

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Tintas Termicamente Isolantes para Interior e Exterior

Dissertação de Mestrado

de

Ana Isabel Proença Varanda Marques

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

Corporação Industrial do Norte - CIN, S.A.



CIN - CORPORAÇÃO INDUSTRIAL DO NORTE, S.A.

Orientador na FEUP: Prof. Adélio Mendes

Coordenador na CIN: Doutora Iracema Belinha



Departamento de Engenharia Química

julho de 2019

*“Do chão sabemos que se levantam as searas e as árvores,
Levantam-se os animais que correm os campos ou voam por cima deles,
Levantam-se os homens e as suas esperanças.
Também do chão pode levantar-se um livro,
Como espiga de trigo ou uma flor brava.
Ou uma ave.
Ou uma bandeira.
Enfim, cá estou eu outra vez a sonhar.
Como os homens a quem me dirijo.”*

José Saramago

Levantado do Chão

Agradecimentos

Ao fazer uma reflexão sobre este percurso, julgo que será meu dever agradecer aos que, com conhecimento, diretrizes e simpatia, contribuíram para que esta experiência enriquecedora.

À Doutora Iracema Belinha, essencial em todas as fases do projeto, que impulsionou a minha capacidade de superação.

Ao Professor Adélio Mendes¹, pelas longas conversas que me proporcionaram uma aprendizagem profunda. Agradeço o método que me transmitiu e que contribui para uma visão mais detalhada dos fenómenos.

À CIN, com especial enfoque no Eng.º João Machado, Eng.ª Filomena Braga, Eng.ª Fernanda Oliveira, que tornaram a execução deste projeto possível. A todos os colaboradores da CIN, que me proporcionaram enriquecedor estágio, através da interpelação de algumas questões que complementaram o meu estudo.

Aos meus colegas de faculdade Teresa, Marta e Luís, com os quais reforcei a relação durante o estágio e que, ao estarem inteirados do meu trabalho, contribuíram para uma análise crítica e fundamentada do meu trabalho.

À Catarina que, com a sua visão imparcial e poder de persuasão incomparável, conseguiu ter a astúcia de me incentivar. Às minhas amigas Sofia, Carina, Beatriz, Maria João e Cristiana, que se tornaram grandes de faculdade e, mais uma vez, demonstraram ser um suporte fenomenal em qualquer circunstância.

Aos meus pais, que me apoiaram incondicionalmente e que me serenaram com palavras de incentivo. Ao meu irmão José que, foi o meu maior confidente e com o qual pude sempre partilhar dificuldades e conquistas. Agradeço a compreensão e a confiança que depositou em mim.

¹ O Prof. Adélio Mendes, orientador académico desta dissertação, é membro integrado do LEPABE - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado por: Unidade de Investigação UID/EQU/00511/2019 - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia - LEPABE - financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Resumo

Atualmente existe uma grande preocupação em assegurar a redução dos consumos energéticos associados à climatização das habitações, sem que o conforto térmico seja descurado. Uma das formas de alcançar este objetivo é através do desenvolvimento de revestimentos com maior isolamento térmico. As tintas, que geralmente são aplicadas no interior e exterior dos edifícios, podem ser estudadas com vista a responder a esta necessidade. Embora sejam geralmente aplicadas com uma menor espessura do que os isolantes térmicos convencionais, como é o caso do poliestireno expandido, as propriedades termicamente isolantes das tintas podem ser exploradas através da introdução de cargas funcionais, como microesferas ocas e sílica sintética amorfa. Quando estas cargas são incorporadas num revestimento por pintura, conferem-lhe propriedades de isolamento térmico.

O Grupo CIN, assume uma constante postura de compromisso para com o ambiente e a sociedade. A presente dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de tintas de interior e exterior e massas de regularização termicamente isolantes.

Um dos pontos fulcrais deste projeto passaria pela determinação da condutividade térmica. O método inicialmente utilizado não permitiu obter valores que estivessem de acordo com o que está descrito na literatura. Avaliou-se ainda a possibilidade de realizar um ensaio normalizado num laboratório externo que mais tarde foi abandonada por não se apresentar exequível em tempo útil.

Foram realizados ensaios que permitiram fazer uma caracterização dos produtos desenvolvidos, bem como de tintas já existentes no mercado e que são apresentados aos consumidores como tendo propriedades termicamente isolantes. Verificou-se que a introdução deste tipo de cargas funcionais pode alterar algumas características, tais como a brancura, suavidade ao toque, rugosidade da película e a refletância solar total.

Como complemento a este estudo, realizou-se análise do desempenho térmico através da aplicação informática *SolidWorks*, que evidenciou que o Sistema Compósito de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS) garante um isolamento térmico mais eficaz.

Palavras Chave: Revestimentos termicamente isolantes, condutividade térmica, cargas funcionais.

