

INCORPORAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS EM SISTEMAS DE FACHADA.

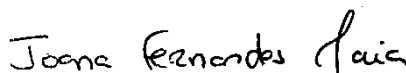
Estudo dos Efeitos nas Propriedades Superficiais e
no Desempenho Higrotérmico

RODRIGO MIGUEL DE OLIVEIRA PRAÇA

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



Orientadora: Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho



Coorientadora: Doutora Joana Fernandes Maia

Julho de 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

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

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

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

AGRADECIMENTOS

Para o sucesso desta dissertação que agora concluo, não posso deixar de agradecer às pessoas que me acompanharam em todo este processo longo e exigente. Como tal, agradeço a todos os intervenientes que de alguma forma se cruzaram comigo durante o curso de Engenharia Civil, assim como a todos os Professores que, cada um à sua maneira, me tornaram numa pessoa preparada para enfrentar o mercado de trabalho e a vida em geral. No entanto, quero agradecer particularmente aos seguintes intervenientes:

À minha orientadora, Professora Maria Helena Póvoas Corvacho, assim como, à minha coorientadora Doutora Joana Fernandes Maia, que mostraram total disponibilidade durante a elaboração deste trabalho. Agradeço também pelo apoio constante e aconselhamento das melhores práticas ao nível da realização de um trabalho desta natureza.

Agradeço à minha namorada, Catarina, por todo o apoio e estabilidade que me tem dado ao longo dos últimos 10 anos. Aos meus pais, Paulo e Leonor, por me concederem a oportunidade de prosseguir estudos superiores e pelo apoio incondicional. Aos meus Avós Luís, Lina, Rui e Albina, agradeço por todos os ensinamentos que me transmitiram e que contribuíram de forma significativa para o culminar desta etapa.

Finalmente agradeço a toda a minha família em geral, ao Tiago e a todos os outros amigos feitos ao longo do curso, ao meu primo João e à minha Tia Fátima.

O autor agradece à empresa *Saint-Gobain* Portugal pelo apoio disponibilizado na realização deste estudo.

Este trabalho foi financiado por: Projeto PTDC/ECI-CON/28766/2017 - POCI - 01-0145-FEDER 028766 - financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e com o apoio financeiro da FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) e pelo projeto Circular2B - 37_CALL#2 - Construção circular em edifícios modulares e energeticamente eficientes através do Programa Ambiente, Alterações Climáticas e Economia de Baixo Carbono no âmbito do Mecanismo Financeiro do Espaço Económico Europeu EEA Grants 2014-2021.

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



RESUMO

A durabilidade dos sistemas de fachada é um tema cada vez mais importante. Dado o crescimento da população mundial é necessário contruir cada vez mais e preservar as mesmas construções de forma que a eficácia das mesmas se mantenha ao longo do máximo tempo possível. Uma forma de incrementar a durabilidade dos sistemas de fachada é através do aumento da refletância solar das mesmas. As cores brancas já apresentam valores de refletância elevados, no entanto, no caso da escolha da cor de um edifício recair sobre um tom mais escuro ou mesmo preto, o panorama muda e a refletância solar diminui de forma significativa.

Assim, no âmbito de dois projetos, o *EnReflect* e o Circular2B, foram realizados vários ensaios de modo a dar resposta a esse problema. Foram desenvolvidas duas argamassas à base de resíduos de construção e demolição (RCD) de forma a reaproveitar outros materiais e assim promover o conceito de construção circular. Nestas argamassas foram testados três tipos de nanopartículas com dois pigmentos diferentes, com o objetivo de analisar o efeito que as nanopartículas provocam nas propriedades superficiais de sistemas de fachada. Assim, os sistemas testados foram um ETICS, do qual foram produzidas amostras para testar a influencia da incorporação das várias nanopartículas selecionadas, misturadas com um colorante, assim como, um painel do tipo SIP (*Structural Insulated Panel*) cujo núcleo será de argamassa, revestido por um novo reboco. Foi também produzida uma argamassa, com a mesma composição do núcleo do SIP, que irá funcionar como pára-sol de fachada ventilada do SIP.

A revisão do estado da arte está dividida em três subcapítulos. O primeiro descreve os sistemas de fachada ETICS e SIP, de forma a conhecer melhor as propriedades e características dos mesmos, assim como, a referência à durabilidade dos mesmos. O segundo subcapítulo faz uma referência às nanopartículas de forma a explicar o que são, as áreas de aplicação e casos em que as mesmas já foram incorporadas em estudos de outros colegas. O último subcapítulo é relativo às propriedades superficiais analisadas e os métodos de medição disponíveis para analisar as mesmas.

No capítulo dedicado à campanha experimental, é detalhada a produção das amostras, os procedimentos de ensaio e métodos de medição, assim como, a apresentação de resultados e discussão dos mesmos.

De seguida, segue o capítulo relativo ao ensaio de envelhecimento realizado, onde são referidos o procedimento de ensaio e os resultados do mesmo.

Finalmente, no último capítulo, é levada a cabo uma simulação numérica que permite observar o comportamento dos sistemas produzidos em vários cenários.

Assim, é possível verificar que neste estudo, a presença das nanopartículas com o colorante no ETICS não produziu um aumento da refletância, pelo contrário, diminuiu a mesma. Já no caso do reboco do painel SIP, as nanopartículas misturadas com tinta acrílica permitiram um ligeiro aumento da refletância solar, embora a validade dos resultados seja discutível devido à elevada fissuração verificada na própria tinta acrílica após a secagem. Na argamassa que serve de pára-sol para a fachada ventilada do SIP, houve um aumento da refletância (ainda que baixo). A emissividade diminuiu de forma geral no revestimento do ETICS e na argamassa do pára-sol da fachada ventilada do SIP com a incorporação das nanopartículas, e conseqüente diminuição do potencial de condensação relativamente à amostra sem nanopartículas.

PALAVRAS-CHAVE: Propriedades Superficiais, Refletância Solar, Nanopartículas, Durabilidade, Espetrofotómetro.

ABSTRACT

The durability of facade systems is an increasingly important topic. Given the growth of the world population, it is necessary to build more and more and preserve the same buildings in a way that the efficiency is preserved at the same time. One way to increase the durability of facade systems is by increasing their solar reflection. As the white colors already have unique solar reflectance values, however, in case the color of a building is chosen to be darker or even black, the picture changes scenario and we see a significant reflection decrease.

Thus, within the scope of two projects, EnReflect and Circular2B, several tests were carried out to respond to this problem. Two mortars based on construction and demolition waste (RCD) were developed to reuse other and thus promote the concept of circular construction. In these mortars, three types of nanoparticles were tested with two different pigments, to analyse the effect that nanoparticles have on the surface properties of facade systems. Thus, the systems tested were an ETICS, from which samples were produced to test the influence of the incorporation of the various selected nanoparticles, mixed with a coloring and, as well as a panel of the SIP type (Structural Insulated Panel) whose core will be of mortar, coated with a new thermal plaster. A mortar was also produced, with the same composition as the core of the SIP, which will work as a sunshade for the ventilated facade of the SIP.

The state-of-the-art review is divided into three subchapters. The first describes the ETICS and SIP facade systems, to better understand their characteristics and characteristics, such as properties, plus a reference to their durability. The second subchapter makes a reference to nanoparticles to explain what they are, as application areas that have already been incorporated in the cases of other colleagues. The subchapter deals with the latest properties and methods available for analysis.

In the chapter dedicated to the experimental campaign, the production of samples, the test procedures and measurement methods are detailed, as well as the presentation of results and their discussion.

Then follows the chapter on the ageing test carried out, where the test procedure and its results are mentioned.

Finally, in the last chapter, a numerical simulation is carried out that allows observing the behaviour of the systems produced in different scenarios. Thus, it is possible to verify that in this study, the presence of nanoparticles with the dye in ETICS did not produce an increase in reflectance, on the contrary, it decreased. In the case of the plaster of the SIP panel, the nanoparticles mixed with acrylic paint allowed a slight increase in the reflectance of its surface. In the mortar that serves as a sunshade for the ventilated facade of the SIP, there was an increase in reflectance (even if low), however the emissivity decreased considerably, which caused a considerable decrease in the condensation potential compared to the sample without nanoparticles.

Thus, it is possible to verify that in this study, the presence of the nanoparticles with the dye in the ETICS did not produce an increase in reflectance, on the contrary, it decreased. In the case of the plaster of the SIP panel, the nanoparticles mixed with acrylic paint allowed a slight increase in the reflectance of its solar surface, although the validity of the results is debatable due to the high cracking seen in the acrylic paint itself after drying. In the mortar that serves as a sunshade for the ventilated facade of the SIP, there was an increase in reflectance (albeit low). The emissivity generally decreased in the ETICS coating and in the mortar of the sunshade of the ventilated facade of the SIP with the incorporation of nanoparticles, and consequent decrease in the condensation potential compared to the sample without nanoparticles.

KEYWORDS: Surface Properties, Solar Reflectance, Nanoparticles, Durability, Spectrophotometer.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO	3
2. ESTADO DE ARTE	5
2.1. SISTEMAS DE FACHADA COM ISOLAMENTO TÉRMICO	5
2.1.1. DESCRIÇÃO	5
2.1.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS	6
2.1.3. APLICAÇÃO DOS SISTEMAS	9
2.1.4. DURABILIDADE	12
2.2. NANOPARTÍCULAS APLICADAS A MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	14
2.2.1. ENQUADRAMENTO	14
2.2.2. INCORPORAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS EM SISTEMA ETICS E SIP	15
2.3. PROPRIEDADES SUPERFICIAIS	17
2.3.1. REFLETÂNCIA SOLAR	17
2.3.2. ALTERAÇÃO DA COR	21
2.3.3. EMISSIVIDADE	24
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL – MATERIAIS E PROCEDIMENTOS	29
3.1. MATERIAIS	29
3.1.1. MATERIAIS CONSTITUINTES DAS AMOSTRAS	29
3.1.1.1 ETICS	29
3.1.1.2. SIP	31
3.1.2. PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS	33
3.1.2.1 ETICS	33

3.1.2.2. SIP	42
3.2. MÉTODOS DE MEDIÇÃO	53
3.2.1. MEDIÇÃO DA REFLETÂNCIA SOLAR COM ESPETROFOTÓMETRO	53
3.2.1.1. ENQUADRAMENTO	53
3.2.1.2 INFRAESTRUTURA EXPERIMENTAL	54
3.2.1.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO	56
3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DA COR COM ESPETROFOTÓMETRO	58
3.2.2.1. ENQUADRAMENTO	58
3.2.2.2 INFRAESTRUTURA EXPERIMENTAL	58
3.2.2.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO	59
3.2.3. MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE COM O EMISSÓMETRO	60
3.2.3.1. ENQUADRAMENTO	60
3.2.3.2 INFRAESTRUTURA EXPERIMENTAL	60
3.2.3.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO	61
4. Propriedades Superficiais: Resultados e Discussão ..	63
4.1. ENQUADRAMENTO	63
4.2. REFLETÂNCIA SOLAR	63
4.2.1. CAMADA DE ACABAMENTO DO ETICS	63
4.2.2. CAMADA DE ACABAMENTO DO SIP	70
4.3. PROPRIEDADES DA COR.....	74
4.3.1. CAMADA DE ACABAMENTO DO ETICS	74
4.3.2. CAMADA DE ACABAMENTO DO SIP.....	77
4.4. EMISSIVIDADE	78
4.5. SÍNTESE DOS RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL	80
5. AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE – ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO	83
5.1. ENQUADRAMENTO	83
5.2. INFRAESTRUTURA EXPERIMENTAL	83
5.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO	84
5.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
6. SIMULAÇÃO NUMÉRICA	91

6.1. ENQUADRAMENTO	91
6.2. INFLUÊNCIA DO SUPORTE NA TEMPERATURA SUPERFICIAL EXTERIOR DOS SISTEMAS DE FACHADA	93
6.3. EFEITO DAS NANOPARTÍCULAS NAS PROPRIEDADES SUPERFICIAIS	96
6.4. POTENCIAL DE CONDENSAÇÃO	101
 7. CONCLUSÃO	 107
7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SÍNTESE CRÍTICA	107
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	109
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema ETICS: 1 – Adesivo; 2 - Placa de isolamento térmico; 3 - Acessórios para fixação mecânica; 4 – Camada de base; 5 – Camada de fibra de vidro; 6 – Camada de acabamento (Systems, 2021)	6
Figura 2 - Painei SIP (Association, 2022)	6
Figura 3 - Espectrofotômetro FLAME (UV-VIS).....	18
Figura 4 - Espectrofotômetro FLAME NIR	19
Figura 5 - Sistema CIELab	22
Figura 6 - Relação entre emissividade espectral irradiante.....	26
Figura 7 - Esquema do SIP com reboco térmico exterior (à esquerda); Esquema do SIP com pára-sol de fachada ventilada (à direita)	33
Figura 8 - Setup de produção das amostras.....	34
Figura 9 – Balança tarada após colocação da placa de acrílico (à esquerda); Pesagem das nanopartículas (ao centro); Pesagem da tinta acrílica ou colorante (à direita)	35
Figura 10 - Amostra pronta para secagem	36
Figura 11 - Amostras de SiO ₂ com colorante em processo de secagem	36
Figura 12 - Amostras de TiO ₂ R secas.....	36
Figura 13 - Amostras de SiO ₂ , ZnO e TiO ₂ R com tinta acrílica em processo de secagem	37
Figura 14 - Aspeto de uma placa de ETICS após corte e sem camada de acabamento	39
Figura 15 - Aspeto do ETICS com revestimento orgânico barrado	39
Figura 16 - Aspeto final da mistura das nanopartículas com o colorante e o revestimento orgânico ..	40
Figura 17 - Amostra de ETICS produzidas	42
Figura 18 - Mistura dos constituintes do núcleo do SIP.....	44
Figura 19 - Enchimento dos moldes que vão dar origem às amostras do núcleo do SIP para posteriores ensaios dos efeitos das nanopartículas nas propriedades superficiais e no comportamento higrotérmico	44
Figura 20 - Aplicação da solução de primário na base dos moldes a qual é constituída por uma placa de OSB	45
Figura 21 - Colocação e espalhamento da argamassa na placa de OSB (à esquerda); Aspeto final dos moldes com argamassa para reboco exterior do SIP para iniciar processo de cura (à direita)	45
Figura 22 - Amostras do núcleo e reboco exterior do SIP na estufa	46
Figura 23 – Identificação dos materiais e equipamentos utilizados para a produção dos revestimentos	47
Figura 24 - Pesagem da argamassa do núcleo do SIP/painel de fachada ventilada sem revestimento	47
Figura 25 - Amostra Ref. PAD com tinta acrílica aplicada	48

Figura 26 - Pesagem das nanopartículas	49
Figura 27 - Pesagem da tinta acrílica	49
Figura 28 - Aspeto da mistura das nanopartículas com a tinta acrílica	50
Figura 29 - Aspeto final da amostra M1 com o revestimento aplicado	50
Figura 30 - Reboco exterior do SIP com fita adesiva a dividir em 4 secções	51
Figura 31 - Secção relativa à mostra Ref. PAD no reboco exterior do SIP com revestimento aplicado	52
Figura 32 - Aspeto final da amostra de reboco exterior do SIP com todos os revestimentos aplicados; Canto superior esquerdo (PAD); Canto superior direito (M1); Canto inferior esquerdo (M3); Canto inferior direito (M2)	53
Figura 33 – Espectrofotómetro FLAME (à esquerda); Espectrofotómetro FLAME-NIR (à direita)	54
Figura 34 - Setup experimental do espectrofotómetro	56
Figura 35 - Fluxograma para configurar modo de exportação das medições (inserção do “file writer”)	59
Figura 36 - Setup do ensaio de emissividade	60
Figura 37 - Emissómetro posicionado na placa prateada para efeitos de calibração	62
Figura 38 - Medição da emissividade em curso	62
Figura 39 - Resultados das medições da refletância nas amostras de ZnO com colorante	64
Figura 40 - Média das refletâncias unitárias e NIR por dimensão da nanopartícula (ZnO com colorante)	65
Figura 41 - Refletância para amostras de TiO ₂ R com colorante	66
Figura 42 - Comparativo entre TiO ₂ R e ZnO (30 nm) com colorante	67
Figura 43 - Refletância para amostras de SiO ₂ com colorante	68
Figura 44 - Comparação das refletância unitária e NIR para as diferentes percentagens de nanopartículas	69
Figura 45 - Comparativo da refletância nas amostras de ETICS produzidas	70
Figura 46 - Resultados da refletância para as amostras com tinta acrílica	71
Figura 47 - Refletância média para cada tipo de nanopartícula para tinta acrílica e colorante	72
Figura 48 - Refletância unitária e NIR nas duas argamassas do SIP	73
Figura 49 - Comparação da refletância entre nanopartículas para os diferentes suportes	74
Figura 50 - Alteração da cor nas amostras de TiO ₂ R com suporte de acrílico com o colorante	75
Figura 51 - Alteração da cor nas amostras de SiO ₂ com suporte de acrílico com o colorante	75
Figura 52 - Alteração da cor nas amostras de ZnO com suporte de acrílico com o colorante	76
Figura 53 - Variação da cor nas amostras de ETICS	77

Figura 54 - Alteração da cor nas amostras de TiO ₂ R, SiO ₂ e ZnO com suporte de acrílico com tinta acrílica	77
Figura 55 - Alteração da cor nos sistemas SIP com tinta acrílica.....	78
Figura 56 - Comparação da emissividade média entre sistemas	80
Figura 57 – Lâmpada de Infravermelhos (à esquerda); Câmara climática (à direita)	84
Figura 58 - ETICS em posição vertical (à esquerda); Suporte da lâmpada de infravermelhos (à direita)	84
Figura 59 - Lâmpada ligada a aproximadamente 1,60 metros de distância do ETICS	85
Figura 60 - ETICS colocado na câmara climática.....	85
Figura 61 - Comparação da refletância total e NIR no ETICS sem e com envelhecimento.....	86
Figura 62 - Incremento de refletância após o ensaio de envelhecimento	87
Figura 63 - Aspeto das amostras após o ensaio de envelhecimento	87
Figura 64 - Variação da alteração da cor, amarelecimento e brilho antes e após envelhecimento	88
Figura 65 - Amostra M3 antes do envelhecimento (à esquerda); Amostra M3 após o envelhecimento (à direita).....	88
Figura 66 - ETICS (em cima, à esquerda); SIP EPS (em cima, à direita); SIP MORTAR (em baixo) .	92
Figura 67 - Tse no ETICS (à esquerda) e no SIP EPS (à direita) com revestimento orgânico e absorção solar igual a 0,80	95
Figura 68 - Tse no SIP EPS (à esquerda) e SIP MORTAR (à direita) com tinta acrílica e absorção solar igual a 0,58	96
Figura 69 - Tse na amostra ETICS, ETICS1 e ETICS 2 para orientação norte (em cima à esquerda); Tse na amostra ETICS, ETICS1 e ETICS2 para orientação oeste (à direita)	98
Figura 70 - Tse na amostra ETICS, ETICS1 e ETICS2 (à esquerda); Tse na amostra SIP SIP MORTAR, SIP MORTAR1 e MORTAR 2 (à direita)	98
Figura 71 - Variação da Tse nos três ETICS para a semana com radiação solar mais intensa durante o ano para a orientação oeste.....	98
Figura 72 - Variação da Tse nas três amostras SIP para a semana com radiação solar mais intensa durante o ano para a orientação oeste	98
Figura 73 - Potencial de condensação para ETICS (esquerda) e SIP EPS (direita).....	98
Figura 74 - Potencial de condensação para SIP EPS (esquerda) e SIP MORTAR (direita)	98
Figura 75 - Potencial de condensação para ETICS 1 (esquerda); ETICS 2 (direita); ETICS sem nanopartículas (em baixo).....	98
Figura 76 - Variação da Tse nos três ETICS na semana mais fria do ano para a orientação norte	98
Figura 77 - Potencial de condensação para SIP MORTAR 1 (esquerda); SIP MORTAR 2 (direita); SIP MORTAR (em baixo)	98
Figura 78 - Variação da Tse nos três SIP na semana mais fria do ano para a orientação norte	98

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Processo de aplicação do ETICS (APFAC, 2015).....	9
Quadro 2 - Processo de aplicação de SIP's (Title24consultants, 2012)	11
Quadro 3 - Compostos mais utilizados para "cool pigments" e respectivas propriedades (R. C. Veloso et al., 2021).....	16
Quadro 4 - Perceptividade da variação total da cor (Cozza et al. (2015); Ramos et al. (2020a)	23
Quadro 5 - Propriedades weberplast decor M/F (Saint-Gobain, 2021)	29
Quadro 6 - Dimensões das nanopartículas utilizadas no ETICS	30
Quadro 7 - Características gerais do colorante	30
Quadro 8 - Características gerais da tinta (CIN, 2021).....	32
Quadro 9 - Nanopartículas incorporadas na argamassa para o SIP	32
Quadro 10 - Materiais e equipamentos necessários à produção das amostras.....	34
Quadro 11 - Constituição das amostras de SiO ₂ com colorante.....	37
Quadro 12 - Constituintes das amostras de TiO ₂ R com colorante	38
Quadro 13 - Pesos dos constituintes da camada de acabamento do ETICS.....	40
Quadro 14 - Constituição das amostras de referência para ETICS.....	41
Quadro 15 - Constituição das amostras de ETICS com nanopartículas e revestimento orgânico.....	41
Quadro 16 - Composição das amostras de ZnO, SiO ₂ e TiO ₂ R com tinta acrílica.....	42
Quadro 17 - Características do processo de cura das amostras do núcleo do SIP	43
Quadro 18 - Materiais e equipamentos utilizados na produção dos revestimentos	46
Quadro 19 - Resultados das pesagens na amostra Ref. PAD	48
Quadro 20 - Determinação da quantidade de nanopartículas a incorporar em cada amostra.....	48
Quadro 21 - Composição dos revestimentos aplicados na argamassa do núcleo do SIP/painel de fachada ventilada	51
Quadro 22 - Determinação do peso de tinta acrílica aplicada	52
Quadro 23 - Determinação da quantidade de nanopartículas a incorporar em cada amostra.....	52
Quadro 24 - Composição dos revestimentos aplicados no reboco exterior no SIP	53
Quadro 25 - Especificações dos espectrofotômetros	54

Quadro 26 - Especificações da fonte de radiação	55
Quadro 27 - Especificações da esfera de integração	55
Quadro 28 - Setup experimental do ensaio de emissividade	60
Quadro 29 - Amostras objeto do ensaio de emissividade	61
Quadro 30 - Refletância média para as 3 dimensões de SiO ₂ com colorante	68
Quadro 31 - Seleção de nanopartículas para testar com tinta acrílica	70
Quadro 32 - Refletâncias médias para amostras com diferentes % de nanopartículas	72
Quadro 33 - Alteração da cor e amarelecimento médios para cada dimensão das amostras de ZnO	76
Quadro 34 - Resultados do ensaio de emissividade nos SIP e no ETICS	79
Quadro 35 - Emissividade após ciclos de envelhecimento	89
Quadro 36 – Características dos modelos dos sistemas de fachada introduzidos no WUFI	92
Quadro 37 - Propriedades das camadas de cada sistema de fachada	93
Quadro 38 - Parâmetros dos cenários analisados	94
Quadro 39 - Cenários de simulação para o efeito das nanopartículas no ETICS e SIP MORTAR	97

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FCUP – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

UTAD – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

APFAC – Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS

ASTM – American Society for Testing Materials

ETICS – External Thermal Insulation Composite System

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

EPS – Expanded Polystyrene Insulation

WUFI – Wärme Und Feuchte Instationär

OSB – Oriented Strand Board

NIR – Near-Infrared Radiation

UV – Radiação Ultravioleta

VIS – Radiação Visível

SRI – Solar Reflex Index

NRP – NIR Reflective Pigments

FV – Fachada Ventilada

PC – Potencial de Condensação

PAD – Amostra Padrão

SIPA – Structural Insulated Panel Association

SIP - Structural Insulated Panel

EPI – Equipamento de Proteção Individual

T – Temperatura [°C]

SiO₂ – Dióxido de Silício

TiO₂ R – Dióxido de Titânio

ZnO – Óxido de Zinco

YI* - Índice de Amarelecimento

ΔE – Alteração da Cor

L* - Brilho da Cor

ρ – Refletância

ρ_{un} – Refletância Total

ρ_{NIR} – Refletância NIR

α – Absortância

τ – Transmitância

ε – Emissividade

g – Gramas

Mpa – Megapascal

Pa - Pascal

Tse – Temperatura Superficial Exterior

TCE – Temperatura do Clima Exterior

Sd – Permeabilidade ao Vapor de Água [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$]

λ – Comprimento de Onda [nm]

nm – Nanómetros

U – Coeficiente de Transmissão Térmica [$\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$]

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

O estudo desta dissertação está enquadrado no âmbito de dois projetos. Um deles relativo ao desenvolvimento de revestimentos com incorporação de nanopartículas para aplicação em ETICS, projeto este designado de *EnReflect* – Sistemas da envolvente de elevada refletância solar com inclusão de nanopartículas.

O foco principal do projeto é o desenvolvimento de novos nano-materiais, ecológicos, com refletância infravermelha mais elevada que serão incorporados como revestimento num ETICS tradicional. Os materiais/sistemas testados neste projeto serão apenas o ETICS e rebocos térmicos, embora estes nano-materiais possam ser aplicados em mais sistemas. Com o aumento da refletância solar, proveniente da incorporação de nanopartículas, a durabilidade dos sistemas é otimizada e assim os custos de manutenção/reparação são consequentemente reduzidos. O ETICS será revestido com um revestimento orgânico e um colorante nos quais serão incorporadas as nanopartículas.

O outro projeto alvo desta dissertação é o Circular2B, que tem como foco o desenvolvimento de um novo sistema SIP – *Structural Insulated Panels* com materiais ecológicos e ao mesmo tempo duráveis e mais eficientes relativamente ao SIP tradicional.

No âmbito do projeto Circular2B, serão produzidas argamassas constituídas por resíduos de construção e demolição (RCD) e também por subprodutos de várias indústrias de modo a implementar um sistema de construção circular que promove a reutilização e a transformação de vários materiais que anteriormente não seriam aproveitados e assim ganham uma nova função.

Estas argamassas serão produzidas em laboratório na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em articulação com a Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD). Estas serão alvo de estudos para verificar se apresentam vantagens suficientes para duas funções distintas. Estas argamassas serão testadas para o núcleo do SIP, como painel de fachada ventilada aplicado a um SIP e, com diferente formulação, como reboco exterior do SIP.

No projeto *EnReflect* e no Circular2B, serão testadas várias nanopartículas com várias dimensões de forma a perceber qual a melhor nanopartícula, qual a melhor dimensão da mesma e também qual a melhor percentagem de nanopartículas a incorporar.

De forma a realizar uma análise mais abrangente serão levadas a cabo simulações no WUFI – *Wärme Und Feuchte Instationär* (traduzido significa algo como “programa que simula a transferência de calor e humidade em regime variável”). Com este software é possível caracterizar os sistemas de fachada alvo

de estudo neste projeto de modo a simular o comportamento higrotérmico dos mesmos para várias orientações, cidades, níveis de absorção solar e emissividade.

Com auxílio deste software será possível também replicar os sistemas produzidos em laboratório com as nanopartículas incorporadas e verificar se os mesmos apresentam variações significativas ou se o efeito fica aquém do esperado.

O ETICS, acrónimo para *External Thermal Insulation Composite System*, é um sistema desenvolvido na Suécia por volta do ano de 1940 que revolucionou o setor da construção, onde era composto por lã mineral que funcionava como um isolante térmico que apresentava como revestimento argamassa de cal e cimento. Mais tarde, devido ao sucesso do sistema, países com climas tradicionalmente frios que estavam necessitados de uma solução barata e duradoura com o objetivo de reduzir as perdas de calor por transmissão através das paredes exteriores dos edifícios, foram sucessivamente adotando essa solução. Durante os anos 70, foi quando se deu a época de maior procura por este tipo de sistemas, o que levou a um aumento nos projetos de investigação na área do estudo das patologias do ETICS de forma a otimizar cada vez mais este sistema (APFAC, 2014).

A degradação dos edifícios, está naturalmente associada a custos de manutenção e reabilitação, na maior parte das vezes elevados, o que leva a um aumento da realização de estudos e projetos de investigação que ajudem a desenvolver sistemas, produtos ou mecanismos que promovam o incremento da durabilidade dos sistemas de fachadas dos edifícios. O ETICS ainda é considerado uma solução relativamente recente que continua a ser bastante requisitada por todo o setor da construção devido às suas vantagens como eficácia e custo de aplicação e manutenção (Tavares, Silva, & de Brito, 2020).

As amostras de ETICS produzidas, com e sem nanopartículas, serão alvo de uma simulação de envelhecimento acelerado de modo a perceber a reação das mesmas quando submetidas a desgaste intenso.

Relativamente ao SIP, este começou a ser aplicado na construção de edifícios na década de 1960 (Amran et al., 2020). O sistema é composto por um núcleo, usualmente EPS (poliestireno expandido), que funciona como isolante térmico que está envolvido por dois painéis, tradicionalmente, de OSB (*Oriented-Strand Board*).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação consiste na avaliação do impacto da incorporação de nanopartículas no revestimento de dois sistemas de fachada, respetivamente, o sistema ETICS e o sistema SIP. Esta avaliação será feita através da medição da refletância solar para as regiões ultravioleta, visível e no infravermelho próximo com um espectrofotómetro. O mesmo equipamento servirá também para fornecer os dados necessários à caracterização da cor das amostras para analisar a variação da mesma. Por fim, foi também medida a emissividade das várias amostras produzidas com recurso ao emissómetro.

Para chegar à conclusão final, as etapas a percorrer foram as seguintes:

- Conhecer de forma detalhada os sistemas em estudo, nomeadamente o ETICS e o SIP;
- Conhecer os efeitos da incorporação de nanopartículas no revestimento dos sistemas de fachada referidos em estudos realizados por outros autores;
- Familiarização com as propriedades superficiais a estudar, nomeadamente, a refletância solar, sistema CIELab, que funciona como método para caracterizar as alterações da cor nas amostras em estudo e por fim a emissividade;
- Implementar procedimentos de ensaio para a refletância solar em ambiente laboratorial;

- Implementar procedimentos de ensaio para a medição da emissividade das amostras em ambiente laboratorial;
- Implementar procedimento experimental para o envelhecimento acelerado;
- Executar simulação numérica no WUFI com vista à análise dos sistemas produzidos em diferentes cenários.
- Avaliar o efeito das nanopartículas na absorção solar, emissividade e variação das características da cor.

1.3 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO

Esta dissertação está dividida da seguinte forma:

- No Capítulo 1 estão referidos os objetivos e enquadramento geral do estudo realizado e uma breve apresentação dos capítulos que se seguem;
- No Capítulo 2 está presente o estado da arte onde estão mencionadas variadas dissertações e artigos que permitem conhecer as várias temáticas em estudo na presente dissertação relativamente aos sistemas de fachada com isolamento térmico, à incorporação de nanopartículas em materiais de construção e por fim, permitem conhecer o que são as propriedades superficiais em foco, nomeadamente, a refletância solar, a variação da cor e a emissividade;
- O Capítulo 3 começa por detalhar os materiais e equipamentos necessários para a produção das várias amostras, assim como, a metodologia e infraestrutura experimental implementada e necessária para a obtenção dos dados necessários à análise das alterações das propriedades superficiais e do comportamento higratérmico das amostras após a incorporação das nanopartículas.
- No Capítulo 4 estão apresentados todos os resultados obtidos experimentalmente nos ensaios de refletância solar, caracterização da cor e emissividade para todas as amostras produzidas e detalhadas no capítulo anterior.
- No Capítulo 5 está apresentada uma campanha experimental adaptada de forma a simular um envelhecimento acelerado nas amostras de ETICS produzidas para perceber o efeito das nanopartículas incorporadas no revestimento do mesmo e assim verificar quais as consequências na durabilidade do sistema;
- No Capítulo 6, está presente uma simulação com recurso ao *software* WUFI com a finalidade de observar o comportamento higratérmico das amostras produzidas para vários cenários, nomeadamente, para várias orientações, climas, níveis de absorção solar assim como para analisar o efeito no potencial de condensação nas mesmas;
- O Capítulo 7 é referente às conclusões retiradas do estudo realizado nesta dissertação e na inspiração que esta consiga promover para novos trabalhos de investigação.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. SISTEMAS DE FACHADA COM ISOLAMENTO TÉRMICO

2.1.1. DESCRIÇÃO

Sustentabilidade é uma palavra-chave transversal nas mais variadas áreas de estudo e indústrias, na engenharia civil tem, cada vez mais, um peso considerável nas ações dos agentes decisores assim como na investigação académica em busca de novos sistemas e materiais. Uma forma de contribuir para a sustentabilidade de um edifício é através das fachadas do mesmo com um incremento da refletância solar, que tem por consequência a diminuição da temperatura superficial das fachadas que contribui para uma maior durabilidade do revestimento do mesmo.

A construção civil é por tradição das indústrias que mais peso tem relativamente ao PIB de qualquer país, é dos setores que emprega e que necessita de mais mão-de-obra. Consequentemente, este setor com elevada dimensão é responsável por 40% da energia consumida na União Europeia, o setor apresenta também como encargo cerca de 36% das emissões de efeito estufa (Energy, 2016; Parracha et al., 2022; Union, 2018). Para tornar os edifícios mais sustentáveis e eficientes energeticamente foi desenvolvido e implementado um sistema de isolamento térmico de paredes exteriores, já em uso corrente há vários anos. Este sistema é designado por *External Thermal Insulation Composite System*, correntemente abreviado pela sigla ETICS.

O ETICS é composto por variadas camadas, sendo as principais uma camada de isolante térmico (EPS e lã mineral os mais utilizados), camada de base que possui malha de fibra de vidro incorporada e por fim, a camada de acabamento (Malanho & do Rosário Veiga, 2020). A Figura 1 apresenta as várias camadas possíveis constituintes do sistema, assim como acessórios e outros materiais importantes para a ligação entre todas as camadas (Systems, 2021).

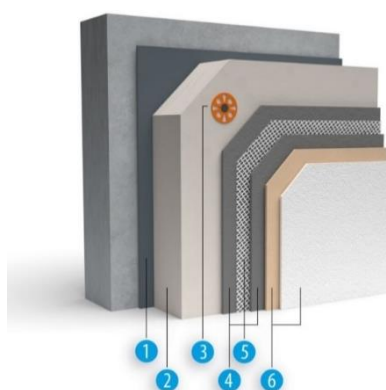


Figura 1 - Sistema ETICS: 1 – Adesivo; 2 - Placa de isolamento térmico; 3 - Acessórios para fixação mecânica; 4 – Camada de base; 5 – Camada de fibra de vidro; 6 – Camada de acabamento (Systems, 2021)

Outro sistema, cada vez mais utilizado, que tem atraído as atenções da indústria e das universidades é o sistema SIP (*Structural Insulated Panel*). Introduzido por investigadores do *Forest Product Laboratory* (FPL) no ano de 1935 em Madison no estado do Wisconsin, Estados Unidos da América, o SIP é um painel *sandwich* implementado num edifício com estrutura constituída por aço e betão, ou seja, é possível construir elementos como paredes, pavimentos ou tetos (Smith, 2010). O painel SIP é de forma corrente constituído por duas placas de um material rígido, geralmente OSB (*Oriented Strand Board*) que englobam um núcleo (usualmente, EPS) com espessura suficiente para fornecer a robustez necessária para a função. A produção destes painéis é executada em fábrica em ambiente controlado. A Figura 2 representa o sistema descrito anteriormente (Association, 2022).

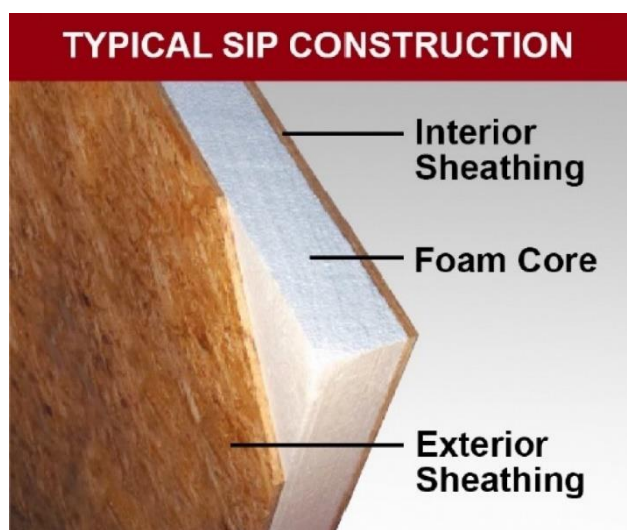


Figura 2 - Painel SIP (Association, 2022)

2.1.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS

O sistema ETICS acaba por ser uma solução válida, pois não só otimiza a eficiência energética do edifício como também é capaz de aperfeiçoar a performance acústica do mesmo, com estudos a apontarem que o ETICS quando composto por EPS melhora o isolamento acústico em 5 dB sendo ainda

mais eficaz quando se recorre a lã mineral ao invés do EPS, levando a um incremento na ordem dos 11 dB (Miskinis, Dikavicius, Buska, & Banionis, 2018; Miskinis, Dikavicius, & Buska, 2016; Norvaišienė, Buhagiar, Burlingis, & Miškinis, 2020). No entanto o sistema também é capaz de evitar a manifestação das pontes térmicas (Luján et al., 2019; Parracha et al., 2022), os autores Barreira and de Freitas (2014); Gonçalves, Simões, Serra, and Flores-Colen (2020); Parracha et al. (2022) referem que o ETICS contribui também para a conservação da parte estrutural de um edifício, nomeadamente, através da proteção contra condensações do lado interior das paredes evitando assim a infiltração da humidade para os elementos armados (potenciando a corrosão do aço das armaduras e consequente fragilização da superestrutura). Ainda do ponto de vista estrutural, Collina and Lignola (2010), concluem que o ETICS reduz as tensões verificadas nas paredes (de alvenaria) de suporte dado que as paredes exteriores apresentam maiores esforços, estes predominantemente devido a esforços com origem nas variações térmicas impostas ao edifício, que podem dar origem a momentos flettores. Ou seja, quando o ETICS é implementado, os esforços provenientes das variações térmicas a que as paredes estão sujeitas sofrem um decréscimo em torno dos 75%, assim a estrutura não só fica otimizada do ponto de vista térmico e acústico, como também se verifica o aumento na segurança da estrutura do edifício (Collina & Lignola, 2010).

Outra vantagem importante da implementação do ETICS é o equilíbrio que o mesmo detém na análise custo-benefício, pois este tem um custo de implementação considerado baixo, assim como, a própria aplicação do material na fachada de um edifício é de relativamente fácil execução (Fernandes, de Brito, & Cruz, 2016; Kvande, Bakken, Bergheim, & Thue, 2018; Parracha et al., 2022) quando comparado com outros sistemas em uso.

Estudos realizados nos últimos anos demonstram que aquando da inexistência de ETICS no paramento exterior de uma alvenaria, a mesma está sujeita a uma maior probabilidade de ocorrência de patologias termo-mecânicas devido a diferenças de temperatura muito elevadas que dão origem a tensões que podem conduzir a fissuração e consequentemente a falhas graves no sistema (Daniotti, Paolini, & Re Cecconi, 2013; Miskinis et al., 2018; Miskinis et al., 2016; Norvaišienė et al., 2020).

No entanto, o ETICS também apresenta algumas desvantagens e especial cuidado na sua aplicação, manuseamento e acondicionamento do mesmo em obra. Verifica-se também, que algumas características dos próprios materiais do sistema apresentam desvantagens em relação a outras soluções de fachada, como por exemplo, a resistência ao choque é considerada inferior á de um painel SIP. Foram já detetadas muitas anomalias em fachadas com ETICS, em alguns casos a aplicação do sistema tinha ocorrido recentemente (Amaro, Saraiva, de Brito, Flores-Colen, & Materials, 2013; Kvande et al., 2018; J Maia, Ramos, & Veiga, 2019; Parracha et al., 2022), sendo a grande maioria fruto da presença de água no próprio ETICS promovendo a manifestação de patologias de origem biológica e/ou anomalias físico-mecânicas (Parracha et al., 2022; J. L. Parracha et al., 2021).

Devido à constante exposição aos efeitos climáticos, Gonçalves et al. (2021) refere que apesar de as anomalias que afetam a parte estética não causarem danos na performance do ETICS a nível térmico, as mesmas podem incutir desconfiança no sistema, suportada pelo surgimento de anomalias de natureza biológica ao longo dos últimos anos (Amaro et al., 2013), nomeadamente, crescimento de fungos, algas, entre outros, muito comuns em países com clima Mediterrânico. (Amaro, Saraiva, de Brito, Flores-Colen, & Management, 2014). Vários estudos apresentam algumas das causas que levam à degradação do sistema por via do crescimento biológico. No artigo desenvolvido por Gonçalves et al. (2021) estão citadas algumas dessas razões, nomeadamente, o pH, a porosidade e a rugosidade da camada de acabamento, assim como, a temperatura e o teor de humidade do mesmo (Barberousse, Ruot, Yéprémian, Boulon, & Environment, 2007; D'Orazio et al., 2014).

Embora o ETICS seja utilizado em larga escala há muitos anos, ainda não foi possível compreender na totalidade a origem e o processo de desencadeamento das mais variadas falhas reportadas e estudadas ao longo dos anos (Norvaišienė et al., 2020; Sulakatko, Liisma, & Soekov, 2017).

Durante o tempo de vida de um ETICS é a apresentação de fissuras parciais que levam à degradação da camada de acabamento (Amaro et al., 2013; Amaro et al., 2014; K. Yuan, Xiong, Wen, & Xu, 2022). As consequências podem ainda ser agravadas conforme o tipo de material utilizado na camada de acabamento. Por exemplo, se a camada de acabamento for à base de gesso aumenta a probabilidade de ocorrência de fissuração de natureza mais gravosa (Ślusarek, Orlik-Kozdoń, Bochen, & Muzyczuk, 2020; K. Yuan et al., 2022), potenciada também pela elevada solubilidade à água deste material (Hong, Fan, Yu, Cao, & Exploitation, 2018; Joana Maia, Ramos, & Veiga, 2018).

