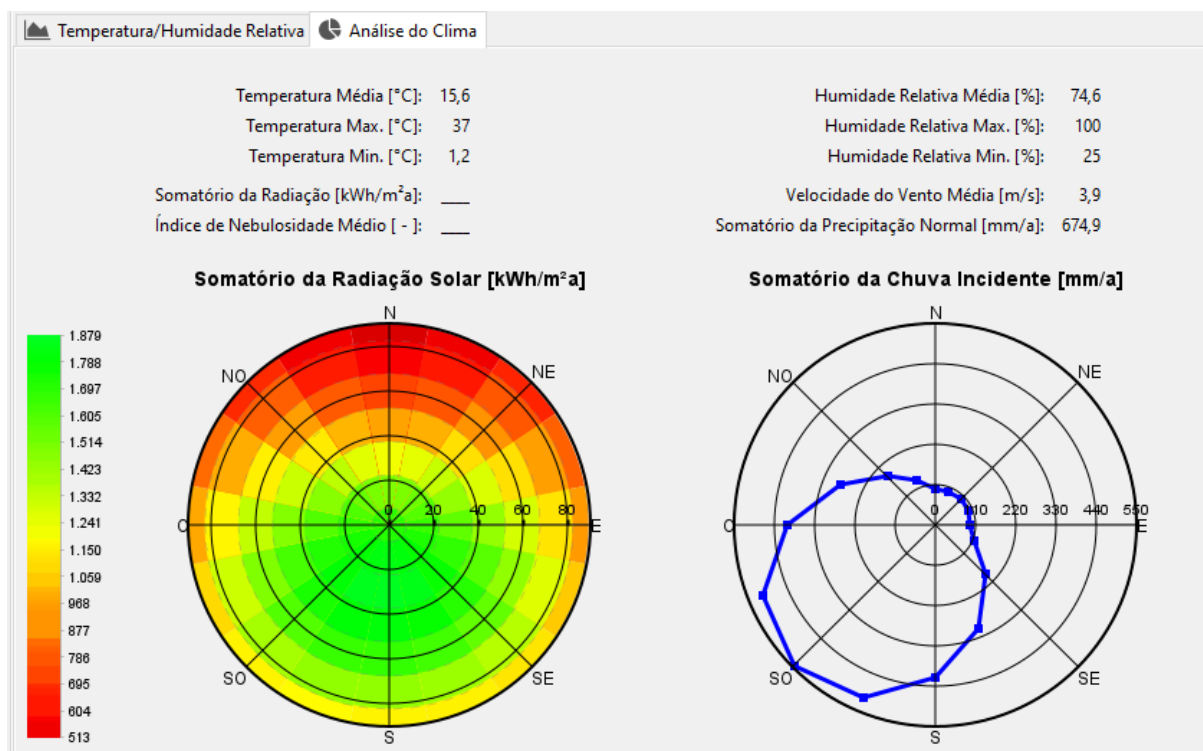
**Figura 27:** Dados de entrada: Condições iniciais.

No que diz respeito às condições de cálculo, é possível definir o período da simulação, bem como o modo de cálculo e ativar/desativar diversas opções que permitem melhorar, na ótica do utilizador, os seus cálculos.

As simulações foram feitas estabelecendo intervalos de hora em hora, uma vez que considerando ciclos de ocorrência inferiores à hora, iguais aos que foram registados durante a campanha experimental (10 em 10 minutos), origina algumas imprecisões nos resultados [3]. Finalmente, define-se o clima exterior e interior a que o elemento construtivo estará sujeito (Figuras 28 e 29). Este pode ser escolhido a partir da base de dados do WUFI PRO, que inclui uma estação meteorológica situada em Lisboa, sobre a qual a FEUP é responsável pela sua manutenção e tratamento de dados.



**Figura 28:** Dados de entrada: Condições climáticas – temperatura e humidade relativa.



**Figura 29:** Dados de entrada: Condições climáticas – análise do clima.

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Considerações Gerais

O desempenho higrotérmico dos sistemas ETICS foi avaliado numa campanha experimental durante o período de Outono/Inverno de 2020, como descrito nos capítulos anteriores, monitorizando a temperatura e humidade relativa na superfície de cada provete.

Devido a problemas logísticos e técnicos, não foi possível realizar a monitorização durante todo o mês de janeiro. No mês de fevereiro, devido a problemas tecnológicos do logger, também não foi possível proceder a recolha de dados.

Por forma a comparar os resultados, o IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera) disponibilizou os dados meteorológicos registados pela estação meteorológica situada na Avenida Gago Coutinho, em Lisboa. Os dados de temperatura e humidade relativa do mês de setembro, referente a Caparica, foram disponibilizados por uma estudante com acesso aos dados duma estação meteorológica situada na cobertura da FCT/UNL [68]. Os valores higrotérmicos dos restantes meses foram retirados do website do IPMA [69] e AccuWeather [70].

Para o período monitorizado foram selecionados três dias representativos de cada mês para a análise e discussão de dados. Esta escolha teve por base uma análise complexa dos dados recolhidos, devido em parte a falha de registo de dados, em certos períodos de tempo, por parte do logger. Noutras situações, devido à sensibilidade dos sensores, estes registavam valores que traduziam humidades relativas negativas. Optou-se, portanto, por escolher dias em que os dados eram aceitáveis em ambas as estações de envelhecimento natural, de forma a poder fazer uma comparação.

Neste capítulo é também apresentada uma comparação dos resultados da campanha experimental com os resultados das simulações numéricas feitas com base no *software* WUFI PRO 6.5. A simulação foi realizada nas quatro tipologias de provetes estudados, considerando a temperatura e humidade relativa.

Para a simulação do desempenho dos provetes, considerou-se as propriedades dos materiais que constituem as diferentes camadas dos diferentes provetes, como descrito no capítulo 3 (Anexos A.1 a A.4). No presente capítulo apresentam-se e discutem-se os principais resultados obtidos durante a campanha experimental e após as simulações.

Além da apresentação dos resultados finais, identifica-se um conjunto de limitações que o WUFI PRO apresenta.

## 4.2. Tratamento de dados experimentais

### 4.2.1. Análise higrotérmica de provetes da mesma cobertura

#### 4.2.1.1. Provetes na estação de envelhecimento natural LNEC

Fazendo primeiramente uma análise ao conjunto de provetes na estação de envelhecimento do LNEC, verificou-se que a temperatura média ao longo do período de monitorização não varia significativamente entre os provetes. Durante toda a campanha experimental, a variação máxima registada entre os sistemas foi de 0,10°C.

Apesar da variação ser relativamente baixa, destacam-se algumas conclusões. O provete S8 (acabamento acrílico) registou temperaturas médias mais elevadas no mês de setembro (Tabela 6). Nesse mês os provetes S2, S4 e S9 registaram em média menos 0,06°C, 0,09°C e 0,10°C, do que o provete S8, respetivamente. Nos restantes meses da campanha experimental, foi o provete S2 (acabamento acrílico) que registou temperaturas médias mais elevadas (Tabela 6). Em média, os provetes S4, S8 e S9 registaram menos 0,08°C, 0,01°C e 0,05°C que o provete S2, respetivamente. Os provetes S4 (acabamento a base de cal) e S9 (silicato) são, portanto, os sistemas que apresentam as temperaturas médias mais baixas.

**Tabela 6:** Temperatura média (°C) registada ao longo da campanha experimental nos provetes da estação de envelhecimento do LNEC

Estação LNEC				
	Provete S2	Provete S4	Provete S8	Provete S9
Setembro	27,86	27,83	27,92	27,82
Outubro	21,34	21,29	21,33	21,30
Novembro	21,68	21,60	21,65	21,64
Dezembro	17,08	16,97	17,08	17,02

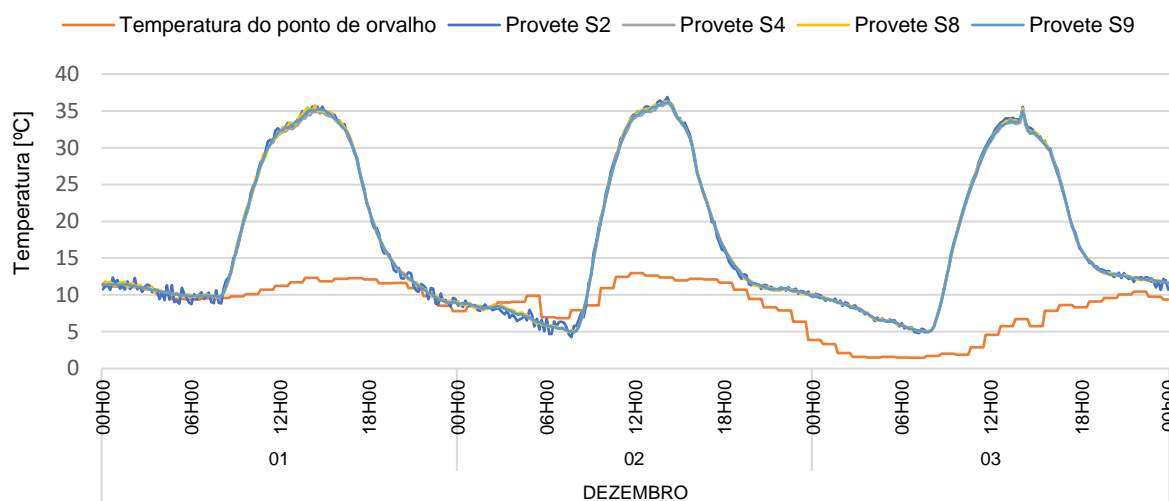
**Legenda:** A cinzento escuro: temperaturas mais elevadas; a cinzento claro: as temperaturas mais baixas.

Na Figura 30 apresenta-se a variação das temperaturas médias superficiais dos quatro provetes da estação de envelhecimento do LNEC, ao longo de três dias representativos do mês de dezembro de 2020. Além disso está ainda representada a temperatura de ponto de orvalho,  $T_{po}$ , que permite definir os períodos de condensações quando comparada com as temperaturas superficiais. É de salientar que houve fenómenos de condensação em todos os provetes, durante as horas noturnas, nomeadamente entre as 00h e as 8h00 da manhã.

O número de horas que a temperatura de ponto de orvalho superou a temperatura superficial registada nos provetes está representada na Tabela 7. Verificou-se que o provete S2 (acabamento acrílico, base cimentícia e isolante EPS) apresentava um maior número de horas de condensação superficial em dezembro (cerca de 3,67 horas), em comparação com os restantes provetes. Verificou-se também que



os provetes S4, S8 e S9 apresentam valores médios parecidos (cerca de 3,15 horas), sendo que a variação máxima entre estes três provetes foi de 0,25 horas (15 minutos).



**Figura 30:** Temperaturas superficiais e de ponto de orvalho dos provetes da estação de envelhecimento do LNEC em três dias do mês de dezembro 2020.

**Tabela 7:** Número de horas em que a temperatura superficial mensal foi superada pela temperatura de ponto de orvalho em cada provete da estação de envelhecimento do LNEC.

	Estação LNEC			
	Provete S2	Provete S4	Provete S8	Provete S9
Setembro	0,00	0,00	0,00	0,00
Outubro	2,17	3,00	1,67	2,50
Novembro	2,33	2,17	2,50	2,50
Dezembro	11,50	7,67	7,83	8,00
Média	4,00	3,21	3,00	3,25

**Legenda:** A cinzento destaca-se o mês de dezembro com um maior número de horas de condensação.

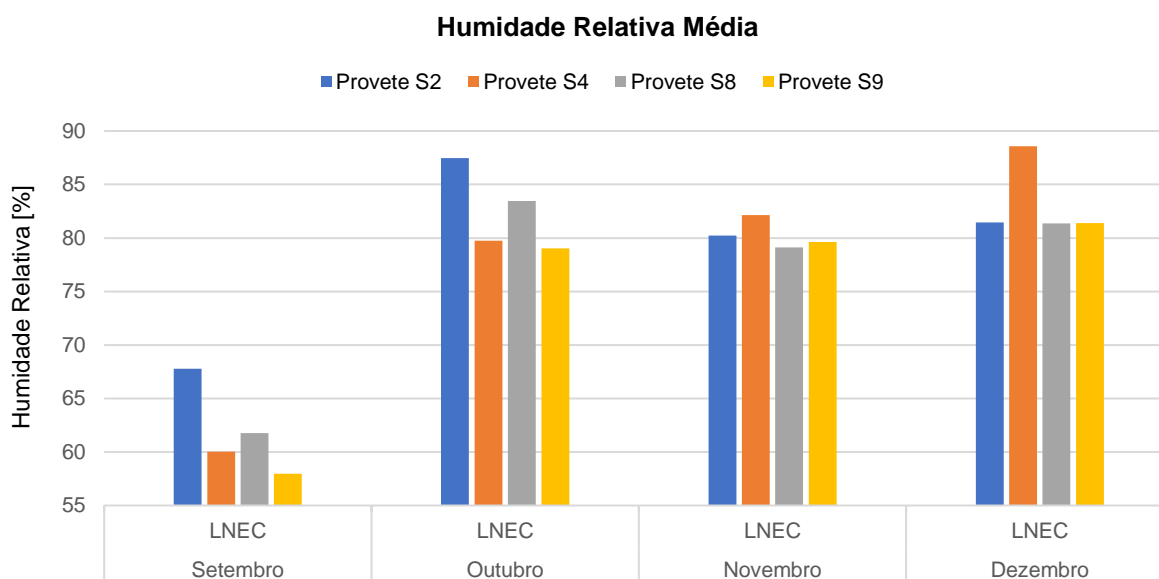
No que diz respeito à humidade relativa média (Figura 31), o sistema S2 foi aquele que registou valores mais elevados no mês de setembro e outubro. Em comparação com os restantes provetes da mesma estação de envelhecimento, nestes dois meses, o sistema S2 apresentou mais 7,29% de humidade relativa média. Mais detalhadamente, no mês de setembro, os provetes S4, S8 e S9 registaram em média menos 7,75%, 6,02% e 9,82%, do que o provete S2, respetivamente. No mês de outubro, os provetes S4, S8 e S9 registaram em média menos 7,73%, 4,00% e 8,44%, do que o provete S2, respetivamente.

Nos meses de novembro e dezembro, o provete que registou valores de humidade relativa média mais elevados foi o sistema S4 (acabamento a base de cal, Figura 31), apresentando em média mais 4,82% de humidade relativa que os restantes provetes. No mês de novembro, os provetes S2, S8 e S9 registaram em média menos 1,92%, 3,04% e 2,53%, do que o provete S4, respetivamente. No mês de

dezembro, a diferença entre o provete S4 e os restantes foi mais acentuada. Os provetes S2, S8 e S9 registaram em média menos 7,11%, 7,19% e 7,16%, do que o provete S4, respetivamente.

Por outro lado, nos meses de setembro e outubro, o provete que registou os valores mais baixos de humidade relativa média foi o S9 (acabamento a base de silicato) (Figura 31). Comparando com os restantes provetes, o S9 registou em média menos 4,89% de humidade relativa. Nomeadamente, no mês de setembro, os provetes S2, S4 e S8 registaram em média mais 9,82%, 2,07% e 3,81%, do que o provete S9, respetivamente. No mês de outubro os provetes S2, S4 e S8 registaram em média mais 8,44%, 0,72% e 4,45%, do que o provete S9, respetivamente.

Nos restantes meses da campanha experimental (novembro e dezembro), foi o provete S8 (acabamento acrílico) que apresentou valores mais baixos (em média menos 2% de humidade relativa, Figura 31). Uma vez mais, fazendo uma análise detalhada, verificou-se que no mês de novembro os provetes S2, S4 e S9 registaram em média mais 1,12%, 3,04% e 0,51%, do que o provete S8, respetivamente. No mês de outubro o S2, S4 e S9 registaram em média mais 0,09%, 7,19% e 0,03%, do que o provete S8, respetivamente.



**Figura 31:** Humidade relativa média registadas nos provetes monitorizados na estação de envelhecimento do LNEC durante a campanha experimental.

#### 4.2.1.2. Estação de envelhecimento natural na FCT

Analisando o conjunto de provetes na estação de envelhecimento da FCT/UNL, verificou-se que a temperatura média ao longo do período de monitorização, tal como se verificou na estação de envelhecimento da FCT, não varia significativamente entre os provetes. A variação máxima registada entre todos os sistemas foi de 0,11°C.

Tal como aconteceu na estação de envelhecimento do LNEC, o provete S8 também registou os valores mais elevados para a temperatura média no mês de setembro (Tabela 8). Em média, os provetes S2, S4 e S9 registaram menos 0,02°C, 0,09°C e 0,11°C, do que o provete S8, respetivamente. Nos meses

de outubro, novembro e dezembro, o provete S2 registou temperaturas médias mais elevadas (Tabela 8). Os provetes S4, S8 e S9 registaram em média menos 0,11°C, 0,01°C e 0,07°C, do que o provete S8, respetivamente. Como observado também nos provetes na estação de envelhecimento do LNEC, os provetes com acabamentos acrílicos (S2 e S8) apresentam valores de temperaturas médias ligeiramente maiores aos sistemas a base de cal (S4) ou silicato (S9).

**Tabela 8:** Temperatura média (°C) registada ao longo da campanha experimental nos provetes da estação de envelhecimento da FCT/UNL.