Abstract

Nowadays there is a great concern to lower the energy consumptions related to thermal comfort of buildings. This goal could be achieved through the development of thermal insulation coatings. Paints, which are generally applied in the external and internal layer of the building walls, can be studied in order to meet these requirements. Thermal insulation properties of the paints may be exploited by the introduction of functional fillers such as hollow microspheres and synthetic amorphous silica, which lower the thermal conductivity of the coating.

Grupo CIN assumed a commitment with environmental and social issues. The main goal of this dissertation is the development of interior and exterior thermal insulation paints and finish plasters.

One of the main goals of this project would be the measurement of the thermal conductivity of the coatings. The method initially used was not suitable to estimate values in accordance to the literature. The possibility of carrying out a standardized test in an external laboratory was also considered, but it was not feasible in time.

The characterization of the products was carried out and these results were compared with the properties of similar products already on the market. It was verified that the incorporation of this type of functional fillers modify some characteristics as whiteness, softness, film roughness and total solar reflectance.

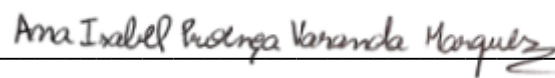
This study was also complemented with a thermal performance simulation through *SolidWorks* software, which showed that the *External Thermal Insulation Composite System* (ETICS) is the best of the studied options to enhance thermal comfort.

Keywords: Thermal insulation coatings, thermal conductivity, functional fillers.

Declaração

Declaro, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

Porto, 1 de julho de 2019



(Ana Isabel Proença Varanda Marques)

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto	1
1.2	Apresentação da Empresa	2
1.3	Contributos do Trabalho	3
1.4	Organização da Tese	3
2	Contexto e Estado da Arte	4
2.1	Mecanismos de transferência de calor	4
2.1.1	Mecanismos de transferência de calor em materiais termicamente isolantes	6
2.2	Materiais termicamente isolantes convencionais	6
2.3	Sistema ETICS	7
2.4	Tintas refletoras da radiação solar	8
2.5	Tintas termicamente isolantes	9
2.5.1	Cargas funcionais para tintas termicamente isolantes	9
2.5.2	Incorporação de cargas funcionais para tintas termicamente isolantes	13
2.5.3	Formulação de tintas termicamente isolantes.....	14
3	Materiais e Métodos	16
3.1	Produtos desenvolvidos.....	16
3.2	Ensaio de caracterização das tintas e massas de regularização	17
3.2.1	Caracterização base de tintas	18
3.2.2	Caracterização exaustiva transversal a tintas de interior e exterior	19
3.2.3	Caracterização exaustiva para tintas de exterior	20
3.2.4	Caracterização exaustiva para tintas de interior.....	21
3.2.5	Caracterização base de massas de regularização	22
3.2.6	Caracterização exaustiva de massas de regularização	22
3.2.7	Caracterização específica	23
4	Resultados e Discussão.....	27
4.1	Resultados da caracterização base das tintas	27

4.1.1	Tintas de exterior	27
4.1.2	Tintas de interior	28
4.2	Resultados da caracterização exaustiva das tintas de interior e exterior	30
4.2.1	Caracterização transversal a tintas de exterior e interior.....	30
4.2.2	Caracterização de tintas de exterior	32
4.2.3	Caracterização de tintas de interior.....	33
4.3	Resultados da regularização de massas de regularização	35
4.3.1	Caracterização base de massas de regularização	35
4.3.2	Caracterização exaustiva de massas de regularização	36
4.4	Resultados da caracterização específica	38
4.4.1	Refletância solar total	38
4.4.2	Calor específico a pressão constante.....	40
4.4.3	Microscopia eletrónica de varrimento.....	41
4.4.4	Condutividade térmica.....	42
4.4.5	Simulação em <i>SolidWorks</i>	42
5	Conclusões	44
6	Avaliação do trabalho realizado.....	46
6.1	Objetivos Realizados	46
6.2	Outros Trabalhos Realizados.....	46
6.3	Apreciação Final	46
7	Referências	47
Apêndice A - Resultados da aplicação prática.....		50
Apêndice B - Resultados do ensaio da esfrega húmida (tintas de interior).....		52
Apêndice C - Resultados do ensaio de aderência (massas de regularização).....		53
Apêndice D - Resultados do ensaio de microscopia eletrónica de varrimento.....		54
Apêndice E - Simulação em <i>Solidworks</i>		58