Alguns estudos identificam algumas das causas para a manifestação de fissuras na camada de acabamento do ETICS. Um artigo de revisão refere no seu artigo que devido ao aquecimento da camada de isolamento térmico a camada de acabamento sofre uma acumulação de calor localizada (Shen, Tan, Tzempelikos, & Buildings, 2011; Xiong, Xu, & Yuan, 2018; K. Yuan et al., 2022) que por sua vez provoca tensões localizadas, devido às diferenças bruscas de temperatura e teor de humidade provocadas, por exemplo, por condições climáticas, tais como, precipitação. O autor refere que estas condições levam a um incremento no gradiente da temperatura e da humidade verificadas numa região localizada da camada de acabamento (Marčiukaitis, 1998; C. Pereira, de Brito, & Silvestre, 2018; K. Yuan et al., 2022) onde se verificavam, como referido anteriormente, as tensões localizadas relativas ao aumento de temperatura devido ao efeito do isolamento térmico provocando deformações na estrutura do ETICS que terá como consequência a fissuração da camada de acabamento.

As placas que envolvem o núcleo do sistema, geralmente, produzidas em OSB, provêm de reflorestamento 100% sustentável, pois não são utilizadas árvores adultas no fabrico das mesmas (Dreamdomus, 2020). O SIP revela uma melhoria significativa na eficiência energética, quando comparado com uma estrutura tradicional de madeira. Assim, um edifício com este tipo de sistema implementado está no caminho certo para atingir as metas que levam ao *Net-Zero Building* (Association, 2022) pois facilmente contribui para certificação energética de classe A ou A+ (Dreamdomus, 2020). Aparentemente, o SIP é constituído por materiais frágeis, no entanto, de acordo com a Dreamdomus (2020) estes painéis apresentam uma performance otimizada quando são ligados entre si por estruturas de aço (LSF – *Light Steel Framing*) ou madeira.

Sistemas produzidos em *offsite* estão naturalmente associados a menores custos no final da empreitada. Um conjunto de paredes ou lajes que demoraria semanas a finalizar, numa obra tradicional, passa a ter uma duração de execução reduzida apenas a alguns dias, dependendo da quantidade de elementos a construir. Isto porque na construção modular, após produção controlada e cuidadosa com os painéis fabricados à medida, apenas é necessária a instalação em obra, ou seja, os custos relativos a planeamento de obra, materiais de apoio e mão-de-obra sofrem uma redução considerável, como confirma um estudo realizado pela BASF, onde referem que a mão-de-obra sofre um decréscimo de 55% (Association, 2022).

De acordo com SIPA (2012) este tipo de construção poderá também contribuir para o bem estar dos utilizadores de edifícios construídos à base de SIP's, é que, dependendo da solução implementada nas zonas de ligação à estrutura, devido à ausência de vazios ou pontes térmicas, as condensações, que conduzem à formação de bolores e fungos (potencialmente prejudiciais à saúde respiratória dos utilizadores dos edifícios em causa), são verificadas com menor intensidade devido às condições herméticas que o SIP proporciona aos edifícios, limitando a entrada, ou seja, existe um controlo da ventilação que resulta na filtração de partículas contaminantes e alergénios que por sua vez induzem

melhoramentos na qualidade do ar interior (Association, 2022). Para além de todas as vantagens mencionadas anteriormente, este sistema é ainda facilmente implementado para qualquer tipo de design criado pelos arquitetos, o SIP revela assim ser bastante flexível pois é possível ser utilizado para construções tradicionais, assim como, para as mais criativas ao nível estético (Association, 2022).

No entanto, o SIP apresenta ainda alguns desafios relativos à sua implementação. Apesar de ser um sistema adaptável a qualquer design, é de referir que uma vez que o painel se encontra produzido não é possível alterar as características do mesmo (Panjehpour, Abang Ali, Voo, & Management, 2013) sendo a solução a reciclagem e a produção de um novo painel. Ou seja, é necessário um fornecimento das medidas exatas à fábrica onde o mesmo vai ser produzido de modo a evitar esta situação, pois se o objetivo é minimizar desperdícios de material e reduzir custos de energia e mão-de-obra, este tipo de erros compromete a sustentabilidade do sistema tornando o mesmo inadequado para o efeito pretendido.

A resistência ao fogo é um requisito cada vez mais importante nas construções, pois apesar de ser uma medida de segurança passiva é crucial para o salvamento de vidas humanas e bens materiais, como por exemplo, os classificados de património da humanidade que possuem um valor incalculável. O SIP constituído por um núcleo de EPS exige a implementação de um mecanismo ou produto que tenha o efeito de retardar o avanço do fogo, com a melhor relação custo-eficácia possível (Panjehpour et al., 2013).

2.1.3. APLICAÇÃO DOS SISTEMAS

De forma a beneficiar de todas as propriedades que o ETICS oferece, é necessária a correta aplicação do mesmo. Em Portugal existe a Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS (APFAC) que fornece um conjunto de diretrizes que de certa forma incentiva e facilita a correta aplicação do ETICS. Como tal o Quadro 1, descreve de forma sucinta o processo de aplicação do sistema (APFAC, 2015).

Quadro 1 - Processo de aplicação do ETICS (APFAC, 2015)

Passos de aplicação do ETICS	Descrição
Preparação prévia dos suportes (alvenarias, betão, reboco, entre outros) para colagem das placas de ETICS	- Toda e qualquer superfície deve ser preparada antes da aplicação das placas de ETICS. Para tal deve ser verificada a existência de destacamentos, sujidades, gorduras, resistência mecânica, entre outros potenciais riscos que comprometam a eficácia do ETICS, nomeadamente na fase de colagem. As paredes devem apresentar superfície regular (irregularidades superiores a 1 cm numa extensão de 2 m devem ser corrigidas).
Aplicação das placas de ETICS	- Aquando do arranque do sistema, o nivelamento, proteção mecânica e proteção à humidade devem ser garantidos através de um perfil de arranque ou qualquer outro método que garanta os mesmos resultados práticos. - Para a colagem das placas deve ser aplicada uma argamassa adesiva na superfície das mesmas. O tipo de colagem difere consoante o tipo de suporte. Para suportes de betão ou reboco plano a argamassa deve ser espalhada em toda a área da placa isolante com recurso a uma talocha dentada nº10. No caso de o suporte ser de alvenaria a área de colagem deve ser superior a 60%, ou seja, aplicar a argamassa de colagem no perímetro da placa e nos pontos transversais do centro da mesma.

	- Para o assentamento das placas é necessário verificar se o adesivo não refluí nas juntas entre os painéis, pois caso aconteça, poderá dar origem a pontes térmicas. As placas devem ser assentadas de baixo para cima, com o lado maior posicionado na horizontal em contra fiado e sem folgas. Findo o assentamento, deve ser exercida uma ligeira pressão com o auxílio de uma talocha. Se forem verificadas folgas nas juntas das placas adjacentes devem ser preenchidas com material isolante para não comprometer a performance térmica do sistema. - No caso de as placas intersectarem elementos como muretes, beirados, peitoris, entre outros, o remate das mesmas deve ser realizado de forma a prever uma junta de pelo menos 5 mm, posteriormente preenchida com material elástico impermeável que demonstre compatibilidade com a placa isolante. - Na eventualidade de não ser possível executar a colagem das placas, pode então ser necessário recorrer à fixação mecânica com buchas e pregos. Neste caso, a fixação mecânica não deve ser efetuada nas zonas de colagem, com a distribuição das buchas a ser feita no perímetro e no centro da placa com 6 a 8 buchas por cada 2 placas. - Deverá ser aplicada rede de fibra de vidro, nos cantos dos vãos abertos, com geometria retangular e posicionados a 45° relativo ao contorno dos vãos, que funciona como reforço adicional.
Aplicação da camada de revestimento nas placas de isolamento do ETICS	- A camada de revestimento é composta por uma argamassa que deve ser aplicada com recurso a uma talocha em inox, com a técnica de barramento, com espessura uniforme de 4 mm (em 2 camadas). - A primeira camada deve ser executada com recurso a uma talocha dentada de 50 cm, de forma a resultar numa espessura de 2 mm. Posteriormente é aplicada rede de fibra de vidro antialcalina que fica incorporada na argamassa e esticada de forma perfeita. - As faixas de rede devem estar sobrepostas pelo menos em 10 cm, de forma a garantir a continuidade de esforços. - Finda a primeira camada, é iniciada a aplicação da segunda camada (2 mm de espessura) de forma a apresentar superfície homogénea e de forma a não ser possível detetar a rede de fibra de vidro.
Aplicação da camada de acabamento	- Após secagem completa da argamassa de regularização, é iniciada a aplicação do primário. Este passo garante a uniformização da absorção do suporte e permite controlar o efeito da alcalinidade da argamassa de suporte. - Após secagem do primário, é executado o acabamento à base de um revestimento espesso colorido. - É recomendada uma refletância solar superior a 30% relativamente à cor do revestimento final, de forma à fachada apresentar um bom desempenho térmico. - A selagem da superfície nos elementos como caixilhos, platibandas ou rufos, deve ser iniciada apenas após o período de secagem do acabamento, através da aplicação de um cordão de selante elástico.

O SIP, sendo um sistema leve e rápido de executar, também exige alguns cuidados aquando da sua aplicação. Os mesmos estão descritos de forma sucinta, no Quadro 2, que cobre os pontos mais importantes relativos à instalação deste sistema (Title24consultants, 2012).

Quadro 2 - Processo de aplicação de SIP's (Title24consultants, 2012)

Passos para aplicação dos SIP's	Descrição
Reconhecimento e verificação do material	- As primeiras ações a desenrolar numa obra à base de SIP's é proceder a uma cuidada análise e interpretação de todas as plantas, alçados e outros desenhos técnicos de forma a minimizar erros na hora de colocar cada SIP na posição correspondente. - De seguida, deve ser feito o inventário dos SIP's chegados à obra, para averiguar que não estão painéis em falta e causar constrangimentos à obra.
Fixar os painéis na laje	- Para laje em madeira ou até mesmo em SIP, é necessário aplicar um material com efeitos adesivos que permita a colagem de um painel ao outro. Após a aplicação do material adesivo, o SIP é encaixado, sendo posteriormente pregado quando já em posição vertical. - Para lajes de betão, é necessário separar a humidade dos SIP's, para tal, são utilizadas duas placas, sendo que a primeira placa de madeira que faz a separação é de madeira tratada.
Fixação dos painéis	- A fixação dos painéis é executada com pregos, estes são dispostos, usualmente, de 15 em 15 cm (na ausência de requisitos especiais). - Os materiais adesivos são aplicados no interior e no exterior das placas, ao longo do topo das mesmas. Este material adesivo, para além da função de fixação, serve também para criar um efeito hermético e para executar a ligação entre os vários elementos estruturais.
Conexões	- O tipo mais comum de conexão utilizado é o sistema correntemente designado de <i>Thin Spline Connection</i>.
Vãos abertos (Preparação)	- A abertura de vão é pré-fabricada em <i>offsite</i> requerendo controlo de qualidade em fábrica de forma a assegurar as corretas dimensões do vão (portas e janelas), assim, quando o SIP chega à obra apenas é necessário instalar no local designado para o mesmo.
Integração de SIP's superiores	- Para executar a ligação entre os painéis SIP é necessária a aplicação de SIP's superiores, estes devem estar sobrepostos pelo menos em 30 cm. De seguida, estes painéis devem ser fixados através de pregos (horizontalmente) e também com material adesivo aplicado no interior e exterior dos painéis, como já mencionado em passos anteriores.
Efeito hermético nos painéis	- De forma a garantir um efeito de estanquidade ao ar, os painéis são selados com material adesivo e com espuma expansiva, introduzida em locais previamente perfurados no painel.

Modificações e cortes em obra	- Na eventualidade de ser necessário executar cortes ou outras modificações geométricas no SIP, apenas serão feitas aquelas que forem possíveis através de serra elétrica ou por métodos existentes para remover espumas mal aplicadas. Caso seja necessário algo mais do que o referido, o painel deve retornar à fábrica para realizar as modificações necessárias de modo a não comprometer a integridade estrutural dos mesmos.
Recursos adicionais	- O edifício poderá vir a ser envolvido numa proteção não perfurada, em conjunto com outros detalhes extra nas janelas e portas, e assim garantir que qualquer quantidade de água que entre no sistema seja drenada pelo mesmo. Assim o SIP é mantido seco e sem danos provocados pela humidade.

2.1.4. DURABILIDADE

O ETICS, em geral, qualquer sistema de fachada, passam ao longo dos anos por um processo de envelhecimento devido à sua elevada e direta exposição à radiação solar, precipitação, ventos, impactos de objetos, entre outros fatores que provocam desgaste neste sistema, no qual a parte estética é a primeira a ser afetada e a longo prazo a performance mecânica e térmica também é afetada de forma negativa, isto, para casos em que a inspeção e manutenção do ETICS é inexistente (Amaro et al., 2013; Amaro et al., 2014; Parracha et al., 2022). Um dos fatores mais comuns para a degradação estética do ETICS é o crescimento de agentes biológicos provocado pela humidade que penetra no sistema através da capilaridade. Parracha et al. (2022) executou uma série de ensaios de envelhecimento artificial e natural que permitiram concluir que nas amostras sujeitas ao envelhecimento artificial há um aumento claro da absorção de água por capilaridade. O maior aumento verificou-se na amostra de ETICS com argamassa térmica, tendo-se observado um acréscimo de 432% considerando um espaço temporal de 24h. O autor refere ainda que a diferença verificada no ensaio de 24h de absorção de água, a quantidade de água absorvida é significativamente mais elevada relativamente ao mesmo ensaio, desta vez, para um período de apenas 1h ou relativo ao coeficiente de absorção da água.

Foi também possível observar que a presença de água na camada de isolamento térmico afeta de forma significativa o efeito isolante da mesma. Após a presença de água nesta camada, as amostras de ETICS sujeitas ao envelhecimento artificial demonstraram maior resistência à secagem, isto é, entre +47% para um sistema aplicado ao isolamento térmico de coberturas constituído à base de lã mineral e +122% para uma argamassa térmica composta por variados ligantes e EPS granulado (Parracha et al., 2022).

J. Parracha et al. (2021) refere que sistemas que são detentores de elevada capacidade de absorver água devem também ser portadores de elevada permeabilidade ao vapor assim como elevada capacidade de secagem, pois caso contrário a durabilidade do sistema será consideravelmente afetada. O mesmo autor conclui ainda que a condutibilidade térmica do isolamento térmico que compõe o ETICS é mais elevada com o teor de humidade a apresentar o mesmo padrão de crescimento (Gomes et al., 2017; Joana Maia et al., 2018).

Uma das consequências da absorção de água num ETICS é o aparecimento de agentes biológicos que tornam as fachadas muitas vezes com aspeto esverdeado, pouco atrativas. Parracha et al. (2022) concluiu que apenas foi verificado o aparecimento de bolores, fungos ou outros agentes biológicos nas amostras sujeitas a envelhecimento artificial, sendo que, nas amostras envelhecidas naturalmente e nas amostras não envelhecidas não foi verificado qualquer vestígio de mofo ou outro agente de origem biológica. Caso se verifique essa anomalia, uma solução a adotar será o uso de biocidas (Parracha et al., 2022).

O brilho dos revestimentos das fachadas sofre uma degradação significativa ao longo dos anos, notado muitas das vezes a olho nu. Nos ensaios levados a cabo por Parracha et al. (2022) a degradação do brilho da cor foi verificada em torno dos 62% relativamente ao brilho da cor original. Esta degradação deveu-se essencialmente, à exposição a poeiras, gases, entre outros agentes causadores de alterações nas propriedades da cor.

Outros fatores importantes a serem considerados em estudos de envelhecimento do ETICS são os raios UV, que promovem a degradação significativa dos revestimentos orgânicos (Ochs, Vogelsang, & Meyer, 2003) aliados a vários poluentes, como a deposição de poeiras ou as mais variadas sujidades, pois estes afetam consideravelmente a parte estética do sistema (Parracha et al., 2022) assim como a performance térmica.

Um facto muito importante na degradação destes sistemas é o tamanho dos poros dos materiais constituintes das camadas exteriores assim como a distribuição dos mesmos (J. Bochen, Gil, Szwabowski, & composites, 2005; J. J. C. Bochen & Materials, 2009; H. Künzel, Künzel, & Sedlbauer, 2006; Xiong et al., 2019).

Relativamente às propriedades mecânicas, o ETICS deve apresentar alta resistência ao impacto. Isto deve-se não só à questão estética, mas principalmente à sua durabilidade. Um ETICS que não apresente elevada resistência ao impacto muito provavelmente irá perder eficácia no seu desempenho, pois no caso de ocorrência de fissuração a sua capacidade protetora nomeadamente à penetração de água proveniente da precipitação (Daniotti et al., 2013; Norvaišienė et al., 2020). Observou também que a maioria das anomalias manifestadas após o envelhecimento do sistema eram acionadas em 51% dos casos por fissuras no material do ETICS (Liisma et al., 2016; K. Yuan et al., 2022)

Oberhaus and Drell (1995) observou que a humidade afeta em particular a camada de acabamento do ETICS (quando este é constituído por uma fina camada de gesso) causando deformações na mesma. No entanto a geometria da fachada do edifício e a disposição dos materiais que compõem a camada de proteção do mesmo, demonstram forte relação com o surgimento de fissuras locais no ETICS (Oberhaus & Drell, 1995).

A orientação é outro fator importante para a intensidade com que uma fachada se vai degradar. Num ensaio levado a cabo por Barreira and de Freitas (2013), no qual foram objeto de estudo fachadas com ETICS com EPS como isolante térmico, num período de 1 ano, foi verificado que a fachada com maior risco de condensação na superfície exterior, foi a que se encontrava virada a oeste, onde a incidência da precipitação foi mais intensa, sendo que o risco diminuía pela seguinte ordem de orientação: este, norte e sul. Ou seja, contrariamente ao esperado, a fachada oeste é a que apresenta o cenário mais favorável ao aparecimento de mofo e outros agentes biológicos capazes de acelerar a degradação da fachada. Existem estudos, nomeadamente na Bélgica, que referem ainda que a fachada virada a norte necessita de maior tempo de secagem pois a exposição à radiação solar é inferior às restantes fachadas com outras orientações, ou seja, neste estudo, a fachada a norte é mais propensa a verificar o aparecimento de agentes biológicos (como seria de esperar), como o mofo ou algas (Dirkx & Grégoire, 2012; Gonçalves et al., 2021). A cor também pode influenciar o risco de condensações, Gonçalves et al. (2021) conclui que a cor branca aumenta o risco de ocorrência de condensações e consequente aceleração da degradação proveniente de fatores biológicos (J Maia et al., 2021; Joana Maia et al., 2018), isto, porque gera um incremento na resistência do isolamento térmico que por sua vez dá origem a temperaturas mais baixas durante a noite.

De referir que as condensações superficiais exteriores ocorrem não só devido a uma combinação de chuva com vento forte, mas também devido à troca de radiação de onda longa entre a fachada do edifício

e a atmosfera que dá origem a um fluxo de calor em direção ao céu baixando a temperatura do ETICS (Gonçalves et al., 2021; Hartwig M. Künzel, 2007).

Propriedades óticas do ETICS, tais como, a emissividade e a refletância solar, são importantes relativamente ao impacto da temperatura superficial, com acrescida importância em fachadas expostas à radiação solar direta (Gonçalves et al., 2021).

Relativamente à durabilidade do SIP, sendo o mesmo constituído por duas placas de OSB, ou seja, à base de madeira, a envolver o núcleo (usualmente de EPS), o maior problema que se pode verificar será a exposição à humidade, embora estes sistemas sejam alvo de um tratamento que os torna mais impermeáveis. No entanto, para estudar os efeitos da humidade no SIP, a SIPA – *Structural Insulated Panel Association* executou três ensaios que avaliaram as consequências que um SIP sofre aquando da exposição às mais variadas condições de humidade. Para carga transversal, lateral e axial. Os resultados médios dos três ensaios demonstraram que entre a amostra de controlo e a amostra ensaiada após o ciclo de humidade não existe perda de resistência mecânica suficiente em qualquer dos ensaios que indique sinais de fragilidade do sistema (SIPA, 2012).

2.2. NANOPARTÍCULAS APLICADAS A REVESTIMENTOS DE SISTEMAS DE FACHADA

2.2.1 ENQUADRAMENTO

As nanopartículas são materiais possíveis de aplicar em várias indústrias e para diferentes aplicações desde a agricultura (Begum & Fugetsu, 2012; Kumar et al., 2017; Rico et al., 2013), à indústria farmacêutica (De Jong & Borm, 2008; Jha & Prasad, 2019) e alimentar (Lv et al., 2018; Zeng, Zhu, Du, & Lin, 2016), assim como, na área da engenharia (Juárez-Moreno, Pestryakov, & Petranovskii, 2014; Tomar, Abdala, Chaudhary, & Singh, 2020).

Com dimensão bastante reduzida, estes materiais distinguem-se pelas suas propriedades óticas, particularmente, as que são relativas à emissividade e à absorção, sendo que estas propriedades, estão fortemente relacionadas com a dimensão das respetivas nanopartículas. Isto é, à medida que a dimensão de uma nanopartícula diminui a densidade da amostra é alterada e assim a absorção sofre, consequentemente, uma variação no seu valor (Liu & Bashir, 2015; Wegner, 1981).

Estudos com foco na procura de mecanismos que aumentem a refletância solar na região do NIR estão a ser realizados com cada vez maior intensidade de modo a desenvolver materiais de custo reduzido, ecológicos e que sejam capazes de tornar os edifícios mais eficientes ao nível energético. Isto deverá ser atingido através da redução das necessidades de arrefecimento dos edifícios conseguida através da redução da temperatura superficial das fachadas, promovendo assim o conforto térmico aos utilizadores do edifício (Santamouris, Synnefa, & Karlessi, 2011).

As nanopartículas, além de terem um efeito significativo no funcionamento da fachada a nível térmico, através da redução das temperaturas superficiais da mesma, permitem melhorar as características de materiais como o cimento, potenciam um incremento na durabilidade de materiais compósitos, permitem a redução do peso dos materiais tornando-os mais leves, sendo que também podem conferir propriedades antimicrobianas, anticorrosivas e de autolimpeza às fachadas (Broekhuizen, 2009; Papadaki, Kiriakidis, & Tsoutsos, 2018; R. C. Veloso, Souza, Maia, Ramos, & Ventura, 2021). Adicionalmente, R. C. Veloso et al. (2021) refere num artigo de revisão que propriedades como a dureza e a tensão crítica (tensão para a qual o revestimento deixa de desempenhar corretamente a sua função), também são importantes relativamente à performance mecânica da fachada (Álvarez-Docio, Reinoso, Del Campo, & Fernández, 2017; Hincapié et al., 2015).

Quando um edifício é exposto à radiação solar, uma parte significativa é refletida enquanto outra é absorvida, aumentando a temperatura superficial. Dentro dos sistemas construtivos, as fachadas têm grande influência no desempenho térmico de um edifício. No estudo efetuado por Takebayashi (2016) observou-se que para uma fachada convencional constituída, por exemplo, por betão ou madeira, 12,5% da radiação solar é refletida para o céu, outros 12,5% são refletidos para o chão e os restantes 75% são absorvidos pela própria fachada (Takebayashi, 2016; R. C. Veloso et al., 2021).

2.2.2 INCORPORAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS EM SISTEMA ETICS E SIP

Por vezes, os arquitetos, responsáveis pela parte estética dos edifícios, revelam preferência por tons escuros para o revestimento dos mesmos. Algumas das razões que influenciam essa posição não estão relacionadas apenas com a estética que estes tons conferem aos edifícios, mas também devido à facilidade com que os mesmos conseguem disfarçar sujidades e poluição provocada por agentes atmosféricos (Baneshi, Maruyama, & Komiya, 2009; Vargas, Amador, & Niklasson, 2006). Muitos dos edifícios revelam ausência total de conforto térmico, devido por exemplo, à idade dos mesmos. Isto leva ao aumento do consumo energético para equilibrar as temperaturas interiores até alcançar o conforto térmico. Como tal, a opção de pintar as fachadas dos edifícios com tons claros, nomeadamente, o branco, é muito frequente. Baneshi et al. (2009) menciona que o branco reflete, de forma eficaz, a radiação solar na região do visível bem como na região próximo do infravermelho (NIR), assim como, também absorve uma quantidade muito baixa da radiação solar total que incide numa superfície. Uma superfície limpa, lisa e opaca, pintada de branco é capaz de apresentar uma refletância solar de 85% (Vargas et al., 2006) esta afirmação do autor é verdadeira, no entanto, na realidade, isto é verificado no momento em que a superfície em causa acabou de ser pintada.

De modo a conseguir ultrapassar os constrangimentos provocados pelos tons claros no revestimento de fachadas, cada vez mais têm sido aplicadas cores escuras nas fachadas, sendo que a inclusão de nanopartículas nos materiais de acabamento de fachadas é uma das possíveis soluções a considerar para alcançar o conforto térmico aos utilizadores dos edifícios. Assim, a nanotecnologia está cada vez mais presente no setor da construção devido à temática da sustentabilidade, bem-estar e saúde (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011; R. C. Veloso et al., 2021).

Como o objetivo de incorporar nanopartículas num acabamento exterior é aumentar a refletância solar do mesmo, os materiais escolhidos para a produção de *cool pigments* são, geralmente, óxidos metálicos que revelam ter grande capacidade para refletir seletivamente radiação solar na região do visível e infravermelho. Existem também pigmentos orgânicos com as mesmas características, mas que, no entanto, com a exposição ao UV têm tendência a sofrer fotodegradação. Materiais como dióxido de titânio (material branco) são considerados os que melhor contribuem a refletância solar, com os valores da mesma a rondar os 87% (R. C. Veloso et al., 2021; L. Yuan et al., 2018).

As nanopartículas apresentam-se como uma solução flexível relativamente à gama de soluções de fachadas, isto porque, podem ser incorporadas em revestimentos coloridos que permitem refletir radiação próxima do infravermelho. É ainda referido no estudo conduzido por Fang, Kennedy, Futter, and Manning (2013) que a quantidade de calor refletida está diretamente ligada à cor do próprio pigmento.

Propriedades como a refletância e a emissividade devem ser maximizadas aquando do desenvolvimento de pigmentos capazes de refletir radiação próxima do infravermelho. No entanto, é necessário especial cuidado para evitar a contaminação por partículas que absorvem radiação infravermelha (Hyde & Brannon, 2006; R. C. Veloso et al., 2021) pois a dimensão da partícula é um parâmetro não menos

importante do que os mencionados atrás, estar relacionado com a capacidade de dispersão do pigmento (Moezzi, McDonagh, & Cortie, 2012; R. C. Veloso et al., 2021).

O Quadro 3 apresentam-se algumas das nanopartículas mais utilizadas em revestimentos.

Quadro 3 - Compostos mais utilizados para "cool pigments" e respetivas propriedades (R. C. Veloso et al., 2021)

Composto	Cor	Dimensão da nanopartícula (Escala)	Refletância NIR (%)	Referência
TiO ₂	Branco	Micro	87 (aprox.)	(R. C. Veloso et al., 2021; L. Yuan et al., 2018)
ZnO	Branco	Nano	85 (aprox.)	(Kiomarsipour, Razavi, Ghani, & Kioumarsipour, 2013; Kiomarsipour & Razavi, 2014; R. C. Veloso et al., 2021)
ZrO ₂	Branco	Micro	-	(Nielsen & Wilfing, 2005; R. C. Veloso et al., 2021)
Cr ₂ O ₃	Verde	Nano	50-57	(Levinson, Berdahl, Akbari, & Cells, 2005; Liang et al., 2015; R. C. Veloso et al., 2021)

Dos compostos mencionados no Quadro 3, para além do TiO₂ que é amplamente usado na indústria como pigmento, um dos que se revela mais promissor é o óxido de zinco (ZnO), pois é capaz de absorver radiação numa grande extensão do espectro. Além disso, é também estável do ponto de vista químico e mecânico sendo que a toxicidade é considerada de baixo nível (Mohan & Renjanadevi, 2016; R. C. Veloso et al., 2021).

Embora o uso destes pigmentos esteja em ascensão, existe alguma preocupação no que respeita à escolha do melhor pigmento a incorporar num revestimento, nomeadamente, de fachadas, pois estas devem possuir a melhor relação entre durabilidade, isolamento, qualidade, custo, estética e resistência mecânica (Balali & Valipour, 2020; R. C. Veloso et al., 2021).

As nanopartículas geram particular interesse pelo facto de serem capazes de refletir radiação na região próxima do infravermelho (R. C. Veloso et al., 2021; Wake, 1989). Apesar de no espectro da radiação solar a região de maior dimensão ser a do visível, não deixa de ser um facto que a radiação localizada na região próxima do infravermelho totaliza cerca de metade de toda a energia proveniente do sol que chega à superfície terrestre (Song et al., 2013; R. C. Veloso et al., 2021). Assim sendo, as nanopartículas apresentam outros pontos a favor para a sua incorporação em revestimentos de fachadas de edifícios, pois podem ser consideradas vantajosas do ponto de vista económico e também por demonstrarem ser de baixa toxicidade, ou seja, as nanopartículas são consideradas um mecanismo passivo que permite reduzir um pouco os custos energéticos de um edifício (para efeitos de arrefecimento), sobretudo no

caso de uma parede com déficit de isolamento térmico (Santamouris et al., 2011; R. C. Veloso et al., 2021).

2.3. PROPRIEDADES SUPERFICIAIS

2.3.1. REFLETÂNCIA SOLAR

Por definição, a refletância solar é a capacidade que uma dada superfície possui de refletir parte da radiação solar que nela incide de volta para a atmosfera, isto é válido tanto para a reflexão difusa (radiação refletida pela superfície em todas as direções) como para a especular (radiação refletida segundo um único ângulo, semelhante ao efeito de espelho) (Ascione & Pisello, 2015). A refletância solar está diretamente relacionada com a temperatura superficial e com a emissividade do material (Desideri & Asdrubali, 2018). Para quantificar esta relação, o autor refere um índice designado de *Solar Reflex Index* (SRI) que varia num intervalo entre zero (para a situação mais quente, tanto quanto uma superfície preta) e 100 (para o cenário mais frio, como uma superfície branca), como mostra a equação 1.

$$SRI = \frac{T_{preto} - T_{superfície}}{T_{preto} - T_{branco}} * 100 \quad (1)$$

A $T_{superfície}$ é obtida de forma analítica através da relação entre a refletância solar da superfície e a respetiva emissividade. Isto é, de forma a absorver a menor quantidade possível de energia proveniente do sol é necessário uma refletância solar elevada. No entanto, quando a emissividade do material é elevada, a superfície atinge o ponto de equilíbrio entre a energia absorvida e a energia devolvida (a temperaturas mais baixas) para a atmosfera (Casini, 2016).

De toda a energia que chega à superfície do planeta, a grande maioria está compreendida entre os 300 e os 2500 nm de comprimento de onda, no entanto a intensidade apresenta variações consequentes da variação dos comprimentos de onda do espectro solar, no qual se verifica um pico nos 600 nm (Ascione & Pisello, 2015). De acordo com Ascione and Pisello (2015) a radiação solar é composta maioritariamente por radiação situada na região espectral do não-visível, ou seja, um revestimento com cor clara não é suficiente para ser considerado um revestimento de alta refletividade, pois devido ao mencionado anteriormente, este revestimento deverá ser capaz de refletir a radiação solar ao longo de todo o espectro. A geometria da superfície de um material contribui de forma considerável para o efeito de ilha de calor, nomeadamente, as propriedades angulares de uma superfície, as quais têm vindo a merecer mais atenção. Ao contrário das superfícies refletivas (que refletem a radiação num ângulo diferente do ângulo da radiação incidente) as superfícies com propriedades retrorrefletivas são capazes de refletir a maioria da radiação que nela incide de volta para a atmosfera (o ângulo da radiação refletida é paralelo ao ângulo da radiação incidente). Assim, o efeito ilha de calor proveniente da radiação que fica “presa” na envolvente do ambiente urbano é mitigado de forma mais eficaz (Desideri & Asdrubali, 2018).

De acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) existem vários métodos para realizar a medição da refletância solar que cumprem normas internacionais de forma a uniformizar os procedimentos de ensaio a efetuar. A escolha do tipo de ensaio e equipamento a utilizar é a que se mostrar mais adequada para o tipo de avaliação a ser feita no revestimento em estudo, nomeadamente, características da superfície do revestimento (superfície rugosa ou lisa), condições climáticas e do local do ensaio (H Akbari, Levinson, & Berdahl, 1996; Hashem Akbari, Levinson, & Stern, 2008; Chen et al., 2019; Fernández-García et al., 2017; Ramos, Souza, Maia, & Almeida, 2020b).

A medição da refletância solar pode ser efetuada com a medição das propriedades do espectro solar relativas à absorvância, refletância e transmitância dos materiais com recurso a um espectrofotômetro. O espectrofotômetro modular (Figura 3) é vantajoso devido à sua portabilidade, sendo que na engenharia civil e para os casos em estudo, a precisão do mesmo revela-se suficiente, na ordem dos 1,5 nm.



Figura 3 - Espectrofotômetro FLAME (UV-VIS)

A norma da ASTM E903 recomenda que a área a medir seja aproximadamente de 0,1 cm² e apresenta melhores resultados quando executado em superfícies planas e homogêneas (Hashem Akbari et al., 2008; Ramos et al., 2020b). O espectrofotômetro é capaz de medir as propriedades dos materiais ao longo do espectro solar, sendo recomendado um intervalo de comprimento de onda de 5 nm. De acordo com a *Ocean Optics*, fabricante do equipamento, o mesmo pode demorar alguns minutos a concretizar a medição, neste caso, da refletância solar, sendo que é recomendado, aquando da execução das medições, que o feixe de luz incida sobre amostras homogêneas (o feixe de luz possui uma área de incidência de 100 mm²) devendo ser realizadas várias medições para o mesmo ponto. Este ensaio é considerado válido para superfícies verticais e horizontais, em que o ângulo de reflexão deve ser ajustado às condições de inclinação em que as medições são efetuadas (Levinson, Akbari, & Berdahl, 2010; Ramos et al., 2020b). As medições com recurso ao espectrofotômetro podem inclusive ser executadas *in situ*, embora os resultados demonstrem maior fiabilidade se as medições forem realizadas em ambiente controlado, como num laboratório (Ramos et al., 2020b).

De acordo com Coser, Moritz, Krenzinger, and Ferreira (2015) e com recurso a um espectrofotômetro *Varian Carry 5000*, foram realizadas variadas medições da refletância espectral, que é traduzida na razão entre a energia refletida pela superfície de uma amostra e a energia incidente nessa mesma amostra (que varia entre 0 e 100%), em função do comprimento de onda, em amostras de cimento revestidas com quatro pigmentos diferentes (Amarelo, Castanho 1, Castanho 2 e Preto) incorporados em duas tintas com formulações distintas (com e sem *cool pigments*).

O espectrofotômetro utilizado está equipado com uma esfera integrada de 150 mm de diâmetro capaz de receber radiação especular e difusa. A amostra padrão utilizada por Coser et al. (2015) está de acordo com a norma da ASTM E903-12.

Pela observação dos resultados obtidos por Coser et al. (2015), para todas as amostras, exceto as que estão revestidas a preto, é possível concluir que as mesmas apresentam refletância muito baixa na região do UV (2-3% para 400 nm). No espectro da radiação visível a refletância é superior nas amostras revestidas com “cool pigments” (28-60% para 700 nm) quando comparada com as amostras standard (10-40% para 700 nm). Para as amostras revestidas a preto, apresentam refletância muito diminuta na região do visível. Na região do NIR, os resultados demonstram que existe uma elevada refletância nas amostras em que os “cool pigments” estão presentes (Coser et al., 2015), podendo dar um contributo

importante na melhoria do conforto térmico para fachadas revestidas com tintas escuras. O autor refere diferenças de 35% e 40%, relativamente à refletância espectral para tintas convencionais e para tintas com “cool pigments” incorporados, para o Amarelo e Castanho 1, respetivamente, revelando as propriedades refletivas dos pigmentos. No entanto a amostra revestida a Castanho 2, com *cool pigments*, demonstra refletância inferior às duas cores previamente referidas. Assim, os resultados obtidos demonstram, claramente, que o Castanho 2 com pigmentos incorporados é menos eficiente a refletir radiação incidente na região do VIS e NIR quando comparada com as cores Amarelo e Castanho 1.

Coser et al. (2015) concluiu que os revestimentos comerciais, sem *cool pigments*, apresentam menor refletância solar quando comparados com revestimentos com *cool pigments*, à exceção da amostra revestida a Castanho 1 (com *cool pigments*) que apresenta menor refletância quando comparado com o pigmento castanho sem *cool pigments*.

Para determinar o impacto da incorporação de NRP (*NIR Reflective Pigments*) na camada de acabamento em sistemas ETICS foi realizada uma campanha experimental por Ramos, Maia, Souza, Almeida, and Silva (2021), com vista à monitorização da refletância solar (entre outras propriedades, tais como, cor e temperatura superficial) em amostras de cor escura, em ETICS, com e sem NRP com aplicação de uma camada de primário. A campanha experimental decorreu ao longo de 2 anos. Foi então verificado que as NRP contribuem, particularmente, no aumento da refletância e naturalmente, no decréscimo da temperatura superficial, nomeadamente quando a temperatura do clima exterior varia em torno dos 30 °C. Os NRP contribuem de forma significativa para o acréscimo da refletância na região do NIR (*Near-Infrared Radiation*) sem provocar modificações na cor visível, pelo contrário, contribuem para a preservação das características da cor. Devido à aplicação da camada de primário, foi observado um incremento na temperatura superficial, particularmente para temperaturas exteriores elevadas. No entanto, em simultâneo com o descrito previamente, a diferença de cor analisada apresenta pouca expressão, assim como, na variação da refletância onde a camada de primário apresentou um contributo diminuto, importante em termos de durabilidade do material. No período em que decorreu a experiência, a refletância solar foi avaliada 1 vez por ano no mês de maio, *in situ*, na cobertura do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, à exceção da temperatura superficial que foi medida de forma contínua. A refletância solar foi medida com recurso ao espectrofotómetro para averiguar a refletância espectral nas regiões UV-VIS e NIR. No espectrofotómetro modular, utilizado por Ramos et al. (2021), FLAME-T (Figura 3) e FLAME-NIR (Figura 4) da Ocean Optics com as características já mencionadas previamente, foi introduzido como *output* da experiência a refletância espectral difusa, medida com intervalos de comprimento de onda de 10 nm ao longo de um espectro de 190 a 1650 nm.



Figura 4 - Espectrofotómetro FLAME NIR

A refletância espectral (SR) é obtida através da equação expressa abaixo.

$$SR = \frac{\sum_{i=1}^n R(\lambda_i) E_{\lambda_i} \Delta\lambda_i}{\sum_{i=1}^n E_{\lambda_i} \Delta\lambda_i} \quad (2)$$

De acordo com a norma da ASTM G-173 (2003):

R_{λ_i} – Refletância espectral difusa medida para o comprimento de onda λ_i ;

$\Delta\lambda_i$ – Variação do comprimento de onda (nm);

E_{λ} – Irradiância espectral do sol na superfície terrestre (W/ (m² nm));

n – Número de medições

A ponderação da refletância espectral está definida na equação 3.

$$SR = 0.05UV + 0.42Vis + 0.53NIR \quad (3)$$

As cinco amostras desenvolvidas por Ramos et al. (2021) tinham 1 m² de dimensão, sendo que, três eram compostas por três camadas e as restantes duas amostras eram constituídas por quatro camadas. A diferença nos dois sistemas reside no facto de o primário apenas ter sido aplicado em duas amostras.

As amostras com três camadas eram constituídas à base de EPS com revestimento de cimento, minerais, entre outros aditivos com um acabamento orgânico de base mineral. Relativamente às amostras com quatro camadas, a constituição das mesmas é semelhante às de três camadas, no entanto, nestas duas amostras com quatro camadas foi aplicado um primário mineral.

A camada de acabamento tem uma espessura de aproximadamente 2 mm na qual 3% são nanopartículas de dióxido de titânio (TiO₂). Para a camada de primário foi utilizada uma camada de fina, com espessura entre 0.1 e 0.15 mm, com TiO₂ incorporado. A camada de revestimento de base foi aplicada em 2 camadas com espessura de 1.5 mm reforçada com fibra de vidro entre as mesmas. Relativamente à camada de EPS, esta, possui uma espessura de 4 cm.

Para avaliar os efeitos da incorporação de NRP, as amostras pretas diferem nas composições no que diz respeito ao pigmento incorporado na camada de acabamento. A amostra “S” é a amostra *standard* com 48% de pigmentos e código de cor PBk11. A outra amostra tem o código de cor PBr29 e incorpora 74% de pigmentos.

Foi concluído que a inclusão de NRP contribuiu para o acréscimo da refletância solar e, por conseguinte, a diminuição da temperatura superficial, particularmente em para temperaturas mais elevadas, mesmo quando analisado em cores escuras. A refletância difusa, medida com recurso ao espectrofotómetro, em revestimentos rugosos contribui quase na totalidade para toda a refletância solar, teoria suportada com base numa boa correlação entre a refletância difusa e a refletância solar, avaliada com recurso ao piranómetro (Ramos et al.). Estudo realizados por outros autores também evidenciam as vantagens de incorporar NRP nos revestimentos das fachadas. Cozza, Alloisio, Comite, Di Tanna, and Vicini (2015), referem que existe um aumento na refletância solar quando são utilizados NRP ao invés de pigmentos *standard* de 30% para fachadas pretas e cinzentas, verificando que valores mais elevados da refletância solar total conduzem a maior refletância de radiação infravermelha que por sua vez diminui a temperatura superficial, o que induz um aumento da durabilidade dos materiais do revestimento.

A refletância solar dos revestimentos das fachadas é também afetado pelo envelhecimento dos mesmos devido a fatores climáticos, nomeadamente, radiação solar e ação da chuva. Na cobertura de um edifício em Milão, a 35 m de altura, foi realizado um estudo das consequências do envelhecimento do revestimento do mesmo durante 4 anos, em duas fachadas com características distintas, nomeadamente, a cor (uma branca e outra bege), orientação (norte e sul), sendo ambas fachadas em posição vertical embora uma delas esteja protegida. Neste estudo levado a cabo por Paolini et al. (2017) foi medida a refletância solar tendo sido verificada um decréscimo na mesma, mais concretamente, na fachada de cor branca o valor passou de 0,75 para 0,55 num período de 4 anos e na fachada bege a refletância solar diminuiu de 0,46 para 0,38 no mesmo espaço temporal. O material escolhido para as amostras, à base de siloxano (polímero), são de uso comum para isolamento exterior de fachadas, com uma espessura de 2 mm tendo sido aplicado numa camada de base com 4 mm de espessura. O espectrofotómetro utilizado por Paolini et al. (2017) foi um PerkinElmer Lambda 950 com um esfera integrada de 150 mm, intervalo de comprimento de onda entre 300 e 2500 nm com resolução espectral de 5 nm sendo que as medições foram realizadas no centro de cada amostra com uma área de medição de cerca de 1 cm².