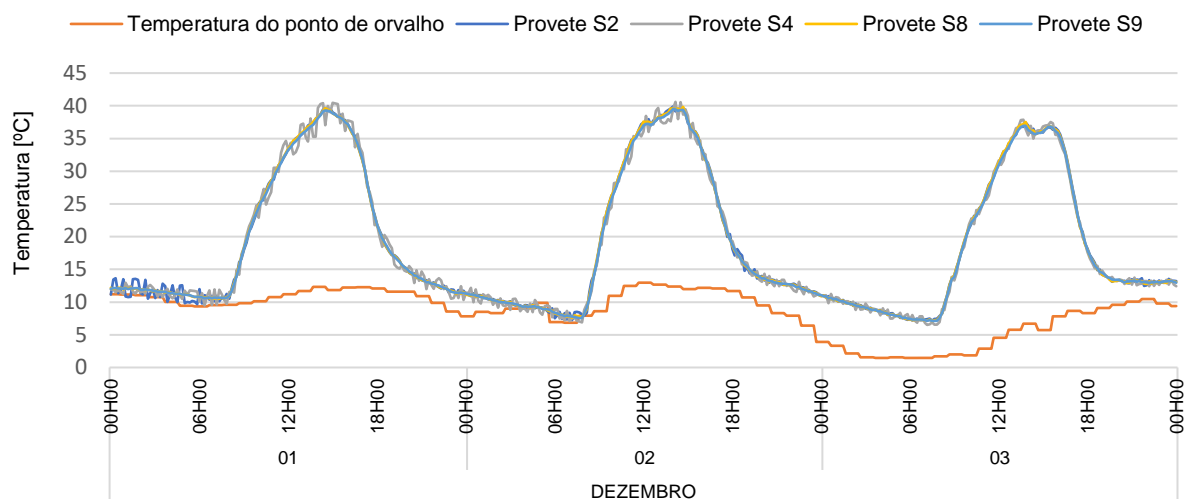
ESTAÇÃO FCT/UNL				
	Provete S2	Provete S4	Provete S8	Provete S9
Setembro	28,18	28,12	28,20	28,10
Outubro	23,00	22,89	23,00	22,94
Novembro	22,09	21,98	22,08	22,03
Dezembro	19,06	18,95	19,04	18,97

**Legenda:** A cinzento escuro: temperaturas mais elevadas; a cinzento claro: as temperaturas mais baixas.

Na Figura 32 apresenta-se a variação das temperaturas médias superficiais dos quatro provetes da estação de envelhecimento do LNEC, ao longo de três dias representativos do mês de dezembro de 2020, bem como a temperatura de ponto de orvalho,  $T_{po}$ . Tal como aconteceu com os provetes da estação de envelhecimento do LNEC, os provetes da FCT/UNL também registaram fenómenos de condensação durante as horas noturnas, nomeadamente entre as 00h e as 8h00 da manhã.

Na Tabela 9 apresenta-se o número de horas que a temperatura de ponto de orvalho superou a temperatura superficial. À semelhança do que aconteceu na estação de envelhecimento do LNEC, o provete S2 (acabamento acrílico) também apresentou um maior número de horas de condensação superficial em dezembro, em comparação com os restantes provetes (em média 0,95 horas). Além do provete S2, destaca-se o provete S4 (acabamento a base de cal) com 0,71 horas em que a temperatura superficial registada foi superada pela temperatura de ponto de orvalho.

De realçar que o número de horas de ocorrência de condensação na FCT/UNL podem não ser tão realista como os do LNEC, uma vez que a temperatura de ponto de orvalho foi calculada com base nas temperaturas do ar registadas pela estação meteorológica situada na Av. Gago Coutinho, em Lisboa. Como referido no capítulo 3, a temperatura de ponto de orvalho é calculada com base na temperatura e humidade relativa do ar. De forma a ter um valor de temperatura de ponto de orvalho a cada 10 minutos próximo da realidade (mesmo intervalo de tempo que os sensores registam uma medida de temperatura), é necessário ter valores de temperatura e humidade relativa também a cada 10 minutos. Desta forma, a única estação meteorológica a que se teve acesso com registo de valores com a periodicidade pretendida foi a estação meteorológica na Avenida Gago Coutinho. Assim sendo, a estação meteorológica por estar mais próxima do LNEC do que da FCT/UNL faz com que os valores de temperatura de ponto de orvalho não sejam tão precisos, resultando num menor número de horas de condensação.



**Figura 32:** Temperaturas superficiais e de ponto de orvalho dos provetes da estação de envelhecimento da FCT/UNL em três dias do mês de dezembro 2020.

**Tabela 9:** Número de horas que a temperatura superficial foi superada pela temperatura de ponto de orvalho em cada provete da estação de envelhecimento da FCT/UNL

Estação FCT/UNL				
	Provete S2	Provete S4	Provete S8	Provete S9
Setembro	0,00	0,00	0,00	0,00
Outubro	1,17	0,67	0,00	0,00
Novembro	0,00	0,17	0,00	0,00
Dezembro	2,50	2,00	1,33	1,33
Média	0,92	0,71	0,33	0,33

**Legenda:** A cinzento destaca-se o mês de dezembro com um maior número de horas de condensação.

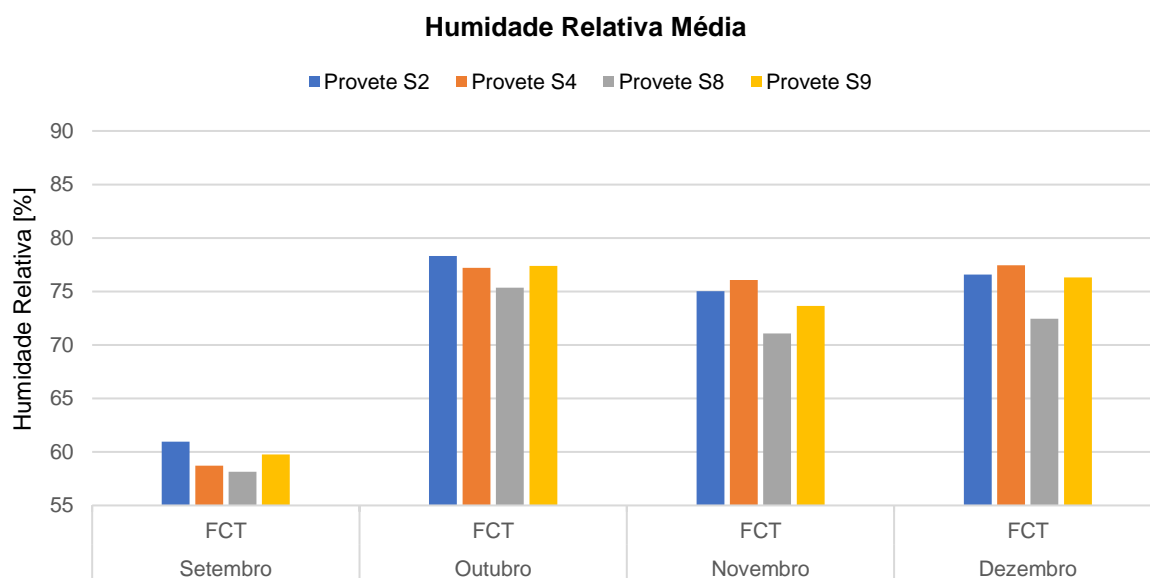
Analisando a humidade relativa média (Figura 33), à semelhança do que foi registado na estação de envelhecimento do LNEC, o sistema S2 foi aquele que também registou valores mais elevados (em média 1,16%) no mês de setembro e outubro. Comparando os valores dos restantes provetes, o sistema S2 registou, no mês de setembro, mais 2,24%, 2,79% e 1,18 que os provetes S4, S8 e S9, respetivamente. No que diz respeito ao mês de outubro, os provetes S4, S8 e S9 registaram em média menos 1,10%, 2,95% e 0,92%, do que o provete S2, respetivamente.

Tal como aconteceu no LNEC, o provete que registou valores de humidade relativa média mais elevados nos meses de novembro e dezembro (meses de maior frio) foi o sistema S4 (Figura 33), registando em média mais 2,29% de humidade relativa. Avaliando apenas o mês de novembro verificou-se que os provetes S2, S8 e S9 registaram em média menos 1,06%, 5,01% e 2,43%, do que o provete S4, respetivamente.

No mês de dezembro, a diferença entre o provete S4 e os restantes foi relativamente semelhante, tendo os provetes S2, S8 e S9 registado em média menos 0,88%, 5,02% e 1,15%, do que o provete S4, respetivamente.

Por outro lado, o provete que registou os valores médios mais baixos, durante toda a campanha experimental, foi o S8 (Figura 33). Em relação aos restantes provetes, o sistema S8 registou em média menos 3,03% de humidade relativa. Analisando de forma independente os provetes, verificou-se que os provetes S2, S4 e S9 registaram em média menos 3,46%, 3,11% e 2,52% de humidade relativa.

De salientar que o sistema S8 é consideravelmente rugoso (1,0 mm) [53], nomeadamente 50% a mais que os provetes S4 e S9 e 20% a mais que o provete S2. A maior rugosidade do provete S8 pode contribuir para “quebrar” a tensão superficial da água [71] e assim favorecer a evaporação.



**Figura 33:** Humidade relativa média registadas nos provetes monitorizados na estação de envelhecimento da FCT/UNL durante a campanha experimental.

#### 4.2.1.3. Discussão dos resultados

Das diferenças de temperaturas registadas ao longo da campanha experimental, destaca-se a pequena variação entre os provetes S2 e S8. Esta baixa variação pode estar associada à composição dos sistemas, que são ambos constituídos pela mesma camada de base (argamassa de cimento) e pela mesma camada de acabamento (acrílico), diferenciando apenas na camada de isolante térmico (EPS no caso do S2 e MW no S8). Assim sendo, podia ser expectável que apresentassem valores de temperatura superficial similares ou com pouca variação, tal como aconteceu.

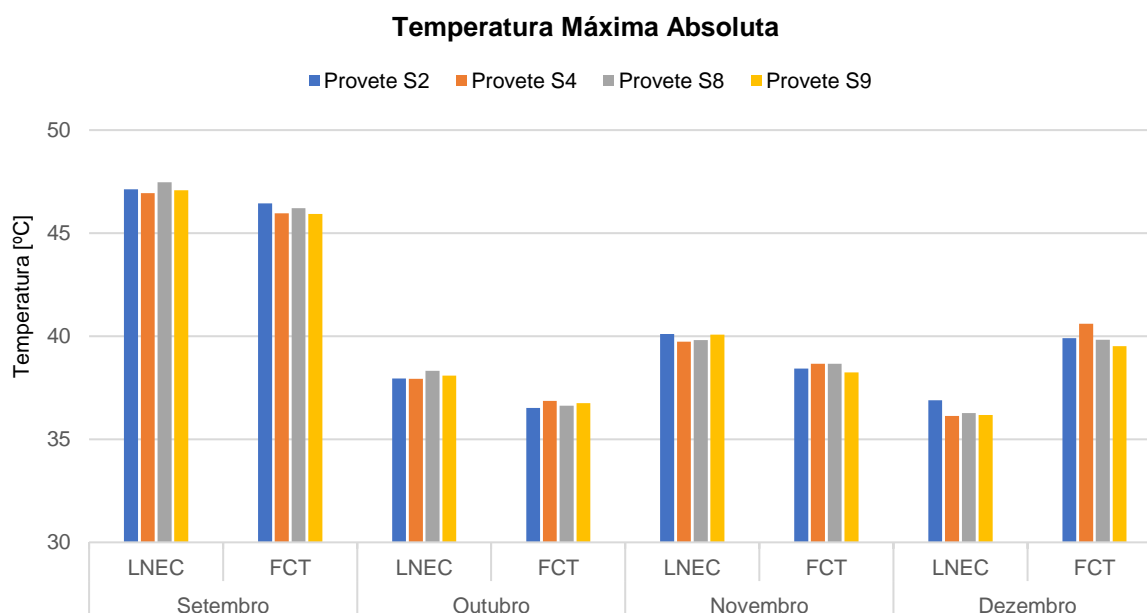
Por outro lado, verificou-se uma maior diferença entre os provetes S8 e S4/S9 no mês de setembro, e entre os provetes S2 e S4/S9 nos restantes meses da campanha experimental. Estas diferenças foram registadas nos provetes com camada de base cimentícia e de acabamento com tinta acrílica (S2 e S8),

que acabam por ter menos refletância térmica quando comparadas com soluções com camadas de base de cal hidráulica e camada de acabamento a base de cal (S4) e silicato (S9) [72].

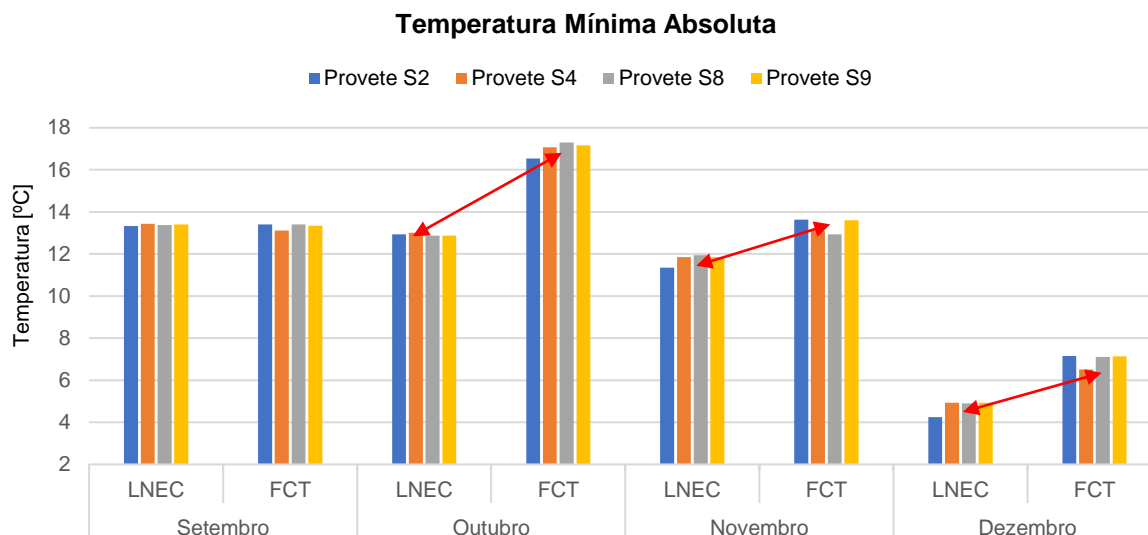
Destaca-se também os valores mais elevados (em ambas as estações de envelhecimento) da temperatura superficial registada no provete S8. À exceção do mês de setembro, o provete S8 registou sempre os valores mais elevados. Uma das razões pode estar associada ao facto de a condutibilidade térmica dos materiais que constituem o sistema ser elevada.

No âmbito do projeto WGB\_Shield, foram realizados ensaios laboratoriais para determinar a condutibilidade térmica do isolante (Tabela 4) de cada um dos sistemas ETICS, e verificou-se que o S8 apresentava o valor mais elevado (0,0564 W/m/K), entre os quatro sistemas, após dois meses de envelhecimento natural [73]. Além disso, verificou-se que a absorção de humidade nos isolantes aumentava sensivelmente o valor de condutibilidade térmica, afetando o desempenho do sistema [53].

Quando se avalia as temperaturas máximas absolutas (Figura 34), os valores mais altos foram registados nos provetes S2 (47,13 °C) e S8 (47,47 °C) durante o mês de setembro, confirmando assim a tendência destes provetes para registar temperaturas mais elevadas. Simultaneamente, os provetes S2 e S8 registaram também os valores mais baixos (durante o mês de dezembro) para a temperatura mínima absoluta (Figura 35), com valores de 4,25°C e de 4,90°C, respetivamente. Desta forma, verifica-se que os sistemas S2 e S8 registam valores de temperatura mais elevados em períodos de maior calor, e temperaturas mais baixas nos períodos de menor calor, indicando uma maior tendência de condensações superficiais.



**Figura 34:** Temperatura máxima dos provetes monitorizados durante a campanha experimental.



**Figura 35:** Temperatura mínima dos provetes monitorizados durante a campanha experimental (setas destacam a diferença entre os valores mínimos de temperatura registados no LNEC e na FCT/UNL).

Nas tabelas 7 e 9 é possível verificar que o provete S2 (isolante térmico EPS, camada de base cimentícia; camada de acabamento acrílica) é aquele que apresenta um maior número de horas de condensação superficial em ambas as estações de envelhecimento natural. Kristin Lengsfeld e Martin Krus referiram que a aplicação de tintas em sistemas ETICS, obtidas através da adição de aditivos inorgânicos específicos (ex. pigmentos) podia reduzir significativamente o risco de ocorrência de condensações, uma vez que a temperatura superficial aumentava [37]. De facto, o S2 é composto por uma tinta acrílica como acabamento, e a sua temperatura superficial, como referido anteriormente, foi uma das maiores registadas, juntamente com o S8 (também com acabamento acrílico). No entanto, a redução de ocorrência de condensações não se verificou no sistema S2 (Figura 36). Este fenómeno pode estar associado ao isolante térmico (S2 composto por EPS), ao contrário do sistema S8, composto por MW, que é notoriamente mais higroscópica.



**Figura 36:** Registo fotográfico da condensação superficial visível no provete S2 da estação de envelhecimento da FCT/UNL.