Notação e Glossário

A	Área de transferência de calor	m^2
Bi	Número de Biot	
C_p	Calor específico a pressão constante	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$C_{p_{amostra}}$	Calor específico a pressão constante da amostra	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$C_{p_{calibração}}$	Calor específico a pressão constante do padrão de calibração	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$C_{p_{termopar}}$	Calor específico a pressão constante do termopar	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
ΔE	Diferença de cor	
E	Potência emitida por um corpo real	$W \cdot m^{-2}$
E_{negro}	Potência emitida por um corpo negro	$W \cdot m^{-2}$
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
I	Irradiância	$W \cdot m^{-2}$
I_{abs}	Fluxo de calor absorvido	$W \cdot m^{-2}$
I_{ref}	Fluxo de calor refletido	$W \cdot m^{-2}$
k	Condutividade térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
k_{tinta}	Condutividade térmica da tinta	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$m_{amostra}$	Massa da amostra	g
$m_{calibração}$	Massa do padrão de calibração	g
$m_{termopar}$	Massa do termopar	g
$p_{amostra}$	Taxa de transferência de calor medido pelo equipamento de DSC no ensaio com a cadinho que contém a amostra	mW
p_{branco}	Taxa de transferência de calor medida pelo equipamento de DSC no ensaio com o cadinho vazio	mW
$p_{calibração}$	Taxa de transferência de calor medida pelo equipamento de DSC no ensaio com o cadinho que contém o padrão de calibração	mW
Q	Taxa de transferência de calor	W
$R_{térmica}$	Resistência térmica	$m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot W$
t	Tempo	s
T	Temperatura	K
T_{∞}	Temperatura do fluido	K
$T_{superfície}$	Temperatura da superfície	K
U	Coeficiente global de transferência de calor	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$U_{externo}$	Coeficiente global de transferência de calor externo ao corpo	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
V	Volume do corpo	
V_c	Volume das cargas	m^3
V_p	Volume da parede	m^3
V_r	Volume de resina	m^3
$\Delta x_{isolante}$	Espessura do isolante	m
Δx_{parede}	Espessura da parede	m
Δx_{tinta}	Espessura da tinta	μm

Índices

A, B, C Camadas de uma parede

Letras gregas

α	Coeficiente de absorção da luz	
ε	Emissividade	
ρ	Coeficiente de reflexão luz	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$
τ	Constante de tempo	s

Lista de Siglas

ARCP	Associação Rede de Competências em Polímeros
ASTM	Sociedade Americana de Ensaios e Materiais (American Society for Testing and Materials)
CIN	Corporação Industrial do Norte
CPVC	Concentração crítica de pigmento por volume (Critical Pigment Volume Concentration)
DSC	Calorimetria diferencial de varrimento (Differential scanning calorimetry)
EN	Norma europeia (European norm)
EPS	Poliestireno Expandido (Expanded polystyrene)
ETICS	Sistema compósito de isolamento pelo exterior (External thermal insulation composite system)
ISO	Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization)
LEPABE	Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia
NIR	Infravermelho próximo (Near-infrared light)
NP	Norma Portuguesa
NZEBs	Edifícios com necessidades quase nulas de energia (Nearly zero-energy buildings)
PCM	Materiais de mudança de fase (Phase change materials)
PVC	Concentração de pigmento por volume (Pigment volume concentration)
SEM	Microscopia eletrónica de varrimento (Scanning electron microscopy)
TMFP	Temperatura mínima de formação de película
TSR	Refletância solar total (Total Solar Reflectance)
UE	União Europeia
UV	Luz Ultravioleta
VIS	Luz Visível

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

Devido aos cada vez mais frequentes episódios associados às alterações climáticas, o conforto térmico dos edifícios é algo que deve ser considerado na construção e renovação de edifícios [1]. Além do mais, o desenvolvimento de um sistema energético sustentável que permita a descarbonização do parque imobiliário é uma das apostas fortes da União Europeia em matéria de eficiência energética dos edifícios [1, 2]. De acordo a Diretiva 2010/31/UE, com atualização para a Diretiva (UE) 2018/844 e que foi traduzida para a lei portuguesa através da Portaria nº 98/2019, referente ao desempenho energético dos edifícios, todas as novas construções a partir de 2021 deverão ter necessidades quase nulas de energia (em inglês: *Nearly zero-energy buildings* - NZEBs) [2]. As reduzidas quantidades de energia deverão ser maioritariamente produzidas *in situ* ou na proximidade do edifício e é dada primazia a energia proveniente de fontes renováveis [3]. No entanto, muitos dos edifícios existentes não foram projetados tendo a perspetiva de alcançar uma adequada eficiência energética. Um estudo publicado em 2017 refere que 20% da população portuguesa não consegue manter uma adequada temperatura na sua habitação [4]. Ao nível da União Europeia, 75% dos edifícios são classificados como energeticamente ineficientes e a climatização dos mesmos contabiliza cerca de 40% do consumo energético total [2, 5].