2.3.2. ALTERAÇÃO DA COR

A cor é uma propriedade importante para o ser humano, confirma a área da psicologia através de estudos realizados no último século, esta propriedade ótica, dependendo da cor e das suas características, é capaz de transmitir ao cérebro humano a sensação de prazer, amplitude, originalidade em espaços arquitetónicos (Janssens, 2013; Ramos, Souza, Maia, & Almeida, 2020a). Ao contrário de outras áreas de estudo, como na alimentação e na medicina, em que a cor é vista como um parâmetro na aferição da qualidade, no sector da construção a cor assume um papel distinto, mais concretamente, no campo estético. Atualmente, a preocupação em tornar os edifícios sustentáveis do ponto de vista energético e nos materiais com durabilidade otimizada, a cor das fachadas dos edifícios assume um papel importante devido à temperatura que estas atingem. Numa fachada escura, a temperatura verificada é habitualmente superior a uma fachada clara. Consequentemente, esta diferença de temperatura afeta de forma significativa a degradação das fachadas e sendo as mesmas dependentes da cor aplicada na camada de acabamento do revestimento (Ramos et al., 2020a). Como referido por Hanson (2012) e Ramos et al. (2020a) a aparência da cor dos objetos, neste caso fachadas de edifícios, é influenciada pela geometria da iluminação, a forma dos objetos, assim como, a própria refletância dos materiais. Para melhor compreensão no estudo da cor existem certas propriedades que devem ser analisadas.

O brilho é definido pela luminosidade, por outras palavras, é definido pela perceção visual no qual uma certa área emite ou reflete mais ou menos luz, ou seja, é o critério que permite distinguir o preto da cor branca. A saturação ou croma define o grau de pureza do cinza, mais concretamente, o croma permite avaliar o quão colorida é uma cor. Outro parâmetro da cor é a matiz que por sua vez corresponde a um comprimento de onda, sendo que, os mais curtos são atribuídos ao violeta e o mais comprido ao vermelho, isto quer dizer que a matiz corresponde à parte visível do espectro da radiação. A combinação dos comprimentos de onda referidos anteriormente, permite obter uma perceção ótica no qual é possível perceber se um objeto é idêntico a outro da cor vermelha, amarela, verde ou azul (Choudhury, 2014; Ramos et al., 2020a). Uma forma de caracterizar a cor e o brilho é através do sistema CIELab, no qual uma superfície padrão reflete a radiação que nela incide. Se a cor da radiação refletida for da mesma cor emitida pela fonte de luz, então o parâmetro a* e b* são zero (Hanson, 2012; Ramos et al., 2020a). O valor de a* e b* corresponde ao croma e à matiz, respetivamente, sendo que o L* é atribuído ao brilho. Na Figura 5 está representada a variação das coordenadas para cada parâmetro e consequente cor atribuída à respetiva coordenada considerada pelo sistema (Ramos et al., 2020a; Sattar, 2019).

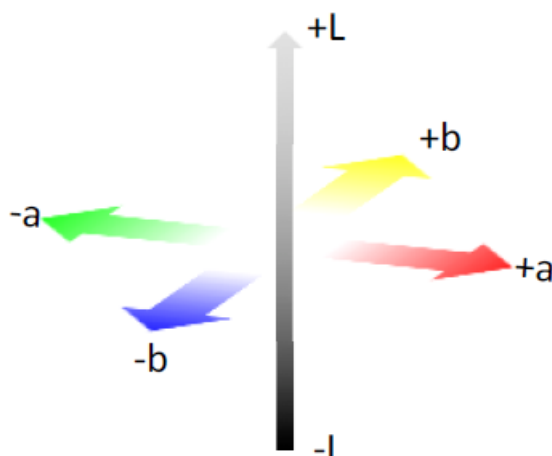


Figura 5 - Sistema CIELab

Para melhor compreensão da Figura 5, o parâmetro L^* relativo ao brilho, varia entre 0 e 100, sendo que para zero a cor da amostra em questão é preto e para um L^* de 100 a cor da amostra é branca. No parâmetro a^* quanto maior o valor positivo mais a amostra se aproxima do vermelho, ao contrário, quanto maior é o valor negativo mais a cor da amostra fica próxima do verde. Respetivamente ao valor de b^* , quanto maior for o valor positivo mais a cor da amostra se aproxima do amarelo, enquanto para o lado negativo a cor tende para o azul. Definido o significado dos parâmetros L^* , a^* e b^* pela Figura 5 para uma correta caracterização da cor, o sistema CIELab necessita que se definam mais parâmetros, isto é, o parâmetro C^* (croma) cujo valor aumenta à medida que a intensidade da cor é mais perceptível ao olho humano e em que a variação do valor do C^* (ΔC) representa a diferença na transmissão/reflexão da luz saturada (Hanson, 2012; Ramos et al., 2020a), é calculado com recurso à equação 4 (ISO, 2008; Ramos et al., 2020a).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (4)$$

Outro parâmetro, também já referido anteriormente é a matiz, definida pela equação 5 (ISO, 2008; Ramos et al., 2020a).

$$h^* = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (5)$$

A variação total da cor alvo de análise (ΔE) representa a relevância da diferença de cor entre a amostra envelhecida e a amostra nova. O cálculo de ΔE é elaborado como se apresenta na equação 6 (ISO, 2008; Ramos et al., 2020a).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2} \quad (6)$$

Cozza et al. (2015) e Ramos et al. (2020a) quantificaram a percepção da variação da cor (ΔE), como mostra a Quadro 4.

Quadro 4 - Percepção da variação total da cor (Cozza et al. (2015); Ramos et al. (2020a))

Percepção	Diferença de cor total
Muito perceptível	$\Delta E > 3$
Perceptível	$1.5 < \Delta E < 3$
Quase imperceptível	$1.5 < \Delta E$

Um índice igualmente importante e que completa a caracterização da cor é o Índice de Amarelecimento (YI) que quantifica a degradação produzida pela luz, pela exposição a agentes químicos e consequente degradação, é quantificada pela equação 7 (Pathare, Opara, Al-Said, & technology, 2013; Ramos et al., 2020a) e variação dos valores expressa a degradação nos módulos, portanto, significa que quanto mais elevado for YI maior foi a degradação da amostra devido a agentes químicos (Ramos et al., 2020a).

$$YI = \frac{142.85 b^*}{L^*} \quad (7)$$

Vários autores estudaram recentemente os impactos e os efeitos que a incorporação de nanopartículas provocam na cor do revestimento de fachadas de edifícios. Três dissertações no âmbito do Mestrado em Engenharia Civil foram realizadas, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), três campanhas experimentais em três anos distintos, consecutivos, nomeadamente, em 2016, 2017 e 2018 em que foi avaliada pelos autores a alteração que a cor das amostras sofreram tendo por comparação amostras com e sem *cool pigments*. O método utilizado pelos autores foi o da norma ASTM E1918A designado por “Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-sloped Surfaces in the Field” que é realizado com recurso ao Piranómetro. Esta norma consiste num método alternativo (não é uma norma internacional) proposto por Hashem Akbari et al. (2008), consiste numa variante à norma ASTM E1918 que mede a refletância solar de superfícies solares quadradas ou circulares com, no mínimo, 1 m de lado (ou 1 m de diâmetro). São acrescentadas às amostras uma máscara preta e outra branca de refletância opaca, conhecida pela norma da ASTM E903 (“Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres”). Tal como dita a norma original (ASTM E1918), de Sá (2018) refere que este ensaio deve ser realizado apenas em dias claros, com sol intenso e céu limpo durante a execução das medições. O método é válido quando o ângulo do sol é inferior a 45° relativamente à normal da superfície. As amostras analisadas pelo autor e que foram sujeitas aos ensaios possuem diferentes constituições. Duas das amostras eram à base de EPS, outra foi um reboco térmico, outro sistema testado era constituído por placas de betão leve.

Após a análise dos resultados obtidos nas campanhas experimentais levadas a cabo por Carneiro (2016), da Costa (2017) e de Sá (2018), as conclusões tiradas por de Sá (2018) foram que as amostras sem primário, brancas com TiO₂ (A1) e as amostras com primário com *cool pigments* pretas sem TiO₂ com 0,2% de *cool pigments* (A2) apresentaram a maior variação de cor com importância dada à cor do revestimento final destas duas amostras, pois a amostra A2, é o oposto da cor da amostra revestida de branco (A1). A não inclusão de TiO₂ na camada de revestimento das amostras demonstrou influência na

durabilidade da cor, pois na análise às amostras com primário com *cool pigments* revestidas de preto sem TiO₂ (A3) e nas amostras A2, a cor revelou um clareamento ao longo do tempo. Não só o TiO₂ tem influência na cor como a presença de *cool pigments* também o tem, pois, de acordo com de Sá (2018) em três anos de medições foi verificado que nas amostras de reboco térmico (sem primário revestidas de preto com TiO₂) (B1) e ETICS (sem primário revestidas de preto com TiO₂) (B2), ou seja, sem *cool pigments*, a cor apresenta menor resistência em manter a cor de origem pois estas mesmas amostras foram as que obtiveram as diferenças de cor mais significativas quando comparadas com amostras que possuem *cool pigments*. O mesmo foi possível confirmar pelo autor nas amostras A3 e A2, ambas com *cool pigments*, no entanto, a amostra A3 demonstrou menor variação na cor devida à maior presença de *cool pigments* no revestimento. Não só é importante o revestimento final do sistema como o próprio núcleo do mesmo. As amostras que são constituídas por reboco térmico, que tem como função o proporcionar isolamento térmico à fachada, apresentam um incremento na variação da cor quando comparadas com as amostras compostas por EPS (poliestireno expandido), ou seja, o EPS apresenta-se como um material mais estável e durável. A cor do material e a sua variação produzem impacto no comportamento térmico das amostras como também na refletância do revestimento, pois quanto mais a cor clarear ao longo do tempo, maior será a refletância solar, ou seja, devido ao aumento do parâmetro L* (Sistema CIELab) (de Sá, 2018; Revel et al., 2014). Outras conclusões, desta vez retiradas por Ramos et al. (2020a), confirma, tal como de Sá (2018), que com a incorporação de nanopigmentos a variação total da cor (ΔE) preta no fim do ciclo 1+2 (ciclo 1 – ΔE entre o primeiro ano e o ano zero; ciclo 2 – ΔE entre o segundo ano e o primeiro ano) diminui, ao contrário da cor vermelha que obteve um acréscimo do ΔE . Com as amostras expostas ao fim dos dois anos, a única cor que apresentou a variação total da cor (ΔE) acima de três foi a vermelha. De acordo com o *European Cool Roof Council* seria de esperar maior degradação nos nanopigmentos após o primeiro ano exposto às condições climáticas (Gobakis et al., 2016). No entanto, tal não foi comprovado na campanha experimental levada a cabo por Ramos et al. (2020a) uma vez que os nanopigmentos apenas apresentaram sinais de degradação após o início do segundo ano de exposição. Neste estudo, os autores apuraram que nas amostras pretas, a presença de nanopigmentos, provocou um clareamento na cor e um escurecimento nas amostras vermelhas. Relativamente às amostras com nanopigmentos incorporados foi verificada uma menor variação do parâmetro L* aquando do fim da campanha experimental, em que as duas cores ficaram mais claras. Caso as amostras não sejam sujeitas a ciclos de exposição, quando não são incorporados nanopigmentos, as mesmas escurecem comparativamente às amostras constituídas por nanopigmentos (Ramos et al., 2020a). No entanto, no estudo levado a cabo por Ramos et al. (2020a) a relação entre a diferença de cor total e a variação da luminosidade não foi verificada.

2.3.3. EMISSIVIDADE

O conceito de emissividade provém da aptidão que uma certa superfície detém em emitir energia comparativamente à energia emitida por um corpo negro (teórico). É possível, com recurso à Lei de Kirchhoff, relacionar a emissividade de um designado material com a refletância do mesmo, assim como, com a absorptância e transmitância, tal como referido na equação 8 (Havens & Sharp, 2015), em que para um certo comprimento de onda absorptância é igual à emissividade. Assim sendo, a emissividade para esse comprimento de onda é obtida através da equação 9 (INGLAS, 2022) apenas se a transmitância for igual a zero. Na possibilidade do material ser opaco, a relação é traduzida pela equação 10 (Musikant, 2003).

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (8)$$

No qual:

α – Absortância;

ρ – Refletância;

τ - Transmitância

$$\begin{aligned}\alpha_\lambda &= \varepsilon_\lambda \\ \varepsilon_\lambda &= 1 - \rho_\lambda \text{ se } \tau = 0\end{aligned}\tag{9}$$

Em que:

α_λ – Absortância para um certo comprimento de onda;

ε_λ – Emissividade para um certo comprimento de onda;

ρ_λ – Refletância para um certo comprimento de onda;

τ - Transmitância

$$\varepsilon + \rho = 1\tag{10}$$

Em que:

ε – Emissividade;

ρ – Refletância

Meola, Boccardi, and Carlomagno (2016) refere que a emissividade de um objeto real é, na verdade, dependente do comprimento de onda (ε_λ) sendo designado por coeficiente de emissividade espectral. Este coeficiente está expresso na equação 11. No entanto, de acordo com Meola et al. (2016) um material emite apenas uma fração da energia (E_λ) relativa à energia total emitida pelo corpo negro ($E_{\lambda b}$), quando as condições de temperatura e o comprimento de onda são iguais. Outro fator a ter em conta é que a emissividade (ε) e a temperatura do material são proporcionais à energia total (W m^{-2}) emitida pelo mesmo (Stewart & Mills, 2021). Um corpo cinzento é um corpo teórico em que a emissividade não varia com o comprimento de onda (Meola et al., 2016). O autor expressa através de um gráfico um comparativo entre um corpo negro, um corpo cinza e um material real, quando analisados com as mesmas condições, nomeadamente, de temperatura. Na Figura 6 é de observar que a curva do corpo cinza e do corpo negro são semelhantes, no entanto, a curva do corpo cinza apresenta valores da emissividade espectral irradiante mais reduzida (Meola et al., 2016).

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{\lambda b}}\tag{11}$$

Em que:

ε_λ – Coeficiente de emissividade espectral;

E_λ – Energia emitida pelo material em análise ($\text{W/m}^2 \mu\text{m}$), no comprimento de onda λ ;

$E_{\lambda b}$ – Energia emitida pelo corpo negro ($\text{W/m}^2 \mu\text{m}$), no comprimento de onda λ .

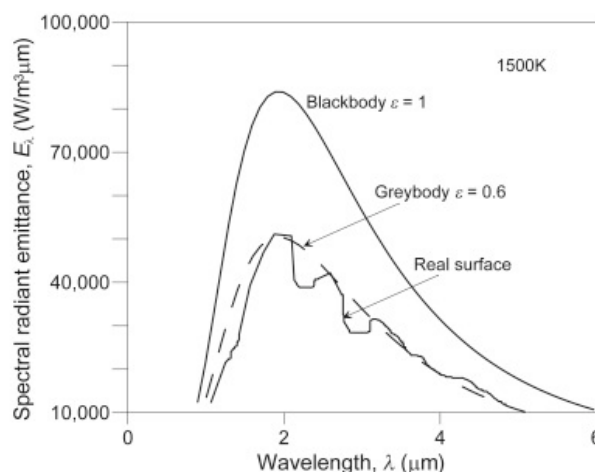


Figura 6 - Relação entre emissividade espectral irradiante

O conhecimento da emissividade dos materiais revela-se muito importante para realizar medições da temperatura com recurso a câmara de infravermelhos. Os valores da emissividade dos materiais correntes são facilmente encontrados em vários documentos. No entanto, apesar de serem um ponto de referência, poderão não ser úteis aquando do uso de uma câmara de infravermelhos para efetuar as medições. Isto porque, a direção e o comprimento de onda dos valores de referência não estão, de forma geral, expressos, logo, a emissividade (ε) disposta nas tabelas a consultar poderá não ser válida (Meola et al., 2016). Para não ocorrer uma diferença significativa entre a emissividade medida e o valor da emissividade tabelada, as medições deverão ser executadas com uma câmara de infravermelhos com características condizentes com as normas internacionais em vigor, o que

consiste em realizar as medições no material em estudo e comparar com um corpo negro (com ambos os materiais à mesma temperatura). Meola et al. (2016) refere ainda que materiais de alta emissividade dão origem a resultados termográficos mais fiáveis.

Apesar de os materiais com elevada emissividade conduzirem a resultados termográficos mais fiáveis, na engenharia civil é cada vez mais importante a produção de sistemas de baixa emissividade, pois devido às questões energéticas e ambientais, é maior a necessidade de incrementar a eficiência energética com um isolamento térmico mais eficaz (Grothe, Kaskel, & Leuteritz, 2012). Nos últimos anos, Grothe et al. (2012) menciona que materiais nanocompósitos com baixa emissividade têm vindo a ser desenvolvidos via sol-gel, particularmente, materiais constituídos por TiO_2 à base de poliéster.

Ensaio realizados numa amostra significativa de materiais com características completamente distintas A. C. M. Pereira (2015) conclui que o material que constitui o apoio da amostra onde será executado o ensaio não afeta o valor da emissividade, assim como, a inclinação do mesmo. Embora, a emissividade seja manipulada caso o material em análise tenha aplicada uma tinta (A. C. M. Pereira, 2015).

Para argamassas térmicas e revestimentos térmicos, foram realizadas medições por J. F. Maia (2019) que conclui que a emissividade para os dois tipos de argamassas e revestimentos analisados apresentam valores idênticos, em concordância com a campanha experimental levada a cabo por Barreira, Bauer, Mustelier, and Freitas (2015), assim, foi concluído que as amostras são detentoras de alta emissividade. J. F. Maia (2019) observou ainda um aumento da emissividade na camada de acabamento dos revestimentos. Representa assim, que esta camada de acabamento reflete mais energia comparativamente ao reboco de acabamento.

3

CAMPANHA EXPERIMENTAL – MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1 MATERIAIS CONSTITUINTES DAS AMOSTRAS

3.1.1.1 ETICS

O presente capítulo irá ter foco na constituição das amostras utilizadas para o estudo da alteração das propriedades superficiais dos materiais. Mais à frente, ainda neste capítulo, serão detalhados os métodos implementados para o estudo referido.

Como referido no capítulo anterior, as cores escuras são, com alguma frequência, requisitadas pelos utilizadores dos edifícios para o revestimento das fachadas dos mesmos, no entanto, estas cores apresentam problemas ao nível do conforto térmico e na durabilidade das fachadas. Estes problemas, tal como já referido no capítulo do Estado de Arte, originam sobreaquecimento da fachada durante o dia, sendo que com o arrefecimento das temperaturas durante a noite, a temperatura da fachada também vai sofrer um decréscimo. Esta variação de temperatura provoca a expansão e retração dos materiais constituintes de uma fachada, que por sua vez formam fissuras nos materiais e/ou folgas nas juntas entre, por exemplo, os painéis de ETICS.

O ETICS, sistema constituído por várias camadas, nomeadamente, EPS, argamassa de base com rede de fibra de vidro e por fim o acabamento, no qual serão incorporados vários tipos de nanopartículas de modo a realizar uma análise do efeito que estas produzem no sistema, particularmente, na emissividade, refletância solar e variação da cor. De referir que o revestimento que vai ser aplicado no ETICS é de composição orgânica com pigmento preto de capa fina, sendo utilizado de forma corrente no setor da construção e também é alvo de variados testes em trabalhos académicos anteriores.

Este revestimento é próprio para fachadas com sistema ETICS, e tem uma paleta de 110 cores disponíveis. O tipo de suporte adequado para a aplicação deste material deverá ser um reboco à base de cimento, gesso ou cal, ETICS ou placas de gesso cartonado. As restantes características estão reproduzidas no Quadro 5 (Saint-Gobain, 2021).

Quadro 5 - Propriedades weberplast decor M/F (Saint-Gobain, 2021)

Massa volúmica	1700-1800 kg/m ³
Permeabilidade ao vapor de água	15< V ₂ ≥150; 1,4< Sd ≥0,14 – Classe média ⁽¹⁾

Absorção de água	$W_3 \leq 0,1$ – Classe baixa ⁽²⁾
Aderência	$\geq 0,30$ Mpa
Durabilidade	Desempenho não determinado
Condutibilidade	0,82 W/m.k
Reação ao fogo	A2-s1, d0

(1) – Velocidade de transmissão do vapor de água, V (g.m⁻². dia⁻¹); Espessura da camada de ar com difusão equivalente, Sd (m);

(2) - Coeficiente de permeabilidade à água, W (Kg.m⁻² .h^{-0.5}).

Relativamente às nanopartículas, os compostos utilizados foram o dióxido de titânio de rutilo (TiO₂ R), o óxido de zinco (ZnO) e o dióxido de silício (SiO₂). Todas as nanopartículas referidas foram adquiridas a uma empresa especializada na produção, sendo que a composição destas é à base de metais em quantidades superiores a 99,9% tendo sido implementadas no estado em que foram adquiridas, ou seja, não foi executada qualquer purificação adicional. No Quadro 6, estão representados os tamanhos das nanopartículas utilizadas no estudo.

Quadro 6 - Dimensões das nanopartículas utilizadas no revestimento do ETICS

Nanopartículas	Dimensão das partículas (nm)			
TiO ₂ R	30			
ZnO	10-30	100	500	1000
SiO ₂	20-30	60-70	400	

O colorante utilizado como revestimento de acabamento para o ETICS é um colorante comercial preto com teor de 48% de pigmentos. As restantes características deste colorante estão representadas no Quadro 7.

Quadro 7 - Características gerais do colorante

Colorante	Composição química do pigmento	Cor	Índice da cor	Opacidade	Densidade (kg/m ³)
Preto	Fe ₂ O ₄ (magnetite)	Cinzentos-escuro ou preto com tons de azul a amarelo	PBk 11	2-3	1911

De referir que o sistema ETICS usado para os ensaios apresenta uma espessura de 4 cm de EPS com as restantes espessuras do acabamento a serem as recomendadas pelo fabricante do sistema, nomeadamente, a Weber Saint-Gobain.

3.1.1.2 SIP

O painel SIP é composto por um núcleo entre as duas placas de OSB. O núcleo do SIP é tradicionalmente composto apenas por uma placa de EPS, no entanto, apesar de o EPS ser muito eficaz como isolamento térmico, o mesmo não se aplica quando o tema é sustentabilidade. Então, no âmbito do projeto Circular2B, o núcleo do SIP não será composto por EPS, mas sim por materiais sustentáveis, nomeadamente, por argamassas que incorporam vários tipos de resíduos provenientes de diferentes indústrias. O mesmo se aplica ao reboco que será aplicado no exterior do SIP.

A composição da argamassa produzida para o núcleo do SIP é à base dos seguintes resíduos:

- Cinzas volantes (90%);
- Poliuretano (5%);
- Madeira (5%);
- Pó de alumínio (0,1%);
- Outros ativadores

Os componentes da argamassa do núcleo do SIP foram fornecidos por várias empresas em atividade no mercado português, ou já estavam em stock no laboratório da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) ou da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP). As cinzas volantes, principal constituinte do núcleo do SIP, foi fornecido pela PEGOP, mais concretamente na central termoeletrica do Pego, que apesar de estar com produção encerrada devido a políticas governamentais relacionadas com o ambiente, ainda tem armazenado milhões de toneladas de resíduos que podem ser reaproveitados a custo reduzido.

Os resíduos de madeira a utilizar na produção das amostras não possuem, por exemplo, integridade estrutural necessária para a execução de testes de resistência mecânica, entre outros testes que serviram para outros tipos de resíduos, mas não para este, pois, a natureza deste material não é adequada para mais ensaios além dos que foram realizados, como tal, os mesmos apenas foram sujeitos a análises de densidade e de dimensão das partículas.

O poliuretano, que foi incorporado em baixa quantidade, foi fornecido sob a forma de partículas trituradas e posteriormente processadas de modo a uniformizar a dimensão das partículas. Dadas as suas características naturais, apenas foi submetido a análises morfológicas e de determinação das dimensões das partículas. Apesar do poliuretano não ser detentor de uma estrutura capaz de resistir a ensaios de resistência mecânica, este material contribui de forma considerável para o incremento da porosidade quando incorporado numa mistura, por exemplo, para a argamassa desenvolvida para o núcleo do SIP.

Relativamente ao reboco exterior para o SIP, a sua constituição é à base de resíduos de construção e demolição (RCD) (50%), cinzas volantes (25%) e vidro moído (25%), e outros ativadores. Os constituintes das amostras foram pesados de modo a atingir um peso total do provete de 1,2 kg.

A cinza volante provém do mesmo lote, já descrito previamente, que foi utilizado para a produção das amostras do núcleo do SIP.

Os RCD são provenientes de ladrilhos cerâmicos e equipamentos sanitários demolidos, sendo agora reaproveitados neste projeto para servir de componente principal num reboco exterior.

Os resíduos cerâmicos, quando chegam ao laboratório ainda se encontram sem qualquer tratamento, ou seja, o estado em que saíram da obra no qual foram demolidos é o estado em que são fornecidos a quem vai reaproveitar este tipo de material. Assim, como as partículas são muito heterogêneas na sua dimensão, desde pó a partículas com dimensões de vários centímetros, é necessário proceder à moagem do resíduo. Como tal, com recurso a um equipamento de moagem por abrasão, foi realizado o designado

ensaio de abrasão de *Los Angeles* que permite moer as partículas do resíduo com recurso a um tambor rotativo que contém no seu interior esferas metálicas que desgastam as partículas dos resíduos. Neste caso, a moagem teve um período de 32h para chegar à granulometria mais adequada para o propósito.

Quanto à composição química dos resíduos cerâmicos, estes são maioritariamente compostos por dióxido de silício (70,98%) e por óxido de alumínio (17,87%).

Relativamente ao resíduo de vidro, este foi fornecido por duas empresas. Uma das empresas, sediada em Vila Real, forneceu resíduos de vidro de lentes oftálmicas. Este material tem na sua composição química 58,37% de dióxido de silício e 14,81% de silício/alumínio, sendo estes dois os principais elementos. Para testar a resistência mecânica foi produzido um provete cilíndrico, no entanto, devido à desmoldagem deficiente do provete, este ficou estruturalmente enfraquecido, logo não foi possível proceder à carga do mesmo não tendo sido obtidos resultados de resistência à compressão.

O restante resíduo de vidro foi fornecido por uma empresa de garrafas de vidro, com sede em Vila Nova de Gaia. Este resíduo é multicolor. Comparativamente ao resíduo de vidro proveniente de lentes oftálmicas, este vidro mostrou uma melhoria na reação com os ativadores podendo ser considerado uma solução alternativa válida.

A análise à composição química do vidro proveniente de garrafas de vidro demonstra que este é essencialmente constituído por dióxido de silício (68,27%), seguido de óxido de sódio (12,28%) e finalmente por óxido de cálcio (12,10%).

Por fim, para finalizar a camada de acabamento do SIP, na argamassado reboco exterior, foi utilizada uma tinta acrílica comercial aquosa com dispersão de carbono com pigmento preto. Esta tinta, de acordo com a ficha técnica da mesma é adequada para revestimentos exteriores para qualquer tipo de clima e pode também ser utilizada para situações de reabilitação de ETICS. O Quadro 8 representa as demais características da tinta utilizada (CIN, 2021).

Quadro 8 - Características gerais da tinta (CIN, 2021)

Tinta	Composição química do pigmento	Cor	Índice da cor	Opacidade	Densidade (kg/m ³)	Tipos de suporte
Tinta aquosa 100 % acrílica	Carbono preto amorfo	Preto Intenso, marrom	PBk 7	1-2	1364	Argamassas cimentícias; Tijolos; Pedra; Gesso

A fim de analisar o efeito da incorporação das nanopartículas nas propriedades superficiais do SIP, nomeadamente, na argamassa do reboco térmico exterior e na argamassa do painel da fachada ventilada, foram incorporadas três nanopartículas diferentes com as características indicadas no Quadro 9.

Quadro 9 - Nanopartículas incorporadas na argamassa para o SIP

Nanopartículas	Dimensão das partículas (nm)	Percentagens testadas
----------------	------------------------------	-----------------------

TiO ₂ R	30	
ZnO	500	1%; 3%; 5%; 8%; 12%; 16%; 20%
SiO ₂	60-70	

Um esquema do SIP está representado na Figura 7.

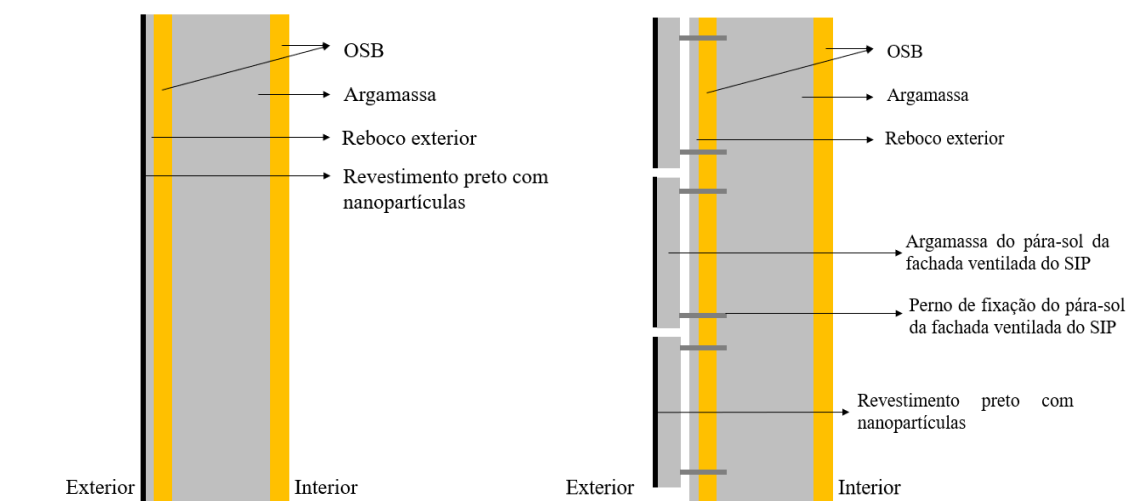


Figura 7 - Esquema do SIP com reboco térmico exterior (à esquerda); Esquema do SIP com pára-sol de fachada ventilada (à direita)

No Circular2B, para além da produção do núcleo, serão também produzidas amostras de argamassa que funcionarão como para-sol de fachada ventilada, esta com a mesma composição do núcleo do SIP.

Como o foco do estudo está na avaliação das propriedades das camadas exteriores do SIP, apenas foi analisada a argamassa referente ao núcleo/painel de fachada ventilada, assim como o reboco térmico exterior para o SIP.

3.1.2 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS

3.1.2.1 ETICS

De forma a estudar os efeitos da incorporação de nanopartículas nas propriedades superficiais e no desempenho higratérmico do ETICS foram produzidas diversas amostras com várias nanopartículas incorporadas para diferentes dosagens e dimensões das partículas.

A produção das amostras é iniciada com a montagem de um cenário com todos os equipamentos e materiais necessários ao apoio da produção das mesmas, como é apresentado em Figura 8.

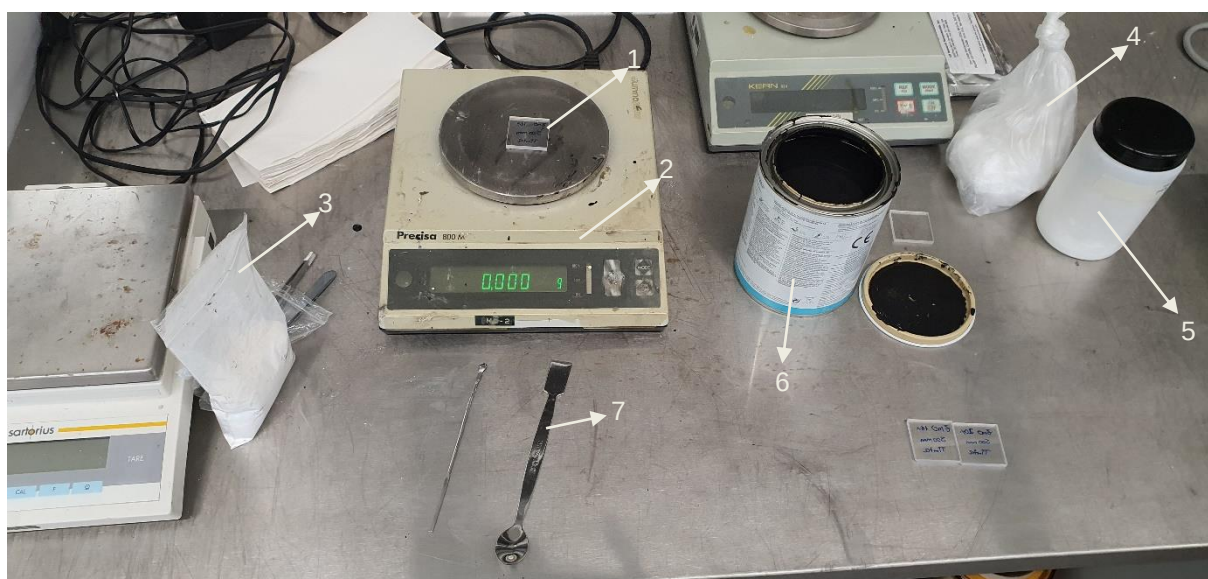


Figura 8 - Setup de produção das amostras

No Quadro 10 estão designados os equipamentos que se podem observar na Figura 8.

Quadro 10 - Materiais e equipamentos necessários à produção das amostras

ID	Equipamento/Material
1	Placa de acrílico
2	Balança
3	Nanopartículas de ZnO
4	Nanopartículas de SiO ₂
5	Nanopartículas de TiO ₂ R
6	Tinta aquosa 100% acrílica/Colorante
7	Espátula/Colher

Primeiramente é necessário proceder à limpeza de todas as placas de acrílico com álcool etílico de forma a eliminar poeiras e sujidades depositadas na superfície das mesmas e que interfiram na aderência dos materiais. Posteriormente, foi procedida a identificação de todas as placas com a designação da nanopartícula, dimensão da mesma em nanómetros, quantidade de nanopartícula presente na mistura (em percentagem) e se a mistura é feita com a tinta acrílica ou com o colorante.

De forma sequencial a produção das amostras nas placas de acrílico para estudar posteriormente a refletância espectral foi levada a cabo através da execução das seguintes tarefas:

- Colocar a placa de acrílico, previamente limpa e identificada, em cima do prato da balança e tarar a mesma de forma a descontar o peso da placa;
- Os primeiros materiais a colocar na placa de acrílico, cuidadosamente (para evitar que fiquem nanopartículas em suspensão no ar), com o auxílio de uma espátula foram as nanopartículas (ZnO , SiO_2 ou TiO_2 R) até atingir o peso previamente determinado;
- Tarar de novo a balança e colocar a tinta acrílica ou o colorante na placa de acrílico, por cima das nanopartículas até atingir o peso, também previamente calculado;



Figura 9 – Balança tarada após colocação da placa de acrílico (à esquerda); Pesagem das nanopartículas (ao centro); Pesagem da tinta acrílica ou colorante (à direita)

- Com o auxílio da espátula misturar bem as nanopartículas com a tinta/colorante de modo a obter uma mistura com a maior homogeneidade possível;
- Novamente com o auxílio de uma espátula, espalhar e barrar a mistura de forma a garantir o maior grau de dispersão possível das nanopartículas e uma superfície lisa e homogênea;
- Disposição das amostras em bancada de laboratório para secagem.

De referir que aquando da produção das amostras, foi sempre produzida uma amostra padrão apenas com a tinta ou com o colorante, ou seja, sem nanopartículas, de forma a servir de referência para a análise dos efeitos das nanopartículas na alteração da cor, esta, será explicada em mais detalhe no respetivo subcapítulo.

A Figura 10 mostra um exemplo de uma amostra padrão no início da secagem.

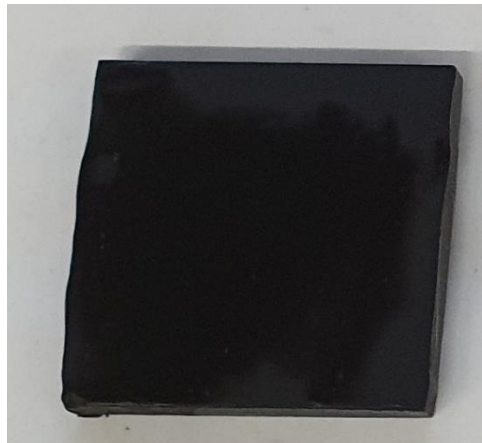


Figura 10 - Amostra pronta para secagem

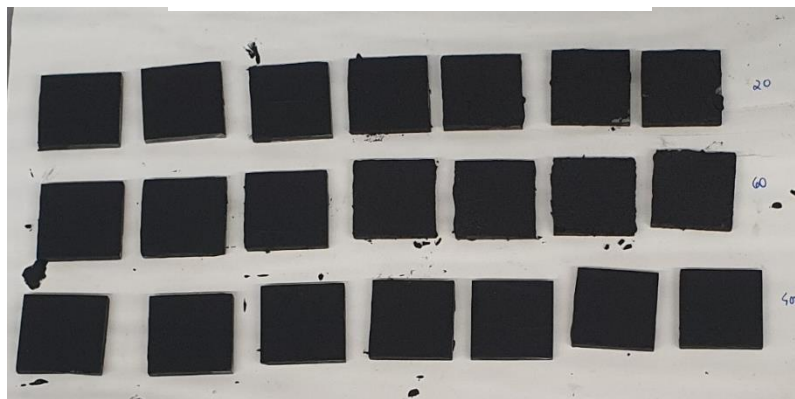


Figura 11 - Amostras de SiO_2 com colorante em processo de secagem

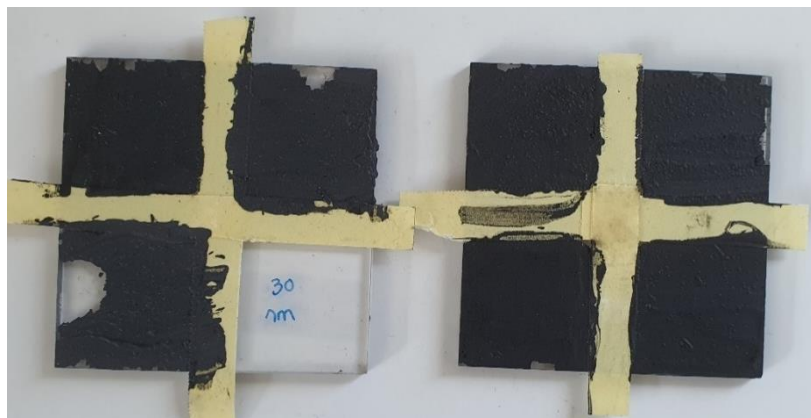


Figura 12 - Amostras de TiO_2 R secas

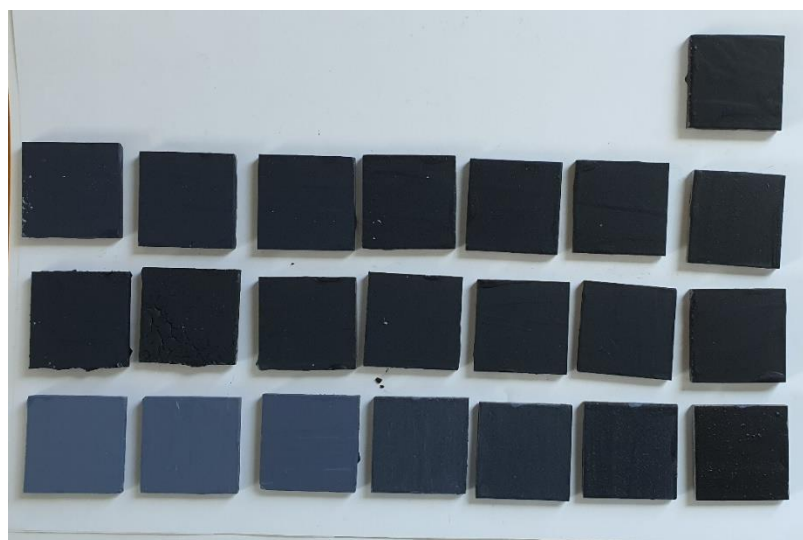


Figura 13 - Amostras de SiO₂, ZnO e TiO₂ R com tinta acrílica em processo de secagem

Relativamente às amostras em placas de acrílico, o Quadro 11 mostra todos os constituintes das amostras ilustradas na Figura 11.

Quadro 11 - Constituição das amostras de SiO₂ com colorante

Nanopartícula	Figura	Nanopartículas incorporadas		Tinta/Colorante	Peso (g)
		Dimensão (nm)	Peso (g)		
SiO ₂	Figura 11	20-30	0,012 (1%)	Colorante	0,985
			0,029 (3%)		0,998
			0,048 (5%)		1,013
			0,075 (8%)		0,969
			0,116 (12%)		1,094
			0,155 (16%)		1,004
			0,193 (20%)		1,080
		60-70	0,009 (1%)		0,984
			0,029 (3%)		1,038
			0,048 (5%)		1,080
			0,077 (8%)		1,035
			0,116 (12%)		0,977
			0,154 (16%)		1,071

	0,194 (20%)	1,055
	0,009 (1%)	1,068
	0,029 (3%)	1,031
	0,048 (5%)	1,054
	0,076 (8%)	1,034
	0,117 (12%)	1,090
	0,156 (16%)	1,023
	0,193 (20%)	1,000

No seguimento dos estudos levados a cabo por Veloso et al. (2022) relativamente às amostras da Figura 12, no qual os respetivos constituintes estão referidos no Quadro 12, o autor refere que estas amostras foram previamente produzidas por Veloso et al. (2022) no âmbito do programa doutoral em que está envolvida. Foram produzidas amostras de TiO₂ R com nanopartículas de variadas dimensões à semelhança das demais amostras. No entanto, após a produção das mesmas e consequente análise da refletância solar, apesar de todas as amostras terem aumentado a refletância total e NIR comparativamente à amostra padrão, a dimensão das nanopartículas que apresentou resultados mais interessantes foi a amostras com nanopartículas de 30 nm. (ETICS)

Quadro 12 - Constituintes das amostras de TiO₂ R com colorante

Nanopartícula	Figura	Dimensão da nanopartícula (nm)	Tinta/Colorante	Percentagem de nanopartículas incorporadas
TiO ₂ R	Figura 12	30	Colorante	1%; 3%; 5%; 8%; 12%; 16%; 20%

No âmbito do projeto *EnReflect*, foram desenvolvidas amostras de placas de ETICS com nanopartículas incorporadas na camada de acabamento. O processo de produção consistiu no barramento de uma camada fina do revestimento orgânico com três nanopartículas distintas com a dimensão das partículas restrita aquela que apresentou resultados mais interessantes nas análises quanto à refletância espectral e quanto à alteração da cor (estes resultados serão discutidos no subcapítulo respetivo aos resultados e discussão dos mesmos).