De acordo com os ensaios de condutibilidade térmica realizados, no âmbito do projeto WGB\_Shield, verificou-se que o isolante térmico do S2 apresentou uma condutibilidade térmica (0,0372 W/m/K) inferior ao isolante térmico do S8 (0,0403 W/m/K) [53]. Esta diferença poderá permitir uma maior transmissão de calor do isolante térmico para a camada de acabamento no sistema S8, aumentando ligeiramente a temperatura superficial e reduzindo os períodos de condensação.

Künzel & Sedlbauer [31] e investigadores do IBP [37] referiram que as condensações superficiais ocorriam em todas as superfícies exteriores, no entanto eram mais evidentes em sistemas com uma camada exterior de espessura reduzida. O provete S2 é o sistema que tem a menor espessura (Tabela 3) entre os quatro provetes estudados, o que pode justificar um maior número de horas de condensação, aliado com o facto de a condutibilidade térmica do acabamento acrílico (camada de acabamento do provete S2) ser inferior aos restantes acabamentos (cal aérea e tinta de silicatos).

Outra razão para o elevado número de horas de condensação superficial no provete S2 pode estar relacionado com o desempenho à água. No âmbito do projeto WGB\_Shield foi estudada a análise do desempenho à água de ETICS [73], e concluiu-se que o sistema S2 foi o que registou os menores valores de absorção capilar (0,242 kg/m<sup>2</sup>) durante 24 horas de ensaio. Por outro lado, os provetes S4 e S8 foram os que registaram valores mais elevados (1,339 kg/m<sup>2</sup> e 1,465 kg/m<sup>2</sup> respetivamente). De notar que, apesar dos valores registados, todas as soluções satisfazem o requisito do ETAG 004, que implica uma absorção capilar após 1h de ensaio inferior a 1kg/m<sup>2</sup> [29], [73]. Estes valores podem assim confirmar que poderá ter ocorrido uma absorção parcial de água por parte dos provetes S4 e S8, justificando os baixos valores de horas de ocorrência de condensação superficial.

Como referido, o sistema S2 foi aquele que registou valores mais elevados de humidade relativa nos meses de setembro e outubro, quer na estação de envelhecimento do LNEC quer na da FCT/UNL. Investigadores do IBP [31] referiram que as condensações superficiais ocorriam sobretudo quando a temperatura de ponto de orvalho era superior à temperatura da superfície exterior. Das tabelas 7 e 9, verifica-se que o provete S2 é o sistema que apresenta um maior número de horas de condensação em ambas as estações de envelhecimento. Como já referido, é também o sistema que obtém um melhor desempenho à água [73] e, assim sendo, o provete que absorve menos água condensada (em comparação aos restantes), que por sua vez acumula-se à superfície, fazendo com que a humidade relativa deste sistema seja mais elevada.

Analisando as Figuras 31 e 33, é possível verificar que os valores de humidade relativa registados em setembro são significativamente mais baixos (cerca de 20%) que os valores registados nos restantes meses da campanha experimental. Através dos dados fornecidos pelo IPMA, é possível verificar que o mês de setembro 2020, na região de Lisboa e Setúbal, foram consideradas de seca fraca [74]. Esta consideração teve por base o índice PDSI (*Palmer Drought Severity Index*), que permite identificar períodos de ocorrência de seca e classificá-los segundo as diferentes intensidades (normal, fraca, moderada, severa e extrema) [75]. Assim sendo, era de esperar que se registassem poucas horas de ocorrência de condensação superficial (Tabela 7). O mês de outubro foi considerado de classe normal de acordo com o índice PDSI [76].



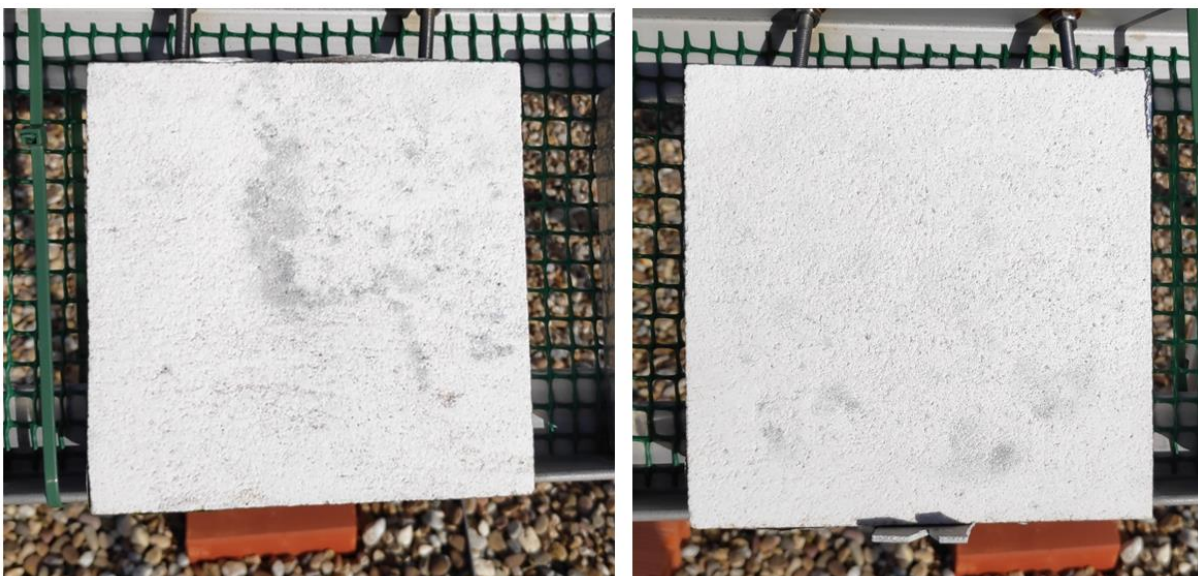
Por outro lado, nos meses de novembro e dezembro, o provete que registou valores de humidade relativa média mais elevados foi o sistema S4, em ambas as estações de envelhecimento. A camada de acabamento deste sistema é a base de cal, um material higroscópico com alguma capacidade de retenção de água. O ensaio de absorção de água, feito no âmbito do projeto WGB\_Shield, mostrou que o sistema S4 registava valores elevados ( $1,339 \text{ kg/m}^2$ ) em relação aos restantes provetes [73].

Krus *et. al.*, num estudo sobre condensações em superfícies externas de edifícios, concluíram que a acumulação de água proporciona o crescimento biológico [46]. Quando os sistemas não têm capacidade de secar ou absorver e, seguidamente, dissipar rapidamente a humidade superficial, o risco de desenvolvimento de microrganismos aumenta consideravelmente.

A cada semana, durante 4 semanas consecutivas, efetuaram-se ensaios de envelhecimento natural, no âmbito do projeto WGB\_Shield. Estes confirmaram que o provete S4 apresentou maior biocolonização (Figura 37) [53], consequência da maior presença de humidade relativa. O desenvolvimento biológico de cada provete foi quantificado utilizando uma escala definida de 0 a 4, tendo o provete S4 sido classificado com aproximadamente 3 (crescimento moderado; superfície contaminada entre 30-60%) [53].

Os provetes com aglomerado de cortiça expandida como isolante térmico apresentaram o crescimento de bolor mais intenso de todos os isolantes térmico, pois a cortiça é um material orgânico natural. Os materiais de base orgânica são mais vulneráveis à deterioração fúngica, uma vez que fornecem múltiplos nutrientes, através da sua composição, contribuindo para o desenvolvimento destes microrganismos [53].

De salientar que o acabamento do sistema S4 não contém aditivos biocidas, que se encontram, no entanto, nos acabamentos acrílicos dos sistemas S2 e S8.



**Figura 37:** Registo fotográfico da colonização biológica registada no provete S4 após 4 semanas de envelhecimento natural.

Nos dados do IPMA, constatou-se que os meses de novembro e dezembro foram considerados de chuva fraca na região de Lisboa e Setúbal [77], [78]. A precipitação total registada nos respetivos meses foi de 80,6 mm e 95,9 mm para a região de Lisboa, e de 55,9 mm e 76,6 mm para a região de Setúbal. Nestes meses também foram registadas temperaturas médias mais baixas (Tabelas 6 e 8), que juntamente com os elevados valores de precipitação, aumentam a probabilidade de ocorrência de condensação superficial e presença de humidade relativa (Tabela 7 e 9).

O provete que registou os valores mais baixos de humidade relativa média foi o S8. De acordo com a análise do desempenho à água em ETICS, feita no âmbito do projeto WGB\_Shield, o provete S8 foi aquele que registou o valor mais elevado de absorção de água (1,465 kg/m<sup>2</sup>) [73]. Como já referido, o provete S8 registou as temperaturas máximas absolutas mais elevadas, que juntamente com a elevada capacidade de absorção de água pode diminuir a humidade relativa à superfície.

Estes valores são validados pelo número de horas que os provetes apresentam humidade relativa superior a 100% (Tabela 10). O provete S4 é aquele que, uma vez mais, apresenta uma maior percentagem de tempo com humidade relativa superior a 100%, confirmando assim que a presença de água neste provete é mais constante, favorecendo potencialmente o crescimento de microrganismos. Este último aspeto foi confirmado na análise dos provetes após exposição natural prolongada [79].

Por outro lado, o provete S8 apresenta um menor número de horas de humidade relativa, apresentando uma capacidade de absorção, bem como uma taxa de secagem superior aos restantes provetes. Obtém-se assim um equilíbrio entre a absorção de água e a capacidade de secagem, mostrando um adequado comportamento higrotérmico do sistema [73], quando comparado aos outros sistemas.

**Tabela 10:** Número de horas em que a HR média superou os 100% nos provetes da estação de envelhecimento do LNEC e na estação de envelhecimento da FCT/UNL.

		Humidade Relativa Média superior a 100% (horas)			
		Provete S2	Provete S4	Provete S8	Provete S9
Setembro	LNEC	0,67	0,00	0,00	0,00
	FCT/UNL	0,00	0,00	0,00	0,00
Outubro	LNEC	11,17	3,83	6,00	4,33
	FCT/UNL	3,83	5,83	0,00	1,17
Novembro	LNEC	15,50	16,83	15,33	14,50
	FCT/UNL	8,83	9,50	3,67	6,33
Dezembro	LNEC	22,17	28,50	24,50	25,50
	FCT/UNL	15,30	15,33	0,83	12,17

**Legenda:** A cinzento: provete com maior HR no respetivo mês.

## 4.2.2. Análise de provetes em coberturas diferentes - influência da localização

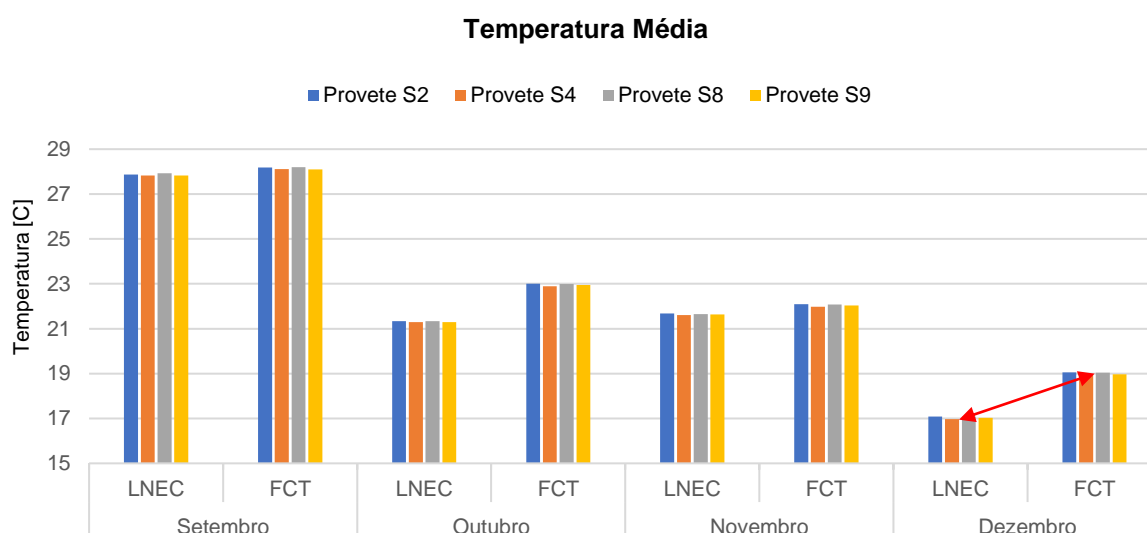
### 4.2.2.1. Comparação estações de envelhecimento natural (LNEC – FCT/UNL)

Analisando os mesmos sistemas em estações de envelhecimento diferentes, verificou-se que todos os provetes que se encontram na estação de envelhecimento da FCT/UNL apresentam temperaturas médias superiores aos provetes na estação de envelhecimento do LNEC. A variação máxima registada entre todos os sistemas foi de 1,98°C (no mês de dezembro nos provetes S2 e S4). No mesmo mês, os provetes S8 e S9 registaram uma variação máxima de 1,96°C e 1,95°C, respetivamente.

De acordo com a Figura 38 verifica-se que no mês de dezembro, a temperatura foi relativamente mais elevada na FCT/UNL (em média 19,01°C) do que no LNEC (em média 17,04°C). Nos restantes meses da campanha experimental a temperatura na FCT/UNL foi também mais elevada do que no LNEC (em média mais 0,78°C).

No que diz respeito à humidade relativa média (Tabela 11), foi na estação de envelhecimento do LNEC que se registaram valores superiores. A variação máxima registada entre estações de envelhecimento foi no mês de dezembro, onde os provetes do LNEC registaram em média mais 8,94% de humidade relativa que os provetes da FCT/UNL. Nos restantes meses a variação foi em média de 5,28%, 6,37% e 7,89% no mês de setembro, outubro e novembro, respetivamente.

Analisando a humidade relativa de cada conjunto de provetes (cada sistema em diferentes estações de envelhecimento), verificou-se que a maior diferença foi registada no provete S8 (cerca de 9,18%). Os sistemas S2, S4 e S9 registaram em média mais 8,26%, 6,33% e 3,18% de humidade relativa, respetivamente.



**Figura 38:** Temperatura média dos provetes monitorizados durante a campanha experimental (seta a vermelho indica a maior discrepância de valores registada no mês de dezembro).

**Tabela 11:** Humidade relativa média (%) registada ao longo da campanha experimental.

		Humidade Relativa Média (%)			
		Provete S2	Provete S4	Provete S8	Provete S9
Setembro	LNEC	67,78	60,03	61,76	59,76
	FCT/UNL	60,95	58,71	58,16	57,96
Outubro	LNEC	87,47	79,74	83,47	79,02
	FCT/UNL	78,30	77,20	75,36	77,38
Novembro	LNEC	80,23	82,15	79,11	79,62
	FCT/UNL	75,02	76,08	71,06	73,65
Dezembro	LNEC	81,46	88,56	81,37	81,40
	FCT/UNL	76,57	77,46	72,44	76,31

**Legenda:** A cinzento destaca-se a estação de envelhecimento que registou os valores mais elevados em cada provete.

#### 4.2.2.2. Discussão de resultados

Durante a campanha experimental verificou-se uma maior tendência para registar valores de temperatura superiores na estação de envelhecimento da FCT/UNL. Analisando os dados recolhidos no período das 13h às 16h (radiação mais forte durante estas horas do dia), verifica-se que as temperaturas médias registadas nos provetes da FCT/UNL são mais elevadas (em média 1,50°C) do que as temperaturas médias dos provetes do LNEC (Tabela 12), contribuindo assim para as maiores temperaturas médias registada nos provetes da FCT/UNL.

**Tabela 12:** Temperatura média dos provetes no período das 13h00 às 16h00 na estação de envelhecimento da FCT/UNL e do LNEC e respetiva diferença das temperaturas.

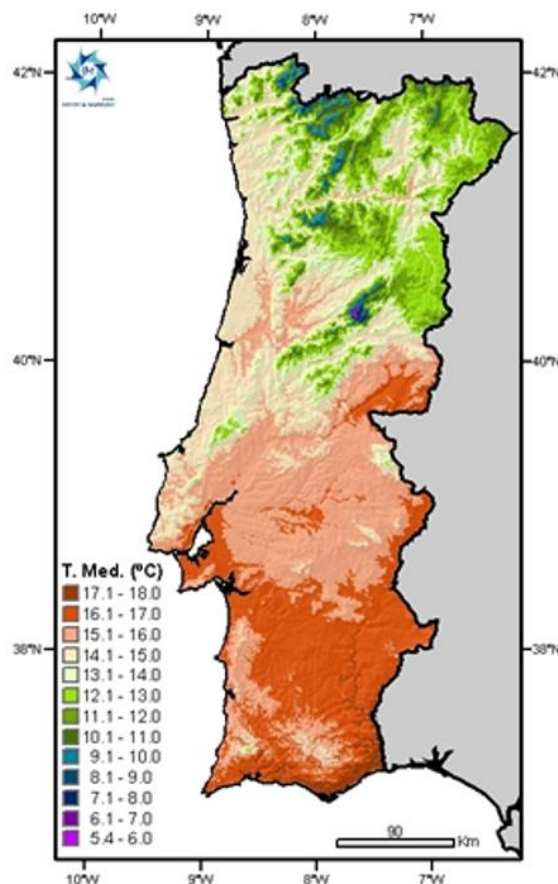
	S2	S4	S8	S9
FCT/UNL	36,80	36,62	36,82	36,66
LNEC	35,34	35,06	35,35	35,19
$\Delta T$	1,46	1,56	1,48	1,47

Esta diferença pode ser explicada não só pelo facto de Lisboa registar valores de intensidade do vento ligeiramente superiores (cerca de 8km/h a mais que a zona da Caparica), mas também pelo número de horas de exposição solar (mais 0,2 horas na zona da Caparica), segundo os dados disponibilizados pelo IPMA e relatórios mensais [74], [76]–[78]. Apesar dos provetes estarem situados na estação de envelhecimento de edifícios e virados a Sul para uma maior exposição solar, em Lisboa há uma maior rugosidade espacial criada pelas construções, que pode fazer com que os provetes da FCT/UNL, estando mais perto da zona Oeste (zona do pôr do sol), acabem por ter mais horas de exposição solar.