A sequência de produção das amostras foi a seguinte:

- Peser uma placa de ETICS, previamente cortada com dimensão 20x20 cm, sem qualquer camada de acabamento;



Figura 14 - Aspecto de uma placa de ETICS após corte e sem camada de acabamento

- Tarar a balança e de seguida barrar uma camada fina do revestimento orgânico na mesma placa de ETICS;



Figura 15 - Aspecto do ETICS com revestimento orgânico barrado

- Subtrair o peso da amostra de ETICS sem o revestimento orgânico ao peso da amostra produzida no passo 2 e assim, é determinado o peso do revestimento barrado;
- O peso do colorante foi determinado a cerca de 6% do peso determinado no passo 3;
- A primeira etapa da mistura é a pesagem das nanopartículas. Para tal, foi colocado um recipiente em cima da balança (tarar a balança de forma a descontar o peso do recipiente) e de seguida foram colocadas as nanopartículas até atingir um peso igual a cerca de 8% do peso do colorante (passo 4);
- Finalmente, é adicionado o revestimento orgânico (peso determinado no passo 3) no recipiente;
- Misturar todos os constituintes, com o auxílio de uma colher, até atingir uma pasta o mais homogênea possível;



Figura 16 - Aspecto final da mistura das nanopartículas com o colorante e o revestimento orgânico

- Colocar a mistura na placa de ETICS e com auxílio de uma talocha metálica, a mistura foi barrada de forma a atingir uma camada fina e homogênea, com o maior grau de dispersão possível das nanopartículas;
- Dispor as amostras na bancada do laboratório à temperatura ambiente para secagem;
- Quando as amostras demonstrarem perda de brilho devido à secagem, estas foram talochadas com uma talocha de plástico de modo a uniformizar a superfície e conferir um melhor aspecto final;
- Deixar amostras à temperatura ambiente até secagem total.

A determinação dos pesos está representada no Quadro 13.

Quadro 13 - Pesos dos constituintes da camada de acabamento do ETICS

Material	Peso (g)
Placa de ETICS sem revestimento orgânico ^(a)	143,860
Placa de ETICS com revestimento orgânico ^(b)	274,720
(a) – (b) = Peso do revestimento orgânico ^(c)	130,860
6% x (c) = Peso do colorante ^(d)	7,852
8% x (d) = Peso das nanopartículas	0,628

De forma a ter amostras de referência dos vários constituintes da nova camada de acabamento no ETICS, foram produzidas três amostras padrão com as características representadas no Quadro 14.

Quadro 14 - Constituição das amostras de referência para ETICS

Amostra	Nanopartícula	Dimensão das nanopartículas (nm)	Peso das nanopartículas (g)	Peso do revestimento orgânico (g)	Peso colorante (g)
Placa de acrílico	-	-	-	n.d. ⁽¹⁾	-
Ref. Padrão	-	-	-	131,771	7,842
Ref. M	-	-	-	130,860	-

(1) – A camada correspondente ao revestimento orgânico apenas foi barrada de modo a atingir uma camada fina e uniforme. Não foi determinado o peso pois a amostra foi produzida apenas para efeitos de posterior análise à refletância espectral e variação da cor.

A constituição das restantes amostras produzidas está expressa no Quadro 15.

Quadro 15 - Constituição das amostras de ETICS com nanopartículas e revestimento orgânico

Amostra	Nanopartícula	Dimensão das nanopartículas (nm)	Peso das nanopartículas (g)	Peso revestimento orgânico (g)	Peso colorante (g)
M1	TiO ₂ R	30	0,763 (8%) ⁽¹⁾	131,418	7,870 (6%) ⁽²⁾
M2	ZnO	500	0,764 (8%) ⁽¹⁾	131,035	7,903 (6%) ⁽²⁾
M3	SiO ₂	60-70	0,700 (8%) ⁽¹⁾	131,324	7,901 (6%) ⁽²⁾

(1) – Percentagem relativas ao peso de colorante;

(2) – Percentagem relativa ao peso do revestimento orgânico

A Figura 17 representa o aspeto das amostras em processo de secagem, antes de terem sido talochadas.



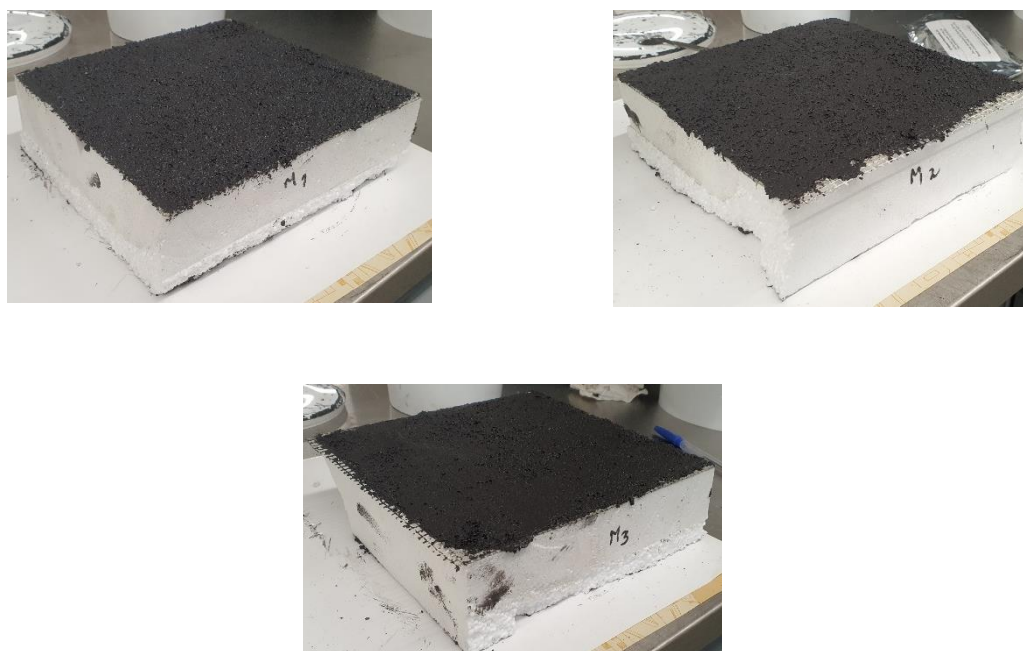


Figura 17 - Amostra de ETICS produzidas

3.1.2.2 SIP

No âmbito do projeto Circular2B foram testadas, à semelhança do processo de produção do ETICS, várias nanopartículas de forma a entender o efeito que estas provocam numa argamassa que servirá de painel de fachada ventilada aplicada a um SIP, assim como para um reboco térmico exterior de um SIP.

No Quadro 16, abaixo representado, apresenta-se a composição das amostras de tinta acrílica com nanopartículas incorporada, como ilustrado na Figura 13.

Quadro 16 - Composição das amostras de ZnO, SiO₂ e TiO₂ R com tinta acrílica

Nanopartícula	Figura	Nanopartículas incorporadas		Tinta/Colorante	Peso (g)
		Dimensão (nm)	Peso (g)		
ZnO	Figura 13	500	0,006 (1%)	Tinta acrílica	0,583
			0,017 (3%)		0,568
			0,028 (5%)		0,575
			0,046 (8%)		0,565
			0,069 (12%)		0,563
			0,089 (16%)		0,577
			0,113 (20%)		0,583
SiO ₂	Figura 13	60-70	0,007 (1%)	Tinta acrílica	0,573
			0,018 (3%)		0,573
			0,028 (5%)		0,573

TiO ₂ R	Figura 13	30	0,046 (8%)	Tinta acrílica	0,595
			0,067 (12%)		0,559
			0,153 (16%)		1,000
			0,190 (20%)		1,010
			0,005 (1%)		0,582
			0,019 (3%)		0,598
			0,028 (5%)		0,579
			0,045 (8%)		0,576
			0,068 (12%)		0,578
			0,090 (16%)		0,594
			0,112 (20%)		0,571

Foram também produzidas amostras de argamassa para o núcleo e para o reboco exterior do SIP na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD). A produção das amostras foi executada com os materiais já descritos no subcapítulo anterior, referente aos materiais utilizados.

As quantidades de material a utilizar foram previamente calculadas pela equipa envolvida no projeto Circular2B. Na produção do núcleo do SIP, após pesagem e mistura de todos os constituintes, a argamassa foi colocada nos moldes para cura e posteriores ensaios de resistência mecânica, descritos com maior detalhe no Quadro 17.

Quadro 17 - Características do processo de cura das amostras do núcleo do SIP

Amostra	Dimensão dos provetes (mm)	Tempo de cura (horas)	Temp. (°C)	Teor de humidade (%)	Tempo de manuseamento (minutos)	R _{flexão} (Mpa)	R _{comp.} (Mpa)
Placa do núcleo	200x200	20	85	40	>30	0,555	1,043

A Figura 18 ilustra uma fase da produção das amostras da argamassa do núcleo do SIP e da fachada ventilada. Sendo que na Figura 19 está representado o aspeto final da argamassa já colocada no molde.



Figura 18 - Mistura dos constituintes do núcleo do SIP



Figura 19 - Enchimento dos moldes que vão dar origem às amostras do núcleo do SIP para posteriores ensaios dos efeitos das nanopartículas nas propriedades superficiais e no comportamento higrotérmico

O processo de produção da argamassa para o reboco exterior do SIP é semelhante ao processo descrito acima para a produção do núcleo do mesmo sistema, no entanto, os constituintes da mistura para o reboco exterior, já referidos no subcapítulo anterior, são diferentes. De notar que, nestas amostras, aquando da colocação nos moldes, de forma a verificar a melhor forma de aderir ao OSB, foi aplicada uma solução de primário em duas placas de OSB sendo que nas restantes duas placas OSB não foi aplicada essa mesma solução.



Figura 20 - Aplicação da solução de primário na base dos moldes a qual é constituída por uma placa de OSB

Nas figuras que se seguem estão ilustrados alguns passos ilustrativos do processo de produção das amostras referentes à argamassa para reboco exterior do SIP, nomeadamente a aplicação da camada de primário nas placas de OSB, a colocação e espalhamento da argamassa nas mesmas e o aspeto final da argamassa após o espalhamento, prontas para iniciarem o processo de cura. A pesagem, mistura dos constituintes da argamassa e respetiva compactação é igualmente processada quando comparada com a produção das amostras de argamassa para o núcleo do SIP.



Figura 21 - Colocação e espalhamento da argamassa na placa de OSB (à esquerda); Aspeto final dos moldes com argamassa para reboco exterior do SIP para iniciar processo de cura (à direita)

A cura das amostras produzidas, tanto as do núcleo do SIP como as do reboco exterior do mesmo, foram realizadas na estufa em ambiente controlado. A Figura 22 apresenta algumas das amostras produzidas na estufa na fase final da cura.



Figura 22 - Amostras do núcleo e reboco exterior do SIP na estufa

Após a produção das amostras ilustradas na Figura 22 e dos ensaios aplicados às mesmas para observar o efeito da introdução de nanopartículas na formulação das amostras, estas amostras foram posteriormente revestidas com tinta acrílica (com e sem nanopartículas) com o objetivo de realizar ensaios que permitam verificar o impacto deste revestimento com vários tipos de nanopartículas incorporadas.

Os materiais e equipamentos utilizados para a produção das amostras foram os indicados no Quadro 18 e ilustrados na Figura 23.

Quadro 18 - Materiais e equipamentos utilizados na produção dos revestimentos

ID	Material/Equipamento	Função
1	Balança	Pesagem das amostras, das nanopartículas e da tinta.
2	Recipiente de plástico	Utilizado para a mistura dos constituintes do revestimento.
3	Espátula/Colher	Colher – Recolha e colocação das nanopartículas no recipiente de plástico; Espátula – Auxílio na mistura dos constituintes do revestimento.
4	Marcador	Identificação das amostras.
5	Luvas de Latex	Equipamento de proteção individual (EPI).
6	Pincel	Espalhamento do revestimento produzido nas argamassas.

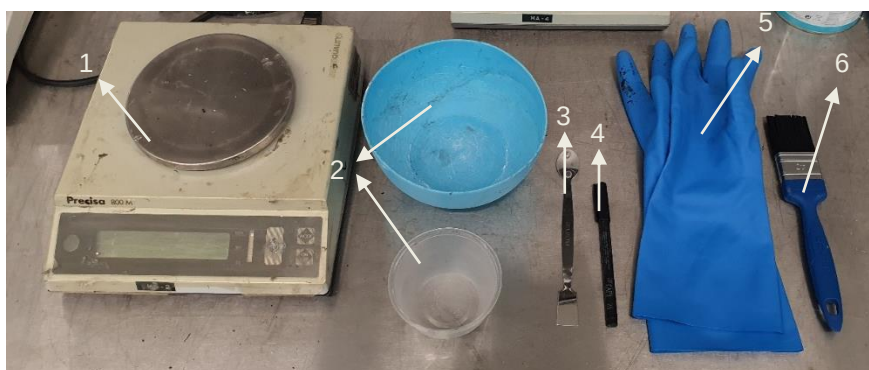


Figura 23 – Identificação dos materiais e equipamentos utilizados para a produção dos revestimentos

Assim, a sequência que se segue, demonstra a produção e aplicação destes revestimentos nas argamassas.

- Pesagem das argamassas (sem revestimento) correspondentes ao núcleo do SIP, que também será testada como painel de fachada ventilada (Figura 25) e ao reboco exterior do SIP (Figura 30);



Figura 24 - Pesagem da argamassa do núcleo do SIP/painel de fachada ventilada sem revestimento

- Relativamente ao revestimento das argamassas do núcleo do SIP/painel de fachada ventilada:
 - i. Aplicar uma camada fina de tinta acrílica de modo a cobrir a argamassa com aspeto uniforme;



Figura 25 - Amostra Ref. PAD com tinta acrílica aplicada

- ii. Pesagem da argamassa e consequente determinação da quantidade de tinta aplicada na amostra (esta amostra será designada de amostra padrão, ou seja, não tem nanopartículas incorporadas e servirá de referência para os ensaios de refletância);

Quadro 19 - Resultados das pesagens na amostra Ref. PAD

Amostra	Peso sem tinta acrílica (g)	Peso com tinta acrílica (g)	Quantidade de tinta acrílica aplicada (g)
Ref. PAD (núcleo do SIP/pára-sol de fachada ventilada)	365,783	370,260	4,479

- iii. Cálculo da quantidade de nanopartículas a incorporar no revestimento em função da quantidade de tinta determinada no passo anterior, neste caso, será 8% do peso de tinta acrílica aplicado na amostra padrão;

Quadro 20 - Determinação da quantidade de nanopartículas a incorporar em cada amostra

Amostra	Quantidade de nanopartículas a incorporar na mistura em função da quantidade de tinta acrílica (%)	Peso das nanopartículas a incorporar em cada amostra (g)
Ref. PAD (núcleo do SIP/Pára-sol de fachada ventilada)	8	0,358

- iv. Colocar recipiente de plástico na balança, tarar e com o auxílio da colher proceder à pesagem das nanopartículas até ao peso determinado no Quadro 20;



Figura 26 - Pesagem das nanopartículas

- v. Tarar a balança novamente e com a colher colocar a tinta acrílica no recipiente até atingir o peso pré-determinado;



Figura 27 - Pesagem da tinta acrílica

- vi. Com a espátula, misturar os constituintes até atingir a maior homogeneidade possível;



Figura 28 - Aspeto da mistura das nanopartículas com a tinta acrílica

- vii. Com a ajuda da colher, verter a mistura para cima da superfície da argamassa;
- viii. Espalhar a mistura com o pincel até obter uma camada fina com o maior grau de dispersão possível.



Figura 29 - Aspeto final da amostra M1 com o revestimento aplicado

O valor das pesagens dos componentes do revestimento está representado em maior detalhe no Quadro 21.

Quadro 21 - Composição dos revestimentos aplicados na argamassa do núcleo do SIP/painel de fachada ventilada

Nanopartícula	Dimensão da nanopartícula (nm)	Peso das nanopartículas (g)	Tinta/Colorante	Peso da tinta acrílica (g)
ZnO	500	0,365 (8%)	Tinta acrílica	4,415
SiO ₂	60-70	0,360 (8%)	Tinta acrílica	4,489
TiO ₂ R	30	0,364 (8%)	Tinta acrílica	4,493

- Para a produção do revestimento da argamassa do reboco exterior, os passos dados foram os seguintes:
 - Dada a disponibilidade de apenas uma amostra, de forma a poder testar os 4 revestimentos, foi feita a divisão da superfície da amostra em 4 quadrados de dimensões semelhantes com fita adesiva;



Figura 30 - Reboco exterior do SIP com fita adesiva a dividir em 4 secções

- Assim sendo após pesagem da argamassa (já com a fita adesiva) o primeiro quadrado foi revestido com uma camada de tinta acrílica;

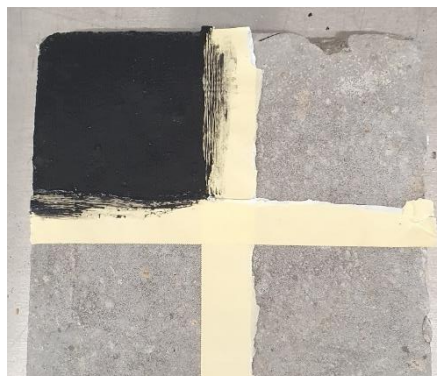


Figura 31 - Secção relativa à mostra Ref. PAD no reboco exterior do SIP com revestimento aplicado

- iii. A argamassa foi pesada de forma a determinar a quantidade de tinta acrílica aplicada (este quadrado é designado como amostra padrão);

Quadro 22 - Determinação do peso de tinta acrílica aplicada

Amostra	Peso sem tinta acrílica (g)	Peso com tinta acrílica (g)	Quantidade de tinta acrílica aplicada (g)
Ref. PAD (Reboco exterior do SIP)	1340,57	1345,81	5,240

- iv. A quantidade de nanopartículas a incorporar foi também em função do peso da tinta aplicada na amostra padrão, neste caso, 8% do peso da tinta;

Quadro 23 - Determinação da quantidade de nanopartículas a incorporar em cada amostra

Amostra	Quantidade de nanopartículas a incorporar na mistura em função da quantidade de tinta acrílica (%)	Peso das nanopartículas a incorporar em cada amostra (g)
Ref. PAD (Reboco exterior do SIP)	8	0,419

- v. A pesagem e mistura das nanopartículas com a tinta foi executada da mesma forma que foi descrita anteriormente;
- vi. A mistura foi vertida e espalhada no quadrado atribuído para cada tipo de nanopartícula com a ajuda da colher e do pincel, respetivamente.

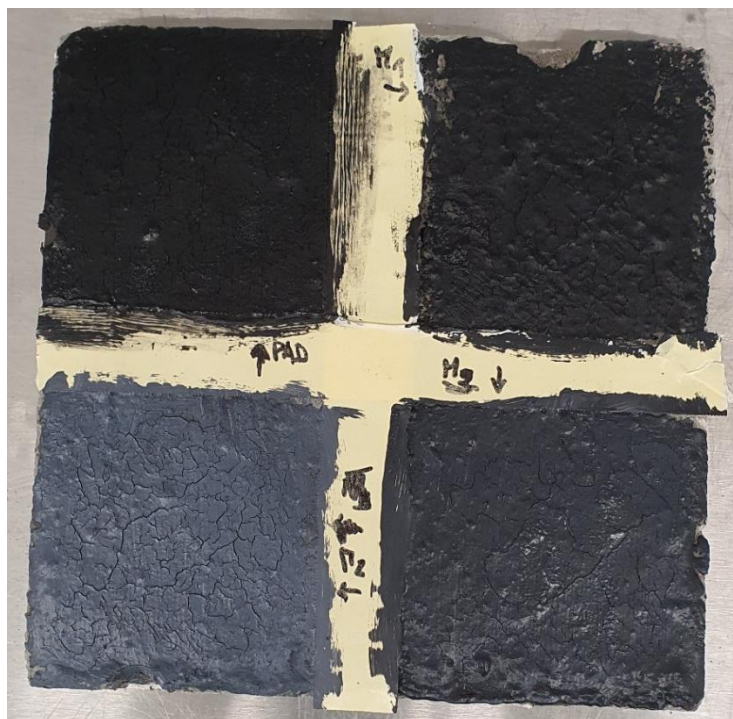


Figura 32 - Aspeto final da amostra de reboco exterior do SIP com todos os revestimentos aplicados; Canto superior esquerdo (PAD); Canto superior direito (M1); Canto inferior esquerdo (M3); Canto inferior direito (M2)

Os valores de todas as pesagens de nanopartículas e de tinta acrílica está detalhado no Quadro 24.

Quadro 24 - Composição dos revestimentos aplicados no reboco exterior no SIP

Nanopartícula	Figura	Dimensão da nanopartícula (nm)	Peso das nanopartículas (g)	Tinta/Colorante	Peso da tinta acrílica (g)
-	32 (PAD)	-	-	Tinta acrílica	5,240
ZnO	32 (M2)	500	0,419 (8%)	Tinta acrílica	5,246
SiO ₂	32 (M1)	60-70	0,420 (8%)	Tinta acrílica	5,269
TiO ₂ R	32 (M3)	30	0,422 (8%)	Tinta acrílica	5,243

3.2. MÉTODOS DE MEDIÇÃO

3.2.1 MEDIÇÃO DA REFLETÂNCIA SOLAR COM ESPETROFOTÓMETRO

3.2.1.1 ENQUADRAMENTO

Após a produção das amostras, foram realizadas várias medições, com recurso ao espectrofotómetro, de forma a executar uma análise comparativa entre as várias amostras com a finalidade de escolher a melhor

nanopartícula com a melhor dimensão e com a percentagem de nanopartículas incorporadas na mistura que demonstre os resultados mais equilibrados, pois nem sempre a amostra que apresenta maior refletância é a melhor, como se verá mais à frente no subcapítulo referente à análise da variação da cor. É também importante referir que a maior percentagem de nanopartículas incorporadas na mistura nem sempre é aquela que apresenta a maior refletância solar. Como demonstrado nos subcapítulos anteriores, as amostras produzidas são todas com tons escuros, isto porque, devido às suas características estas cores apresentam maior solicitação e os danos poderão ser maiores, então, o objetivo deste estudo é encontrar uma solução capaz de reduzir a temperatura superficial atingida por uma parede exposta ao Sol, assim como, incrementar a durabilidade dos sistemas das fachadas através do aumento da refletância solar que consequentemente reduz a temperatura superficial diminuindo assim a amplitude das variações de temperatura. Com a introdução das nanopartículas, reduz-se a absorção da radiação infravermelha, algo que nos tons claros o efeito produzido com a incorporação das mesmas não é tão notório porque estes tons já refletem uma quantidade considerável de radiação solar na região UV-VIS e NIR. Então, a introdução de nanopartículas em fachadas revestidas com tons claros não vão promover um aumento da refletância no NIR da ordem de grandeza do aumento da refletância solar verificado em amostras com tons escuros.

3.2.1.2 INFRAESTRUTURA EXPERIMENTAL

Para executar as medições de refletância foi necessário recorrer a dois espectrofotómetros portáteis da marca Ocean Optics, um dos equipamentos é capaz de detetar radiação na região UV-VIS do espectro solar, este, com o nome comercial FLAME. O outro equipamento é focado apenas em radiação situada na região do NIR, este equipamento é designado pela marca de FLAME-NIR. Na Figura 33 estão representados os dois equipamentos mencionados.



Figura 33 – Espectrofotómetro FLAME (à esquerda); Espectrofotómetro FLAME-NIR (à direita)

As características dos dois espectrofotómetros utilizados nas medições são apresentadas em maior detalhe no Quadro 25.

Quadro 25 - Especificações dos espectrofotómetros

Especificação	Unidades	FLAME UV-VIS (TXR1)	FLAME-NIR
Resolução ótica	nm	~0,10 – 10,0	10
Rácio sinal-ruído	-	300:1	6000:1
Tempo de integração	Milissegundos - Segundos	3,80 – 10,0	1 – 65

Linearidade correta	%	>99,8	99,8
Tipo de conexão	-	Micro-USB; Cabo JAE DD4 40-pinos	
Detetor	-	Toshiba TCD1304AP linear CCD array	Hamamatsu G8160-03 InGaAs linear image sensor
Alcance do detetor	nm	190 – 1100	900 – 1700
Pixels	px.	3648	128
Dimensões	mm	88,9 x 63,5 x 31,9	
Peso	g	265	

A fonte que emite a radiação é composta por duas lâmpadas, uma de deutério e outra de halogéneo. As restantes características estão presentes no Quadro 26.

Quadro 26 - Especificações da fonte de radiação

Especificação	Unidades	Fonte de radiação
Modelo	-	DH-2000-BAL Light Source
Intervalo de comprimento de onda	nm - μ m	210 – 2,50
Fonte	-	Deutério e Halogéneo de tungsténio
Potência nominal da lâmpada	W	25 (Deutério); 20 (Tungsténio de halogéneo)
Potência de saída típica	μ W	194 (Deutério); 615 (Tungsténio de halogéneo)
Obturador	-	Sim
Conector de fibra	-	SMA 905
Potência requerida	V & Hz	85 – 264 & 50/60

Para medir a refletância diretamente na amostra existe um acessório que é acoplado ao espetrofotómetro, capaz de medir em amostras opacas, o que é o caso. Este acessório é designado de esfera de integração e permite medir a componente especular da reflexão total integrada. Os restantes detalhes deste acessório estão dispostos no Quadro 27.

Quadro 27 - Especificações da esfera de integração

Especificação	Unidades	Esfera de integração
Modelo	-	ISP-30-6-R

Armadilha de brilho	-	Não
Diâmetro da porta da amostra	mm	6
Faixa espectral	nm	200 – 2500
Revestimento da esfera	-	PTFE
Tipo de conector	-	SMA 905
Dimensões	Mm	59 (diâmetro) x 58 (altura)
Refletância do PTFE	% (nm)	>98 (400 – 1500)>95 (250 – 2500)
Peso	g	330
Diâmetro da esfera	mm	30

Para finalizar o *setup* experimental, existem dois cabos de fibra ótica. Um dos cabos transporta a radiação proveniente da fonte até à esfera de integração, o outro cabo é conectado na esfera de integração e segue até ao espectrofotómetro, este encontra-se conectado a um computador através de um cabo USB. Com recurso a um software próprio do espectrofotómetro que permite introduzir as especificações pretendidas para as medições que o utilizador pretende executar.

O *setup* experimental tem o aspeto ilustrado na Figura 34.

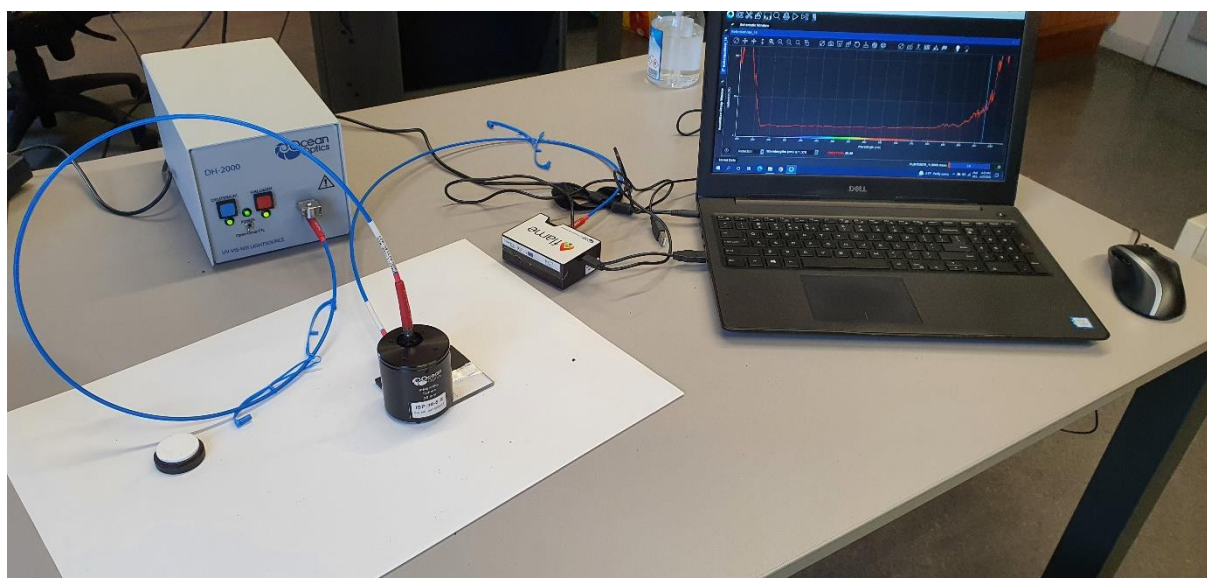


Figura 34 - Setup experimental do espectrofotómetro

3.2.1.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

As medições da refletância que foram executadas seguem a norma da ASTM E 903-20 com a designação *Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres*. Esta norma abrange ensaios em materiais detentores de propriedades óticas especulares e difusas, adicionalmente, a norma referida é particularmente sensível ao impacto verificado na textura da amostra em análise (ASTM, 2020).

Antes de realizar as medições é necessário montar o *setup* experimental. Seguem os passos necessários para o efeito:

- Ligar fonte de radiação à corrente e acionar o interruptor situado na parte de trás do equipamento;
- Ligar as duas lâmpadas integradas no equipamento (deutério e tungstênio de halogênio);
- Deixar a fonte aquecer no mínimo durante 20 minutos;
- Fazer a ligação fonte-esfera de integração e esfera de integração-espectrofotômetro através dos dois cabos de fibra ótica;
- Ligar espectrofotômetro ao computador através de um cabo USB;
- No computador, iniciar o software e no menu escolher o tipo de medição a efetuar:
 - i. Para a medição da refletância para a radiação UV-VIS é necessário introduzir as seguintes especificações:
 - Integration time: 2 segundos;
 - Scans to average: 4;
 - Boxcar width: 50;
 - Electric dark: Sim;
 - Nonlinearity correction: Sim;
 - Trigger Mode: On demand.
 - ii. Na medição da refletância para a radiação NIR as especificações são:
 - Integration time: 200 000 microssegundos;
 - Scans to average: 4;
 - Boxcar width: 20;
 - Electric dark: Sim;
 - Nonlinearity correction: Sim;
 - Trigger Mode: On demand.
- Após o preenchimento do quadro com os parâmetros iniciais, efetua-se a calibração do espectrofotômetro;
- Inicialmente é pedido para abrir o obturador de forma a deixar passar a radiação emitida pela fonte, após a abertura do mesmo e tendo a esfera de integração posicionada no topo da amostra padrão da Ocean Optics, após duas leituras é captada a refletância máxima;
- De seguida, do mesmo modo que foi feita a captação da refletância máxima é realizada a captação da refletância mínima após ter fechado o obturador da fonte, bloqueando assim qualquer radiação emitida pela mesma;
- O equipamento encontra-se em estado de prontidão para iniciar as medições.
- Foram efetuadas três medições por amostra em três pontos distintos da mesma;
- Para a medição da radiação UV-VIS e NIR, é procedida a configuração do método de exportação dos dados obtidos;
 - i. Escolher a pasta de destino;
 - ii. Nomear o ficheiro com as refletâncias a exportar;
 - iii. Selecionar a opção *file counter*.
- Para cada medição os valores são exportados para uma pasta previamente criada no computador em formato .txt;
- Após ter terminado as medições nos três pontos, é necessário proceder a nova calibração do espectrofotômetro, seguindo a regra de efetuar uma calibração a cada três medições;
- O processo foi repetido de igual forma até terminar as medições em todas as amostras produzidas.

No que respeita à determinação da refletância total de uma amostra, após o registo dos valores da refletância fornecidos pelo espectrofotómetro, estes obtidos em função do comprimento de onda, procedeu-se ao cálculo da média ponderada desses valores para os comprimentos de onda tabelados no apêndice X2.1 da norma da ASTM E 903 para 100 ordenadas. Este cálculo permite conhecer a refletância total, dada pela equação 12 (Naia, 2019).

$$\rho_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho(\lambda_i) \quad (12)$$

Em que:

ρ_s – Refletância total;

n – Número de valores tabelados no apêndice X2.1 da norma da ASTM E 903 ⁽¹⁾;

$\rho(\lambda_i)$ – Refletâncias correspondentes ao comprimento de onda especificado na tabela X2.1 da norma da ASTM E 903;

(1) – O parâmetro n poderá ir até 50 ou 100 ordenadas, neste caso, o mesmo irá até às 100 ordenadas.

Após introdução destes dados numa folha de cálculo automático, com recurso ao Microsoft Office Excel, é realizado o cálculo da refletância total com o auxílio da equação 12.

Os resultados serão disponibilizados e discutidos no subcapítulo 3.3.2.

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DA COR COM ESPETROFOTÓMETRO

3.2.2.1 ENQUADRAMENTO

Como referido no estado da arte, a cor de uma fachada tem importância a vários níveis. A cor para além de importante no que respeita a componente estética, revela ser uma propriedade determinante para o comportamento higrotérmico do edifício. No âmbito dos projetos EnReflect e Circular2B, a análise é centrada em cores escuras dado serem as mais problemáticas em termos de durabilidade dos sistemas de fachada. Para tal, tendo como objeto de estudo as amostras produzidas como descrito no subcapítulo 3.1.2 e dado que estas apresentam cores escuras, foi elaborada uma caracterização da cor destas amostras através da análise da variação da mesma consoante o tipo de nanopartículas utilizados, a percentagem de nanopartículas incorporadas no revestimento e o pigmento utilizado (tinta acrílica ou colorante). O resultado que apresentar a menor variação de cor, em comparação com a amostra padrão sem nanopartículas incorporadas, para a maior refletância e para o menor índice de amarelecimento, será a amostra referenciada com a formulação mais vantajosa de vir a ser aplicada numa situação real.

3.2.2.2 INFRAESTRUTURA EXPERIMENTAL

A infraestrutura necessária para executar a caracterização da cor das amostras é igual à infraestrutura experimental descrita no subcapítulo 3.2.1.2, ou seja, o espectrofotómetro é capaz de caracterizar a cor de uma amostra de acordo com o sistema CIELab, previamente configurado após montagem de todos os equipamentos necessários ao ensaio. Assim sendo, aquilo que difere este ensaio relativamente ao ensaio da refletância, é o objetivo da análise, neste caso é a cor e os seus parâmetros, a configuração do

software e o método de caracterização, neste caso serão calculados os vários parâmetros definidos pelo sistema CIELab.

3.2.2.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

A caracterização da cor das amostras foi elaborada com base no sistema CIELab, com os respectivos parâmetros já detalhados no estado da arte.

O procedimento necessário para iniciar as medições da refletância com o fim de caracterizar a cor segue de acordo com os passos apresentados de seguida:

- Montagem do *setup* experimental tal como descrito no subcapítulo 3.2.1.3 nos passos 1 a 5;
- Após ter calibrado com sucesso o espectrofotómetro e introduzido os parâmetros para a medição da refletância da radiação UV-VIS, é selecionado o ícone do menu do software escolhendo a opção de medição da cor designada de “color”;
- É selecionada a opção “existing processing”, pois o software já reconheceu o espectrofotómetro calibrado previamente para as medições da refletância solar;
- No quadro que surge, são selecionados os seguintes parâmetros para medir a cor seguindo as diretrizes do sistema CIELab;
- Para exportar os valores medidos, é selecionada a janela *schematic view*;
- De seguida, é apresentado pelo software um fluxograma, no qual, é introduzido o local para onde irá ser exportado um ficheiro em formato .txt, como ilustrado na Figura 35;

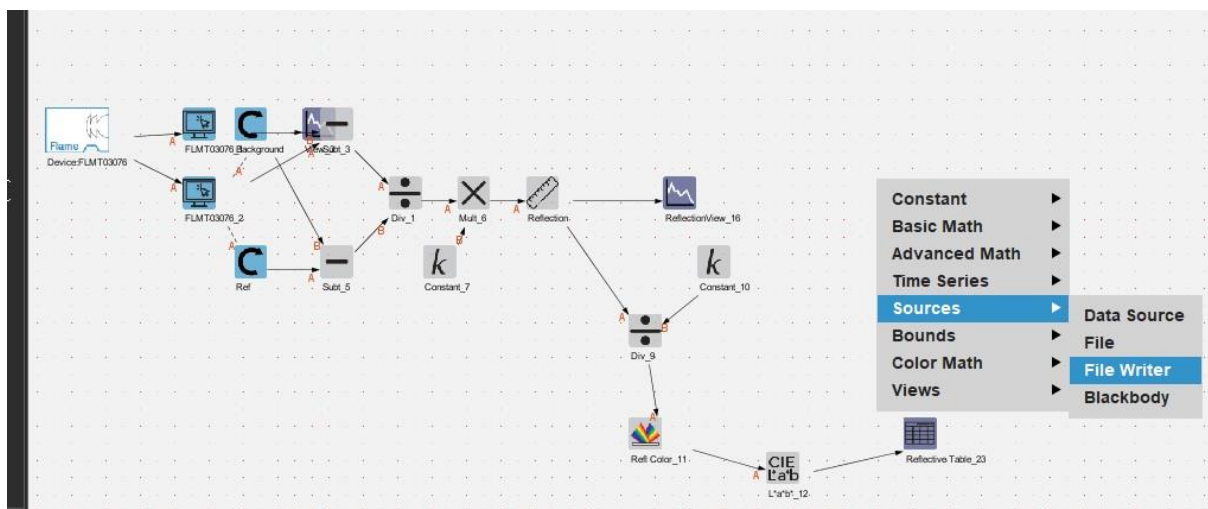


Figura 35 - Fluxograma para configurar modo de exportação das medições (inserção do “file writer”)

- É configurado o formato de exportação com a escolha da pasta de destino, nome do ficheiro e com a seleção da opção *file counter*, como explicado no passo 12 da montagem do *setup* experimental para medição da refletância solar;
- Assim, a configuração está concluída e as medições da cor com o espectrofotómetro são iniciadas;
- A cada 3 medições, é necessária nova calibração do espectrofotómetro, tal como descrito no subcapítulo 3.2.1.3 nos passos 8 e 9.

3.2.3 MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE COM O EMISSÓMETRO

3.2.3.1 ENQUADRAMENTO

O estudo da emissividade nas amostras produzidas foi centrado em perceber se a inclusão de nanopartículas no revestimento da argamassa e na própria argamassa afeta de algum modo a quantidade de radiação emitida de volta para o meio ambiente quando comparado com uma amostra sem revestimento ou com revestimento escuro sem nanopartículas. A emissividade é uma percentagem da energia emitida por um corpo negro. A emissividade depende então da constituição do material, no qual, a grande maioria dos materiais tradicionais utilizados na construção têm uma emissividade elevada. Assim, seria importante, num sistema de fachada, aliar um incremento da refletância solar com um decréscimo da emissividade para a menor variação de cor possível.

3.2.3.2 INFRAESTRUTURA EXPERIMENTAL

O cenário para proceder ao ensaio da emissividade é o que se apresenta na Figura 36, legendada pelo Quadro 28.

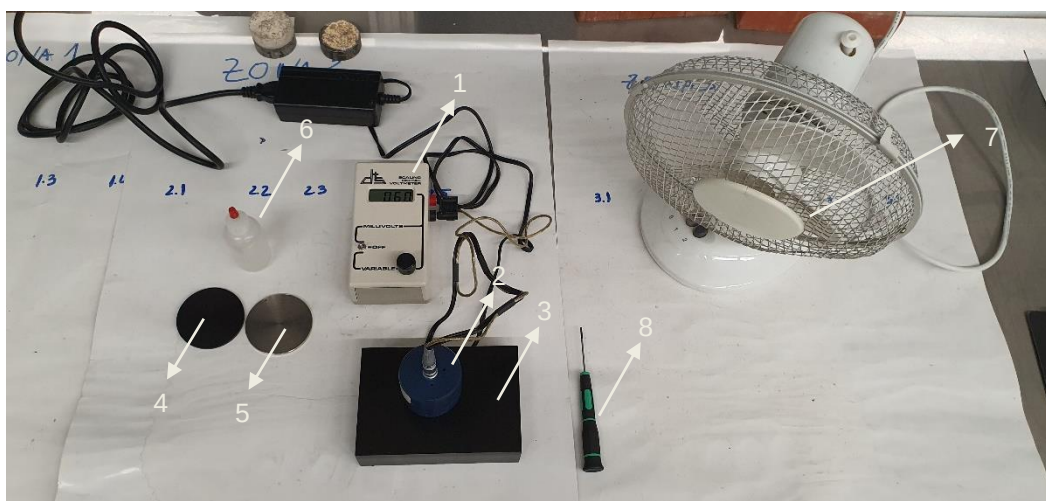


Figura 36 - Setup do ensaio de emissividade

Quadro 28 - Setup experimental do ensaio de emissividade

ID	Equipamento	Função
1	Voltímetro	Equipamento que fornece as leituras da emissividade, com precisão decimal.
2	Emissómetro	Equipamento que mede a emissividade em contacto direto com a superfície da amostra.

3	Suporte do emissômetro	Acessório que suporta o emissômetro durante o aquecimento e calibração do mesmo.
4	Corpo negro	Acessório utilizado para a calibração do emissômetro. Placa metálica preta que simula um material com emissividade de 0,88.
5	Corpo de baixa emissividade	Acessório utilizado para a calibração do emissômetro. Placa metálica prateada que simula um material com emissividade de 0,05.
6	Água destilada	Utilizada para criar aderência entre os acessórios 4 e 5 e o acessório 3.
7	Ventoinha	Utilizada para igualar a temperatura superficial de amostras com dimensão superior ao acessório 3 à temperatura superficial dos acessórios 4 e 5.
8	Chave de fendas	Ferramenta utilizada para calibrar o emissômetro.

3.2.3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O ensaio de emissividade foi realizado nas amostras representadas no Quadro 29.

Quadro 29 - Amostras objeto do ensaio de emissividade

MATERIAL	AMOSTRA	COM REVESTIMENTO	SEM REVESTIMENTO
ETICS	REF. M; REF. PAD; M1; M2; M3	X	
ARGAMASSA COM PLACA DE OSB COMO SUPORTE	REBOCO EXTERIOR DO SIP	X	X
ARGAMASSA	NÚCLEO DO SIP/PAINEL DE FACHADA VENTILADA	X	

O procedimento do ensaio foi o seguinte:

- Montagem do *setup* com aspeto final igual ao da Figura 36;
- Ligar o emissômetro à corrente elétrica para aquecer o mesmo.
- Deixar o emissômetro aquecer durante 30 minutos;
- De seguida, são colocadas duas gotas de água, uma para cada placa metálica (ID 4 e 5 no Quadro 28), de forma a criar aderência entre as placas e o suporte do emissômetro;

- Ligar o voltímetro com interruptor na posição “variable”;
- Ligar a ventoinha na direção das amostras a ensaiar e do suporte do emissómetro;
- Posicionar o emissómetro na placa preta e esperar entre 60 e 90 segundos;
- Ajustar, no voltímetro, a emissividade até 0,88;
- Posicionar o emissómetro na placa prateada;

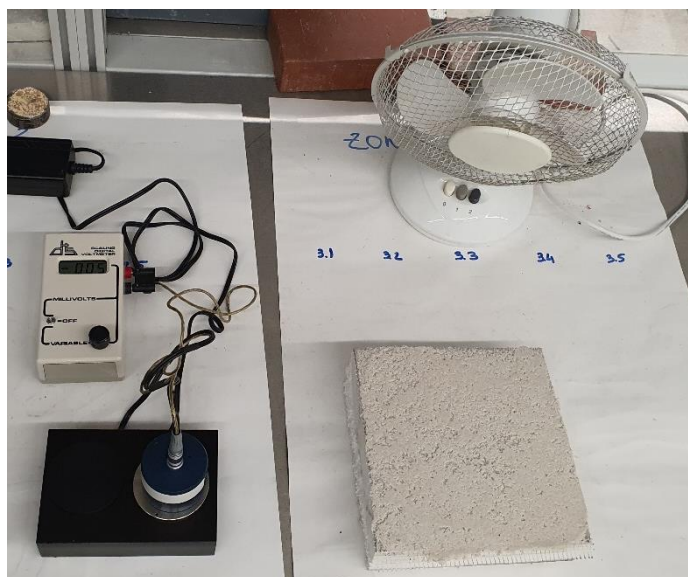


Figura 37 - Emissómetro posicionado na placa prateada para efeitos de calibração

- Ajustar com a chave de fendas, no emissómetro, o valor da emissividade até 0,05;
- Repetir o processo até o emissómetro apresentar leituras estáveis, nomeadamente, 0,88 para a placa preta e 0,05 para a placa prateada;
- Desligar a ventoinha;
- Posicionar o emissómetro em contacto direto na superfície da amostra a estudar;

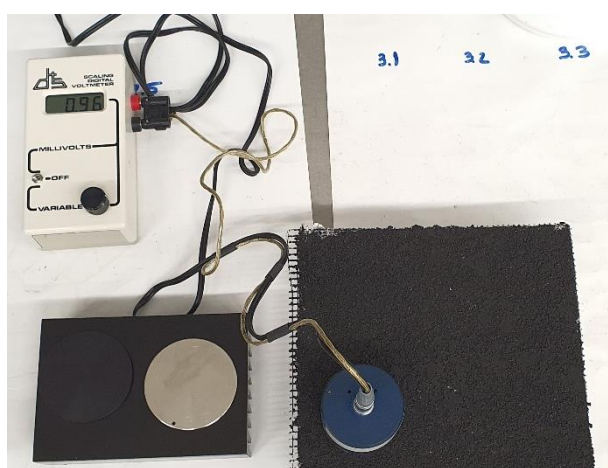


Figura 38 - Medição da emissividade em curso

- Ler o valor da emissividade indicado no voltímetro;
- Foram realizadas três medições em três pontos distintos em cada amostra.

4

PROPRIEDADES SUPERFICIAIS: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENQUADRAMENTO

Os ensaios foram realizados em variados tipos de nanopartículas com o objetivo de escolher, para cada tipo de nanopartícula, qual a dimensão e percentagem a incorporar das mesmas nos revestimentos dos sistemas ETICS e SIP, de acordo com as que apresentam os melhores resultados em termos de refletância. No entanto, espera-se que a cor não sofra alterações significativas comparativamente à amostra padrão sem nanopartículas, aspeto que será tratado no subcapítulo 3.3.3.

4.2 REFLETÂNCIA SOLAR

4.2.1 CAMADA DE ACABAMENTO DO ETICS

Como referido previamente, a medição da refletância foi realizada com espectrofotómetro modular em ambiente laboratorial.

As medições foram iniciadas nas amostras de ZnO com colorante em placa de acrílico a servir de suporte.

Os resultados das medições da refletância solar com o espectrofotómetro estão na Figura 39 dispostas por dimensão da nanopartícula e respetivas percentagens da mesma incorporada na mistura com o colorante.

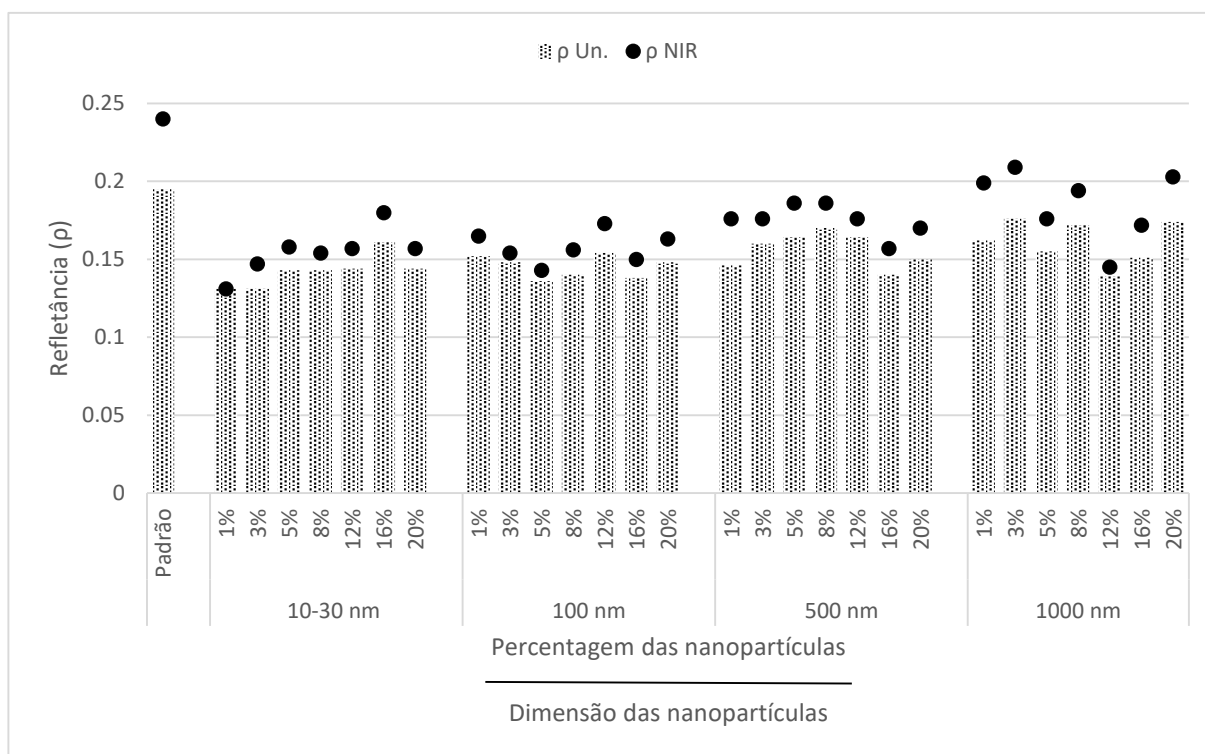


Figura 39 - Resultados das medições da refletância nas amostras de ZnO com colorante

Nota: ρ Un – Refletância Total; ρ NIR – Refletância no NIR.

De seguida, para melhorar a interpretação dos dados foi calculada a média das refletâncias totais e das refletâncias na região do NIR para cada dimensão da partícula de forma a perceber se esta característica das nanopartículas tem impacto nas mesmas.

A refletância total engloba a radiação refletida na região UV-VIS e na região NIR, esta, foi calculada de acordo com a norma da ASTM E 903-20 para o método das 100 ordenadas.

As médias das refletâncias estão representadas na Figura 40.

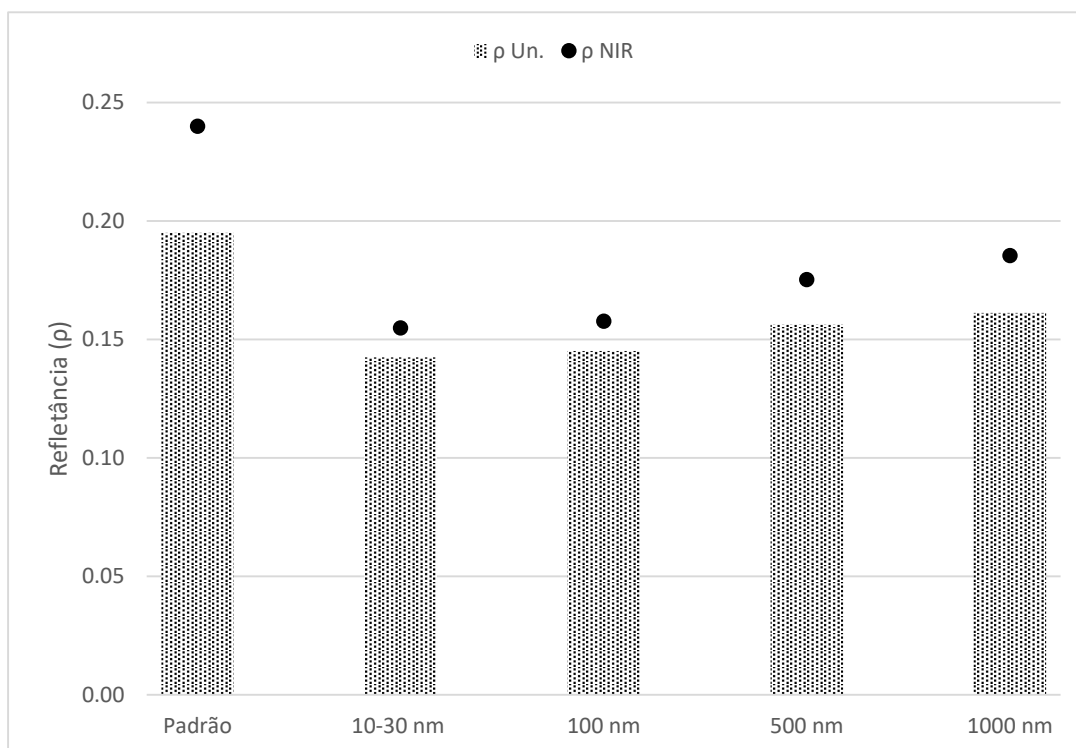


Figura 40 - Média das refletâncias unitárias e NIR por dimensão da nanopartícula (ZnO com colorante)

As amostras com dimensão de 1000 nm são as que apresentam a refletância média mais elevada, para a total e para a situada na região NIR. O que seria de esperar, pois normalmente, e de acordo com a experiência adquirida na produção de outras misturas, quanto maior a dimensão das nanopartículas, para a mesma percentagem, menor será a quantidade incorporada em termos de volume. Assim, ao misturar os componentes da mistura, a dispersão das nanopartículas vai ser maior pois a mistura não se encontra tão saturada e assim, a área abrangida por estas será superior comparativamente a misturas com dimensões das nanopartículas inferiores. No entanto é de referir que a amostra padrão apresenta refletância total e NIR superior às amostras com nanopartículas, ou seja, o efeito observado foi contrário ao efeito esperado.

De seguida, ainda dentro das amostras com colorante como pigmento, foram medidas as que são compostas por dióxido de titânio com rutilo (TiO₂ R). Estas amostras foram produzidas para várias dimensões, à semelhança das restantes. No entanto, após medições e consequente análise das mesmas, estas elaboradas previamente por Veloso et al. (2022), foi determinado que as amostras com as nanopartículas com dimensão 30 nm são as que apresentaram melhores resultados. Estas amostras foram novamente medidas de acordo com o trabalho previamente elaborado com a finalidade de comparar com as demais amostras produzidas e assim verificar o potencial de aplicação das mesmas em sistemas de fachada.

Os resultados relativos às medições nas placas de acrílico com a mistura de TiO₂ R com 30 nm estão indicados na Figura 41.

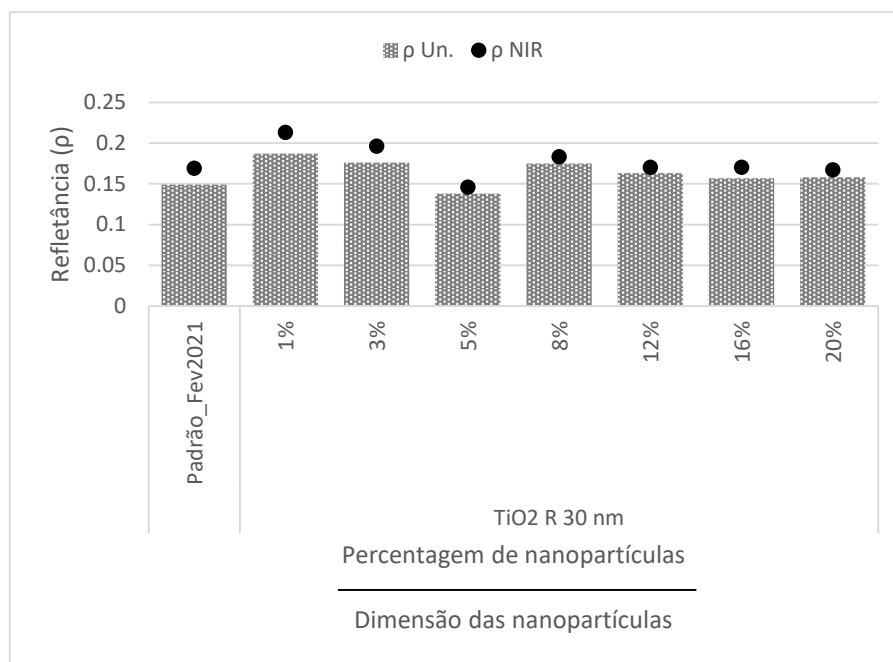


Figura 41 - Refletância para amostras de TiO₂ R com colorante

No geral, as amostras com nanopartículas apresentaram refletâncias total e NIR superiores à amostra padrão. Parece também existir um padrão, isto é, as amostras com percentagens mais baixas de nanopartículas apresentam refletâncias superiores às amostras com percentagens mais elevadas. O significado deste resultado pode estar relacionado com o facto de as amostras com percentagens mais elevadas apresentarem uma mistura menos homogénea devido à crescente dificuldade em misturar os componentes à medida que se incorporam mais nanopartículas. Assim, como as nanopartículas ficaram muito concentradas em determinadas zonas da amostra, a refletância será menor dado que a área abrangida pela TiO₂ R na superfície da amostra será menor.

Com o intuito de perceber o efeito do tipo de nanopartícula utilizada na refletância, para o mesmo suporte (placa de acrílico), para dimensões semelhantes e misturado com o colorante, a Figura 42 representa um comparativo entre as amostras de TiO₂ R de 30 nm com as de ZnO de 10-30 nm.

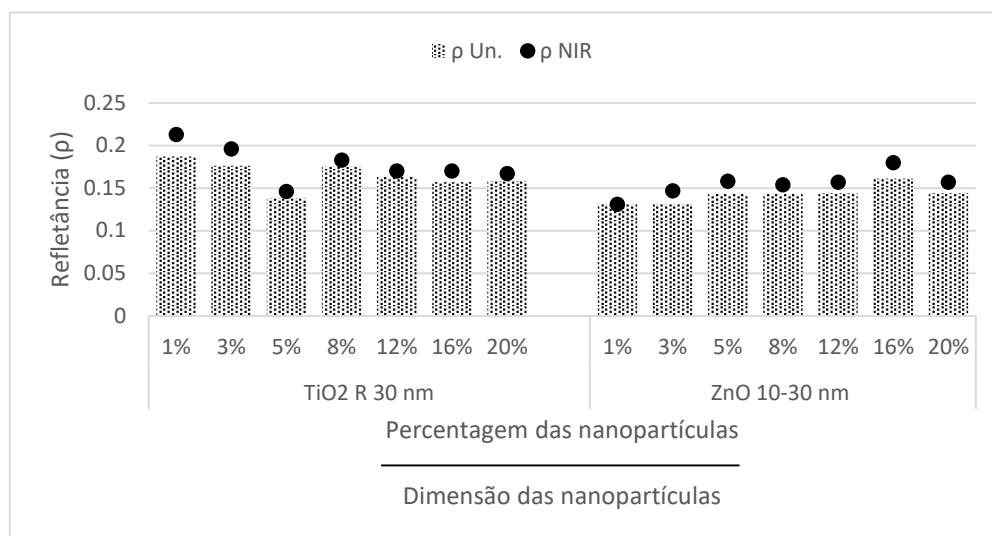


Figura 42 - Comparativo entre TiO₂ R e ZnO (30 nm) com colorante

Assim, é possível observar que para percentagens mais baixas de nanopartículas incorporadas a refletância total e NIR é maior para as amostras com TiO₂ R comparativamente às amostras de ZnO. Isto poderá dever-se ao facto das amostras com TiO₂ R serem menos densas do que as de ZnO, logo, para a mesma percentagem de material a incorporar na mistura, o volume de nanopartículas presente na mistura será superior. Então, quanto maior a percentagem de TiO₂ R mais saturada ficará a mistura revelando dificuldade acrescida na mistura com o colorante e, consequentemente, maior dificuldade em espalhar a mesma no suporte. Ou seja, a dispersão das nanopartículas será inferior nas amostras de TiO₂ R com maior percentagem de nanopartículas, o que interfere nas medições da refletância podendo o espectrofotómetro não apanhar a zona da amostra que contenha a maior concentração das mesmas.

Assim, dado que as amostras de ZnO são mais pesadas, não necessitam de tanto volume para a mesma percentagem de nanopartículas a aplicar na mistura, que dá origem a uma mistura mais homogênea e com maior dispersão das mesmas. Logo, apesar de não existir um padrão claro, a tendência será quanto maior a percentagem de ZnO maior a refletância total e na região do NIR.

Ainda dentro das amostras produzidas com o colorante, foram utilizadas nanopartículas de SiO₂ para três dimensões distintas. A Figura 43, à semelhança dos resultados anteriores já demonstrados, traduz os resultados obtidos para a refletância total e para a refletância na região NIR.

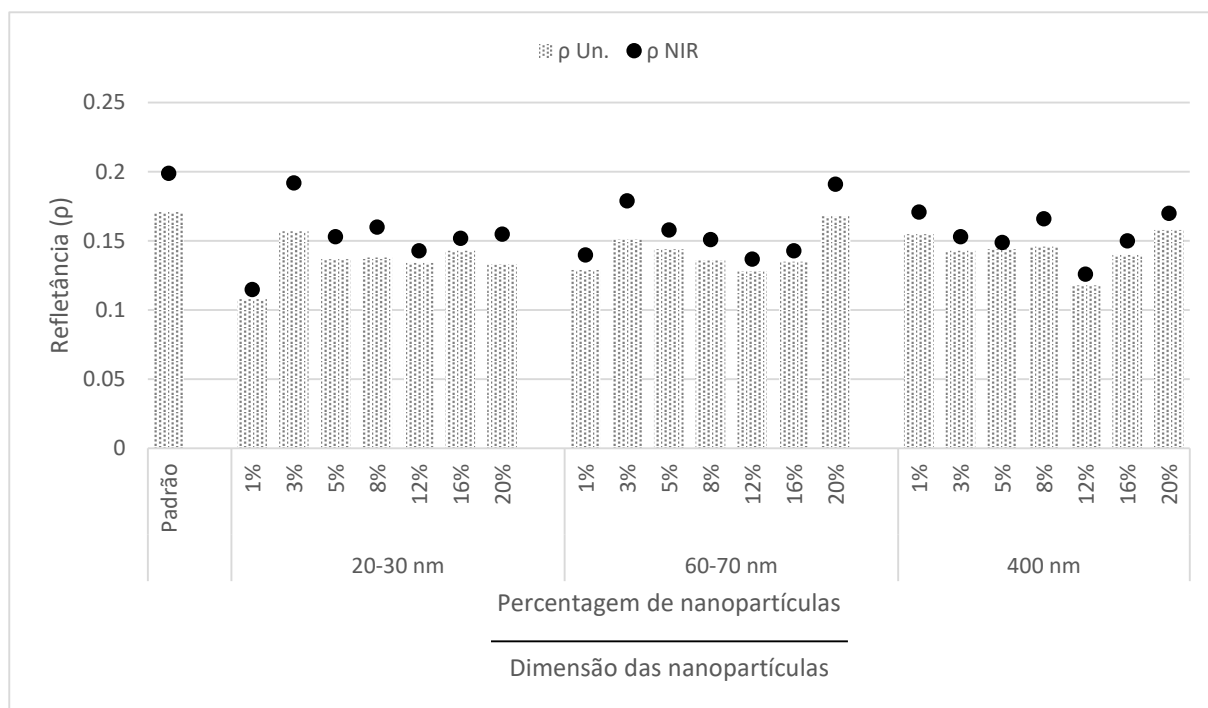


Figura 43 - Refletância para amostras de SiO₂ com colorante

De acordo com a Figura 43 é possível observar que a dimensão da nanopartícula que apresenta o valor médio da refletância total é a de 400 nm, no entanto, na região do NIR é a de 60-70 nm que revela a refletância mais elevada entre as três dimensões testadas. De notar que nestas amostras o objetivo da incorporação das nanopartículas não é alcançado dado que a amostra padrão apresenta refletâncias superiores às amostras com nanopartículas, sendo estas últimas apresentam diferenças pouco significativas entre cada dimensão.

No Quadro 30 estão demonstrados os valores médios das refletância para todas as dimensões testadas nas amostras de SiO₂.

Quadro 30 - Refletância média para as 3 dimensões de SiO₂ com colorante

Dimensão das nanopartículas (nm)	ρ	
	Total	NIR
20-30	0,136	0,153
60-70	0,142	0,157
400	0,143	0,155

Os valores presentes no Quadro 30 são muito próximos, no entanto, ao escolher apenas uma dimensão deste tipo de nanopartícula (SiO₂) será aquela que apresentar a melhor relação entre a refletância total e a refletância na região do NIR. Assim sendo, a dimensão que apresenta melhor refletância será a de 60-70 nm que para além de apresentar a melhor relação referida anteriormente, provavelmente será a dimensão que apresentará menor risco de apresentar pigmentos brancos visíveis a olho nu. Isto porque, quando comparado com a dimensão de 20-30 nm, o volume de nanopartículas a incorporar desta

dimensão será maior para mesma percentagem, logo, a mistura com o colorante será mais saturada e consequentemente não será tão homogênea quanto a de 60-70 nm ou a de 400 nm.

Relativamente à razão pela qual a dimensão de 60-70 nm apresenta valores de refletância ligeiramente superiores (provavelmente devido à precisão de medição do espectrofotómetro) à dimensão de 400 nm, poderá ser também derivado do volume de nanopartículas incorporadas na mistura. No entanto, neste caso, o problema a ocorrer ao nível da homogeneidade da mistura, mas sim relativamente à dispersão das nanopartículas. Dado que as de 400 nm são mais pesadas relativamente às de 60-70 nm, para a mesma percentagem de nanopartículas a incorporar, o volume destas será menor, logo, a área da amostra coberta pelas nanopartículas será menor e assim levar a um decréscimo na refletância total quando comparadas com as de 60-70 nm.

Após seleccionar as dimensões das nanopartículas que apresentaram os resultados mais interessantes para a refletância, foi realizada uma análise para determinar a percentagem de nanopartículas a incorporar no colorante. Assim, a percentagem de nanopartículas é fixada para posteriormente comparar os resultados nas amostras produzidas com o colorante e nas que foram produzidas com tinta acrílica nas placas de acrílico e posteriormente nos vários suportes em estudo, nomeadamente, no ETICS e no SIP. Essa análise foi realizada tendo em conta não só a refletância, mas também a alteração da cor relativamente à amostra padrão. Na prática, esta análise foi feita em simultâneo para as duas propriedades referidas, no entanto, para efeitos de organização a análise à variação da cor será discutida no subcapítulo 3.3.2 com os respetivos resultados demonstrados.

Poderia ser antecipado, sem a análise à variação da cor, que quanto maior a percentagem de nanopartículas incorporadas na mistura maior será a alteração da cor verificada nas amostras, dado que a cor destas antes de serem incorporadas na mistura é branca. Assim, a lógica seria escolher uma percentagem intermédia, mas que apresente resultados interessantes para a refletância total e NIR.

A Figura 44 mostra os resultados das refletâncias total e NIR para os vários tipos de nanopartículas agrupados pela quantidade deste material incorporado na mistura, em percentagem.

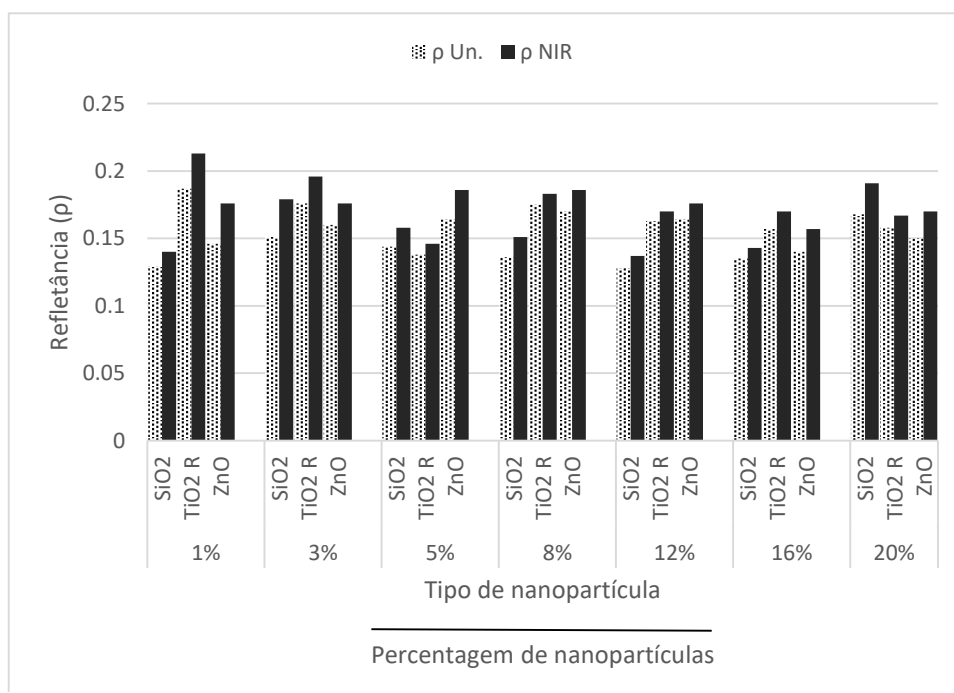


Figura 44 - Comparação das refletância unitária e NIR para as diferentes percentagens de nanopartículas

Analisada a refletância solar nas amostras com placas de acrílico, o foco do estudo passou para uma aplicação em contexto mais realista. Isto é, foram produzidas as amostras com a composições discriminadas no Quadro 15. Tendo sido obtidos, para o ETICS, os resultados da radiação que este sistema reflete para a mesma quantidade de nanopartículas (8%), com colorante aplicado no ETICS, ou seja, esta comparação, presente na Figura 45 permite avaliar o efeito das nanopartículas na refletância solar entre as diferentes amostras de ETICS.

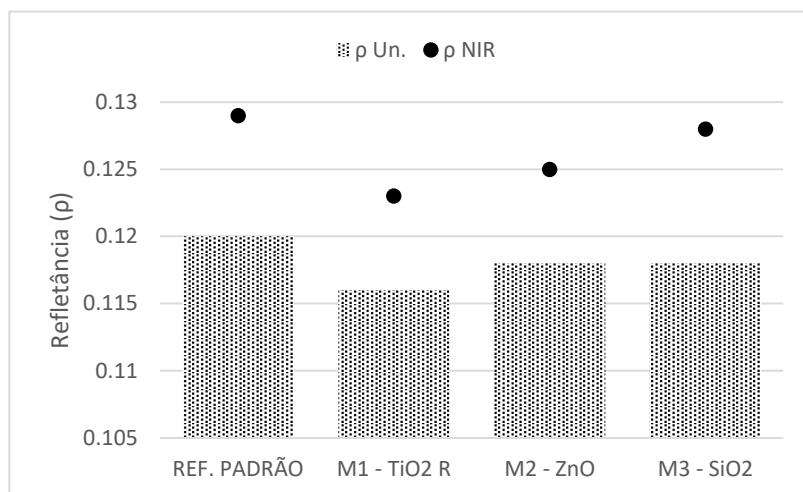


Figura 45 - Comparativo da refletância nas amostras de ETICS produzidas

De acordo com a Figura 45 é possível observar que nas amostras de ETICS, com o colorante, a refletância revela ser superior na amostra sem nanopartículas, assim, não é obtido o efeito desejado para a incorporação de nanopartículas neste revestimento. Então, é possível concluir que o revestimento com colorante promove o decréscimo na refletância solar quando são incorporadas nanopartículas devido a um menor grau de dispersão das mesmas.

4.2.2 CAMADA DE ACABAMENTO DO SIP

De seguida, foram utilizadas as mesmas nanopartículas misturadas com o colorante para produzir amostras, desta vez, com tinta acrílica. Desta forma fica possível a comparação da refletância total e na região do NIR em amostras com duas bases diferentes (colorante/tinta acrílica) para o mesmo suporte com a melhor dimensão e percentagem de nanopartículas selecionadas.

Quadro 31 - Seleção de nanopartículas para testar com tinta acrílica

Nanopartículas selecionadas			Colorante/Tinta acrílica	Tipo de suporte
Designação	Dimensão (nm)	%		
TiO ₂ R	30	1%; 3%; 5%; 8%; 12%; 16%; 20%	Tinta acrílica	Placa de acrílico
SiO ₂	60-70			
ZnO	500			

Os resultados obtidos nos ensaios de refletância das amostras indicadas no Quadro 31 estão apresentados na Figura 46.

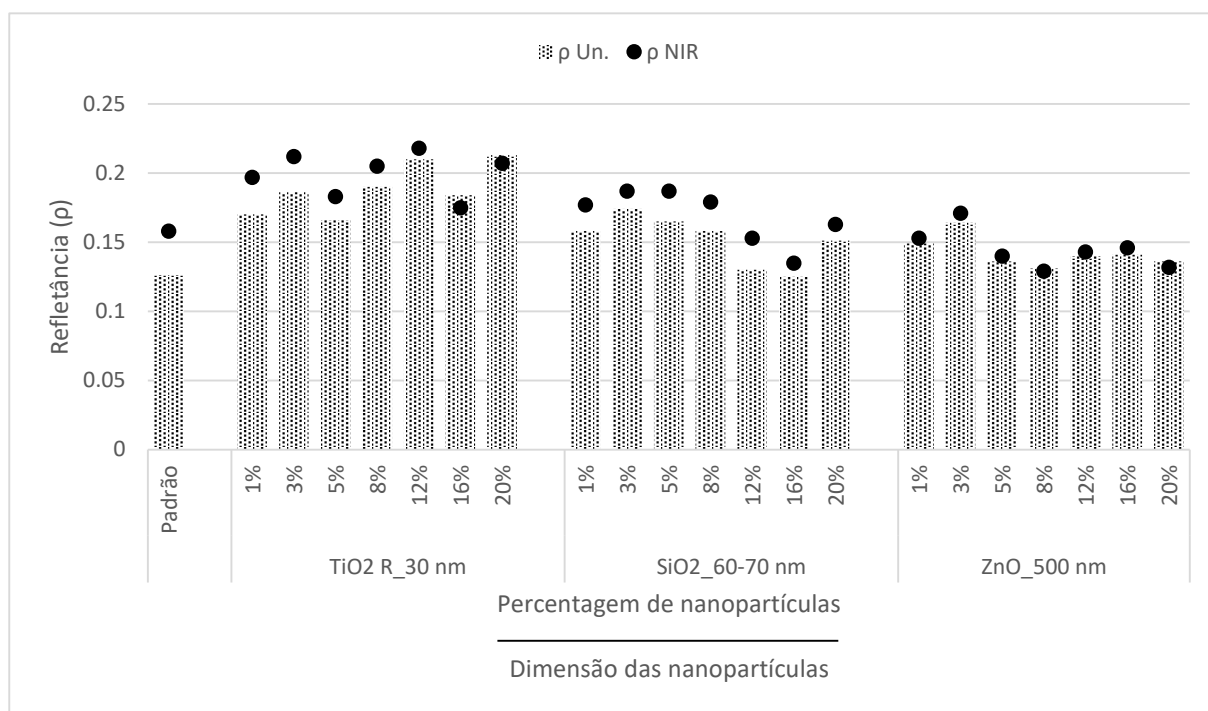


Figura 46 - Resultados da refletância para as amostras com tinta acrílica

Os resultados demonstram que a mistura das nanopartículas com a tinta acrílica, de modo geral, provoca um incremento na refletância total e na refletância na região do NIR. A tinta possui mais componentes comparativamente ao colorante, que é de composição mais simples. Isto poderá ser um fator que influencie na quantidade de radiação refletida pelas amostras com este revestimento, incorporando nanopartículas. Ao longo do processo de produção das amostras, foi também verificado que a mistura das nanopartículas com a tinta acrílica era mais fácil comparativamente à mistura das nanopartículas com o colorante. Ou seja, com a melhor dispersão das nanopartículas nas amostras com tinta acrílica o efeito nas mesmas foi mais intenso.

A Figura 47 indica que as refletâncias médias, para cada tipo de nanopartícula incorporada, são, no geral, superiores para as amostras com tinta acrílica relativamente às amostras constituídas pelo colorante. As nanopartículas de ZnO são a exceção (mesmo assim, estas amostras apresentam refletância superior à amostra padrão, o que se verifica nas amostras com colorante), uma vez que estas quando misturadas com a tinta acrílica refletem uma menor quantidade de radiação. O facto de que o colorante é constituído por um pigmento à base de ferro, no qual as partículas do pigmento são superiores às partículas do pigmento da tinta acrílica, e que a tinta acrílica possui um pigmento à base de carbono pode explicar esta diferença de comportamento do ZnO em relação às outras duas nanopartículas analisadas. Isto porque, o carbono é bastante resistente à radiação UV, e sendo assim, as partículas de carbono são capazes de se moverem pelas designadas linhas de capilaridade que leva as mesmas até à superfície da amostra o que apresenta como consequência a alteração da cor após algum tempo de exposição à radiação solar. A cor pode ficar mais cinzenta (Chromafer, 2013), e assim, como o brilho é superior a uma cor preta (cor original) a refletância será mais elevada.

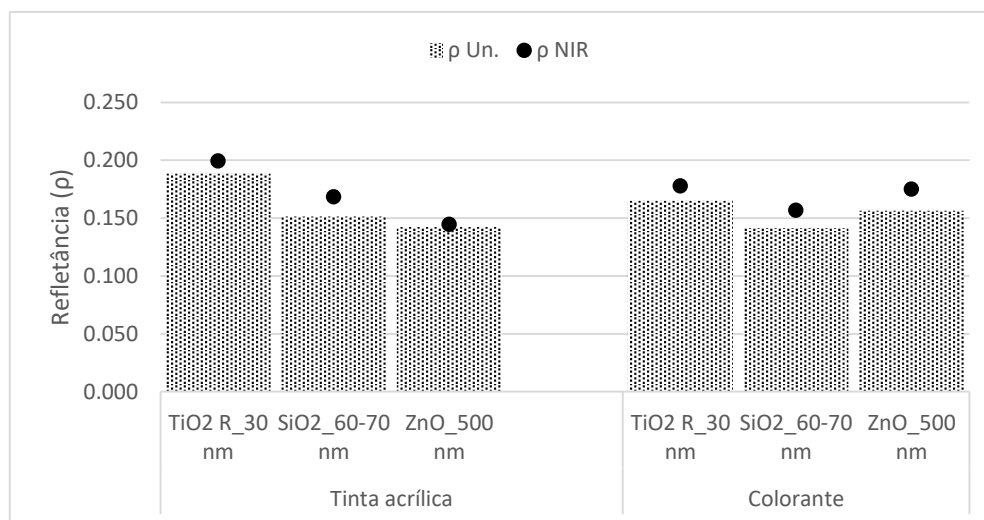


Figura 47 - Refletância média para cada tipo de nanopartícula para tinta acrílica e colorante

De acordo com a experiência adquirida na produção das amostras, foi possível observar que a escolha seria entre as amostras que contém 8% e as de 12%, pois são aquelas que apresentam uma determinada quantidade de nanopartículas que permite cobrir uma área interessante da amostra, ou seja, boa dispersão e maior área de cobertura quando comparadas com as amostras com 1%, 3% e 5%. Ao mesmo tempo permitem obter um acabamento homogêneo pois não ficam demasiado saturadas como as amostras que apresentam maior percentagem de nanopartículas. Assim, tendo em conta os resultados da Figura 44, as de 8% são as que apresentam maior refletância total, mas também para a região do NIR.

O Quadro 32 mostra os valores das refletâncias médias para o conjunto de amostras com 8% e com 12% de nanopartículas.

Quadro 32 - Refletâncias médias para amostras com diferentes % de nanopartículas

Nanopartículas (%)	ρ	
	Total	NIR
8%	0,160	0,173
12%	0,152	0,161

Com o auxílio do Quadro 32 é possível considerar a quantidade de 8% de nanopartículas será a mais vantajosa, dadas as refletâncias superiores e a probabilidade de provocar menor variação da cor quando comparadas com as amostras com 12% de nanopartículas.

Analisada a refletância solar nas amostras com placas de acrílico, o foco do estudo passou a ser mais virado para uma aplicação em contexto mais realista. Isto é, foram produzidas as amostras com a composições discriminadas no Quadro 24 e Quadro 21. Tendo sido obtidos, respetivamente para a argamassa de reboco exterior do SIP (RE) e por fim para a argamassa do pára-sol da fachada ventilada (FV) que poderá vir a ser utilizado como solução para um sistema de fachada ventilada, os resultados

da radiação que cada argamassa reflete para a mesma quantidade de nanopartículas (8%), com tinta acrílica aplicada no revestimento das argamassas do SIP, ou seja, esta comparação permite avaliar o efeito das nanopartículas na refletância solar de diferentes argamassas.

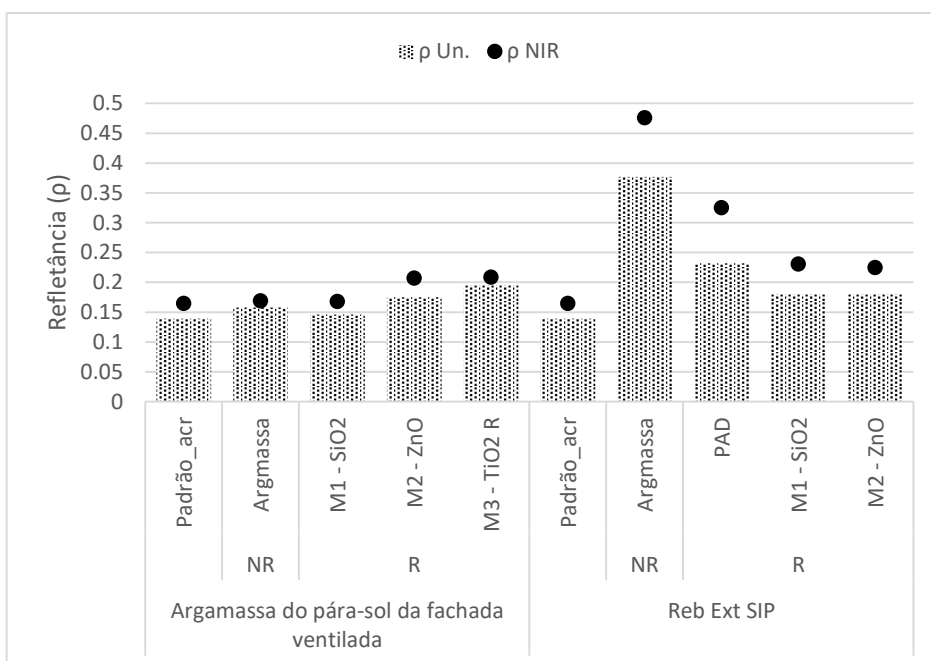


Figura 48 - Refletância unitária e NIR nas duas argamassas do SIP

Nota – NR – Não revestido; R – Revestido; PAD – Amostra padrão.

Convém referir que a validade dos resultados para as amostras do reboco exterior do SIP não é completamente aceitável devido à elevada fissuração do revestimento quando aplicado diretamente na argamassa do mesmo. Assim os resultados considerados válidos serão os referentes à argamassa do pára-sol da fachada ventilada.

A análise da Figura 48 permite referir que é confirmada a influência da tinta no aumento da refletância solar relativamente às amostras produzidas com o colorante, também comparado na Figura 47, no entanto, neste caso o suporte era uma placa de acrílico.