Este facto, juntamente com a intensidade do vento (mais intensa na zona de Lisboa), pode fazer com que os provetes na estação de envelhecimento do LNEC comecem a registar temperaturas inferiores ligeiramente mais cedo (em média a partir das 18h) que os provetes da estação de envelhecimento da FCT/UNL (em média a partir das 19h). Este aspeto pode também explicar a ligeira diferença nas temperaturas médias de cada estação de envelhecimento.

Analisando os dados disponibilizados pelo IPMA, referentes à estação meteorológica em Lisboa, e os dados da estação meteorológica situada na estação de envelhecimento da FCT/UNL (Tabela 13), é possível verificar que a temperatura média é sempre mais elevada (em média 0,62°C) na zona da Costa da Caparica do que na zona urbana de Lisboa. De acordo com o mapa da temperatura média anual em Portugal Continental (Figura 39), a zona costeira do distrito de Setúbal apresenta, em média, temperaturas ligeiramente superiores que a região urbana de Lisboa, confirmando assim os valores recolhidos [69].

Na figura 35, verifica-se que de outubro a dezembro, os provetes registaram temperaturas mínimas absolutas mais baixas no LNEC do que na FCT/UNL (cerca de 2,63°C em média), ao contrário do que aconteceu em setembro (diferença de 0,06°C entre FCT/UNL e LNEC). Esta discrepância pode ser justificada pela intensidade do vento, que como referido anteriormente, é mais elevada na zona de Lisboa [80]. No mês de setembro não se verifica uma diferença tão acentuada porque, segundo o IPMA, este mês foi considerado seco fraco, com temperaturas elevadas e fraca intensidade de vento [74].



**Figura 39:** Temperatura média anual em Portugal Continental - IPMA [69].

**Tabela 13:** Médias das temperaturas mínimas (*T. min*), máximas (*T. máx*) e médias (*T. méd*) registadas pelas estações meteorológicas em Lisboa e na Caparica (dados IPMA).

	Lisboa			Costa da Caparica		
	T. min	T. máx	T. méd	T. min	T. máx	T. méd
Setembro	18,20	28,60	23,40	19,58	33,79	25,08
Outubro	13,80	22,40	18,10	13,90	22,42	18,16
Novembro	14,62	15,49	15,04	12,37	18,73	15,55
Dezembro	11,85	12,80	12,09	9,35	15,26	12,31

**Legenda:** A cinzento claro temperaturas médias mais baixas; a cinzento escuro temperaturas médias mais elevadas

Analisando a humidade relativa em cada estação de envelhecimento, como referido, verificou-se que a estação de envelhecimento do LNEC registou valores superiores durante a campanha experimental. Eva Barreira [3], referiu que a presença de obstáculos influenciava a temperatura superficial noturna. Através da avaliação *in situ* que a autora realizou, percebeu que a presença de um obstáculo originava um aumento da temperatura superficial noturna, e conseqüentemente uma diminuição das condensações superficiais. Apesar de a estação de envelhecimento do LNEC estar situada no centro de Lisboa, onde existe uma rugosidade de edifícios, criando de certa forma obstáculos, a temperatura superficial e conseqüentemente a humidade relativa foi, no entanto, mais elevada.

Embora os obstáculos contribuam para um aumento da temperatura superficial e uma diminuição das condensações, o facto de os edifícios vizinhos à estação de envelhecimento do LNEC estarem relativamente distantes, pode não contribuir tanto para o acontecimento deste fenómeno. Assim sendo, os valores superiores de humidade relativa registados na estação de envelhecimento do LNEC podem estar associados a outros fenómenos físicos, nomeadamente devido às temperaturas mais baixas registadas na zona de Lisboa.

Como já mencionado, os provetes da FCT/UNL têm uma exposição solar ligeiramente maior, por estarem perto da zona Oeste, o que faz com que os provetes tenham uma temperatura superficial um pouco mais elevada, como é o caso. Este aumento de temperatura pode contribuir para uma secagem mais rápida, que, juntamente com a velocidade do vento mantêm a humidade relativa ligeiramente mais baixa.

Da análise da Tabela 11, destaca-se ainda o mês de setembro com os valores mais baixos de toda a campanha experimental (entre 60% a 68%). No entanto, os dados fornecidos pelo IPMA confirmam que os valores medidos experimentalmente estão de acordo com os valores de humidade relativa medidos na zona de Lisboa e Caparica (entre 60% a 65%) para o respetivo mês [74], [80].

### 4.3. Simulação de dados no WUFI PRO 6.5

As simulações no WUFI PRO 6.5 (Figura 40), como referido no capítulo 3, foram feitas considerando intervalos de hora em hora. A Figura 41 mostra os dados experimentais da variação da humidade relativa e temperatura do provete S2, e a Figura 42 os dados simulados referentes ao provete S2, ambas durante três dias do mês de novembro de 2020.



Figura 40: Simulação higrótérmica do provete S2 entre os meses de setembro e dezembro de 2020.

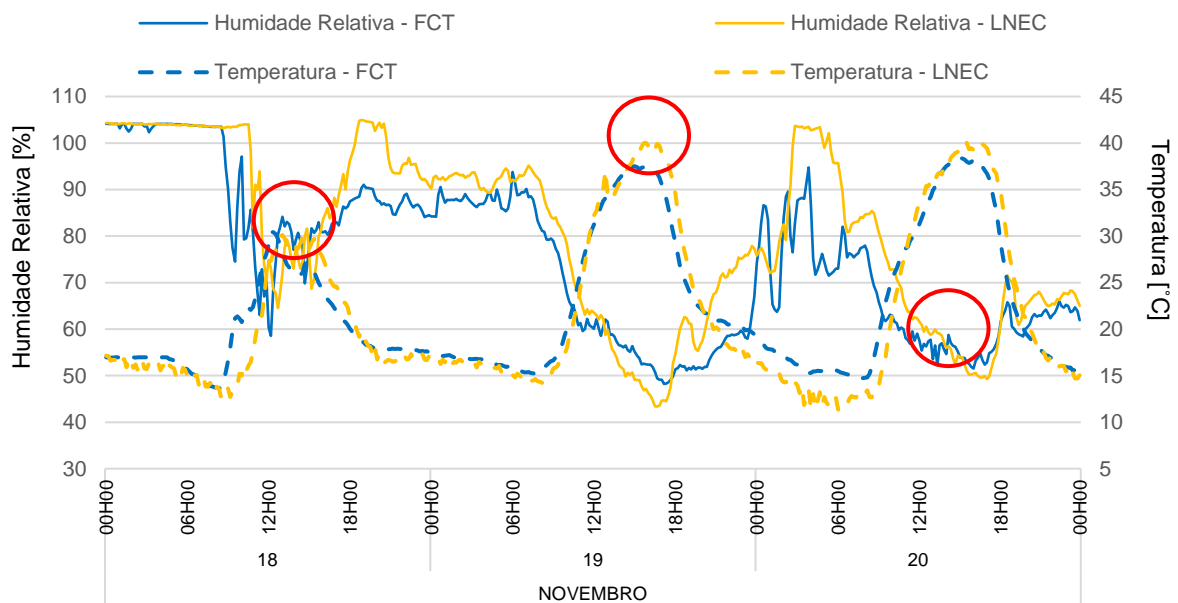
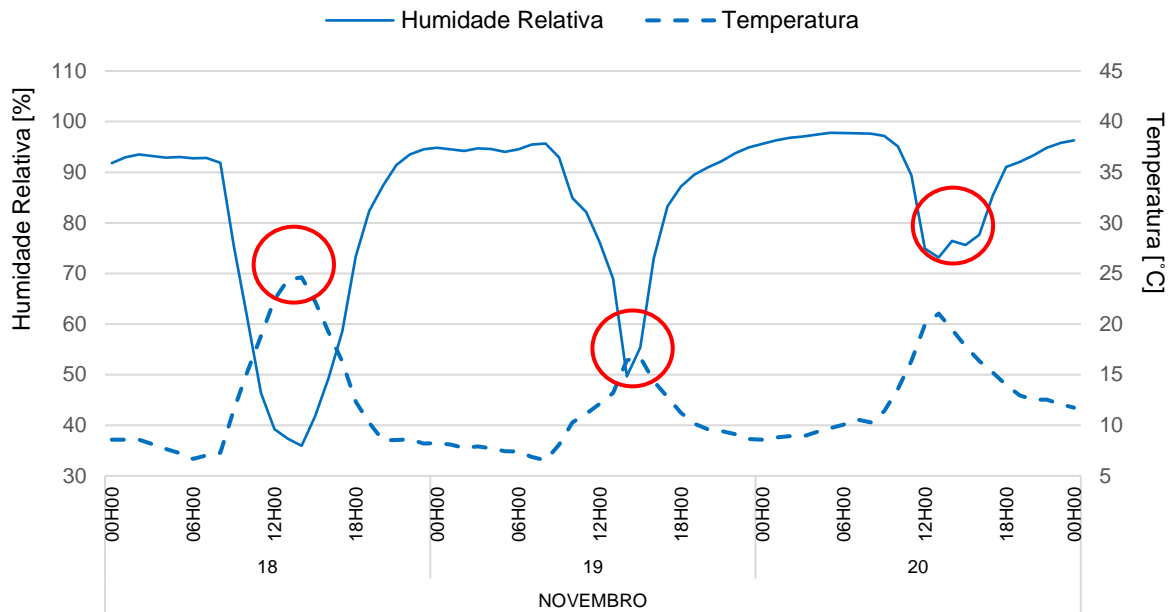


Figura 41: Variação da humidade relativa e temperatura, in situ, no provete S2 em novembro de 2020. Os círculos a vermelho destacam os picos de humidade e temperatura.



**Figura 42:** Variação da humidade relativa e temperatura, no WUFI, no Proвете S2 em novembro de 2020. Os círculos a vermelho destacam os picos de humidade e temperatura.

Quando se comparam os dados simulados com os valores experimentais (Tabela 14), verifica-se que no dia 19 de novembro de 2020 houve uma discrepância mais acentuada entre os valores de temperatura medidos e os simulados (Figuras 41 e 42). Esta diferença pode dever-se ao fato de, segundo os dados do IPMA, o mês de novembro ter sido o segundo mês mais quente desde o ano de 2000, destacando-se na região de Lisboa o dia 19, como o mais quente durante todo o mês [77].

Barreira e Peixoto de Freitas evidenciaram que a correspondência entre os resultados simulados e os obtidos experimentalmente é menos evidente em dias de maior temperatura [81], como também observado nos dados obtidos neste trabalho. Os autores referiram que a interferência do sol influencia diretamente o comportamento dos provetes, quer quando atua diretamente nos provetes, ou através da emissão/reflexão da radiação pelo solo. O *software* WUFI PRO 6.5 tem por base as condições climáticas de anos anteriores nas simulações, no entanto torna-se difícil prever este tipo de fenómenos pontuais ou fora da média. Adicionalmente, os provetes estão colocados na estação de envelhecimento de um edifício e virados a Sul, sendo, portanto, sujeitos a uma maior exposição à radiação solar, justificando assim os elevados valores de temperatura medidos *in situ*, em comparação com os simulados.

Comparando os valores médios, mínimos e máximos da temperatura medidos durante a campanha experimental com os resultados simulados do provete S2, a diferença é menos acentuada (Tabela 15), tendo apenas se verificado uma diferença maior nos valores máximos de temperatura, ou seja, quando a radiação atinge diretamente os provetes. Como referido por Barreira e Peixoto de Freitas [21], a aproximação entre os valores simulados e os valores medidos é menor quando o céu está limpo, permitindo confirmar a influência direta do sol, não só quando incide diretamente nos provetes, mas



também durante a noite, quando a energia solar absorvida pelo solo é reemitida. Estes fenómenos não são considerados pelo WUFI 6.5 (ou são muito simplificados) originando assim variações entre os valores simulados e os medidos quando o céu está limpo [3].

**Tabela 14:** Valores médios, mínimos e máximos de temperatura [°C] medidos e simulados no provete S2 em novembro de 2020.

Temperatura [°C]				
Temperatura	Estação natural	Ensaçada	Simulada	Varição
Média	LNEC	21,68	11,86	9,82
	FCT/UNL	22,09		10,22
Mínima	LNEC	11,36	6,54	4,81
	FCT/UNL	13,63		7,08
Máxima	LNEC	40,10	24,62	15,48
	FCT/UNL	38,43		13,80

**Tabela 15:** Valores médios, mínimos e máximos de temperatura [°C] medidos e simulados no provete S2 durante a campanha experimental.

Temperatura [°C]				
Temperatura	Estação natural	Ensaçada	Simulada	Varição
Média	LNEC	17,13	15,78	1,34
	FCT/UNL	17,77		1,98
Mínimo	LNEC	3,10	1,92	1,18
	FCT/UNL	3,30		1,38
Máximo	LNEC	47,13	39,10	7,99
	FCT/UNL	46,44		7,30

**Legenda:** A cinzento destaca-se a maior discrepância verificada.

No que diz respeito à humidade relativa, também se verificou uma discrepância acentuada nos valores. Neste caso, os valores simulados no dia 20 de novembro às 12h00 (75% HR) foram mais elevados que os valores medidos *in situ* (60% HR) (Figuras 41 e 42). Como referido anteriormente, o mês de novembro de 2020 foi um mês atípico. O IPMA refere que o mês de novembro, em Portugal continental, classificou-se como muito quente em relação à temperatura do ar. Este fenómeno poderá ter contribuído para os valores mais baixos de humidade relativa medidos *in situ*, em comparação com os simulados (Tabela 16).

Quando se avalia a humidade relativa medida e simulada durante toda a campanha experimental, verifica-se também uma discrepância relativamente acentuada (Tabela 17). Eva Barreira [3] refere que o WUFI PRO não assegura uma simulação válida da humidade relativa, principalmente em períodos

de chuva incidente. Quando a chuva incide diretamente nos provetes, os valores de humidade relativa simulados atingem 100% apenas enquanto chove.

O *software* não tem em conta o período em que os provetes continuam molhados, após ter terminado a incidência de chuva. Uma vez que o programa não tem capacidade para ter em conta a chuva acumulada à superfície dos provetes, apenas considera a sua influência na transferência de humidade através dos materiais que compõem o sistema [3], [82].

**Tabela 16:** Valores médios, mínimos e máximos de humidade relativa média [%] medidos e simulados no provete S2 em novembro de 2020.

Humidade Relativa [%]				
Humidade Relativa	Estação de envelhecimento	Ensaçada	Simulada	Varição
Média	LNEC	80,23	84,06	3,83
	FCT/UNL	75,02		9,04
Mínimo	LNEC	43,37	35,94	7,43
	FCT/UNL	48,22		12,28
Máximo	LNEC	104,96	97,79	7,17
	FCT/UNL	104,13		6,34

**Tabela 17:** Valores médios, mínimos e máximos de humidade relativa média [%] medidos e simulados no provete S2 durante a campanha experimental.

Humidade Relativa [%]				
Humidade Relativa	Estação de envelhecimento	Ensaçada	Simulada	Varição
Média	LNEC	91,85	80,8	11,07
	FCT/UNL	81,01		0,23
Mínimo	LNEC	5,48	23,1	17,61
	FCT/UNL	13,13		9,96
Máximo	LNEC	107,04	100,00	7,04
	FCT/UNL	104,38		4,38

#### 4.3.1. Limitações do trabalho realizado

Como referido, o WUFI apresenta algumas limitações que influenciam os resultados. Eva Barreira referiu que estas limitações resultam das simplificações assumidas pelo modelo de cálculo [3].

A utilização do WUFI permitiu perceber que não existe qualquer sub-rotina que simule o efeito de obstáculos no comportamento higrotérmico de uma fachada. Este efeito, como referido anteriormente,

tem consequências diretas na temperatura superficial e depende das dimensões, da distância à fachada e da emissividade da sua superfície.

Outra lacuna do programa está relacionada com os resultados simulados para a humidade relativa. Comparando os resultados experimentais com os simulados, percebeu-se que o WUFI não permite uma simulação fiável nos períodos de chuva incidente. O *software* assume 100% de humidade relativa enquanto chove, mas não tem em conta o período em que os provetes continuam molhados.

As simulações têm que ser feitas para intervalos de hora em hora, uma vez que os dados climáticos disponibilizados pelo programa são horários. Considerando uma simulação com intervalos de tempo de 10 minutos (iguais aos da campanha experimental) origina imprecisões nos resultados, uma vez que o intervalo de tempo não é compatível com o intervalo de dados fornecido.

Durante a campanha experimental, verificaram-se algumas dificuldades na recolha de dados.

Devido à atual situação pandémica não foi possível recolher dados durante o mês de janeiro, o que adicionaria uma maior quantidade de dados a este trabalho. Para além disso, em fevereiro apenas foi possível recolher dados na estação de envelhecimento do LNEC, uma vez que a FCT se encontrou interdita durante todo o mês. Este facto não permitiu comparar dados das duas estações de envelhecimento durante os meses de janeiro e fevereiro.

Por diversas vezes identificaram-se falhas na recolha de dados, nomeadamente devido a falhas de energia na FCT/UNL que impossibilitaram a recolha de dados. Inicialmente, pensou-se que seria por falta de memória do logger e procedeu-se à sua limpeza, no entanto continuou a ser recorrente e conclui-se que era devido a falhas de energia no pavilhão. Uma forma de ultrapassar este problema, em futuras campanhas experimentais, poderia passar pela incorporação de uma bateria autónoma ligada ao logger.

Adicionalmente, verificou-se que os sensores apresentavam alguma oxidação superficial, que por sua vez alterou a calibração dos mesmos, traduzindo-se num registo de humidades relativas negativas. Devido a esta sensibilidade, optou-se por proteger os sensores com um tecido de polietileno, o que melhorou relativamente a sua performance.



## 5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

### 5.1. Conclusões finais

Os ETICS têm tido uma aplicação crescente em Portugal, devido à sua fácil aplicação, uma boa relação custo-benefício e contribuição para uma melhor eficiência energética dos edifícios. No entanto, a formação de manchas e respetiva suscetibilidade biológica, apesar de normalmente não alterar o desempenho térmico dos sistemas, é ainda uma patologia bastante presente neste tipo de sistema, causando uma degradação do aspeto da fachada dos edifícios.

A revisão da literatura permitiu perceber que os estudos realizados pela comunidade científica contribuíram para um avanço do conhecimento do comportamento higrotérmico dos sistemas ETICS. No entanto, os estudos efetuados foram realizados maioritariamente no centro e norte da Europa, sendo necessário avaliar o comportamento destes sistemas com base nas condições climáticas de Portugal. Deste modo, esta dissertação foi realizada com o intuito de contribuir para o aumento do conhecimento do desempenho higrotérmico dos ETICS.

A campanha experimental realizada, no âmbito da presente dissertação, permitiu retirar as seguintes conclusões:

- A avaliação in situ dos diferentes provetes, expostos em ambientes diferentes, mostraram que a temperatura superficial varia só minimamente em função da composição de cada sistema. No entanto, os resultados mostraram que a influência da localização é um fator preponderante no comportamento higrotérmico. Os sistemas situados na estação de envelhecimento da FCT/UNL registaram sempre temperaturas mais elevadas, contribuindo assim para os menores valores de humidade relativa registados.
- Verificou-se que o provete S4 (isolante térmico de cortiça; camada de base cimentícia; e revestimento à base de cal) apresentou as temperaturas mais baixas e, conseqüentemente, maiores valores de humidade relativa. Por outro lado, o provete S8 (isolante térmico de lã mineral; camada de base cimentícia; e revestimento acrílico) apresentou valores de humidade relativa mais baixos e de temperatura mais elevados. Este fenómeno indica que a capacidade de absorção e secagem, contribuem para a diminuição das condensações superficiais e conseqüentemente o desenvolvimento biológico. Além disso, verificou-se que a absorção de humidade nos isolantes aumentava sensivelmente o valor de condutibilidade térmica, afetando o desempenho do sistema
- A presença de humidade relativa pode estar também relacionada com a capacidade de absorção e secagem de água que cada sistema tem. Verificou-se que os provetes com uma maior absorção capilar apresentavam um menor número de horas em que a humidade relativa superava os 100%, e vice-versa. É fundamental um equilíbrio entre a absorção de água e a

capacidade de secagem, mostrando um adequado comportamento higrotérmico do sistema. É notório também que a retenção de humidade no sistema pode alterar o desempenho térmico do sistema.

- Verificou-se que a rugosidade dos sistemas pode ter um papel fundamental. Quanto mais rugosa for a superfície, maior probabilidade tem de “quebrar” a tensão superficial da água, favorecendo a evaporação da mesma. Conclui-se, portanto, que presença de humidade à superfície diminui quanto mais rugosa for a superfície, contribuindo para a secagem mais rápida do sistema evitando as condições favoráveis para o desenvolvimento biológico.
- Não se verificou-se uma relação clara entre as condensações superficiais e o número de horas em que a humidade relativa da superfície igualou ou superou os 100%, o que indica uma vez mais que, a capacidade de secagem e relativa permeabilidade ao vapor da camada de acabamento tem um papel fundamental. No entanto, verificou-se que a presença de humidade na superfície dos provetes aumenta o risco de desenvolvimento biológico. O provete S4 foi o que apresentou um maior número de horas em que a humidade relativa superou os 100%, resultando no provete com maior suscetibilidade biológica.
- Verificou-se que os resultados simulados através do WUFI PRO se aproximam aos resultados experimentais. A diferença maior verificou-se quando se comparam os valores de temperatura máximos. Por outro lado, quando se compara os valores de humidade relativa medidos experimentalmente com os simulados, verifica-se uma discrepância mais acentuada. O programa não permite uma simulação fiável da humidade relativa, uma vez que o modelo numérico que tem por base, não tem em conta o período de tempo que a superfície continua húmida, após o período de chuva terminar.

## 5.2. Desenvolvimentos futuros

Os resultados obtidos no âmbito da presente dissertação, permitiram perceber que o trabalho de investigação do comportamento higrotérmico de sistemas ETICS pode ainda ser aprofundado. Deste modo, destacam-se algumas sugestões para complementar o trabalho desenvolvido:

- Estudar o desenvolvimento biológico de cada sistema, utilizando os dados higrotérmicos recolhidos, e dando continuidade ao estudo em questão.
- Identificar a tipologia de microrganismos com maior tendência a desenvolver-se nas fachadas de edifícios com sistemas do tipo ETICS, caracterizando as condições favoráveis para o seu desenvolvimento, tendo em conta o tipo de microrganismo e o tipo de suporte.
- Avaliar o comportamento higrotérmico de fachadas devido à presença de obstáculos.

- Realizar campanhas experimentais e casos de estudo em diferentes cidades portuguesas, por período de tempo mais extenso, de forma a simular o comportamento higrotérmico de uma fachada do tipo ETICS ao longo do ano, tendo em conta a sua localização.
- Monitorizar provetes virados a Norte, uma vez que é a orientação com menos exposição solar, o que faz com que os provetes apresentem mais humidade relativa e conseqüentemente um maior potencial de colonização biológica.





## Referências bibliográficas

- [1] B. Amaro, D. Saraiva, J. De Brito, and I. Flores-Colen, “Inspection and diagnosis system of ETICS on walls,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1257–1267, 2013.
- [2] J. Parracha, A. Cortay, G. Borsoi, R. Veiga, and L. Nunes, “Evaluation of ETICS Characteristics that Affect Surface Mould Development,” XV International Conference on Durability of Building Materials and Components, pp.209-216, Barcelona, 2020.
- [3] E. Barreira, “Degradação Biológica De Fachadas Com Sitemas De Isolamento Térmico Pelo Exterior Devida Ao Desempenho Higrotérmico.,” Tese de Doutoramento. FEUP, Porto, Portugal, 2010.
- [4] C. Duarte, “A Europa das Argamassas e dos ETICS. Tendências, Perspectivas e Oportunidades.,” IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Belo Horizonte, Brazil.
- [5] “APFAC.” <https://www.apfac.pt/> (accessed Jun. 12, 2021).
- [6] J. Fernandes Maia, “Durability of thermal rendering and plastering systems,” Tese de Doutoramento. FEUP. Porto, Portugal, 2019.
- [7] APFAC, “ETICS - Manual de Aplicação,” 2015.
- [8] S. Ximenes, J. de Brito, P. L. Gaspar, and A. Silva, “Modelling the degradation and service life of ETICS in external walls,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 48, no. 7, pp. 2235–2249, 2015.
- [9] R. Veiga and S. Malanho, “ETICS e argamassas térmicas: novos desafios de desempenho e sustentabilidade,” Seminário Fachadas energeticamente eficientes: contribuição dos ETICS/Argamassas Térmicas. LNEC, Lisboa, Portugal, 2009.
- [10] I. Flores-Colen, J. de Brito, and V. P. de Freitas, “Stains in facades’ rendering - Diagnosis and maintenance techniques’ classification,” *Construction and Building Materials* 22 (2008) 211–221, 2008.
- [11] APFAC, “Manual ETICS,” 2018.
- [12] V. Peixoto De Freitas and P. F. Gonçalves, “Isolamento térmico de fachadas pelo exterior - Reboco delgado armado sobre poliestireno expandido,” FEUP, Formação Continua 65-66, 2005.
- [13] C. B. Moura, “Aplicação de isolamento térmico pelo exterior tipo ETICS associado a revestimento cerâmico,” Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal, 2012.
- [14] C. F. Inês Flores-Colen, Sofia Ruivo, Pedro Teixeira, Natália Neto, José Silvestre, “Revestimentos de Paredes,” *Inst. Super. Técnico*, p. 217, 2002, [Online]. Available: [http://www.civil.ist.utl.pt/~joaof/tc-pb/21 Revestimentos de paredes - 22ª a 24ª aulas teóricas.pdf](http://www.civil.ist.utl.pt/~joaof/tc-pb/21%20Revestimentos%20de%20paredes%20-%2022%20a%2024%20aulas%20teóricas.pdf).
- [15] M. do R. Veiga, “Comportamento de argamassas de revestimento de paredes : contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação,” Tese de Doutoramento, Lisboa, Portugal, 1998.
- [16] “Resultados Geniais - Obras e Construção Civil.” <http://www.resultadosgeniais.com/> (accessed Apr. 14, 2021).
- [17] T. Lopes, “Fenómenos De Pré-Patologia Em Manutenção De Edifícios Aplicação Ao Revestimento ETICS,” Dissertação de Mestrado, FEUP. Porto, Portugal, 2005.
- [18] R. Veiga and C. Santos, “Revestimentos de isolamento térmico de fachada: Eficiência, durabilidade e comprovação de qualidade,” *Construção Magazine*, Vol 32. 12-18pp. Lisboa, Portugal, 2009.

- [19] V. Peixoto De Freitas, "Isolamento Térmico De Fachadas Pelo Exterior Reboco Delgado Armado Sobre Poliestireno Expandido – ETICS," Grupo maxit - Tecnologias de Construção e Renovação, Lda. Porto, 2002.
- [20] "Vantagens e desvantagens do sistema ETICS | Engenharia e Construção." <https://www.engenhariaeconstrucao.com/2011/07/vantagens-e-desvantagens-do-sistema.html> (accessed Apr. 12, 2021).
- [21] E. Barreira and V. P. de Freitas, "Experimental study of the hygrothermal behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)," *Building and Environment* 63 (2013) 31-39, 2013.
- [22] F. Pedro Fernandes Pereira and P. Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos, "Avaliação Laboratorial Do Desempenho dos ETICS," Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal, 2009.
- [23] M. F. Williams and B. Lamp Williams, "Exterior Insulation and Finish Systems (EIFS) Part I: EIFS Standards Development in the U.S.," *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, Vol. 18, pag 390-398. Maple Glen, USA, 1995.
- [24] P. E. Nelson and R. E. Kroll, "Exterior Insulation Finish Systems (EIFS): Materials, Properties, and Performance," ASTM - American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA, 1996.
- [25] F. FLEURY; B. ABRAHAM, "L'isolation thermique des façades par l'extérieur," CSTB, Paris, France, 1982.
- [26] P. Baronnier, "Manuel de mise en oeuvre des enduits minces sur isolant. Isolation par l'extérieur. Le bon exemple de l'applicateur K'PLIC," CSTB, Paris, France, 1983.
- [27] J. Carvalho Lucas, "Classificação e descrição geral de revestimentos para paredes de alvenaria ou de betão.," ITE 24. LNEC, Lisboa, Portugal, 2004.
- [28] J. Carvalho Lucas, "Exigências funcionais de revestimentos de paredes.," ITE 25. LNEC, Lisboa, Portugal, 2008.
- [29] EOTA, "External thermal insulation composite systems (ETICS) with renderings," European Assessment Document - EAD 040083-00-0404, Brussels, Belgium, 2020.
- [30] M. Silva, "CERTIF-ASSOCIAÇÃO PARA A CERTIFICAÇÃO ETICS: Marcação CE de acordo com a ETAG 004," Seminário APFAC - Patologias de Sistemas de Isolamento Térmico pelo Exterior do tipo ETICS. FEUP, Porto, Portugal, 2015.
- [31] H. Kunzel and K. Sedlbauer, "Biological growth on stucco. Performance of exterior envelopes of whole buildings VIII: Integration of building envelopes.," ASHRAE, Florida, USA, 2001.
- [32] GEcoRPA, "Aprendendo com os erros e defeitos da construção," 2º Simpósio Internacional do CIB em Lisboa, 2003.
- [33] J. Blach, "La détérioration des bâtiments. Analyse et prévention," EMPA, Dübendorf, Suisse, 1999.
- [34] W. Zillig, K. Lenz, K. Sedlbauer, and M. Krus, "Condensation on façades – Influence of construction type and orientation," *Research in Building Physics*, pp. 437-444. K. U. Leuven, Leuven, Belgium, 2003.
- [35] A. Holm, W. Zillig, and H. M. Kunzel, "Exterior surface temperature and humidity of walls -

- Comparison of experiment and numerical simulation,” Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX International Conference. ASHRAE, Florida, USA, 2004.
- [36] H. M. Künzle, “Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One-and two-dimensional calculation using simple parameters,” Tese de Doutorado, IRB Verlag, Stuttgart, Germany, 1995.
- [37] K. Lengsfeld and M. Krus, “Microorganism on façades-reasons, consequences and measures,” Fraunhofer-Institute for Building Physics (IBP), Holzkirchen, Germany, 2004.
- [38] M. Krus, C. Fitz, A. Holm, and K. Sedlbauer, “Prevention of algae and mould growth on facades by coatings with lowered long-wave emission,” Institute for Building Physics - Report, 2006.
- [39] R. Becker, “Patterned Staining of Rendered Facades: Hygro-Thermal Analysis as a Means for Diagnosis,” Journal of Thermal Envelopes and Building Science, Vol. 26, No. 4, pp. 321-341. Sage Publications, London, UK, 2003.
- [40] R. Becker and M. Putterman, “Patterned mould growth on rendered facades in Israel – A consequence of substrate thermal insulation.,” 6th Symposium of Building Physics in the Nordic Countries, Vol. 2, pp. 667-674. NTNU, Trondheim, Norway, 2002.
- [41] J. Von Werder and H. Venzmer, “New diagnostic strategies to quantify algal growth on façade materials – An important step in advancing product development.,” 12th Symposium for Building Physics, Vol. 2, pp. 963-972. Technische Universität Dresden, Dresden, Germany, 2007.
- [42] J. Von Werder, H. Venzmer, N. Lesnych, and K. Lewis, “Algal defacement of façade materials – Results of long term natural weathering tests obtained by new diagnostic tools.,” 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Vol. 1, pp. 277-284. DTU, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [43] E. Barreira and V. Peixoto de Freitas, “Condensações superficiais nos ETICS - Avaliação experimental,” PATORREB 2009 – 3.º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Vol. 1, pp. 441-446. FEUP, Porto, Portugal, 2009.
- [44] E. Barreira and V. Peixoto de Freitas, “Influência das condensações superficiais exteriores na degradação do ETICS,” Construção2007 – 3.º Congresso Nacional da Construção. FCTUC, Coimbra, Portugal, 2007.
- [45] E. Barreira and V. Peixoto de Freitas, “External condensations on ETICS - influence of nearby obstacles,” 1st Central European Symposium on Building Physics – CESBP, Universidade de Tecnologia de Cracóvia, Cracóvia, Polónia, 2010.
- [46] M. Krus, D. Rösler, and K. Sedlbauer, “New model for the hygrothermal calculation of condensate on the external building surface,” 3rd International Building Physics Conference – Research in Building Physics and Building Engineering, pp. 329-333. Concordia University, Montreal, Canada, 2006.
- [47] J. Delgado, N. Ramos, E. Barreira, and V. De Freitas, “A critical review of hygrothermal models used in porous building materials,” Journal of Porous Media, Vol. 13, Issue 3, pp. 221-234. Begell House, California, USA, 2010.
- [48] Fraunhofer IBP, “WUFI® Pro | WUFI (en).” <https://wufi.de/en/software/wufi-pro/> (accessed Feb. 11, 2021).