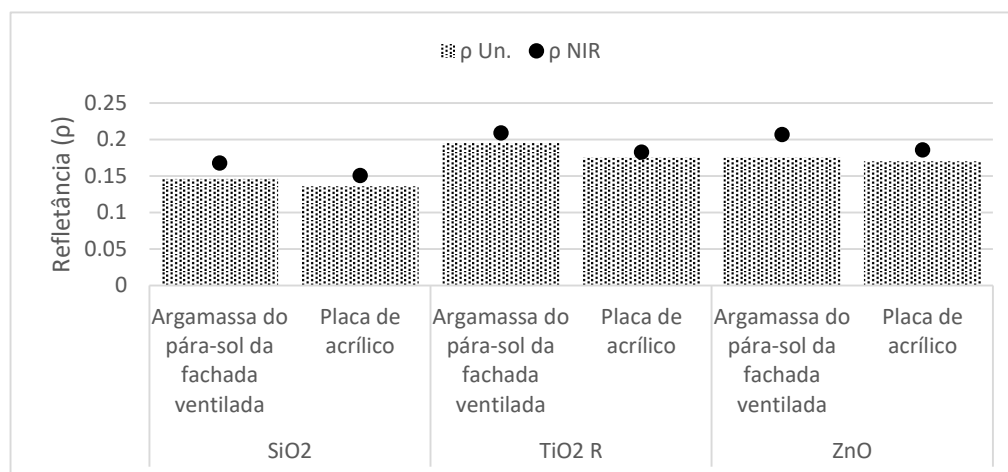


Figura 49 - Comparação da refletância entre nanopartículas para os diferentes suportes

Assim, de acordo com a Figura 49 é observado que independentemente da nanopartícula, a refletância mostra ser superior nas amostras com argamassa do pára-sol da fachada ventilada a servir de suporte, em comparação com as amostras produzidas em placas de acrílico.

4.3 PROPRIEDADES DA COR

4.3.1 CAMADA DE ACABAMENTO DO ETICS

Para caracterizar a cor das amostras padrão e executar uma análise da alteração da cor e do amarelecimento da mesma foram realizadas medições de refletância com o espectrofotômetro, tal como descrito no subcapítulo 3.2.2.

A alteração da cor (ΔE) é calculada através da Equação 6 sendo que o amarelecimento (YI^*) é calculado pela Equação 7. De relembrar que os parâmetros da percepção da alteração da cor a olho nu estão indicados no Quadro 4.

De seguida na Figura 50, Figura 51 e Figura 52 estão representados os resultados da alteração da cor comparativamente à amostra padrão, para as amostras com colorante em suporte de acrílico.

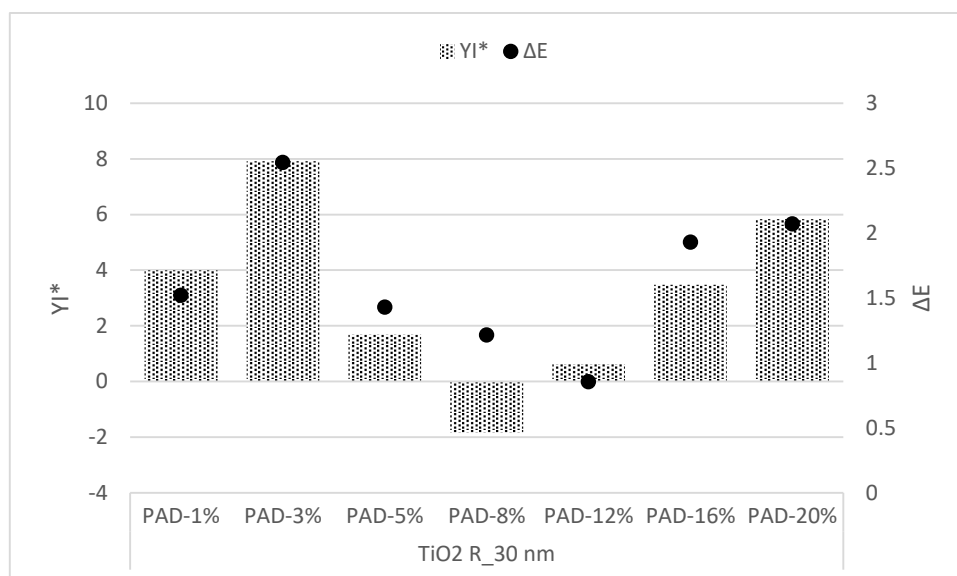


Figura 50 - Alteração da cor nas amostras de TiO₂ R com suporte de acrílico com o colorante

Os resultados da Figura 50, para as amostras com TiO₂ R, indicam que a amostra que apresenta melhor relação entre a alteração da cor e o amarelecimento é a que contém 12% de nanopartículas seguida da amostra com 8% de nanopartículas. Estas apresentam um ΔE menor que 1,5, logo, é impercetível a alteração da cor em relação à amostra padrão. Aliado a estes resultados, também são as amostras que indicam menor grau de amarelecimento (YI*).

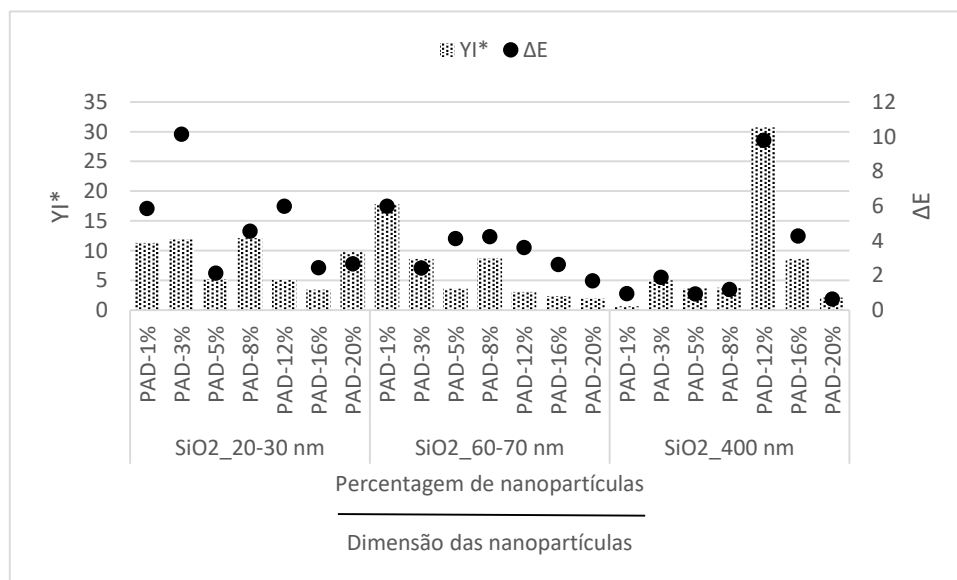


Figura 51 - Alteração da cor nas amostras de SiO₂ com suporte de acrílico com o colorante

As amostras de 60-70 nm, quando comparadas com as de 400 nm, apresentam, em termos médios, maior grau de alteração da cor no entanto menor amarelecimento devido à exposição a agentes químicos. No entanto, como indica o Quadro 30, as amostras de 60-70 nm refletem mais radiação solar na região do

NIR relativamente às de 400 nm. Apesar das nanopartículas de 400 nm apresentarem maior dispersão quando aplicadas no suporte, estas cobrem menos área na superfície da amostra devido ao menor volume de nanopartículas incorporadas, para a mesma percentagem, comparativamente às de 60-70 nm.

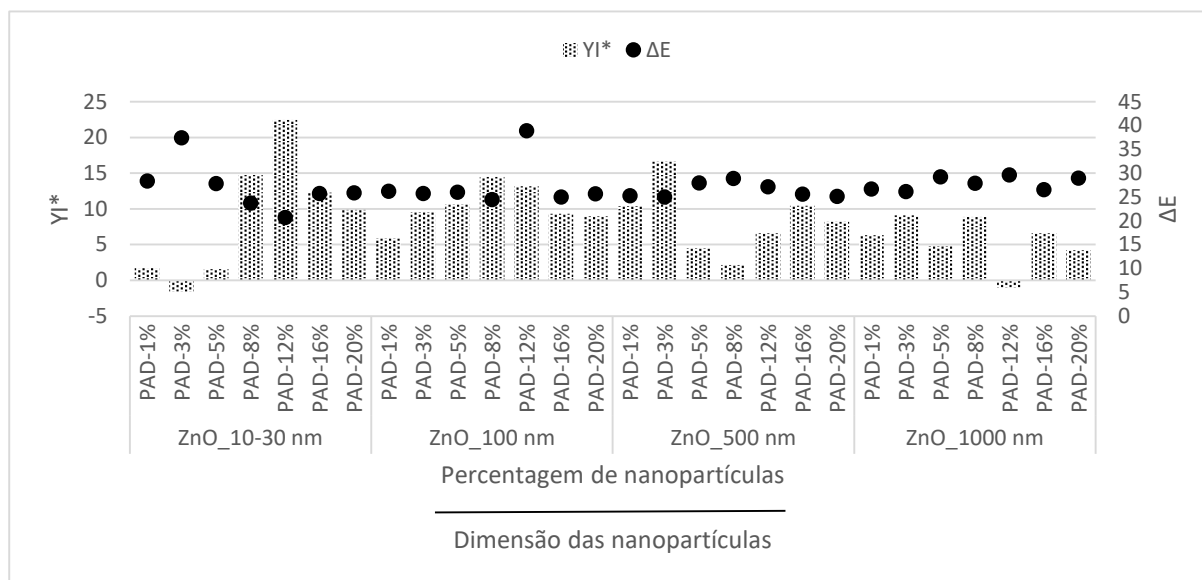


Figura 52 - Alteração da cor nas amostras de ZnO com suporte de acrílico com o colorante

As amostras de ZnO são as que apresentam a alteração da cor mais elevada em relação às restantes amostras. No entanto, as amostras em questão já teriam sido produzidas há algum tempo, podendo os resultados estar influenciados pelo espaço temporal decorrido entre a produção das amostras e a medição da refletância nas mesmas.

Apesar dos resultados apresentados na Figura 52 foi escolhida uma dimensão destas amostras para testar em sistemas de fachada. Assim, foi escolhida a dimensão que apresenta menor alteração da cor e amarelecimento, para valores médios. Os resultados estão indicados no Quadro 33.

Quadro 33 - Alteração da cor e amarelecimento médios para cada dimensão das amostras de ZnO

Dimensão das nanopartículas (nm)	Alteração da cor	
	ΔE	YI*
10-30	27,1	8,7
100	27,5	10,3
500	26,4	8,4
1000	27,9	5,6

As amostras de 500 nm são as que apresentam menor variação na cor, mas são mais degradadas por agentes químicos. No entanto, por serem de menor dimensão, logo mais leves, poderão vir a ser vantajosas na aplicação em sistemas de fachada reais devido ao maior poder de cobertura relativamente

às de 1000 nm. Então, apesar dos resultados serem muito próximos, será escolhida a dimensão de 500 nm.

Passando para a parte da aplicação dos revestimentos com nanopartículas nos sistemas em estudo, nomeadamente, no ETICS, a Figura 53 apresenta os resultados obtidos para a alteração da cor e para o amarelecimento.

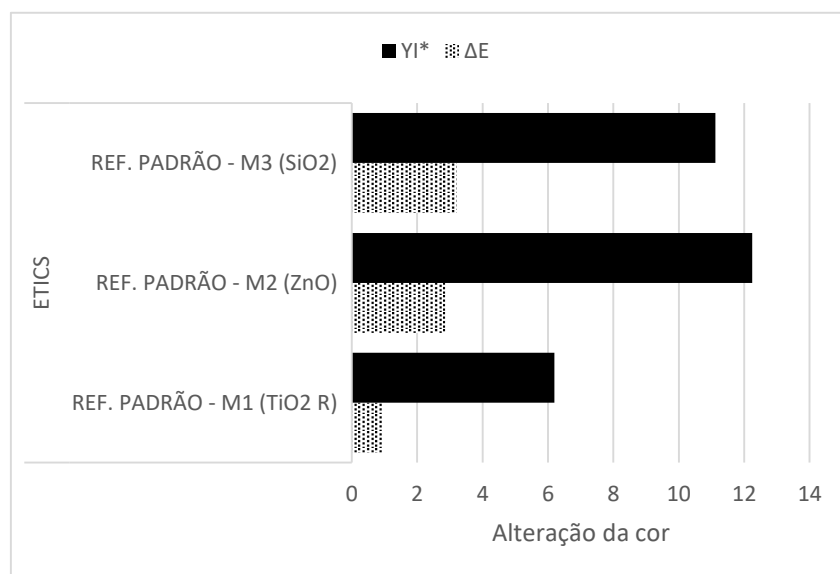


Figura 53 - Variação da cor nas amostras de ETICS

Para o ETICS, a amostra com TiO₂ R (M1) é a que tem menor alteração assim como o menor grau de amarelecimento. O que não era esperado dado que no momento de produção das amostras de acrílico, as de TiO₂ R apresentaram alteração da cor a olho nu bastante perceptível.

4.3.2 CAMADA DE ACABAMENTO DO SIP

Relativamente às amostras com suporte em placa de acrílico com tinta acrílica, os resultados estão apresentados na Figura 54.

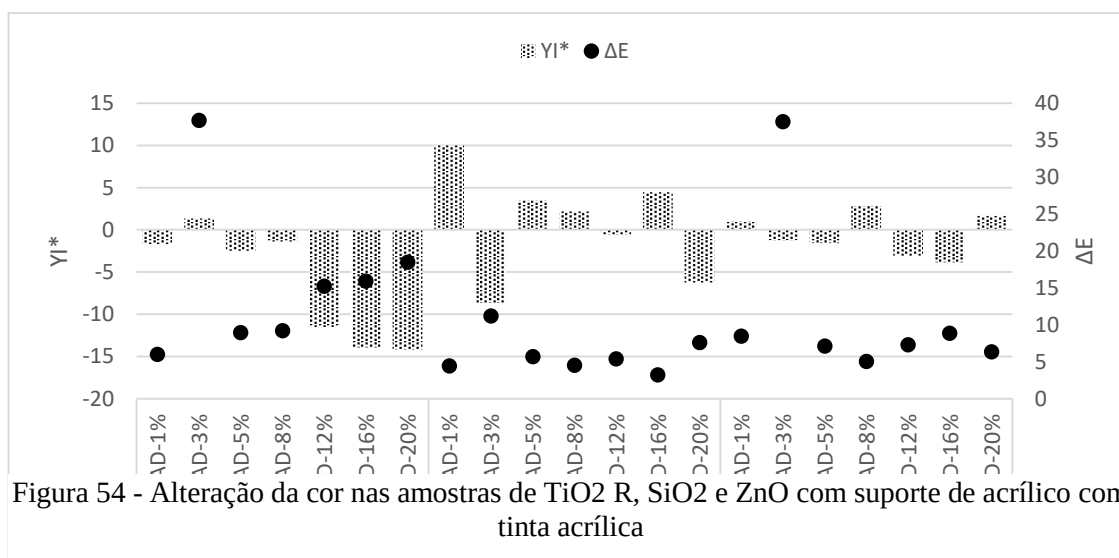


Figura 54 - Alteração da cor nas amostras de TiO₂ R, SiO₂ e ZnO com suporte de acrílico com tinta acrílica

Relativamente à variação da cor, as amostras com melhor comportamento foram as de SiO₂ com 60-70 nm, seguidas das de ZnO e por fim as de TiO₂ R com a maior alteração de cor como mostra a Figura 19.

Passando para a parte da aplicação dos revestimentos com nanopartículas nos sistemas em estudo, nomeadamente, no SIP, a Figura 55 mostra os resultados das medições da refletância no âmbito da variação da cor.

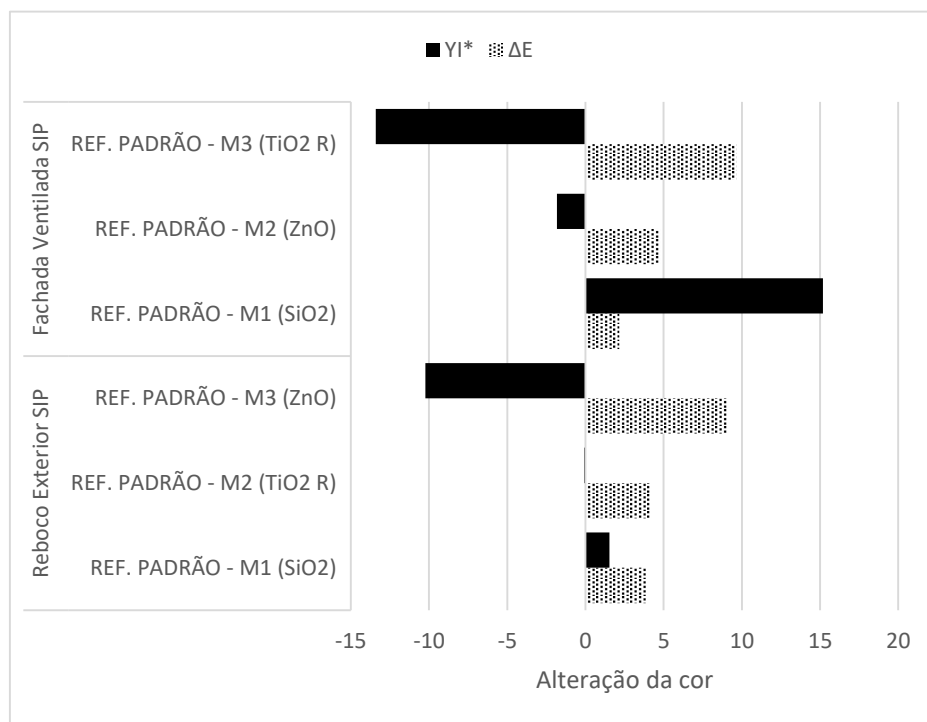


Figura 55 - Alteração da cor nos sistemas SIP com tinta acrílica

Os resultados expressos na Figura 55 mostram que as nanopartículas de SiO₂ (M1 para o pára-sol da fachada ventilada) apresentam um comportamento aceitável nas argamassas para o SIP, particularmente na argamassa do pára-sol da fachada ventilada no parâmetro ΔE, mas não tanto no YI*, sendo a que apresenta o maior amarelecimento devido à degradação por exposição a agentes químicos.

De notar que nas amostras referentes à argamassa de reboco exterior do SIP, a que contém SiO₂ também é a que apresente os melhores resultados. No entanto, a validade dos resultados para o conjunto de amostras M1, M2 e M3 para esta argamassa é questionável devido ao estado em que o revestimento se encontra após a secagem (Figura 32).

4.4 EMISSIVIDADE

A emissividade foi medida nas amostras indicadas no Quadro 29. Os resultados obtidos foram os que são apresentados no Quadro 34.

Quadro 34 - Resultados do ensaio de emissividade nos SIP e no ETICS

Sistema	Com/Sem revestimento	Amostra	Nº de pontos medidos	Emissividade média ($\epsilon_{\text{média}}$)
ETICS	Com	M1 - TiO_2 R	3	0,83
		M2 - ZnO		0,84
		M3 - SiO_2		0,83
		REF.PADRÃO - Colorante		0,85
		REF.M – Revestimento orgânico		0,83
SIP – Argamassa do reboco exterior	Sem	Argamassa Padrão – Sem revestimento	5	0,87
	Com	M1 - SiO_2	3	0,82
		M2 - TiO_2 R		0,91
		M3 - ZnO		0,92
		PAD – Tinta acrílica		0,93
SIP – Argamassa do pára-sol da fachada ventilada	Com	M1 - SiO_2	3	0,80
		M2 - ZnO		0,82
		M3 - TiO_2 R		0,79
		PAD – Tinta acrílica		0,83

Os resultados da emissividade são semelhantes dentro do mesmo sistema, e também, quando analisado entre sistemas. A variação da emissividade entre sistemas está representada na Figura 56.

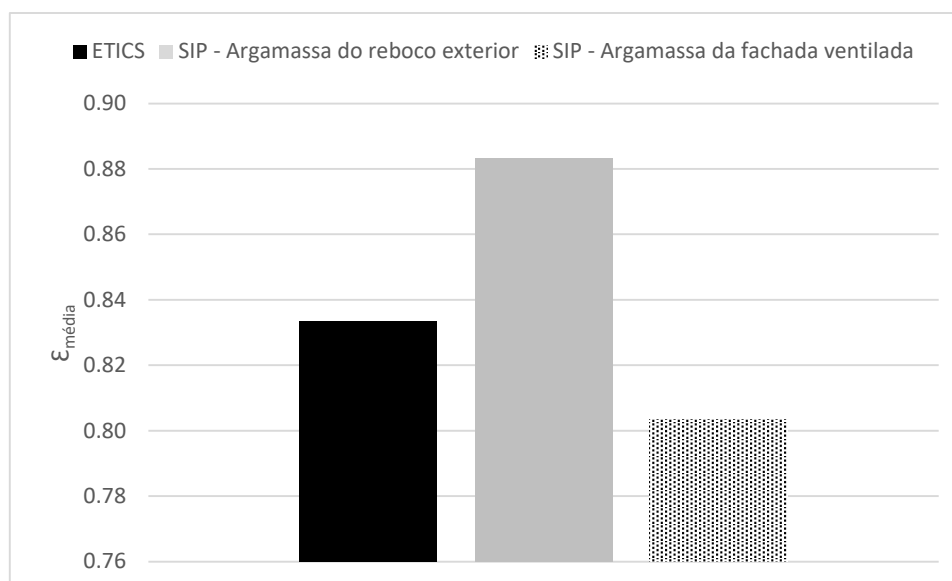


Figura 56 - Comparação da emissividade média entre sistemas

Assim, pelo gráfico da Figura 56 é possível considerar que nos SIP, entre a argamassa do reboco exterior e a argamassa da fachada ventilada, existe uma variação da emissividade a ser considerada. Nestas duas argamassas variam o tipo de suporte, a espessura das amostras e a constituição das argamassas (a argamassa do reboco exterior térmico tem RCD's, nomeadamente, resíduos cerâmicos), ou seja, estes poderão ser três fatores que apresentam influência na emissividade dos mesmos.

É também de referir que na argamassa do reboco exterior a emissividade é maior na amostra apenas com tinta acrílica e menor nas amostras com nanopartículas, particularmente na amostra M1. Na argamassa da fachada ventilada aplicada num SIP, os valores são, no geral, semelhantes entre as amostras, sendo que a amostra que apenas é revestida com tinta acrílica é a que apresenta menor emissividade (a par da amostra M3) e a amostra M2 é a que revela o valor mais elevado. Ou seja, é possível retirar destas medições que as nanopartículas de SiO_2 impõem um decréscimo na emissividade da argamassa do reboco exterior do SIP ao contrário das de ZnO levam a um aumento na emissividade da mesma argamassa e também na argamassa da fachada ventilada do SIP.

No caso do ETICS este sistema demonstrou valores muito semelhantes entre todas as amostras. Ou seja, as nanopartículas não induzem qualquer alteração ao mesmo em termos de emissividade.

4.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Concluindo, após a análise às propriedades superficiais dos sistemas foi verificado que:

- Concentração de nanopartículas acima dos 12% apresenta elevado grau de saturação e mistura heterogénea;
- 8% foi a percentagem que apresentou a melhor relação entre a homogeneidade, refletância solar e variação da cor;
- A mistura das nanopartículas com o colorante promoveu um decréscimo na refletância solar, ao contrário das amostras com tinta acrílica.

- As amostras com TiO_2 R em placa de acrílico, com tinta acrílica, apresentaram elevada alteração da cor (preto para cinzento), facto confirmado pelos resultados da refletância, os quais sofreram um incremento;
- No ETICS, a amostra com maior alteração de cor foi a constituída por SiO_2 ;
- Na argamassa do pára-sol a amostra com TiO_2 R apresentou alteração de cor superior a 10,0 (Muito perceptível), sendo que a amostra com SiO_2 foi a que apresentou o valor mais baixo ($\Delta E=2,16$);
- Os resultados obtidos para a argamassa do reboco exterior não foram considerados válidos devido à elevada fissuração verificada na tinta.
- A variação da emissividade entre amostras foi muito ligeira, como esperado;
- A emissividade nas amostras de ETICS e da argamassa do SIP apresentou uma variação máxima de 0,02;

5

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE – ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

5.1 ENQUADRAMENTO

Neste capítulo será apresentada uma simulação de envelhecimento aplicado às amostras de ETICS produzidas em ambiente laboratorial. Neste ensaio foram simuladas situações em que o sistema está exposto a ciclos de calor-frio através da adaptação da norma com a norma europeia EN 1015-21 reativa a *Methods of test for mortar for masonry – Part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates*.

Assim, o objetivo será, de uma forma simplificada, perceber de que forma a exposição ao calor por radiação infravermelha, assim como, a exposição a temperaturas negativas, alteram as propriedades superficiais, neste caso, do ETICS. O ensaio que serviu para o efeito foi realizado com o espectrofotómetro FLAME, para a região UV-VIS e FLAME-NIR, tal como o nome indica, para a região NIR. Ou seja, a superfície das amostras foi sujeita a ciclos higratérmicos mais gravosos, que poderão provocar tensões termo-mecânicas que por sua vez poderão dar origem a fissurações.

As amostras sujeitas a este ensaio são as especificadas no Quadro 14 e no Quadro 15.

5.2 INFRAESTRUTURA EXPERIMENTAL

De modo a simular a incidência de radiação solar, na região do infravermelho, nas amostras foi utilizada uma lâmpada com 2000W de potência (Figura 57), colocada no topo de uma estante, com posição fixa de modo que a radiação incida de forma perpendicular nas amostras de ETICS. Estas amostras foram dispostas verticalmente com o objetivo de simular uma fachada real, a uma distância próxima de 1,60 metros de forma a manter a temperatura da superfície do ETICS constante, a cerca de 60 °C, tal como é indicado na norma.

O equipamento utilizado para simular temperaturas negativas foi uma câmara climática (Figura 57) capaz de atingir temperaturas na ordem dos -42 °C.



Figura 57 – Lâmpada de Infravermelhos (à esquerda); Câmara climática (à direita)

Para controlar a temperatura da superfície do ETICS foi utilizado um aparelho capaz de realizar as medições da mesma à distância, por *laser*.

5.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Como referido no subcapítulo 4.1, ensaio teve por base a norma EN 1015-21. Dado que o objetivo deste ensaio foi avaliar o efeito de ciclos higrotérmicos (calor-frio) mais severos, sendo o outro ciclo presente na norma relativo à humedificação-congelação. Como o EPS presente no ETICS é praticamente impermeável, este ciclo de humedificação-congelação não teria à partida grande efeito na degradação. Assim, o procedimento utilizado para o ensaio adaptado foi o seguinte:

- Colocação das amostras em posição vertical numa superfície estável e instalação da lâmpada de infravermelho na estante de suporte, com posição fixa de modo que a radiação atinga as amostras da forma mais homogênea possível;



Figura 58 - ETICS em posição vertical (à esquerda); Suporte da lâmpada de infravermelhos (à direita)

- Ligar a lâmpada de infravermelho. A mesma foi ligada por volta das 9h30 no dia 7 de junho de 2022;
- Após 15 minutos de incidência de radiação na superfície das amostras foi executado o controlo da temperatura da mesma de forma a verificar se as amostras apresentavam temperatura homogênea. A temperatura estipulada para a superfície do ETICS foi de cerca de 60 °C;

- No caso da temperatura não ser homogênea ou não estar dentro do valor definido, adaptar a distância entre a lâmpada e as amostras. Após várias calibrações a distância final foi de cerca de 1,60 metros (Figura 59).



Figura 59 - Lâmpada ligada a aproximadamente 1,60 metros de distância do ETICS

- A lâmpada manteve-se ligada, a incidir radiação infravermelha no ETICS durante 8h;
- De seguida, a lâmpada foi desligada e as amostras repousaram durante cerca de 30 minutos às condições ambiente com o objetivo de estabilizar a temperatura da superfície das mesmas;
- A câmara climática foi programada a uma temperatura de -10 °C;
- Após a estabilização do ETICS estar concluída, o mesmo foi colocado dentro da câmara climática durante 15h, como representado na Figura 60, marcando assim o fim de um ciclo;



Figura 60 - ETICS colocado na câmara climática

- Foram realizados 4 ciclos calor-frio.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Finalizados os quatro ciclos de envelhecimento, as amostras foram estabilizadas às condições ambiente, durante 48 horas, para posteriormente serem alvo de medições da refletância.

O procedimento de ensaio para a refletância foi o mesmo já referido, no capítulo 3, com recurso ao espectrofotômetro modular tal como para as amostras em suporte de placa de acrílico, ETICS e argamassa do SIP.

Os dados obtidos pelo espectrofotômetro serviram para o cálculo da refletância solar na região do UV-VIS e para a região do NIR, a combinação dos quais nos dá a refletância total.

Os resultados para a refletância do ETICS envelhecido estão apresentados na Figura 61, onde será efetuado um comparativo com as mesmas amostras de ETICS antes do envelhecimento (os resultados para os ETICS sem o envelhecimento são os mesmos que estão apresentados na Figura 45).

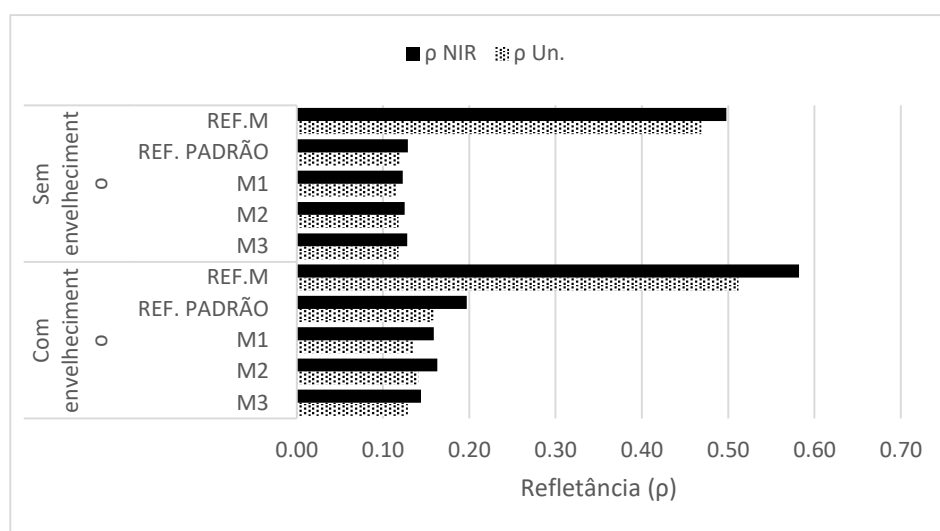


Figura 61 - Comparação da refletância total e NIR no ETICS sem e com envelhecimento

Através da Figura 61 é possível verificar que após o envelhecimento do ETICS, com a exposição a ciclos de radiação infravermelha e a temperaturas negativas, a refletância aumentou para todas as amostras não só para o valor global da refletância mas também com a refletância solar na região do NIR a acompanhar este incremento em proporção.

Dentro das amostras com nanopartículas (M1, M2 e M3), a amostra M2, correspondente à nanopartícula de ZnO, foi a que apresentou o diferencial mais acentuado na refletância total e na região do NIR, seguida das amostras M1 (TiO₂ R) e M3 (SiO₂), no entanto as diferenças não são significativas ao ponto de poder concluir se a dimensão da nanopartícula ou o volume incorporado da mesma pode estar relacionado com as diferenças verificadas no aumento da refletância total e NIR. A amostra REF. PADRÃO, apenas com revestimento orgânico e colorante (sem nanopartículas) e a amostra REF. M apenas com revestimento orgânico (sem colorante e sem nanopartículas) também apresentaram um incremento na refletância total e NIR, tendo sido aquelas que apresentaram as maiores variações das mesmas, como mostra a Figura 62, que representa o incremento da refletância nas amostras referidas.

Assim, verifica-se que a presença de nanopartículas nas amostras de ETICS produzidas promove um aumento da refletância à medida que o sistema se desgasta.

A figura 62 mostra o incremento da refletância, em percentagem, para as diferentes amostras submetidas ao ensaio de envelhecimento.

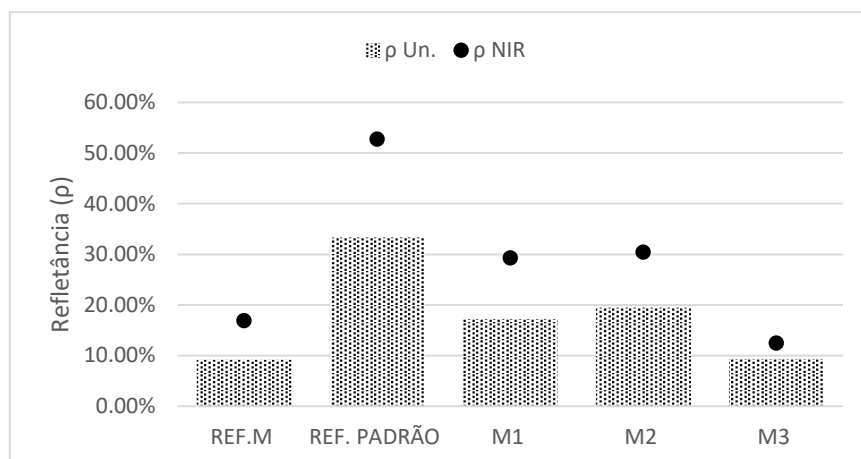


Figura 62 - Incremento de refletância após o ensaio de envelhecimento

Na Figura 63 estão apresentadas fotografias das várias amostras de ETICS com o objetivo de observar a existência de alterações visíveis na superfície das mesmas.

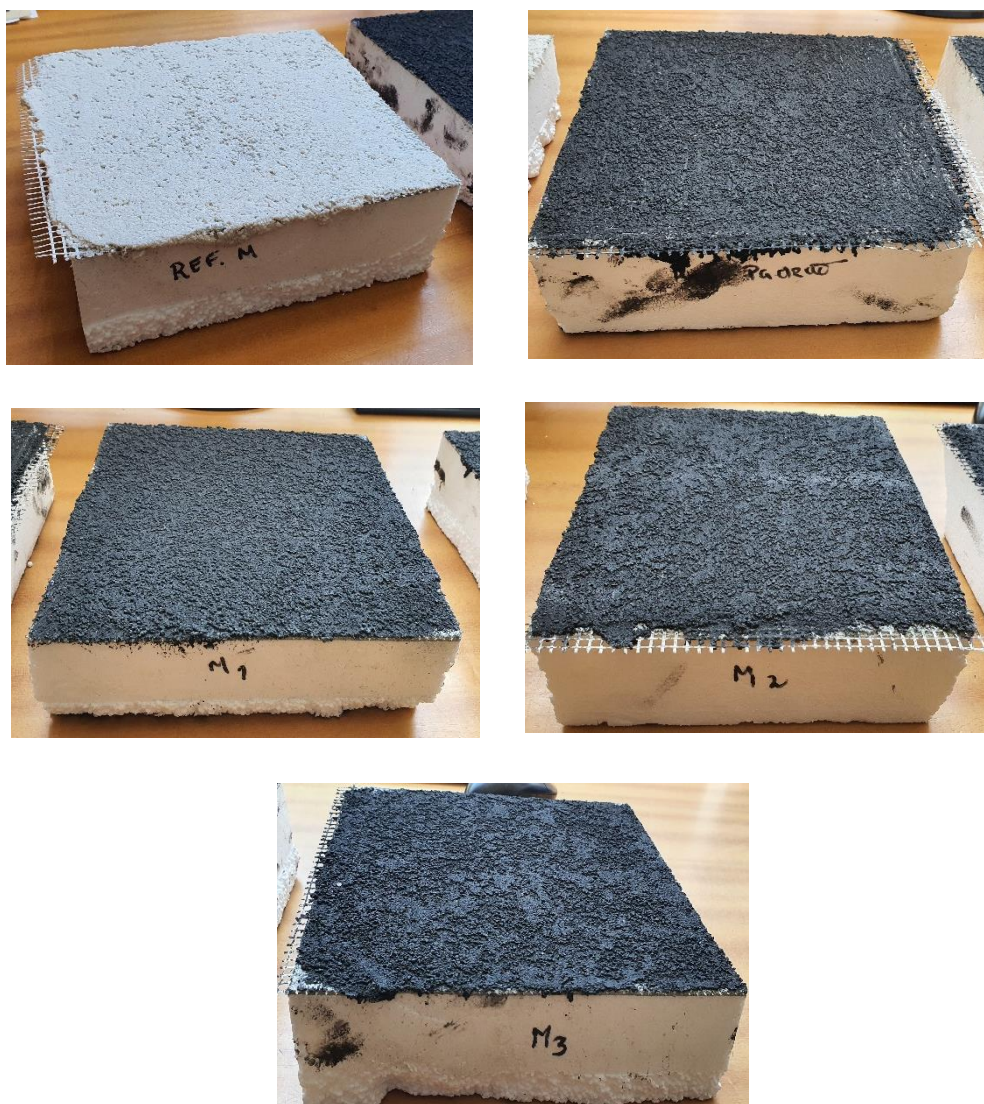


Figura 63 - Aspetto das amostras após o ensaio de envelhecimento

Assim, é possível verificar através da Figura 63 que, aparentemente, a alteração da cor a olho nu, não foi significativa, nem são verificadas fissuras ou outro tipo de danos na superfície do ETICS.

A Figura 64 mostra a variação na alteração da cor (ΔE), no amarelecimento (ΔYI^*) e no brilho (ΔL) entre as amostras de ETICS que foram sujeitas aos ciclos de envelhecimento e as mesmas amostras antes dos ciclos de envelhecimento.

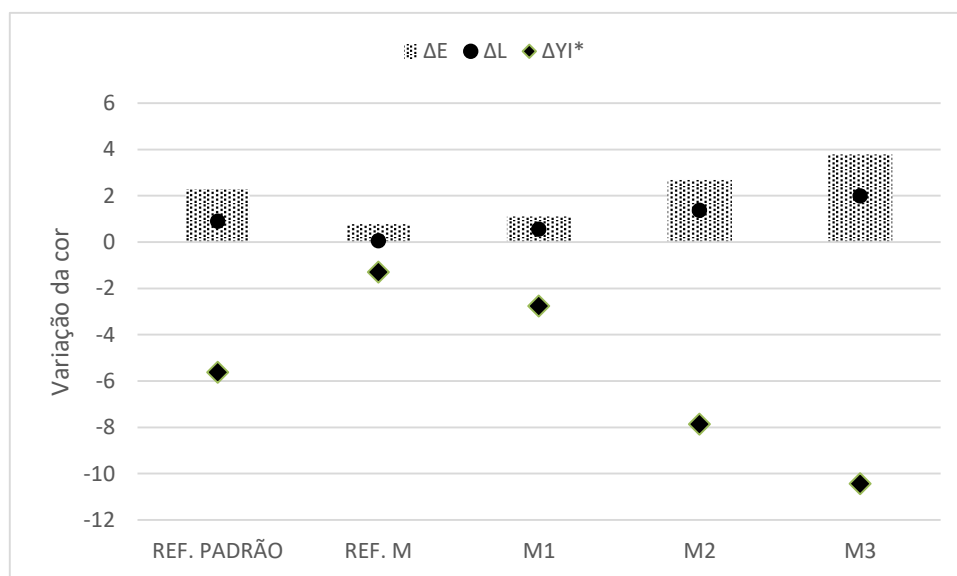


Figura 64 - Variação da alteração da cor, amarelecimento e brilho antes e após envelhecimento

Os resultados mostram que a amostra M3 (SiO_2) foi a que apresentou maior alteração da cor (ΔE), maior variação do amarelecimento (YI^*), que poderá estar relacionado com o facto do revestimento ter polímeros na sua constituição, os quais degradam-se com a ação da luz. Ou seja, foi a que ficou menos amarela e a que registou o maior incremento no brilho (L). Estes resultados confirmam que variação das características da cor está ligada à refletância total e NIR. No geral, os resultados obtidos entre as amostras de ETICS não foram os esperados, dado que as amostras REF. PADRÃO e REF. M, ambas sem nanopartículas, foram as que obtiveram menor variação da cor, que revelou, de forma ligeira, um menor desgaste. Assim, verifica-se que sem nanopartículas no revestimento, a variação da cor de um modo geral é inferior comparativamente às amostras com nanopartículas incorporadas.

A Figura 65 mostra a amostra M3 antes e após o ensaio de envelhecimento.

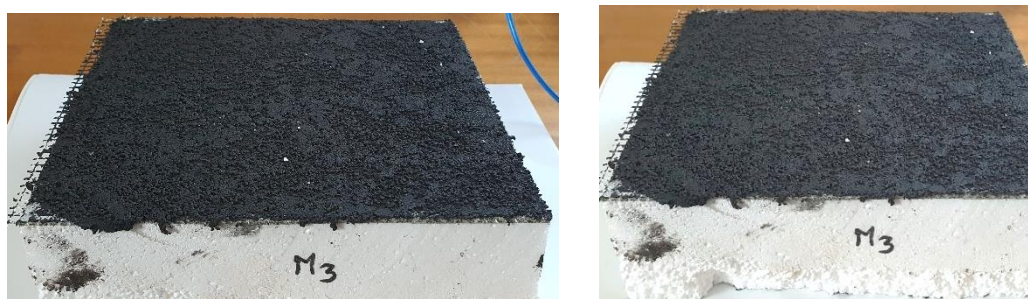


Figura 65 - Amostra M3 antes do envelhecimento (à esquerda); Amostra M3 após o envelhecimento (à direita)

Pelas fotografias representadas na Figura 65, não é possível perceber a alteração da cor (ΔE) a olho nu. No entanto, a alteração da cor na M3 foi superior a 3, patamar no qual valores medidos acima do mesmo indicam que o ΔE é muito perceptível a olho nu.

Relativamente ao ensaio de emissividade, foi observado um aumento da mesma, ainda que ligeiro, nas amostras de ETICS com nanopartículas incorporadas no revestimento. Na amostra padrão, sem nanopartículas, foi observado o efeito oposto. Os resultados estão apresentados no Quadro 35.

Quadro 35 - Emissividade após ciclos de envelhecimento

Sistema	Amostra	Nº de pontos medidos	Emissividade média (ϵ média)	
			Sem envelhecimento	Com envelhecimento
ETICS	Ref Padrão	3	0,85	0,81
	M1		0,83	0,84
	M2		0,84	0,87
	M3		0,83	0,84

As variações analisadas no Quadro 35 são de expressão pouco significativa e com impacto reduzido no comportamento do sistema em ambiente real. Assim, é considerado que os ciclos de envelhecimento realizados neste procedimento simplificado não produzem efeitos significativos na emissividade do sistema ETICS.

A conclusão retirada dos ciclos de envelhecimento executados nas amostras de ETICS com e sem nanopartículas é que a presença das mesmas, neste sistema, aumenta a refletância solar, no entanto, induz um incremento na alteração da cor. Para analisar, de forma mais assertiva, o efeito das nanopartículas na durabilidade de revestimentos para ETICS, estas amostras deverão ser submetidas a ciclos mais longos para atestar os efeitos a longo prazo.

6

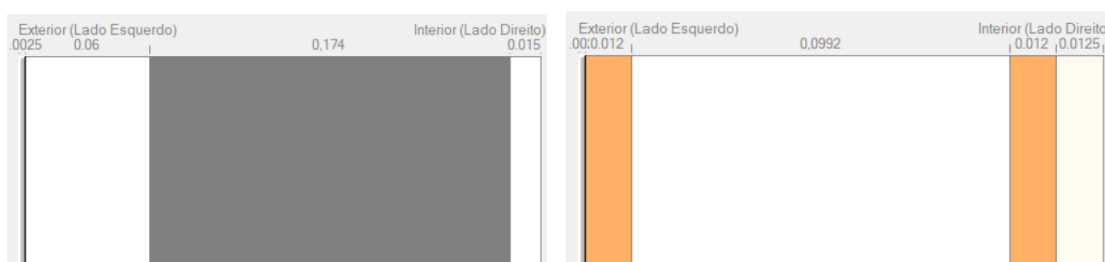
SIMULAÇÃO NUMÉRICA

6.1 ENQUADRAMENTO

Neste capítulo serão comparados os diferentes sistemas. Os sistemas alvo deste estudo serão o ETICS comparativamente ao SIP EPS (SIP tradicional composto por duas placas de OSB e com núcleo de EPS) e o SIP MORTAR (SIP com placas de OSB a revestir um núcleo de argamassa produzido com variados resíduos de várias indústrias) relativamente ao SIP EPS, com recurso ao software WUFI, de forma a observar se existe algum diferencial na temperatura superficial das fachadas (Tse) e no potencial de condensação (PC) entre os sistemas referidos. Os valores relativos à argamassa do núcleo do SIP MORTAR foram medidos experimentalmente por outro colega no âmbito de uma dissertação de mestrado a decorrer. Algumas propriedades utilizadas no modelo de simulação foram medidas experimentalmente por Joana Maia et al. (2018), nomeadamente os valores referentes à permeabilidade ao vapor de água e emissividade do revestimentos destes sistemas. As restantes propriedades foram obtidas na base de dados do programa. Este estudo será realizado para diferentes cidades de Portugal, assim como para as orientações distintas.

O WUFI, software mencionado no parágrafo anterior, simula o comportamento higrotérmico de um sistema de fachada previamente introduzido no software com as devidas características e propriedades. A geometria, as condições de fronteira (importantes para os pontos de monitorização onde serão medidas várias propriedades de acordo com o cenário a simular), e as propriedades detalhadas dos materiais permitem uma simulação realista de um sistema multicamada (Hartwig M Künzels, Kiessl, & transfer, 1996). Sendo assim, o WUFI tem vantagens na sua utilização pois tem em conta o balanço radioativo explícito (BRE), que é importante pois tem em consideração os componentes de radiação de onda curta e de onda longa. O WUFI tem ainda uma base de dados alargada de materiais e ficheiros com dados climáticos de variadas cidades mundiais (J. F. Maia, 2019).

Assim, a Figura 66 mostra os três sistemas introduzidos no software para a realização da simulação.



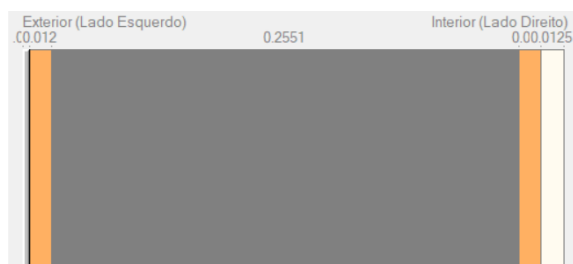


Figura 66 - ETICS (em cima, à esquerda); SIP EPS (em cima, à direita); SIP MORTAR (em baixo)

O estudo começa pela introdução dos três sistemas em estudo no software, e pela inserção de alguns parâmetros necessário para a elaboração das simulações, sendo eles (J. F. Maia, 2019):

- Geometria e montagem do sistema;
- Orientação, inclinação e altura da fachada;
- Propriedades higratérmicas dos materiais;
- Condições climáticas exteriores e interiores (no estudo presente, apenas será necessário analisar as condições exteriores);
- Coeficientes de transferência das superfícies;
- Condições iniciais da humidade relativa e temperatura superficial.

Relativamente ao cálculo da transferência de calor, o software tem em consideração s seguintes aspetos:

- Condutibilidade térmica;
- Radiação solar de onda curta;
- Fluxos de humidade;
- Arrefecimento noturno devido a radiação de onda longa devido à sua importância na análise das condensações da superfície exterior.

São estes um ETICS, um SIP com núcleo de EPS e finalmente um SIP com núcleo de argamassa. As espessuras dos sistemas referidos foram dimensionadas de forma que os três sistemas apresentem o mesmo coeficiente de transmissão térmica (U). Assim, o Quadro 36 mostra as principais características dos sistemas considerados.

Quadro 36 – Características dos modelos dos sistemas de fachada introduzidos no WUFI

Sistema de fachada	Espessura total (m)	U (W/ (m ² K)
ETICS	0,252	0,349
SIP EPS	0,138	
SIP MORTAR	0,294	

No Quadro 37, estão representadas as restantes propriedades respetivas a cada camada, para cada um dos três sistemas considerados para a simulação.

Quadro 37 - Propriedades das camadas de cada sistema de fachada

Propriedades dos materiais	ETICS			SIP EPS			SIP MORTAR		
	CB ⁽¹⁾	EPS	BBL ⁽²⁾	CB ⁽¹⁾	OSB	EPS	CB ⁽¹⁾	OSB	M ⁽³⁾
Permeabilidade ao vapor do revestimento (Sd)					1/0,61 ⁽⁴⁾				
Fator de resistência à difusão de vapor de água	12	30	8,30	12	650	30	12	650	8,70
Densidade aparente (kg/m ³)	1250	15	600	1250	630	15	1250	630	644
Porosidade (m ³ /m ³)	0,25	0,95	0,72	0,25	0,6	0,95	0,25	0,6	0,76
Calor específico (J/kgK)	1000	1500	850	1000	1500	1500	1000	1500	1111
Condutibilidade térmica (W/Mk)	0,45	0,04	0,14	0,45	0,13	0,04	0,45	0,13	0,103

(1) – Camada de base;

(2) – Bloco de betão leve;

(3) – Mortar (Argamassa do núcleo do SIP);

(4) - Sd=1,0 para revestimento com tinta acrílica; Sd=0,61 para revestimento orgânico (Ambos foram simulados no WUFI Pro como uma camada fictícia).

Também será realizada uma análise com foco no efeito que a introdução das nanopartículas poderá impor nos sistemas ETICS e SIP MORTAR, para as duas principais cidades portuguesas, as quais são detentoras de climas com características diferentes.

Em sumário, neste capítulo estão presentes dois estudos com dois objetivos. O primeiro, apenas avalia as diferenças verificadas na Tse e no PC entre os vários sistemas. O segundo estudo é aplicado a situações concretas, com a utilização de valores da refletância solar e emissividade medidos, em ambiente laboratorial, nas demais amostras produzidas.

6.2 INFLUÊNCIA DO SUPORTE NA TEMPERATURA SUPERFICIAL EXTERIOR DOS SISTEMAS DE FACHADA

Após a introdução dos sistemas de fachada com as respetivas características, foram exportados os dados para diferentes cenários. Foram considerados dois revestimentos, um revestimento orgânico preto de capa fina e uma tinta acrílica. Estes dois revestimentos foram considerados nos três sistemas de forma a analisar todas as opções. Ao nível das orientações, foram exportados dados para Norte, Este, Sul e Oeste para as cidades de Bragança, Porto, Lisboa e Faro. Ou seja, assim, a análise efetuada abrange uma latitude significativa de Portugal. Foi também considerada a variação da absorção solar do sistema entre 0,80 e 0,58, representando assim uma cor escura e uma cor clara, respetivamente. O período considerado para as simulações foi de um ano, nomeadamente, de 01/01/2020 – 00h:00m:00s até à data 01/01/2021 – 00h:00m:00s.

Os cenários analisados neste capítulo estão apresentados no Quadro 38.

Quadro 38 - Parâmetros dos cenários analisados

ID	Sistemas comparados	Revestimento	Absorção Solar	Emissividade	Orientação	Cidade
1	ETICS – SIP EPS	Revestimento Orgânico	0,80	0,90	norte, oeste	Bragança;
2	SIP EPS – SIP MORTAR	Tinta acrílica	0,58	0,90		Porto; Lisboa; Faro

As conclusões obtidas foram que entre sistemas de fachada a variação da Tse é mínima, ou seja, entre o ETICS e o SIP EPS e entre o SIP EPS e o SIP MORTAR não existem diferenças tais na Tse que justifiquem a utilização de um sistema em detrimento de outro. De forma a obter um gráfico legível, foram apenas consideradas nesta análise as orientações Norte e Oeste, pois são as duas orientações com resultados mais díspares.

A Figura 67 mostra, respetivamente, a Tse de um sistema ETICS com revestimento orgânico para uma absorção de 0,80 e de um SIP EPS revestido com o mesmo colorante para a mesma absorção.

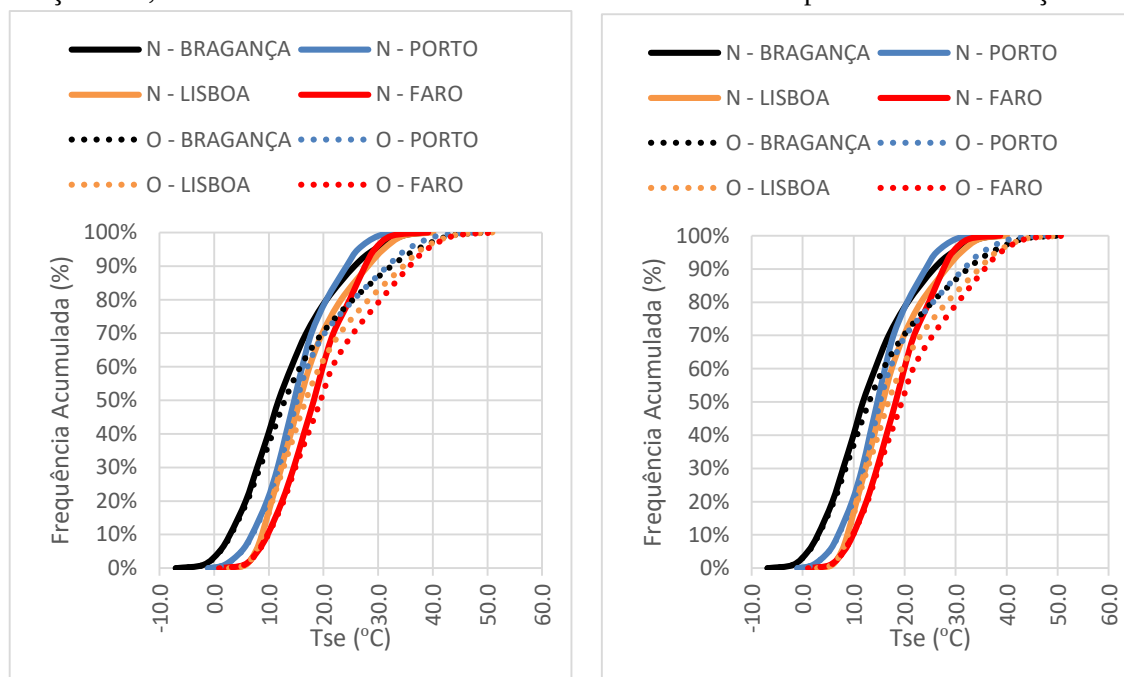


Figura 67 - Tse no ETICS (à esquerda) e no SIP EPS (à direita) com revestimento orgânico e absorção solar igual a 0,80

É verificado que para a mesma orientação e cidade a Tse apresenta uma variação que pode ser considerada desprezável entre os dois sistemas. A diferença máxima registada é de cerca de 1 °C. O sistema que aquece mais é o ETICS em comparação com o SIP EPS.

De seguida são apresentados os resultados obtidos na simulação de forma confirmar se o mesmo se verifica entre um SIP EPS e um SIP MORTAR (Figura 68).

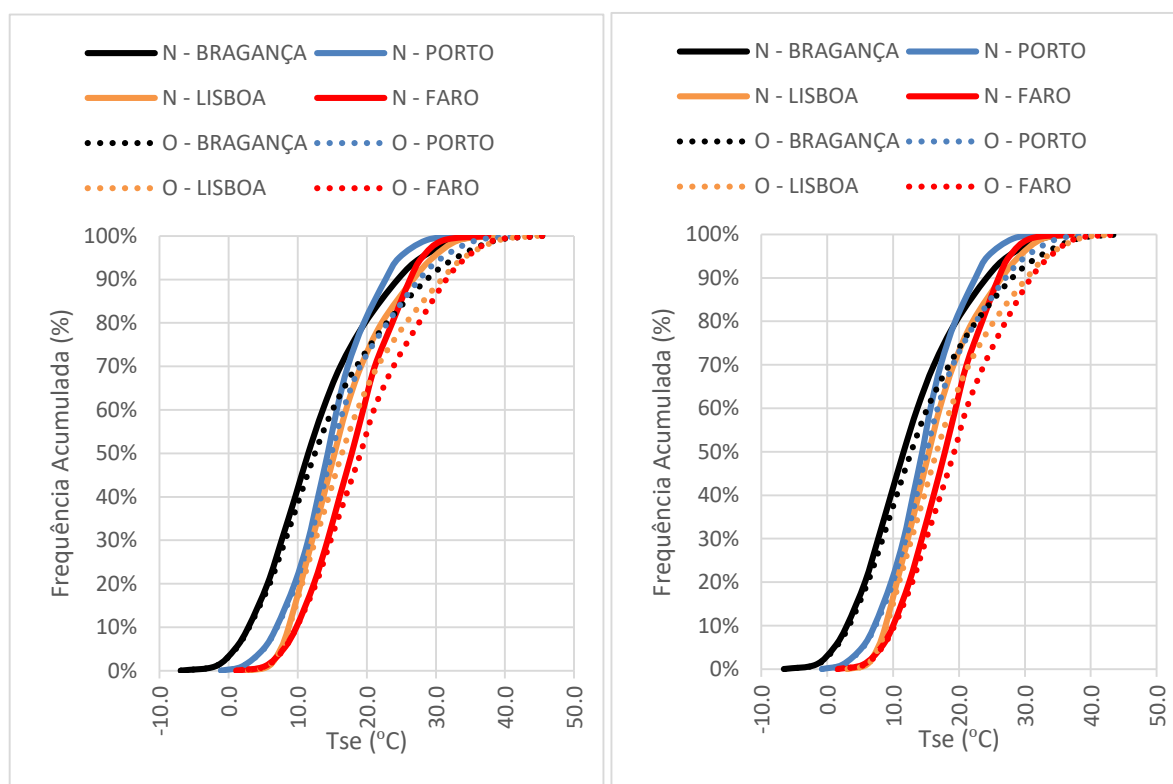


Figura 68 - Tse no SIP EPS (à esquerda) e SIP MORTAR (à direita) com tinta acrílica e absorção solar igual a 0,58

A Figura 68 permite retirar a mesma conclusão do estudo anterior entre um SIP EPS e um ETICS, neste caso, aplicado à comparação dos sistemas SIP MORTAR e SIP EPS com absorção solar igual 0,58 e revestido com tinta acrílica.

O mesmo se passa nas restantes simulações, não havendo necessidade de apresentar os gráficos para as mesmas dado que não existem variações significativas. Assim a conclusão a retirar é que o tipo de sistema não apresenta uma influência significativa na Tse, para os sistemas analisados, mas sim uma diferença máxima de cerca de 1 °C, com o SIP MORTAR a apresentar a menor Tse. Assim, propriedades como a absorção solar revelam um peso significativo comparando com o tipo de sistema.

6.3 EFEITO DAS NANOPARTÍCULAS NAS PROPRIEDADES SUPERFICIAIS

Considerando os resultados obtidos nas medições da refletância solar efetuadas nas amostras de ETICS e de argamassa produzida para a fachada ventilada do SIP, estes foram aplicados nos sistemas presentes no software de modo a simular o efeito das nanopartículas para diferentes simulações e para diferentes cidades entre os próprios sistemas. Dado a amostra de reboco térmico exterior do SIP apresentou elevada fissuração no revestimento depois do processo de secagem, os resultados obtidos para o mesmo não apresentam a validade desejada. A justificação para apenas apresentar simulações para Norte e Oeste, dá-se devido à diminuta variação de valores entre da Tse, assim, foram apenas analisadas as orientações que apresentam os resultados mais díspares. Os cenários foram os presentes no Quadro 39.

Quadro 39 - Cenários de simulação para o efeito das nanopartículas no ETICS e SIP MORTAR

Amostra fictícia	Amostra real	Revestimento	Nanopartículas	Absorção solar	Emissividade	Orientação	Cidade
ETICS	REF. PADRÃO	Colorante	-	0,880	0,850	norte; oeste	Porto; Lisboa
ETICS 1	M1		TiO ₂ R	0,884	0,830		
ETICS 2	M2		ZnO	0,882	0,840		
SIP MORTAR	PAD	Tinta acrílica	-	0,861	0,83		
SIP MORTAR 1	M1		SiO ₂	0,854	0,800		
SIP MORTAR 2	M2		ZnO	0,825	0,820		

O critério de seleção para as nanopartículas a testar recai sobre as duas nanopartículas que apresentaram a melhor relação refletância solar-alteração da cor nas medições efetuadas nas amostras de ETICS e da argamassa da fachada ventilada para o SIP, com o espectrofotómetro.

Assim os resultados obtidos na simulação para o ETICS, ETICS 1 e ETICS2 foram os seguintes.

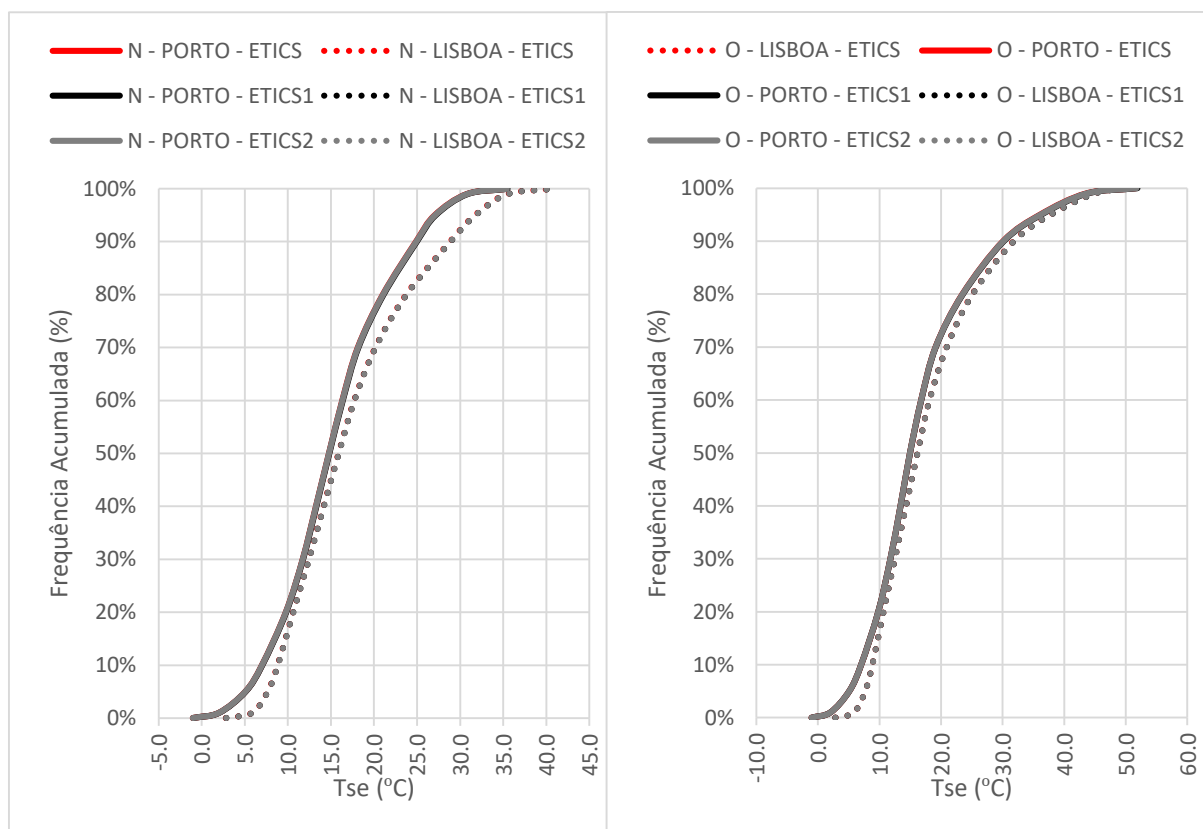


Figura 69 - Tse na amostra ETICS, ETICS1 e ETICS 2 para orientação norte (em cima à esquerda); Tse na amostra ETICS, ETICS1 e ETICS2 para orientação oeste (à direita)

Na Figura 69 é possível observar que no ETICS, a introdução das nanopartículas tem efeito residual na Tse do sistema de fachada (não é sequer possível identificar a variação da Tse graficamente). De forma a testar se o mesmo acontece no SIP, à semelhança do que foi realizado no ETICS foram também realizadas as mesmas simulações, mas aplicado ao SIP com os cenários indicados no Quadro 39.

Os resultados obtidos são os seguintes.

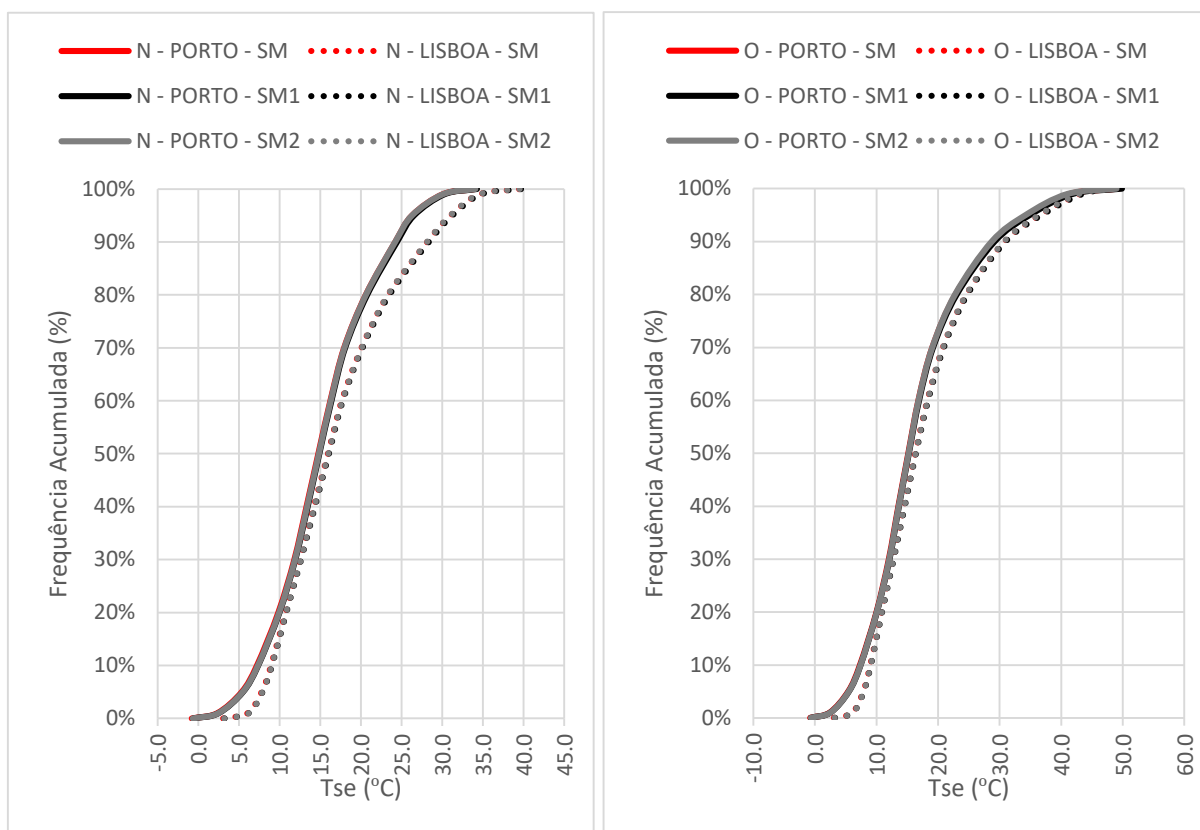


Figura 70 - Tse na amostra SIP MORTAR, SIP MORTAR1 e MORTAR 2 para a orientação norte (à esquerda); Tse na amostra SIP MORTAR, SIP MORTAR1 e MORTAR 2 para a orientação oeste (à direita)

Tal como nas amostras de ETICS, as amostras de SIP também não apresentam variação capaz de ser identificada graficamente (variação da Tse de aproximadamente 1°C), como é possível confirmar pela observação da Figura 70.

Na comparação entre os diferentes sistemas para a mesma nanopartícula observa-se, neste caso, entre SIP MORTAR 2 e o ETICS 2 para a orientação oeste a temperatura máxima atingida num ano varia cerca de 1°C. No caso de a fachada estar virada a norte, a variação da temperatura máxima anual atingida também é de aproximadamente 1°C. Neste caso, o sistema que apresenta as temperaturas máximas anuais mais baixas no espaço de um ano é o SIP. No entanto, a diferença de temperaturas superficiais observadas nestes dois sistemas não é representativa do efeito das nanopartículas, mas sim do tipo de revestimento utilizado, pois o ETICS é revestido com colorante e o SIP MORTAR é revestido com tinta acrílica. Como foi observado anteriormente nos resultados das medições da refletância nas amostras de ETICS, a incorporação de nanopartículas no colorante provocou um decremento nas mesmas, ou seja, o ETICS naturalmente irá apresentar Tse mais elevada devido à maior absorção de radiação solar comparativamente ao SIP MORTAR.

Na Figura 71 é possível analisar a variação da Tse no três ETICS produzidos e da temperatura do clima exterior (TCE), ao longo da semana com a radiação solar mais intensa, para o período analisado na cidade do Porto.

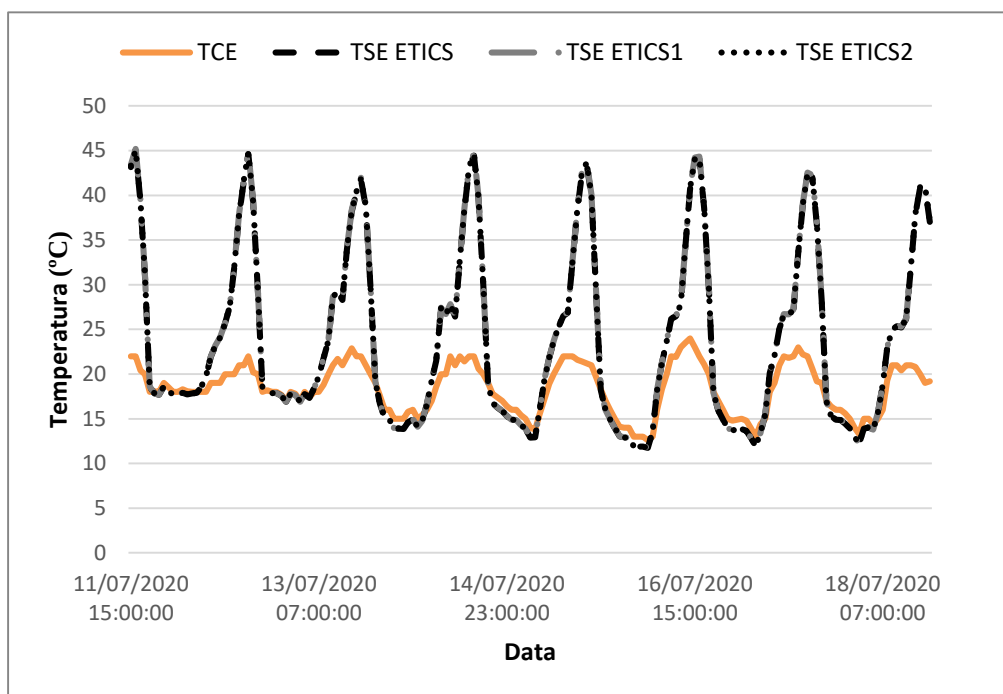


Figura 71 - Variação da Tse nos três ETICS para a semana com radiação solar mais intensa durante o ano para a orientação oeste

Na Figura 71 é possível observar que a amplitude das temperaturas é muito semelhante entre sistemas. Estes resultados estão de acordo com os dados medidos na refletância solar para as mesmas amostras os quais são resultados muito próximos e assim não promovem diferenças significativas no comportamento do sistema como um todo.

A Figura 72 representa a mesma análise da variação da Tse, para a semana mais quente do ano, desta vez, aplicada aos três SIP produzidos, também para a cidade do Porto.

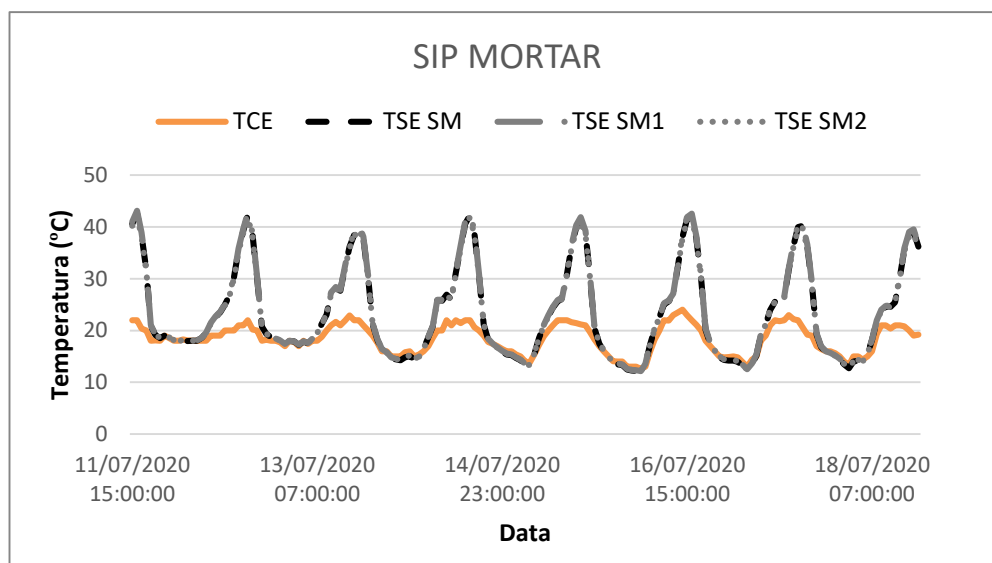


Figura 72 - Variação da Tse nas três amostras SIP para a semana com radiação solar mais intensa durante o ano para a orientação oeste

O SIP MORTAR, o SIP MORTAR1 e o SIP MORTAR2 não apresentam variação significativa entre os mesmos. Ou seja, para a mesma hora da semana analisada, as Tse verificadas nos três sistemas vão ser semelhantes.

6.4 POTENCIAL DE CONDENSAÇÃO

Outra propriedade que pode ser analisada quanto ao impacto da introdução das nanopartículas e entre sistemas com características iguais é o potencial de condensação na superfície exterior dos sistemas de fachada.

Esta propriedade é avaliada pela diferença entre a pressão do vapor de água instalada numa superfície e a pressão de saturação na mesma superfície (J. F. Maia, 2019; Zheng et al., 2004).

Para a simulação foram utilizados dados climáticos, nomeadamente, a temperatura do clima exterior e a humidade relativa exterior para as cidades do Porto e Lisboa. A relação destes dois dados com a temperatura superficial exterior permite obter o potencial de condensação da fachada em estudo.

A diferença do potencial de condensação entre um ETICS e um SIP EPS com a mesma absorção solar e emissividade é menos elevada comparada com a diferença entre um SIP EPS e um SIP MORTAR.

O resultado da simulação do potencial de condensação no cenário 1, do Quadro 38, está apresentado na Figura 73.

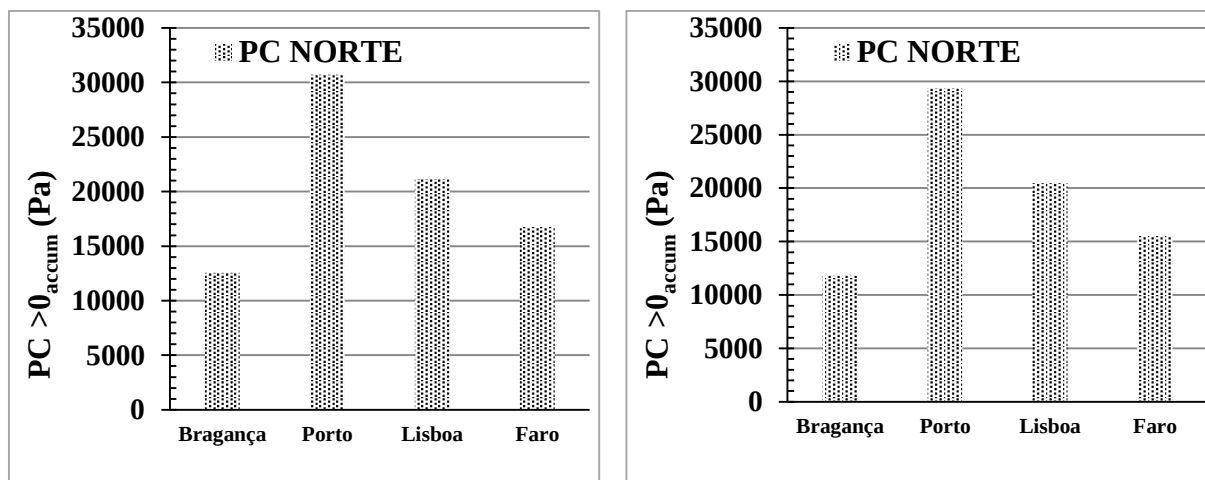


Figura 73 - Potencial de condensação para ETICS (esquerda) e SIP EPS (direita)

De acordo com a Figura 73 a redução verificada do potencial de condensação do ETICS para o SIP EPS foi aproximadamente igual a 6%.

A comparação entre um SIP EPS e um SIP MORTAR revela uma variação mais acentuada. Em média para as 4 cidades analisadas, a redução do potencial de condensação está situada nos 67%. Na Figura 74 estão apresentados os resultados da simulação do PC para os dois sistemas para Bragança, Porto, Lisboa e Faro.

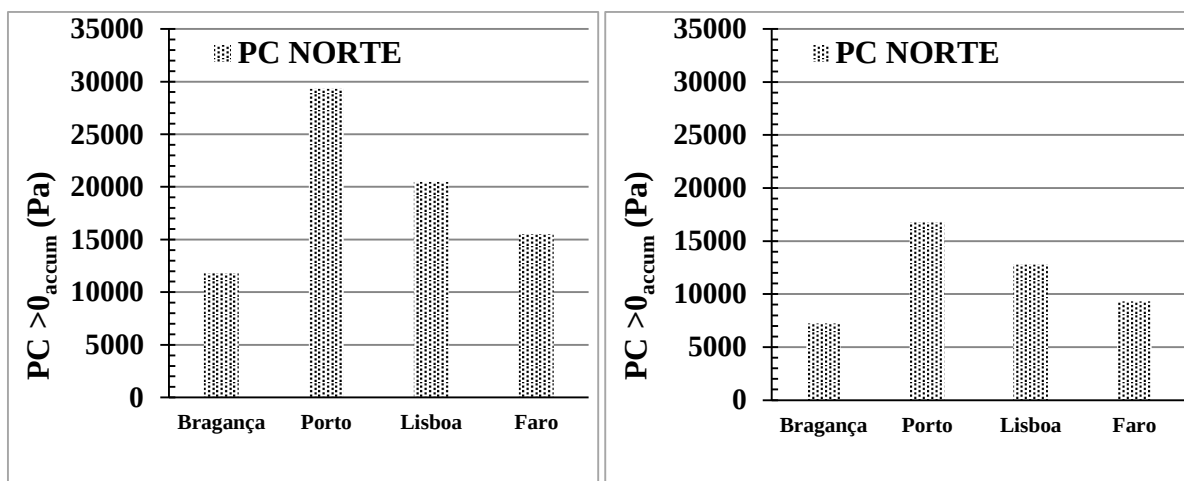
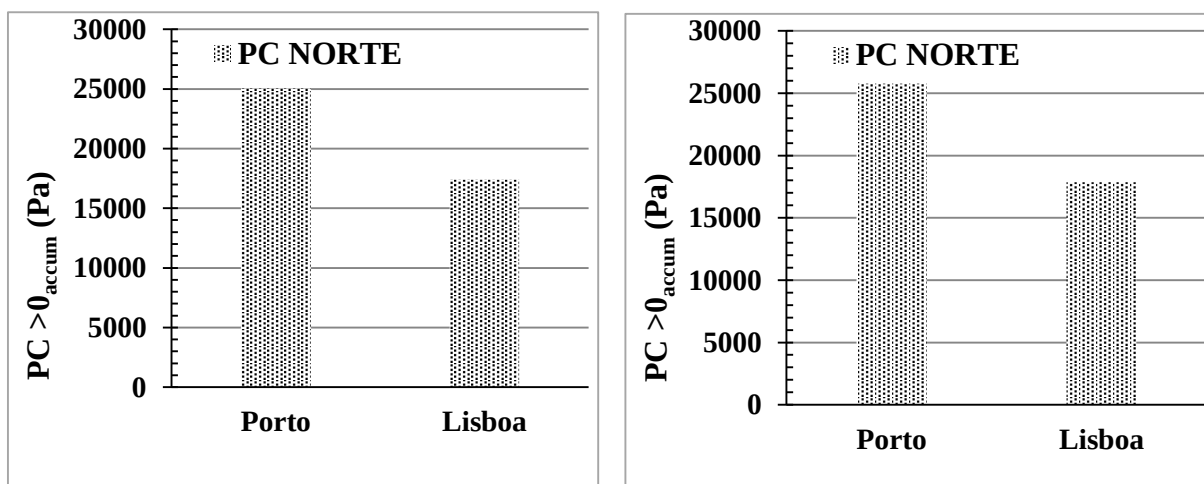


Figura 74 - Potencial de condensação para SIP EPS (esquerda) e SIP MORTAR (direita)

Com a incorporação das nanopartículas os resultados foram influenciados positivamente, isto apesar do efeito das nanopartículas com o colorante no ETICS não ser o esperado, apresentou de facto um efeito benéfico nas condensações superficiais do sistema devido à Tse ser mais elevada comparativamente à amostra sem nanopartículas. Assim com o decréscimo do potencial de condensação, o que significa que o risco de degradação da fachada devido a agentes biológicos é menor, e assim a durabilidade do sistema é otimizada.

Os resultados obtidos, por exemplo, para um sistema de ETICS sem nanopartículas com colorante, o potencial de condensação calculado é o que está representado na Figura 75, juntamente com os resultados obtidos para o ETICS 1 e ETICS 2.



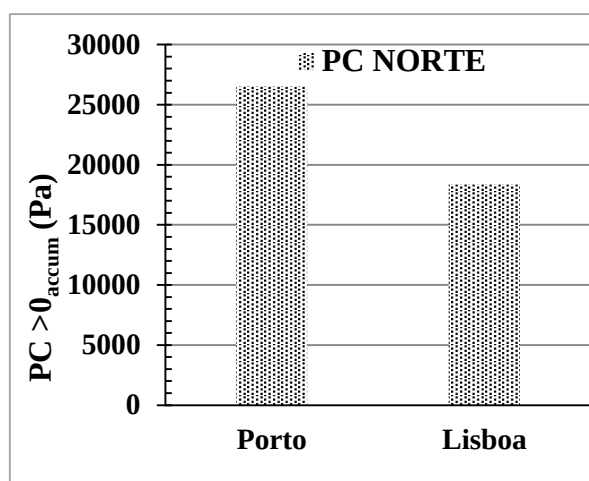


Figura 75 - Potencial de condensação para ETICS 1 (esquerda); ETICS 2 (direita); ETICS sem nanopartículas (em baixo)

A Figura 75 demonstra que a amostra ETICS 1 é a que apresenta menor potencial de condensação, apesar da diferença para o ETICS 2 ser bastante reduzida.

A redução do PC da amostra ETICS para o ETICS 1 é de aproximadamente 6% enquanto para o ETICS 2 está situada em torno de 4%.

Para as amostras SIP MORTAR (sem nanopartículas), SIP MORTAR 1 e SIP MORTAR 2 o potencial de condensação apresenta uma variação mais expressiva comparativamente às amostras de ETICS.

A Figura 76 representa a variação da Tse nas várias amostras de ETICS produzidas para a semana mais fria do ano, para a orientação norte.