- [49] Fraunhofer IBP, “WUFI (en) - HOME,” *Version 3.0*. <https://wufi.de/en/> (accessed Feb. 11, 2021).
- [50] “Software WUFI - FEUP/LFC.” <https://paginas.fe.up.pt/~wufi/index.html> (accessed Jun. 13, 2021).
- [51] B. Reich, H. Ge, and J. Wang, “Effect of Vapor Diffusion Port on Drying of Wood-Frame Walls,” XV International Conference on Durability of Building Materials and Components, pp.967-974, Barcelona, 2020.
- [52] S. Van Linden and N. Van Den Bossche, “Rainwater Management of Ventilated Facades: Impact of Joint Width and Cavity Size,” XV International Conference on Durability of Building Materials and Components, pp.1079-1086, Barcelona, 2020.
- [53] J. L. Parracha, G. Borsoi, P. Faria, M. G. Gomes, I. Flores-Colen, and R. Veiga, “Performance parameters of ETICS: Correlating water resistance, bio-susceptibility and surface properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, Feb. 2021.
- [54] M. Zhang, H. Sun, M. Li, and L. Zheng, “Development of a new type monitoring system of leaf surface temperature and humidity,” *Am. Soc. Agric. Biol. Eng. Annu. Int. Meet. 2014, ASABE 2014*, vol. 3, pp. 1757–1764, 2014.
- [55] H. International Inc, “HIH-4000 Series Humidity Sensors ,” 2010. Accessed: Feb. 15, 2021. [Online]. Available: [www.honeywell.com/sensing](http://www.honeywell.com/sensing).
- [56] L. Moreira, “Medição de Temperatura Usando-se Termopar,” *Cerâmica Ind. Vol.3*, vol. 7, no. 5, pp. 51–53, 2002.
- [57] K. Uchida *et al.*, “Observation of the spin Seebeck effect,” *Nature*, vol. 455, no. 7214, pp. 778–781, 2008.
- [58] T. P. Wang, “TE-Thermocouple Materials Paper,” ASM Handbook, Vol.2, Properties and Selections: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 1990.
- [59] MEZÃO, “Manual de instalação / Manual do utilizador,” 2020.
- [60] Mosaic Industries, “T Type Thermocouple Calibration, Convert Type T Thermocouple Voltage to Temperature.” <http://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/microcontroller-projects/temperature-measurement/thermocouple/type-t-calibration-table#type-t-calibration-equation> (accessed Feb. 15, 2021).
- [61] D. Potter, “Measuring Temperature with Thermocouples-a Tutorial,” Application note 043, National Instruments, 1996.
- [62] Honeywell - Sensing and Control, “Humidity Sensor Performance Characteristics Application Sheet,” 2008.
- [63] D. Prato and P. W. Lamberti, “A note on Magnus formula,” *J. Chem. Phys.*, vol. 106, no. 11, pp. 4640–4643, Mar. 1997.
- [64] M. G. Lawrence, “The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 86, no. 2, pp. 225–233, Feb. 2005.
- [65] Fraunhofer IBP, “Product overview | WUFI (en).” <https://wufi.de/en/software/product-overview/> (accessed Feb. 11, 2021).
- [66] Fraunhofer IBP, “Manual do utilizador - Tópico 66: Driving rain coefficients.” WUFI PRO 6.5.

- [67] “Classificação da intensidade da precipitação líquida - Instituto Português do Mar e da Atmosfera.”  
[https://www.ipma.pt/pt/educativa/faq/meteorologia/previsao/faqdetail.html?f=/pt/educativa/faq/meteorologia/previsao/faq\\_0033.html](https://www.ipma.pt/pt/educativa/faq/meteorologia/previsao/faqdetail.html?f=/pt/educativa/faq/meteorologia/previsao/faq_0033.html) (accessed Apr. 14, 2021).
- [68] D. Aelenei, S. Brito-Coimbra, M. G. Gomes, and A. M. Rodrigues, “Solar Bridge Retrofit System: An innovative solution to renovate structural thermal bridge areas,” *Energy Build.*, vol. 236, p. 110784, Apr. 2021.
- [69] “Instituto Português do Mar e da Atmosfera.” <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/> (accessed May 22, 2021).
- [70] “Meteorologia nacional atual | AccuWeather.” <https://www.accuweather.com/pt/pt/portugal-weather> (accessed May 16, 2021).
- [71] B. V. Toshev and D. Platikanov, “Wetting: Gibbs’ superficial tension revisited,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 291, no. 1–3, pp. 177–180, Dec. 2006, doi: 10.1016/J.COLSURFA.2006.06.013.
- [72] A. Castro, L. Labaki, R. Caram, A. Basso, and M. Fernandes, “Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral,” *Ambiente Construído - Revista online da ANTAC*, Vol.3, no.2, pp.69-76, 2008.
- [73] J. L. Parracha, G. Borsoi, P. Faria, M. G. Gomes, I. Flores-Colen, and R. Veiga, “Conservação e reabilitação de edifícios - Análise do desempenho à água de ETICS e influência na condutibilidade térmica,” *Construção Magazine*, pp.12, 2020.
- [74] I. P. M. A. Instituto Português do Mar e da Atmosfera, “Dados Meteorológicos - Setembro 2020.”
- [75] W. M. Alley, “The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions.,” *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23 (7), 1100–1109, 1984.
- [76] I. P. M. A. Instituto Português do Mar e da Atmosfera, “Dados Meteorológicos - Outubro 2020.”
- [77] I. P. M. A. Instituto Português do Mar e da Atmosfera, “Dados Meteorológicos - Novembro 2020.”
- [78] I. P. M. A. Instituto Português do Mar e da Atmosfera, “Dados Meteorológicos - Dezembro 2020.”
- [79] J. L. Parracha *et al.*, “Projeto WGB\_Shield Tarefa 2 – Envelhecimento natural em ETICS: avaliação da durabilidade,” Relatório CERIS DTC n.º 31/2020, Lisboa, Portugal, 2020.
- [80] I. P. M. A. Instituto Português do Mar e da Atmosfera, “RELATÓRIO SETEMBRO 2020 - IPMA,” 2020. Accessed: Jun. 10, 2021. [Online]. Available: [www.ipma.pt](http://www.ipma.pt).
- [81] E. Barreira and V. P. De Freitas, “External Thermal Insulation Composite Systems: Critical Parameters for Surface Hygrothermal Behaviour,” *Advances in Materials Science and Engineering*, pp 1-16, 2014.
- [82] A. Karagiozis, G. Hadjisophocleous, and S. Cao, “Wind-driven rain distributions on two buildings,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol 67-68, pp.559-572, 1997.



## Anexos

### A.1 Propriedades do material do Proвете S2 obtido a partir das fichas técnicas e da base de dados do WUFI.

<b>PROVETE S2</b>			
Espessura	37,70 mm	1,75 mm	1,12 mm
Camada	Isolante Térmico	Camada de Base	Camada de acabamento
Material	EPS 100	Argamassa fibrada	Revestimento Acrílico
Densidade aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	21	1195	1700
Porosidade [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0,35	0,40	0,28
Calor Específico [J/kgK]	1550	900	840
Condutibilidade térmica [W/mK]	0,036	0,470	0,371
Fator de Resistência à difusão de vapor de água [-]	21,70	15,50	86,70
Valor típico da humidade de construção [kg/m <sup>3</sup> ]	0,18	85,00	95,00

### A.2 Propriedades do material do Proвете S4 obtido a partir das fichas técnicas e da base de dados do WUFI.

<b>PROVETE S4</b>			
Espessura	58,83 mm	4,87 mm	2,15 mm
Camada	Isolante Térmico	Camada de Base	Camada de acabamento
Material	Aglomerada de cortiça expandida	Cál hidráulica + cimento	Cál aérea + ligante hidráulico
Densidade aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	130	1350	1200
Porosidade [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0,51	0,37	0,30
Calor Específico [J/kgK]	1700	850	900
Condutibilidade térmica [W/mK]	0,04	0,45	0,45
Fator de Resistência à difusão de vapor de água [-]	10,00	7,40	27,00
Valor típico da humidade de construção [kg/m <sup>3</sup> ]	-	309,24	120,00

### A.3 Propriedades do material do Proвете S8 obtido a partir das fichas técnicas e da base de dados do WUFI.

<b>PROVETE S8</b>			
Espessura	56,83 mm	3,33 mm	1,18 mm
Camada	Isolante Térmico	Camada de Base	Camada de acabamento
Material	Lã mineral	Argamassa de cimento	Acabamento acrílico
Densidade aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	75	1400	1750
Porosidade [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0,80	0,30	0,28
Calor Específico [J/kgK]	700	900	840
Condutibilidade térmica [W/mK]	0,034	0,450	0,820
Fator de Resistência à difusão de vapor de água [-]	1,3	15,5	86,7
Valor típico da humidade de construção [kg/m <sup>3</sup> ]	-	85	95

### A.4 Propriedades do material do Proвете S9 obtido a partir das fichas técnicas e da base de dados do WUFI.

<b>PROVETE S9</b>			
Espessura	38,57 mm	1,24 mm	4,10 mm
Camada	Isolante Térmico	Camada de Base	Camada de acabamento
Material	Aglomerada de cortiça expandida	Argamassa de colagem	Tinta aquosa de silicato
Densidade aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	130	1250	-
Porosidade [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0,51	0,30	-
Calor Específico [J/kgK]	1700	850	-
Condutibilidade térmica [W/mK]	0,04	0,24	-
Fator de Resistência à difusão de vapor de água [-]	10,00	16,12	-
Valor típico da humidade de construção [kg/m <sup>3</sup> ]	-	163,15	-

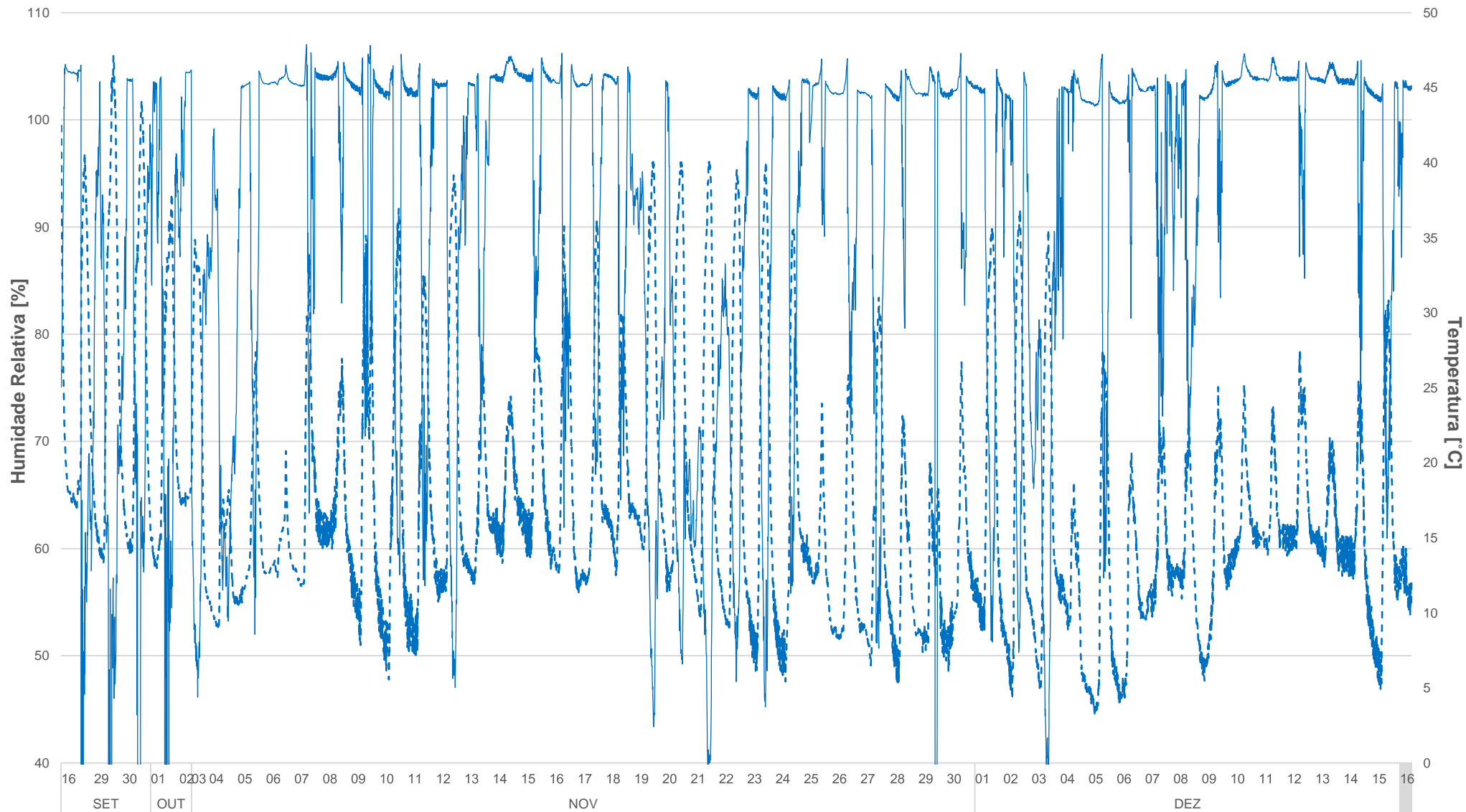


## A.5 Parâmetros de simulação e respectivos critérios/valores assumidos para os provetes estudados.

PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	CRITÉRIO/VALOR
<i>Configuração do elemento construtivo</i>	
Orientação	Sul
Inclinação	45°
Coefficiente de chuva incidente	Equação 3.6
<i>Coefficientes de transferências à superfície exterior</i>	
Resistência térmica [m <sup>2</sup> ·K)/W]	Dependente do vento (Figura 26)
Valor de sd [m]	Sem revestimento (há exceção do Proвете S9 – tinta de silicatos)
Absorção (Radiação de onda curta) [-]	Superfície clara (0,2)
Emissividade (Radiação de onda longa) [-]	Superfície clara (0,9)
Balanço Radiativo Explicito	SIM
Refletividade do solo (onda curta) [-]	Valor padrão (0,2)
<i>Coefficientes de transferências à superfície interior</i>	
Fator de redução da chuva incidente [-]	Dependente da inclinação do elemento construtivo (0,1)
<i>Condições iniciais no elemento construtivo</i>	
Humidade [%]	60
Temperatura [°C]	20

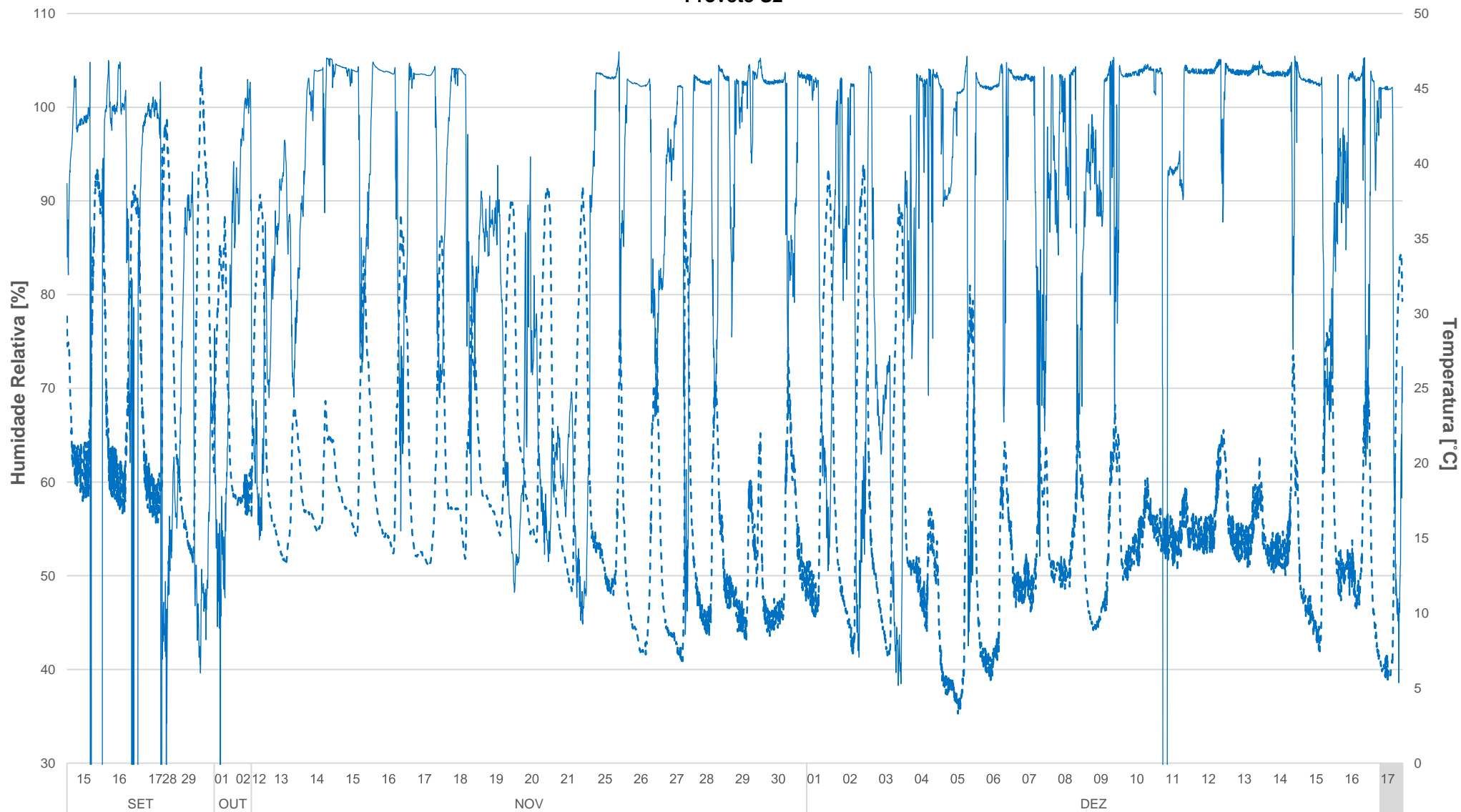
# A.6 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S2 do LNEC ao longo da campanha experimental

Provete S2



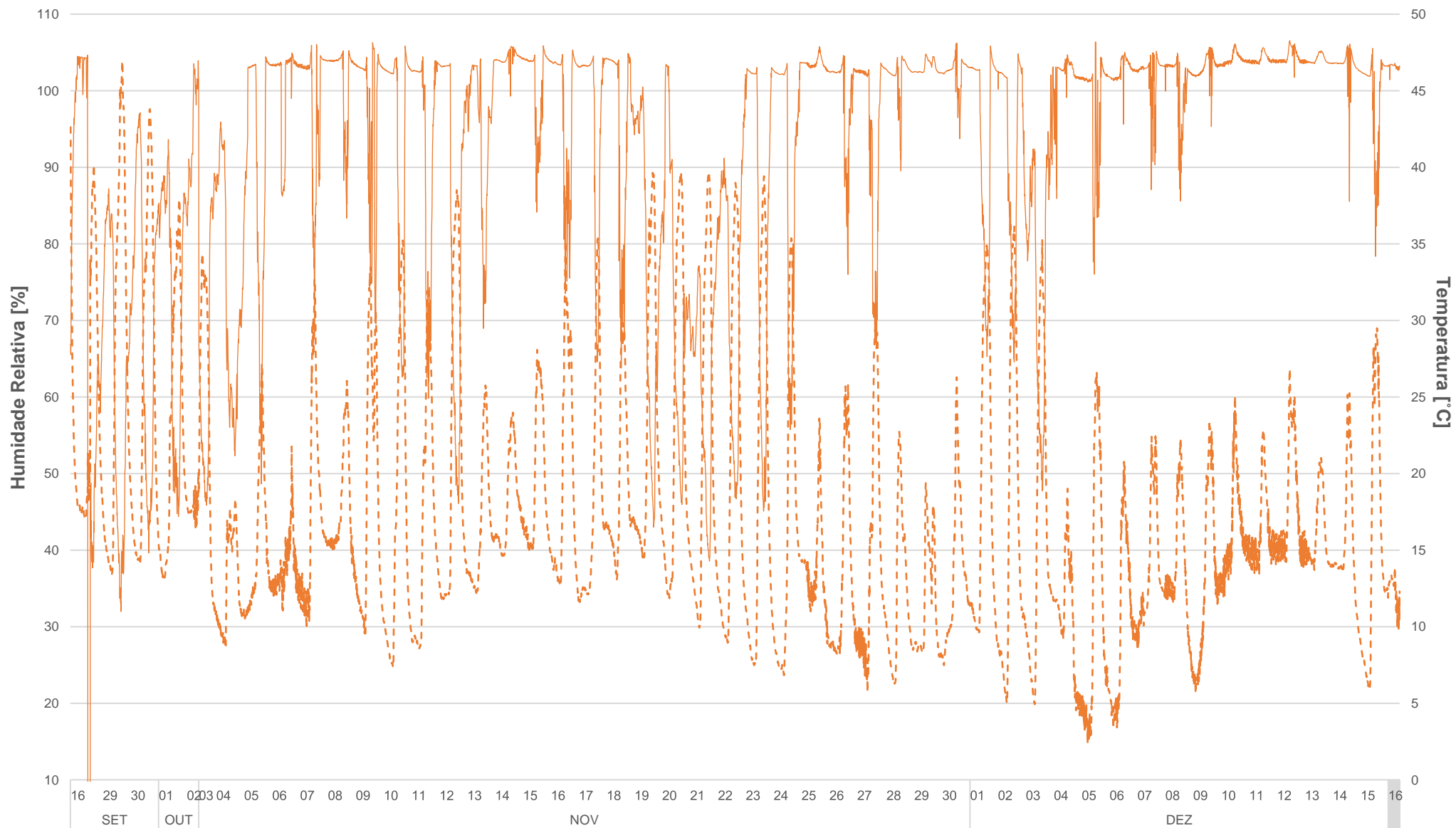
# A.7 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provetete S2 da FCT/UNL ao longo da campanha experimental

Provetete S2



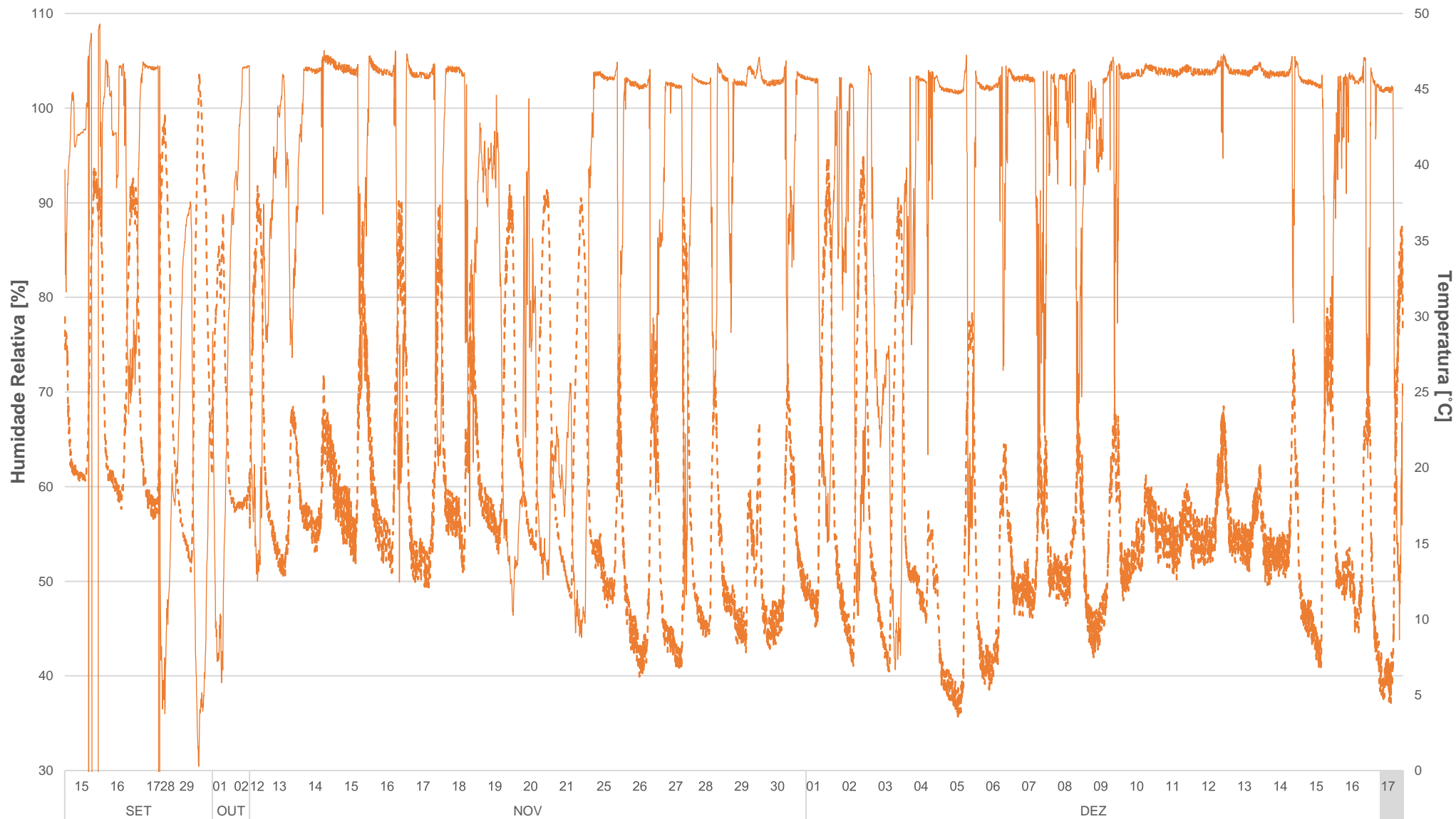
# A.8 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S4 do LNEC ao longo da campanha experimental

## Provete S4



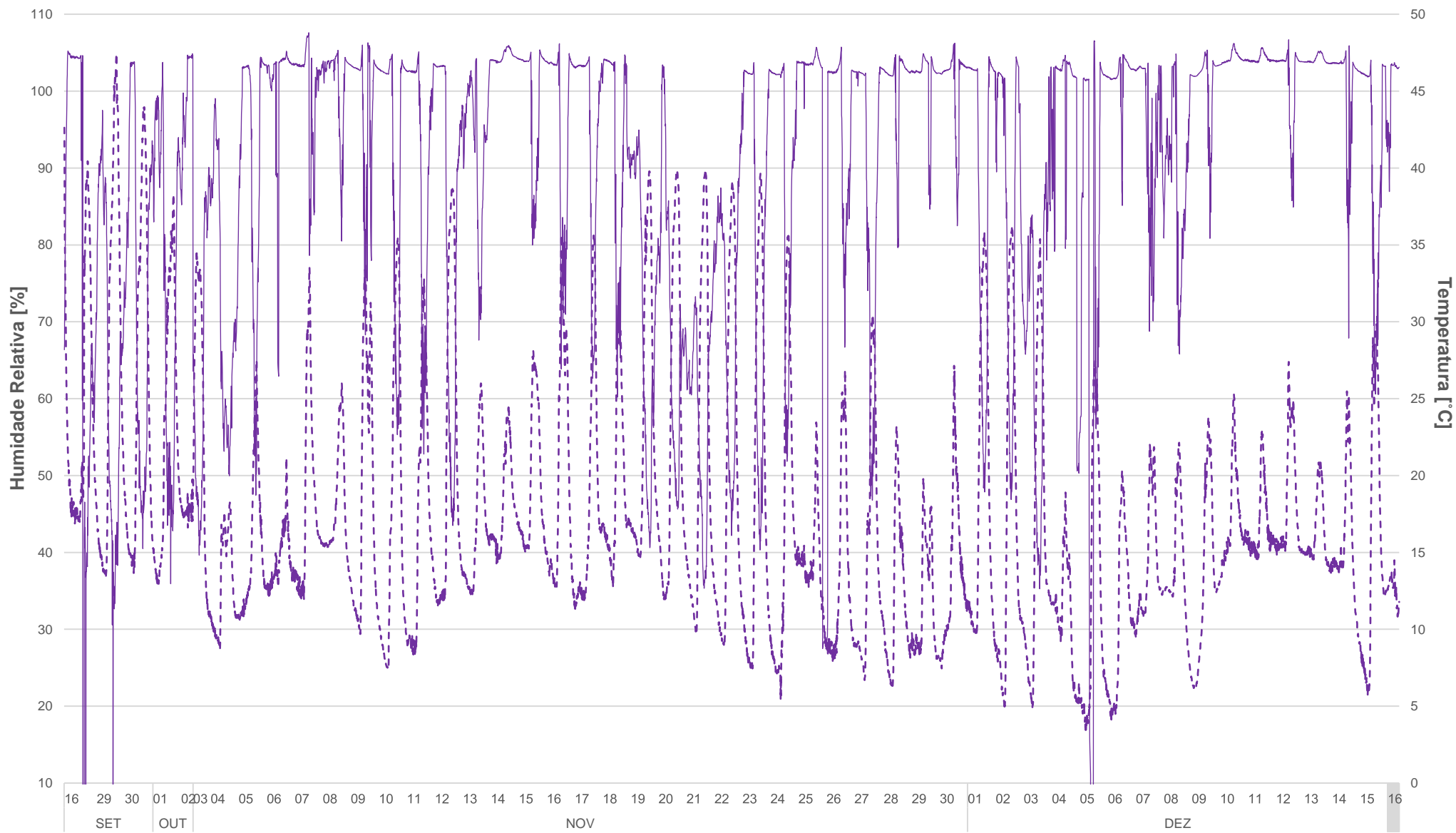
# A.9 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S4 da FCT/UNL ao longo da campanha experimental

Provete S4



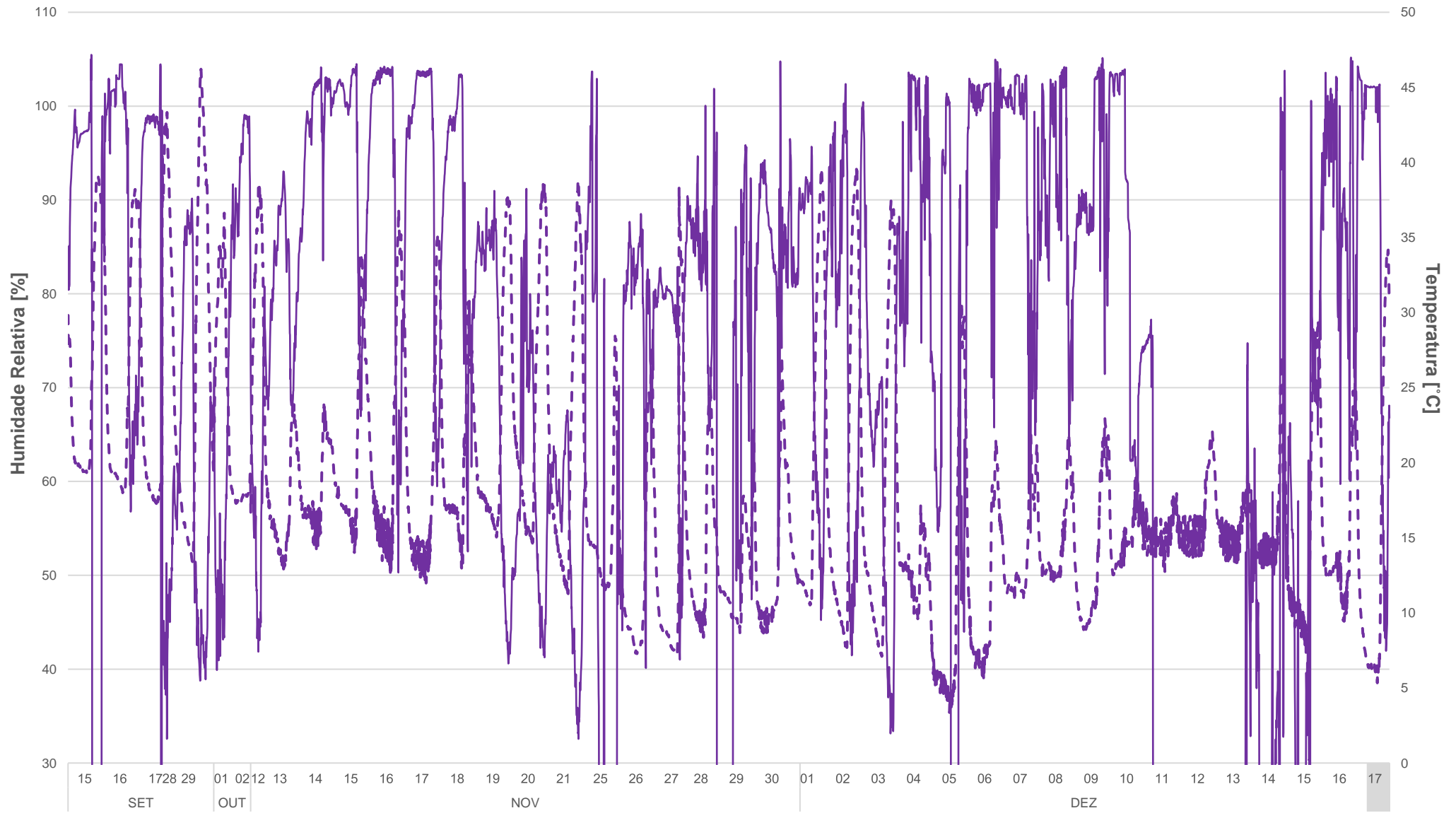
A.10 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S8 do LNEC ao longo da campanha experimental

Provete S8



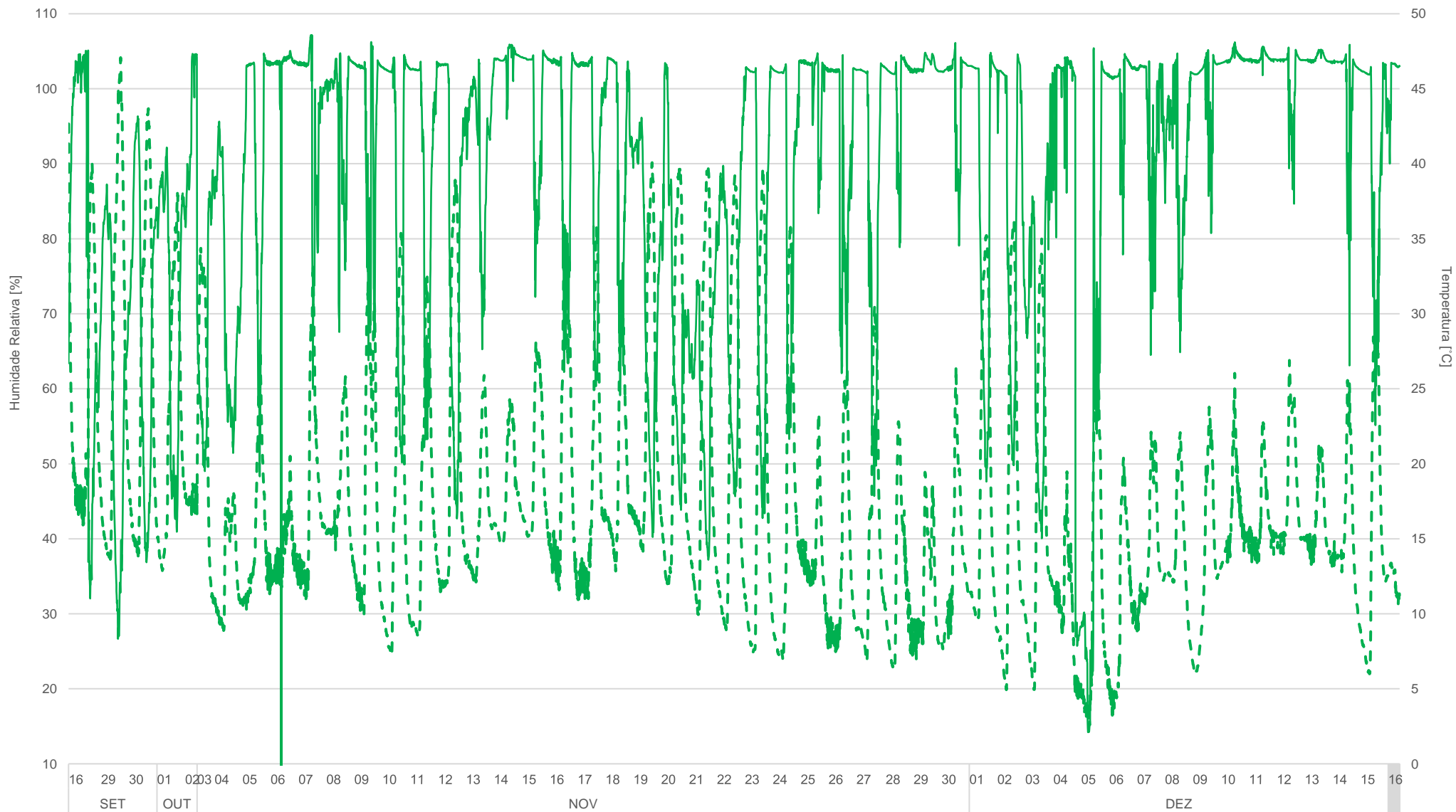
# A.11 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S8 da FCT/UNL ao longo da campanha experimental