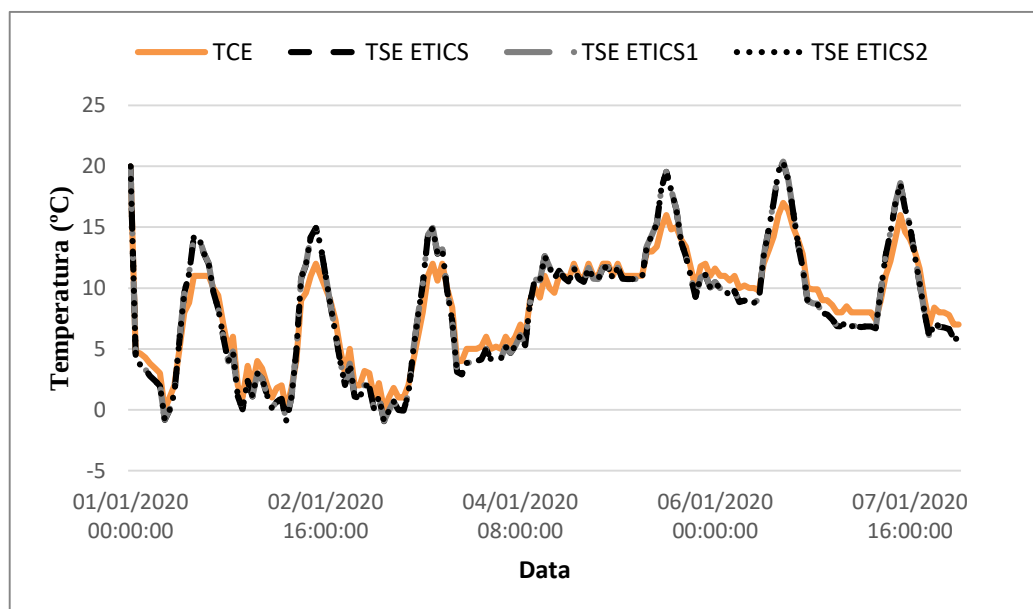


Figura 76 - Variação da Tse nos três ETICS na semana mais fria do ano para a orientação norte

De acordo com a Figura 76 é possível verificar que durante a noite, aquando do arrefecimento da temperatura do ar exterior, a Tse dos ETICS dá-se mais rápido. É também observado que para a hora de um dia desta semana em que se dá o pico das temperaturas mais baixas, o diferencial entre a temperatura do ar e a Tse das três amostras de ETICS terá influência num potencial de condensação elevado. Na Figura 76 é também possível concluir que dado que a emissividade é semelhante (ligeiramente inferior no ETICS1 e ETICS2 relativamente ao ETICS), as nanopartículas, ao aumentar a absorção solar no ETICS tem como consequência uma diminuição mínima do potencial de condensação. A Figura 77 apresenta o potencial de condensação para as três amostras SIP produzidas.

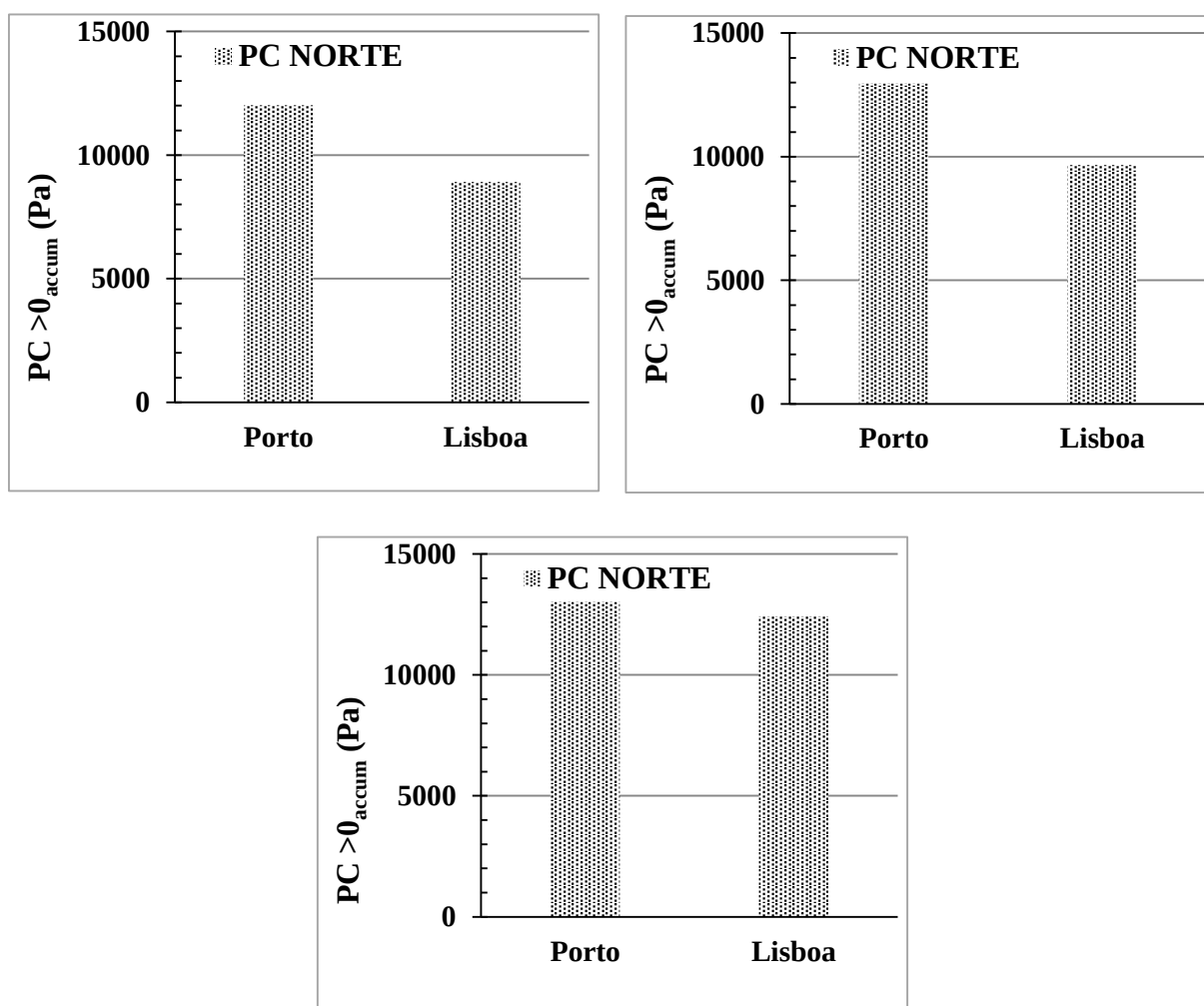


Figura 77 - Potencial de condensação para SIP MORTAR 1 (esquerda); SIP MORTAR 2 (direita); SIP MORTAR (em baixo)

Como mostra a Figura 77, a redução do potencial de condensação do SIP MORTAR para o SIP MORTAR 1 é de 8% para o Porto e 28% para Lisboa. Relativamente à diferença entre o SIP MORTAR para o SIP MORTAR 2 é verificado um decréscimo de 0,4% para o Porto e de 22% para Lisboa.

Este facto pode ser justificado devido à emissividade das amostras. A amostra SIP MORTAR apresenta uma emissividade de 0,83, enquanto a SIP MORTAR1 e a SIP MORTAR2 apresentam emissividades de 0,80 e 0,82, respetivamente. Ou seja, quanto maior a emissividade maior o potencial de condensação. Ou seja, como a amostra SIP MORTAR emite mais radiação, a superfície da mesma arrefece mais rápido durante a noite com a temperatura da superfície inferior à temperatura do ar, logo, o potencial de condensação será superior às amostras SIP MORTAR1 e SIP MORTAR2 que revelam emissividades inferiores e daí o diferencial no potencial de condensação entre os dois sistemas com nanopartículas e o sistema sem nanopartículas. Ou seja, as nanopartículas não provocam efeitos significativos na Tse das amostras, no entanto, alteram a emissividade das mesmas (apenas nos SIP), que por consequência diminui o PC, assim, acabam por contribuir para um incremento da durabilidade dos SIP através da mitigação do aparecimento de bolores, fungos e outros agentes biológicos.

A variação da Tse na superfície dos três SIP produzidos para a semana mais fria do ano, para a orientação norte, está representada na Figura 78.

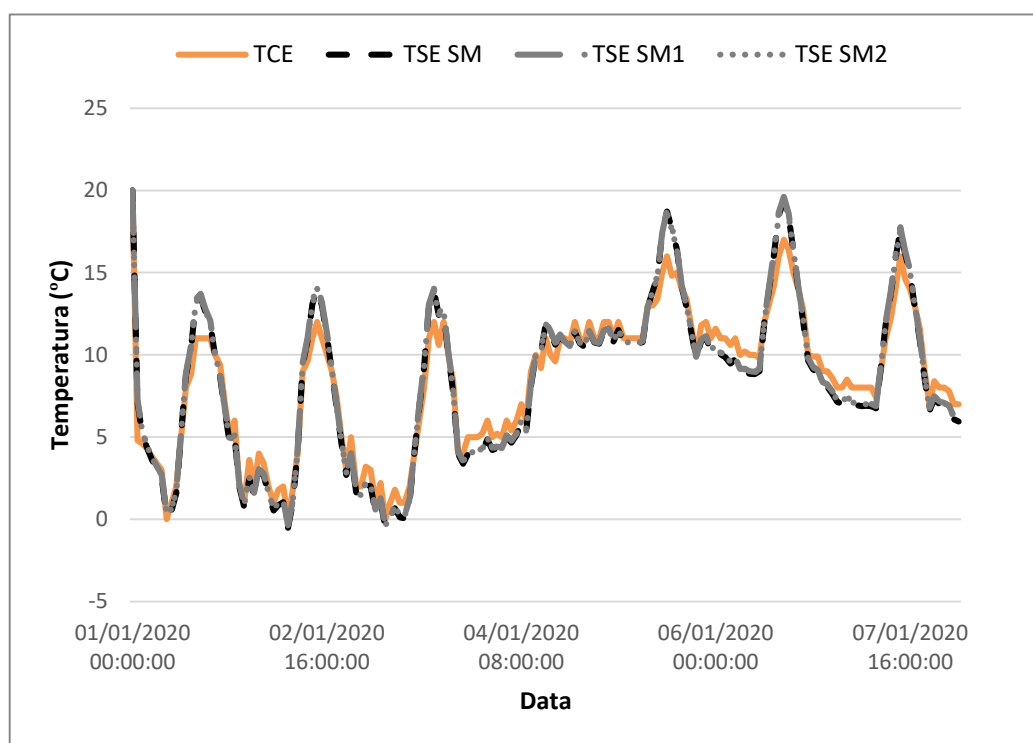


Figura 78 - Variação da Tse nos três SIP na semana mais fria do ano para a orientação norte

Assim, é possível confirmar pela Figura 78 que a Tse dos SIP, durante a noite, não arrefece tão rápido, assim o potencial de condensação será menor, pois quando Tse atinge valores inferiores à temperatura do ar o diferencial de temperaturas não é tão significativo.

7

CONCLUSÃO

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SÍNTESE CRÍTICA

A crescente preocupação com a sustentabilidade é geral em todos os setores da sociedade, como tal, na área da engenharia e construção civil não é diferente. Assim, a procura por soluções que contribuam para a reutilização de materiais de construção pode ser uma resposta válida para esta causa. No entanto, estas soluções, no caso dos sistemas de fachada, devem apresentar características de resistência mecânica, de propriedades higratérmicas e durabilidade, no mínimo semelhantes às soluções tradicionais, e se possível, os novos sistemas desenvolvidos devem mesmo apresentar um incremento nas suas propriedades higratérmicas de modo, não só a criar procura por parte dos empreiteiros para a utilização dos mesmos, mas também para de facto mitigar os custos de manutenção e reparação derivados do desgaste, algumas vezes, precoce dos sistemas de fachada tradicionais. Assim, no âmbito deste estudo, foram desenvolvidas amostras de novos revestimentos de sistemas de fachada com nanopartículas incorporadas, de forma a promover um incremento da refletância solar, tendo o cuidado para não alterar a cor original do pigmento, e também de forma a baixar a emissividade destes sistemas.

Assim as principais conclusões retiradas das várias análises efetuadas ao longo desta dissertação, estão apresentadas de seguida.

Para a refletância solar:

- Durante a produção das amostras do revestimento a aplicar nos sistemas de fachada, foram testados vários tipos de nanopartículas (SiO_2 , TiO_2 R e ZnO) com várias percentagens a incorporar na mistura (1%; 3%, 5%; 8%; 12%; 16%; 20%), para diferentes dimensões da nanopartícula, com dois revestimentos diferentes (um revestimento orgânico com colorante preto e outro apenas com uma tinta acrílica aquosa). Verificou-se que para percentagens superiores a 12% de nanopartículas incorporadas, para SiO_2 e TiO_2 R, a mistura apresentava um grau de saturação elevado que dificultava a obtenção de uma mistura homogénea, assim como, a aplicação da mesma no suporte (na placa de acrílico e na amostra de ETICS ou argamassa do pára-sol da fachada ventilada do SIP);
- O motivo para justificar a elevada saturação das misturas com SiO_2 e TiO_2 R é o facto destes dois tipos de nanopartículas apresentarem uma densidade muito baixa (principalmente a de SiO_2) comparativamente à de ZnO . Ou seja, para a mesma percentagem de nanopartículas a incorporar o volume de SiO_2 e TiO_2 R era significativamente maior relativamente ao volume de ZnO (nanopartícula mais densa das três analisadas);
- De modo a medir as propriedades superficiais das amostras, foi possível utilizar o espectrofotómetro modular, que permitiu executar medições de refletância com base na norma

da ASTM E 903-20, assim como, caracterizar os vários parâmetros da cor de acordo com o sistema CIELab;

- A percentagem de nanopartículas a incorporar nas referidas amostras dos sistemas de fachada em análise foi fixada nos 8% para todas as nanopartículas, dado ser a que apresentava melhores condições de homogeneidade da mistura. As dimensões das nanopartículas foram fixadas em 60-70 nm para a SiO_2 , 30 nm para a TiO_2 R e 500 nm para a de ZnO . Ao fixar a percentagem das nanopartículas a incorporar, foi possível comparar os efeitos das mesmas nas propriedades superficiais dos sistemas de fachada, de modo a observar qual a que apresenta resultados mais satisfatórios;
- Nas amostras de ETICS, com o colorante, a refletância foi inferior nas amostras com nanopartículas relativamente à amostra padrão, sem nanopartículas. Este efeito não era o esperado. Nas amostras das argamassas para o SIP, com a tinta acrílica, a refletância aumentou nas amostras com nanopartículas comparativamente à amostra sem nanopartículas, embora as diferenças não sejam significativas.

Relativamente à variação da cor:

- Com a placa de acrílico como suporte e tinta acrílica, as amostras de TiO_2 R apresentaram uma alteração da cor (de preto para cinzento) imediata, à medida que a mistura ia ficando mais homogênea, facilmente identificada a olho nu. Este facto foi confirmado com estas a apresentarem a refletância mais elevada (dado a cor ser mais clara), assim como, uma maior alteração da cor, de acordo com os parâmetros do sistema CIELab;
- No ETICS, a amostra com SiO_2 foi a que apresentou maior alteração da cor, ao contrário da amostra de TiO_2 R, estes resultados confirmaram as medições efetuadas nas amostras com suportes de acrílico. Na argamassa do pára-sol do SIP a amostra que apresentou maior alteração da cor foi, sem surpresas, a de TiO_2 R (aproximadamente $\Delta E=10,00$) ao contrário da amostra com SiO_2 ($\Delta E=2,16$) que foi a que apresentou menor alteração da cor. Os resultados para a argamassa do reboco exterior térmico não foram considerados válidos para uma conclusão assertiva devido à elevada fissuração que o revestimento sofreu durante o processo de secagem.

Quanto à emissividade:

- As amostras de ETICS apresentaram emissividade muito semelhante entre a amostra revestida com o colorante, sem nanopartículas, e as amostras revestidas, também com colorante embora com nanopartículas incorporadas. A variação máxima da emissividade entre amostras foi de 0,02;
- Nas amostras das argamassas do SIP foi verificada uma diminuição da emissividade em todas as amostras com nanopartículas incorporadas comparativamente à amostra revestida apenas com tinta acrílica (sem nanopartículas). Esta diferença entre amostras para a emissividade é ainda mais significativa quando comparado com a amostra da argamassa sem qualquer tipo de revestimento.

Para o ensaio de envelhecimento acelerado as conclusões foram as seguintes:

- Apenas foram submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado as amostras de ETICS. O mesmo foi realizado com base na adaptação da norma EN 1015-21. Foram realizados quatro ciclos calor-frio e de seguida foram medidas a refletância e a variação da cor. Assim sendo, os resultados obtidos mostram que nas amostras envelhecidas foi observado um incremento na refletância em cerca de 20% nas amostras com TiO_2 R e na de ZnO . No entanto, a alteração da cor na amostra com TiO_2 R foi de $\Delta E=1,00$ e na de ZnO a alteração da cor foi de $\Delta E=3,80$. Ou seja, nas três nanopartículas não existe um padrão claro, no entanto, é possível afirmar que a

nanopartícula SiO₂ foi a que mais contribuiu para a durabilidade do sistema, uma vez que apresentou um incremento significativo na refletância com a alteração da cor praticamente impercetível ($\Delta E=1,10$).

Foi também realizada a avaliação do desempenho higrotérmico através de simulação numérica com recurso ao WUFI Pro de sistemas ETICS e SIP:

- Numa simulação para sistemas de uso corrente, a diferença do potencial de condensação entre um ETICS e um SIP com EPS como isolante térmico, com as mesmas características e propriedades é pouco significativo. No entanto, quando a comparação é efetuada entre um SIP com EPS como isolante térmico e um SIP com a nova argamassa no núcleo. Neste último comparativo verifica-se que este último apresenta uma redução do potencial de condensação superior a 40%;
- A temperatura superficial dos sistemas verificou um incremento para climas mais quentes, assim, como seria de esperar, o clima tem influência na Tse dos sistemas de fachada;
- Num cenário de simulação para comparação do sistema ETICS e com o novo SIP com as propriedades superficiais medidas experimentalmente, a conclusão a que se chega é que no ETICS, dado a refletância diminui com a incorporação das nanopartículas e a emissividade entre as amostras ser muito semelhante, o potencial de condensação não apresenta variações significativas entre eles, sendo, no entanto, menor nas amostras com nanopartículas. Relativamente ao SIP com a nova argamassa do núcleo, o potencial de condensação das amostras com nanopartículas incorporadas é mais baixo comparativamente à amostra sem nanopartículas. Isto deve-se ao facto de que a refletância aumentou com as nanopartículas, mas a emissividade baixou. O que significa que durante a noite, o arrefecimento da superfície dá-se de forma menos intensa do que o arrefecimento que ocorre nas amostras sem nanopartículas e assim o risco de condensação é menor.

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De forma a contribuir para o desenvolvimento de novos revestimentos para sistemas de fachadas, devem ser realizados e abordados novas investigações dentro desta temática, de forma a reunir o máximo de dados analisados e assim chegar a uma solução otimizada. Para tal, serão referidos alguns aspetos a ter em conta em novos projetos de investigação:

- Analisar a incorporação de mais tipos de nanopartículas tendo em consideração a densidade das mesmas de forma a alcançar a menor saturação possível da mistura para a maior quantidade de nanopartículas;
- Realizar análises mais detalhadas do efeito que o tipo de pigmento misturado com as nanopartículas promove na refletância solar;
- Realizar ciclos de envelhecimento de longa duração para verificar a variação das propriedades óticas e superficiais dos sistemas em análise ao longo do tempo, principalmente a ação da radiação UV;
- Realizar análises detalhadas de forma a otimizar a aderência do revestimento com nanopartículas à argamassa do reboco exterior, de modo a mitigar a fissuração do revestimento;
- Analisar o efeito de condições climáticas mais extremas na durabilidade deste tipo de revestimentos, nomeadamente, exposição a poeiras, agentes químicos e incidência de precipitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akbari, H., Levinson, R., & Berdahl, P. (1996). *ASTM standards for measuring solar reflectance and infrared emittance of construction materials and comparing their steady-state surface temperatures*. Retrieved from
- Akbari, H., Levinson, R., & Stern, S. J. S. E. (2008). Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. 82(7), 648-655.
- Álvarez-Docio, C. M., Reinosa, J., Del Campo, A., & Fernández, J. (2017). 2D particles forming a nanostructured shell: a step forward cool NIR reflectivity for CoAl₂O₄ pigments. 137, 1-11.
- Amaro, B., Saraiva, D., de Brito, J., Flores-Colen, I. J. C., & Materials, B. (2013). Inspection and diagnosis system of ETICS on walls. 47, 1257-1267.
- Amaro, B., Saraiva, D., de Brito, J., Flores-Colen, I. J. J. o. C. E., & Management. (2014). Statistical survey of the pathology, diagnosis and rehabilitation of ETICS in walls. 20(4), 511-526.
- Amran, Y. M., El-Zeadani, M., Lee, Y. H., Lee, Y. Y., Murali, G., & Feduik, R. (2020). *Design innovation, efficiency and applications of structural insulated panels: A review*. Paper presented at the Structures.
- APFAC. (2014). *Patologias de sistemas de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS*. Retrieved from <https://www.apfac.pt/patologias/LFC-IC-282A-2014.pdf>
- APFAC. (2015). *ETICS - Manual de Aplicação*. Retrieved from <https://www.apfac.pt/uploads/documentos/APFAC-MANUAL-DE-APLICACAO-ETICS-2015-LQ.pdf>
- Ascione, F., & Pisello, A. L. J. C.-C. S. E. (2015). Eco-efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs. (1), 177-178.
- Association, S.-S. I. P. (2022). What are SIP's? Retrieved from <https://www.sips.org/what-are-sips>
- ASTM. (2020). Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. Retrieved from <https://www.astm.org/e0903-20.html>
- Balali, A., & Valipour, A. (2020). Identification and selection of building façade's smart materials according to sustainable development goals. 26, e00213.
- Baneshi, M., Maruyama, S., & Komiya, A. (2009). The effects of using some common white pigments on thermal and aesthetic performances of pigmented coatings. 4(1), 131-145.
- Barberousse, H., Ruot, B., Yéprémian, C., Boulon, G. J. B., & Environment. (2007). An assessment of façade coatings against colonisation by aerial algae and cyanobacteria. 42(7), 2555-2561.
- Barreira, E., Bauer, E., Mustelier, N., & Freitas, V. (2015). *Measurement of materials emissivity—Influence of the procedure*. Paper presented at the 13th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications, At Pisa, Italy, September.
- Barreira, E., & de Freitas, V. (2013). Experimental study of the hygrothermal behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS). 63, 31-39.
- Barreira, E., & de Freitas, V. (2014). External thermal insulation composite systems: Critical parameters for surface hygrothermal behaviour. 2014.
- Begum, P., & Fugetsu, B. J. J. o. H. M. (2012). Phytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes on red spinach (*Amaranthus tricolor* L) and the role of ascorbic acid as an antioxidant. 243, 212-222.
- Bochen, J., Gil, S., Szwabowski, J. J. C., & composites, c. (2005). Influence of ageing process on porosity changes of the external plasters. 27(7-8), 769-775.
- Bochen, J. J. C., & Materials, B. (2009). Study on the microstructure of thin-layer facade plasters of thermal insulating system during artificial weathering. 23(7), 2559-2566.
- Broekhuizen, F. A. v. B. J. C. v. (2009). *Nanotechnology in the European Construction Industry -State of the art 2009-Executive Summary*. Retrieved from <https://www.efbww.eu/stream/7ae060b2-746d-4629-948b-aaae5715f65a>
- Carneiro, B. D. G. (2016). A Influência da Cor na Temperatura Superficial de Revestimentos Térmicos.
- Casini, M. (2016). *Smart buildings: Advanced materials and nanotechnology to improve energy-efficiency and environmental performance*: Woodhead Publishing.
- Chen, J., Zhou, Z., Wu, J., Hou, S., Liu, M. J. C., & Materials, B. (2019). Field and laboratory measurement of albedo and heat transfer for pavement materials. 202, 46-57.

- Choudhury, A. K. R. (2014). *Principles of colour and appearance measurement: Object appearance, colour perception and instrumental measurement*: Elsevier.
- Chromafer. (2013). *Carbon black for cement, concrete and mortar uses*. Retrieved from
- CIN. (2021). Boletim Técnico NOVÁQUA HD 10-125. Retrieved from <https://cin.com/deco/pt/pt/10125-novagua-hd>
- Collina, A., & Lignola, G. P. (2010). *The External Thermal Insulation Composite System (ETICS): more than comfort and energy saving*. Paper presented at the Proceedings of the 3rd Portuguese Congress on Construction Mortars, Lisbon, Portugal.
- Coser, E., Moritz, V. F., Krenzinger, A., & Ferreira, C. A. J. P. (2015). Development of paints with infrared radiation reflective properties. 25, 305-310.
- Cozza, E., Allosio, M., Comite, A., Di Tanna, G., & Vicini, S. J. S. E. (2015). NIR-reflecting properties of new paints for energy-efficient buildings. 116, 108-116.
- D'Orazio, M., Cursio, G., Graziani, L., Aquilanti, L., Osimani, A., Clementi, F., . . . environment. (2014). Effects of water absorption and surface roughness on the bioreceptivity of ETICS compared to clay bricks. 77, 20-28.
- da Costa, M. R. (2017). A influência dos pigmentos refletantes na temperatura superficial dos revestimentos térmicos.
- Daniotti, B., Paolini, R., & Re Cecconi, F. (2013). Effects of ageing and moisture on thermal performance of ETICS cladding. In *Durability of Building Materials and Components* (pp. 127-171): Springer.
- De Jong, W. H., & Borm, P. J. J. I. j. o. n. (2008). Drug delivery and nanoparticles: applications and hazards. 3(2), 133.
- de Sá, J. T. T. (2018). Durabilidade de etics com elevada absorção solar.
- Desideri, U., & Asdrubali, F. (2018). *Handbook of energy efficiency in buildings: a life cycle approach*: Butterworth-Heinemann.
- Dirkx, I., & Grégoire, Y. (2012). *Evaluation of the resistance to algae growth of ETICS*. Paper presented at the 4th APFAC Congress.
- Dreamdomus. (2020). Painéis SIP: melhor para todos! Retrieved from <https://dreamdomus.com/paineis-sip-melhor-para-todos/>
- Energy, D.-G. f. (2016). Mapping and analyses of the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables). Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/mapping-and-analyses-current-and-future-2020-2030-heatingcooling-fuel-deployment-fossilrenewables-1_en
- Fang, V., Kennedy, J. V., Futter, J., & Manning, J. (2013). *A review of near infrared reflectance properties of metal oxide nanostructures*: GNS Science.
- Fernandes, C., de Brito, J., & Cruz, C. O. J. J. o. B. E. (2016). Architectural integration of ETICS in building rehabilitation. 5, 178-184.
- Fernández-García, A., Sutter, F., Martínez-Arcos, L., Sansom, C., Wolfertstetter, F., Delord, C. J. S. E. M., & Cells, S. (2017). Equipment and methods for measuring reflectance of concentrating solar reflector materials. 167, 28-52.
- Gobakis, K., Synnefa, A., Meier, H., Evans, R., Kolokotsa, D., & Santamouris, M. J. R. J. (2016). Cool Roofs in the European context. 4, 19-24.
- Gomes, M. G., Flores-Colen, I., Manga, L., Soares, A., De Brito, J. J. C., & Materials, B. (2017). The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars. 135, 279-286.
- Gonçalves, M., Simões, N., Serra, C., Almeida, J., Flores-Colen, I., de Castro, N. V., & Duarte, L. J. J. o. B. E. (2021). Onsite monitoring of ETICS comparing different exposure conditions and insulation materials. 42, 103067.
- Gonçalves, M., Simões, N., Serra, C., & Flores-Colen, I. J. A. e. (2020). A review of the challenges posed by the use of vacuum panels in external insulation finishing systems. 257, 114028.
- Grothe, J., Kaskel, S., & Leuteritz, A. (2012). Nanocomposites and hybrid materials. In *Polymer Science: A Comprehensive Reference, 10 Volume Set* (pp. 177-209).
- Hanson, A. R. (2012). What is colour? In *Colour Design* (pp. 3-23): Elsevier.
- Havens, K. J., & Sharp, E. (2015). *Thermal imaging techniques to survey and monitor animals in the wild: a methodology*: Academic Press.
- Hincapié, I., Künniger, T., Hischier, R., Cervellati, D., Nowack, B., & Som, C. J. J. o. N. R. (2015). Nanoparticles in facade coatings: a survey of industrial experts on functional and environmental benefits and challenges. 17(7), 1-12.

- Hong, D., Fan, M., Yu, L., Cao, J. J. E. E., & Exploitation. (2018). An experimental study simulating the dissolution of gypsum rock. *36*(4), 942-954.
- Hyde, D. M., & Brannon, S. M. J. C. (2006). Investigation of infrared reflective pigmentation technologies for coatings and composite applications. *1*.
- INGLAS. (2022). Principles of emissivity measurement. Retrieved from <https://inglas.org/tir100/principles-behind-the-tir100/>
- ISO, E. J. C., Brussels. (2008). 11664-4 (2008) Colorimetry—part 4: CIE 1976 L* a* b* colour space.
- Janssens, J. J. N. (2013). Facade Colours-not just a Matter of Personal Taste. A Psychological Account of Preferences for Exterior Building Colours. *14*(2).
- Jha, A. K., & Prasad, K. J. M. T. P. (2019). Nanomaterials from biological and pharmaceutical wastes—a step towards environmental protection. *18*, 1465-1471.
- Juárez-Moreno, K., Pestryakov, A., & Petranovskii, V. J. P. C. (2014). Engineering of supported nanomaterials. *10*, 25-30.
- Kiomarsipour, N., Razavi, R. S., Ghani, K., & Kioumarsipour, M. J. A. S. S. (2013). Evaluation of shape and size effects on optical properties of ZnO pigment. *270*, 33-38.
- Kiomarsipour, N., & Razavi, R. S. J. C. I. (2014). Hydrothermal synthesis of ZnO nanopigments with high UV absorption and vis/NIR reflectance. *40*(7), 11261-11268.
- Kumar, S., Bhanjana, G., Sharma, A., Dilbaghi, N., Sidhu, M., & Kim, K.-H. J. S. o. t. T. E. (2017). Development of nanoformulation approaches for the control of weeds. *586*, 1272-1278.
- Künzel, H., Künzel, H. M., & Sedlbauer, K. J. A. A. (2006). Long-term performance of external thermal insulation systems (ETICS). *5*(1), 11-24.
- Künzel, H. M. (2007). *Factors determining surface moisture on external walls - Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings X*
- Künzel, H. M., Kiessl, K. J. I. J. o. h., & transfer, m. (1996). Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. *40*(1), 159-167.
- Kvande, T., Bakken, N., Bergheim, E., & Thue, J. V. J. B. (2018). Durability of ETICS with rendering in Norway—Experimental and field investigations. *8*(7), 93.
- Levinson, R., Akbari, H., & Berdahl, P. J. S. E. (2010). Measuring solar reflectance—Part II: Review of practical methods. *84*(9), 1745-1759.
- Levinson, R., Berdahl, P., Akbari, H. J. S. E. M., & Cells, S. (2005). Solar spectral optical properties of pigments—Part II: survey of common colorants. *89*(4), 351-389.
- Liang, S.-t., Zhang, H.-l., Luo, M.-t., Liu, H.-x., Bai, Y.-l., Xu, H.-b., & Zhang, Y. J. T. o. N. M. S. o. C. (2015). Preparation of Cr₂O₃-based pigments with high NIR reflectance via thermal decomposition of CrOOH. *25*(8), 2646-2647.
- Liisma, E., Sepri, R., Raado, L.-M., Lill, I., David, E., Will, Q., . . . Pöldaru, M. J. P. o. t. C. E. t. S. B., Prague, Czech Republic. (2016). Defect analysis of renovated facade walls with ETICS solutions in cold climate conditions. *22-24*.
- Liu, J. L., & Bashir, S. (2015). Advanced nanomaterials and their applications in renewable energy.
- Luján, S. V., Arrebola, C. V., Sánchez, A. R., Benito, P. A., Cortina, M. G. J. S. C., & Society. (2019). Experimental comparative study of the thermal performance of the façade of a building refurbished using ETICS, and quantification of improvements. *51*, 101713.
- Lv, M., Liu, Y., Geng, J., Kou, X., Xin, Z., Yang, D. J. B., & Bioelectronics. (2018). Engineering nanomaterials-based biosensors for food safety detection. *106*, 122-128.
- Maia, J., Pedroso, M., Ramos, N., Pereira, P., Flores-Colen, I., Gomes, M. G., . . . Buildings. (2021). Hygrothermal performance of a new thermal aerogel-based render under distinct climatic conditions. *243*, 111001.
- Maia, J., Ramos, N. M., & Veiga. (2018). Evaluation of the hygrothermal properties of thermal rendering systems. *144*, 437-449.
- Maia, J., Ramos, N. M., & Veiga. (2019). Assessment of test methods for the durability of thermal mortars exposure to freezing. *52*(6), 1-14.
- Maia, J. F. (2019). Durability of thermal rendering and plastering systems.
- Malanho, S., & do Rosário Veiga, M. J. J. o. B. E. (2020). Bond strength between layers of ETICS—Influence of the characteristics of mortars and insulation materials. *28*, 101021.
- Marčiukaitis, G. J. S. (1998). The influence of sudden increase in temperature and humidity on stress-strain states in exterior finishing layers of multileaf walls with flexible ties. *4*(3), 219-226.
- Meola, C., Boccardi, S., & Carlomagno, G. M. (2016). *Infrared thermography in the evaluation of aerospace composite materials: infrared thermography to composites*: Woodhead Publishing.

- Miskinis, K., Dikavicius, V., Buska, A., & Banionis, K. J. A. A. (2018). Influence of EPS, mineral wool and plaster layers on sound and thermal insulation of a wall: a case study. *137*, 62-68.
- Miskinis, K., Dikavicius, V., & Buska, A. J. i. I., Athens, Greece. (2016). ACUSTICAL AND THERMAL PROPERTIES OF BUILDING ENVELOPE WITH ETICS.
- Moezzi, A., McDonagh, A. M., & Cortie, M. B. J. C. e. j. (2012). Zinc oxide particles: Synthesis, properties and applications. *185*, 1-22.
- Mohan, A. C., & Renjanadevi, B. J. P. T. (2016). Preparation of zinc oxide nanoparticles and its characterization using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). *24*, 761-766.
- Musikant, S. (2003). *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (R. A. Meyers Ed. Third Edition ed.): Academic Press.
- Naia, R. J. T. (2019). *Durabilidade de revestimentos com características termo-refletantes*. (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,
- Nielsen, R. H., & Wilfing, G. (2005). Zirconium and Zirconium Compounds. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.
- Norvaišienė, R., Buhagiar, V., Burlingis, A., & Miškinis, K. J. J. o. B. E. (2020). Investigation of mechanical resistance of external thermal insulation composite systems (ETICS). *32*, 101682.
- Oberhaus, H., & Drell, R. J. B. (1995). Stresses and deformations of an external thermal insulation composite system (ETICS); measurements at a test wall and calculations; Spannungen und Verformungen eines Waermedaemmverbundsystems (WDVS); Messungen an einer Probewand und begleitende rechnerische Untersuchungen. *17*.
- Ochs, H., Vogelsang, J., & Meyer, G. J. P. i. o. c. (2003). Enhanced surface roughness of organic coatings due to UV-degradation: an unknown source of EIS-artifacts. *46*(3), 182-190.
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. *25*(2), 582-590.
- Panjehpour, M., Abang Ali, A. A., Voo, Y. L. J. J. o. E., Project, & Management, P. (2013). Structural Insulated Panels: Past, Present, and Future. *3*(1).
- Paolini, R., Zani, A., Poli, T., Antretter, F., Zinzi, M. J. E., & Buildings. (2017). Natural aging of cool walls: Impact on solar reflectance, sensitivity to thermal shocks and building energy needs. *153*, 287-296.
- Papadaki, D., Kiriakidis, G., & Tsoutsos, T. (2018). Applications of nanotechnology in construction industry. In *Fundamentals of nanoparticles* (pp. 343-370): Elsevier.
- Parracha, J., Borsoi, G., Flores-Colen, I., Veiga, R., Nunes, L., Dionísio, A., . . . Faria, P. (2021). Performance parameters of ETICS: Correlating water resistance, bio-susceptibility and surface properties. *272*, 121956.
- Parracha, J. L., Borsoi, G., Flores-Colen, I., Veiga, R., Nunes, L. J. C., & Materials, B. (2022). Impact of natural and artificial ageing on the properties of multilayer external wall thermal insulation systems. *317*, 125834.
- Parracha, J. L., Borsoi, G., Veiga, R., Flores-Colen, I., Nunes, L., Garcia, A. R., . . . Environment. (2021). Effects of hygrothermal, UV and SO₂ accelerated ageing on the durability of ETICS in urban environments. *204*, 108151.
- Pathare, P. B., Opara, U. L., Al-Said, F. A.-J. J. F., & technology, b. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *6*(1), 36-60.
- Pereira, A. C. M. (2015). Emissividade dos materiais de construção-influência da medição em diferentes variantes.
- Pereira, C., de Brito, J., & Silvestre, J. D. J. E. F. A. (2018). Contribution of humidity to the degradation of façade claddings in current buildings. *90*, 103-115.
- Ramos, N. M., Maia, J., Souza, A. R., Almeida, R. M., & Silva, L. J. I. (2021). Impact of incorporating NIR reflective pigments in finishing coatings of ETICS. *6*(6), 79.
- Ramos, N. M., Souza, A. R., Maia, J., & Almeida, R. M. (2020a). *Colour degradation of façade coatings—the effect of nanopigments incorporation*. Paper presented at the E3S Web of Conferences.
- Ramos, N. M., Souza, A. R., Maia, J., & Almeida, R. M. (2020b). *Solar reflectance of ETICS finishing coatings—a comparison of experimental techniques*. Paper presented at the 12TH NORDIC SYMPOSIUM ON BUILDING PHYSICS (NSB 2020).
- Revel, G. M., Martarelli, M., Emiliani, M., Gozalbo, A., Orts, M. J., Bengochea, M. Á., . . . Taxiarchou, M. J. S. E. (2014). Cool products for building envelope—Part I: Development and lab scale testing. *105*, 770-779.

- Rico, C. M., Hong, J., Morales, M. I., Zhao, L., Barrios, A. C., Zhang, J.-Y., . . . technology. (2013). Effect of cerium oxide nanoparticles on rice: a study involving the antioxidant defense system and in vivo fluorescence imaging. *47*(11), 5635-5642.
- Saint-Gobain, W. (2021). weberplast decor M/F. Retrieved from <https://construir.saint-gobain.pt/Produtos/weber/weberplast-decor-mf#technical-information>
- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. J. S. e. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *85*(12), 3085-3102.
- Sattar, S. J. J. o. C. E. (2019). Characterizing Color with Reflectance. *96*(6), 1124-1128.
- Shen, H., Tan, H., Tzempelikos, A. J. E., & Buildings. (2011). The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption—An experimental study. *43*(2-3), 573-580.
- SIPA. (2012). *Durability of SIP's Exposed to Moisture*. Retrieved from https://www.sips.org/documents/SIPA_TB_09_Durability-of-SIPs-Exposed-to-Moisture.pdf
- Ślusarek, J., Orlik-Koźdoń, B., Bochen, J., & Muzyczuk, T. J. J. o. B. E. (2020). Impact of the imperfection of thermal insulation on structural changes of thin-layer facade claddings in ETICS. *32*, 101487.
- Smith, R. E. (2010). *Prefab architecture: A guide to modular design and construction*: John Wiley & Sons.
- Song, Z., Zhang, W., Shi, Y., Song, J., Qu, J., Qin, J., . . . Buildings. (2013). Optical properties across the solar spectrum and indoor thermal performance of cool white coatings for building energy efficiency. *63*, 49-58.
- Stewart, I. D., & Mills, G. (2021). *The Urban Heat Island*: Elsevier.
- Sulakatko, V., Liisma, E., & Soekov, E. J. P. e. s. (2017). Increasing construction quality of external thermal insulation composite system (ETICS) by revealing on-site degradation factors. *38*, 765-772.
- Systems, E. A. f. E. T. I. C. (2021). About ETICS. *ETICS*. Retrieved from <https://www.ea-etics.com/etics/about-etics/>
- Takebayashi, H. J. S. (2016). High-reflectance technology on building façades: Installation guidelines for pedestrian comfort. *8*(8), 785.
- Tavares, J., Silva, A., & de Brito, J. J. J. o. B. E. (2020). Computational models applied to the service life prediction of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS). *27*, 100944.
- Testing, A. S. f., Weathering, M. C. G. o., & Durability. (2003). *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*: ASTM International.
- Title24consultants (Producer). (2012, May 18, 2022). Installing SIP's Structural Insulated Panels. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=0iAMTyh2RTg>
- Tomar, R., Abdala, A. A., Chaudhary, R., & Singh, N. J. M. T. P. (2020). Photocatalytic degradation of dyes by nanomaterials. *29*, 967-973.
- Union, E. U. J. O. J. E. (2018). Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. *156*, 75-91.
- Vargas, W. E., Amador, A., & Niklasson, G. A. J. O. c. (2006). Diffuse reflectance of TiO₂ pigmented paints: Spectral dependence of the average pathlength parameter and the forward scattering ratio. *261*(1), 71-78.
- Veloso, Dias, C., Praça, R., Maia, J., Ramos, J. M. M., & Ventura, J. (2022). *Study of near-infrared reflective performance of metal oxide nanomaterials for building's external walls coatings*.
- Veloso, R. C., Souza, A., Maia, J., Ramos, N. M. M., & Ventura, J. J. J. o. M. S. (2021). Nanomaterials with high solar reflectance as an emerging path towards energy-efficient envelope systems: a review. *56*(36), 19791-19839.
- Wake, L. V. (1989). *Principles and Formulations of Solar Reflecting and Low Infrared Emitting Coatings for Defence Use*. Retrieved from
- Wegner, F. J. Z. f. P. B. C. M. (1981). Bounds on the density of states in disordered systems. *44*(1), 9-15.
- Xiong, H., Xu, J., & Yuan, K. J. J. o. B. E. (2018). Experimental study on the temperature field of ETICS cladding system with finishing colorful steel plate. *18*, 438-447.

- Xiong, H., Yuan, K., Wen, M., Yu, A., Xu, J. J. C., & Materials, B. (2019). Influence of pore structure on the moisture transport property of external thermal insulation composite system as studied by NMR. *228*, 116815.
- Yuan, K., Xiong, H., Wen, M., & Xu, J. J. A. T. E. (2022). Visualization of localized deformation of external thermal insulation composite systems during aging. *118108*.
- Yuan, L., Han, A., Ye, M., Chen, X., Yao, L., Ding, C. J. D., & Pigments. (2018). Synthesis and characterization of environmentally benign inorganic pigments with high NIR reflectance: lanthanum-doped BiFeO₃. *148*, 137-146.
- Zeng, Y., Zhu, Z., Du, D., & Lin, Y. J. J. o. E. C. (2016). Nanomaterial-based electrochemical biosensors for food safety. *781*, 147-154.
- Zheng, R., Janssens, A., Carmeliet, J., Bogaerts, W., Hens, H. J. C., & Materials, B. (2004). An evaluation of highly insulated cold zinc roofs in a moderate humid region—part I: hygrothermal performance. *18*(1), 49-59.