Provete S8



# A.12 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S9 do LNEC ao longo da campanha experimental

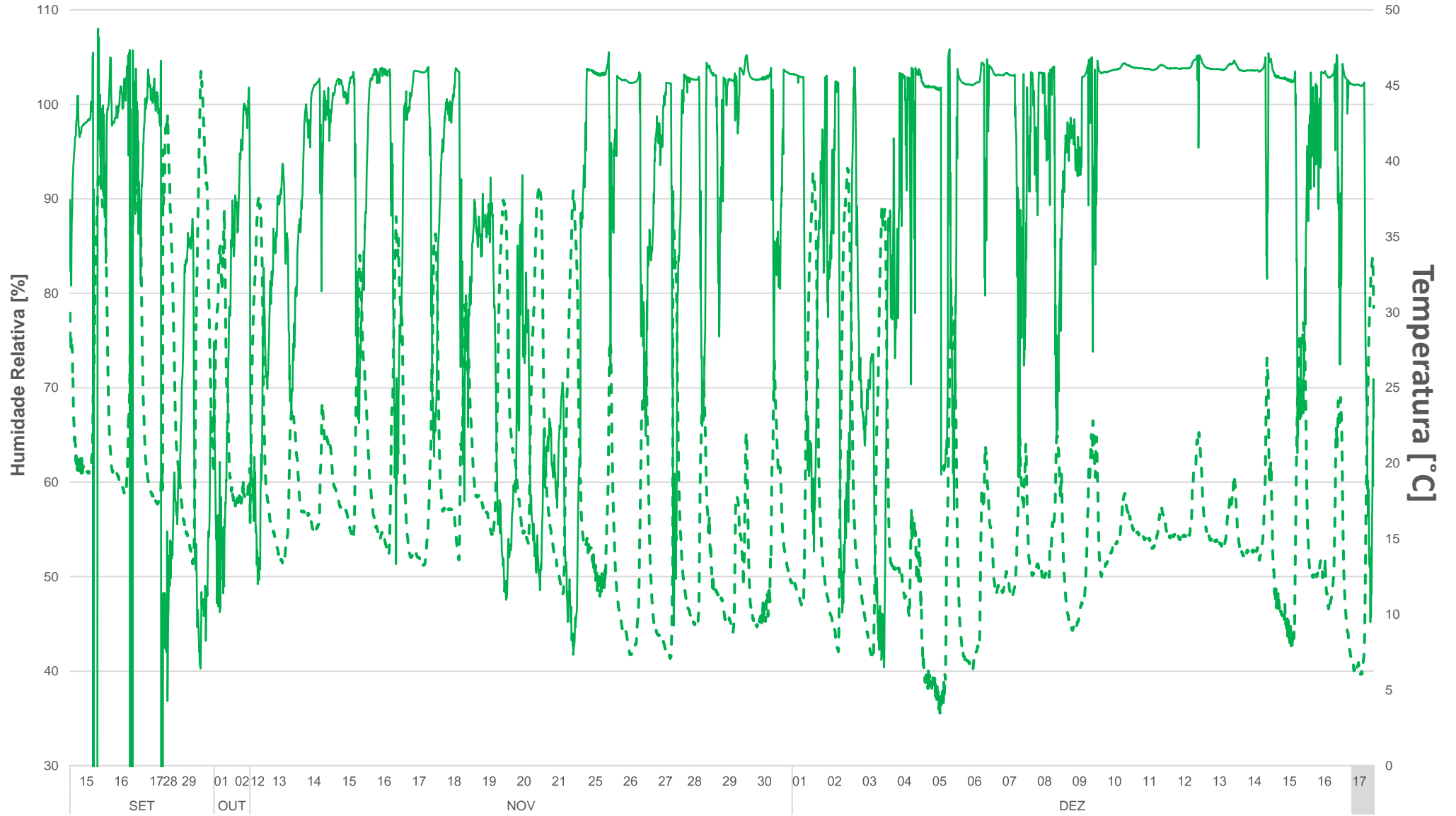
## Provete S9



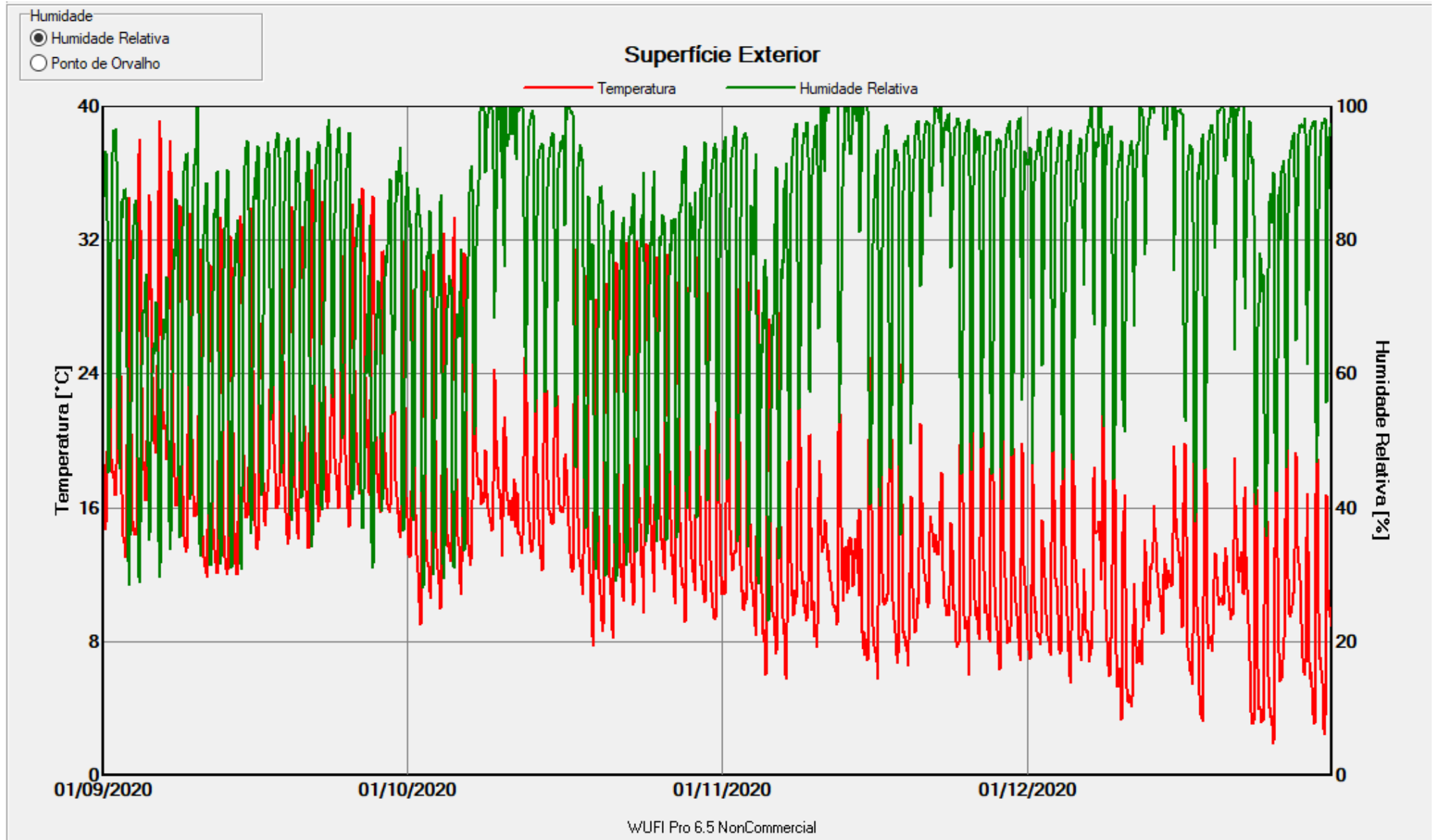


# A.13 – Humidade relativa e temperaturas registadas no Provete S9 da FCT/UNL ao longo da campanha experimental

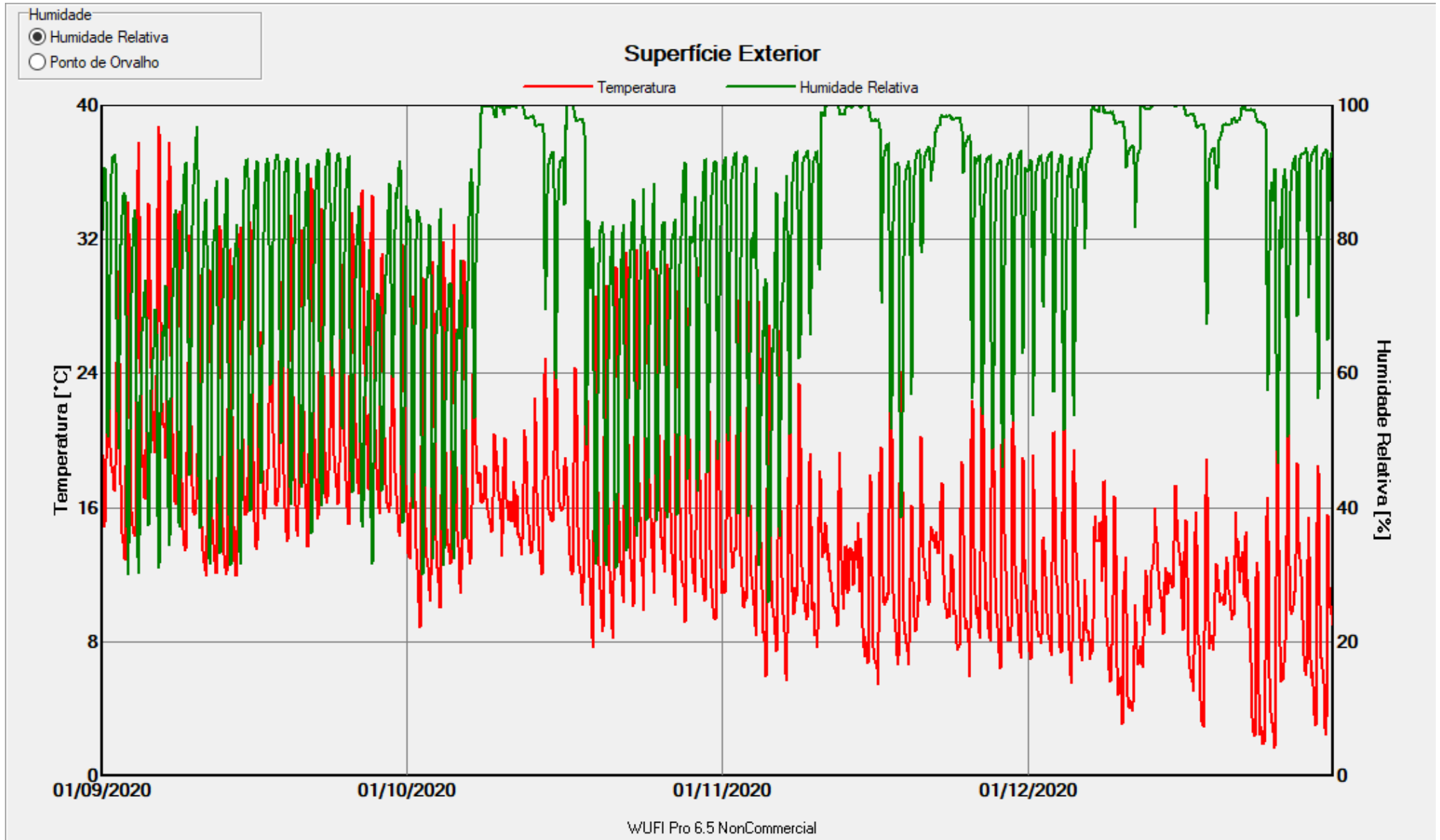
Provete S9



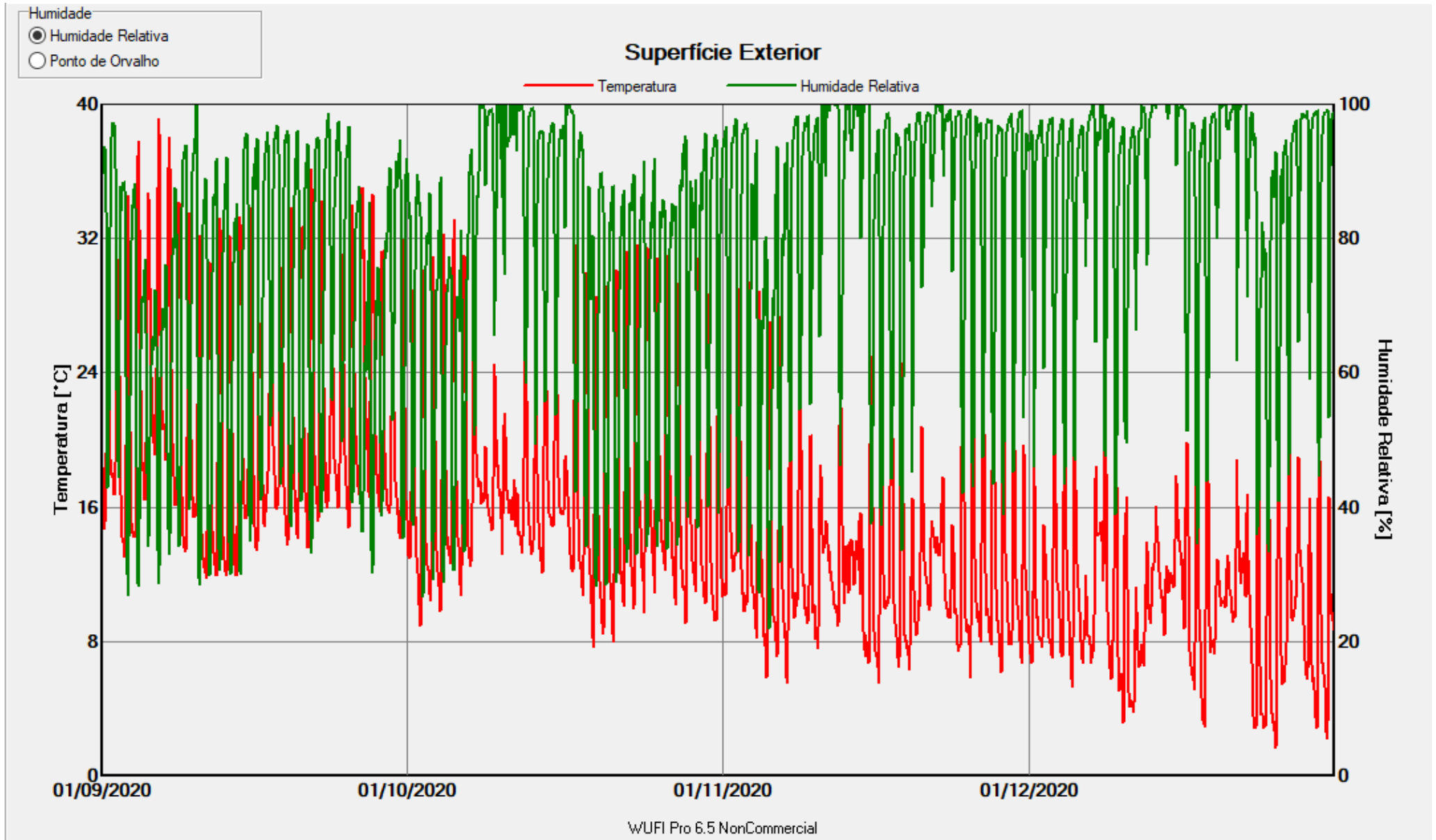
### A.14 – Simulação da humidade relativa e temperatura do Provete S2 no WUFI



## A.15 – Simulação da humidade relativa e temperatura do Provete S4 no WUFI



A.16 – Simulação da humidade relativa e temperatura do Provete S8 no WUFI



### A.17 – Simulação da humidade relativa e temperatura do Provete S9 no WUFI