Os meios passivos de climatização, tais como os materiais termicamente isolantes, são uma das abordagens que permite eficazmente reduzir o consumo energético associado ao aquecimento e arrefecimento dos edifícios [6]. De acordo com as diretrizes da Organização Mundial de Saúde, o conforto dos ocupantes deve também ser potenciado através da minimização de fenómenos de pontes térmicas [2]. Uma junção ineficiente de diversos materiais ou a utilização de materiais bons condutores de calor pode originar zonas em que o calor é transferido a uma maior taxa, o que origina pontes térmicas [7]. Para além de afetar a eficiência energética dos edifícios, este fenómeno pode desencadear condensações nas paredes interiores, o que culmina na deterioração dos revestimentos, através da proliferação de microrganismos [7].

Com vista a aumentar a resistência térmica, $R_{\text{térmica}}$, a melhor estratégia passa pela aplicação de espessas camadas de materiais termicamente isolantes, que são geralmente caracterizados por uma baixa condutividade térmica. Para uma parede com várias camadas, como é o caso da que se apresenta na Figura 1.1, o valor de $R_{\text{térmica}}$ pode ser calculado através da equação (1.1) [8].

$$R_{\text{térmica}} = \frac{1}{UA} = \frac{\Delta x_A}{k_A A} + \frac{\Delta x_B}{k_B A} + \frac{\Delta x_C}{A k_C} \quad (1.1)$$

onde A é a área de transferência de calor, U é o coeficiente global de transferência de calor, Δx_A , Δx_B e Δx_C são as espessuras dos materiais, k_A , k_B e k_C são as condutividades térmicas dos materiais.

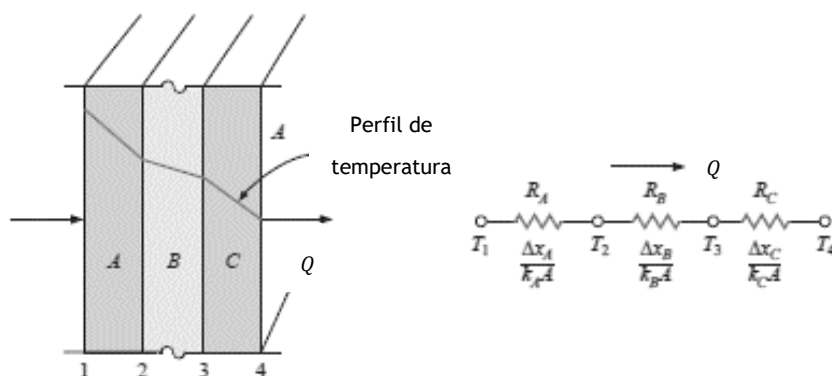


Figura 1.1 - Representação da transferência de calor em estado estacionário ao longo de uma parede com associação de diferentes materiais em série (Adaptado de [8]).

O projeto que se apresenta compreende o desenvolvimento e estudo de formulações de tintas para interior e exterior e massas de regularização termicamente isolantes. As tintas são dispersões coloidais que podem ser usadas para decorar o substrato em que são aplicadas ou potenciar diversas características, tais como a resistência química ou mecânica [9]. As características destes produtos químicos, que são constituídos por cargas, resinas, pigmentos, aditivos e veículo volátil, dependem não só das quantidades de cada um destes componentes, mas também do modo operativo [9, 10]. Nas formulações desenvolvidas ao longo deste projeto, estudou-se a introdução de cargas funcionais, nomeadamente microesferas ocas e partículas de sílica sintética amorfa, com vista a aumentar o isolamento térmico dos revestimentos.

1.2 Apresentação da Empresa

O Grupo CIN, Corporação Industrial do Norte, S.A., dedica-se à produção e comercialização de tintas, vernizes e produtos afins. Para além dos mais de 100 anos de experiência, é líder nacional no setor desde 1992 e domina o mercado ibérico desde 1995. A presença em quatro continentes é uma prova da constante afirmação de uma entidade global da marca [11].

Uma grande parte deste sucesso deve-se à continuada aposta em Investigação e Desenvolvimento (I&D). Atualmente são desenvolvidos cerca de 100 projetos por ano, que se traduzem num contributo de cerca de 13 % para os resultados totais [11].

Dadas as vastas preocupações ao nível da sustentabilidade, as restrições impostas pela UE e as necessidades dos consumidores, a unidade de I&D do Grupo CIN pretende focar um dos seus projetos no desenvolvimento de revestimentos termicamente isolantes.

1.3 Contributos do Trabalho

Este projeto permitiu à empresa Grupo CIN o desenvolvimento e caracterização de tintas e massas de regularização termicamente isolantes. Dada a crescente preocupação em matéria de eficiência energética e conforto térmico, é extremamente importante avaliar a potencialidade destes produtos como meios passivos de climatização competitivos. A realização de uma simulação permitiu prever o desempenho térmico deste tipo de produtos numa situação real.

1.4 Organização da Tese

Esta tese está estruturada em sete capítulos que visam a abordagem de diferentes tópicos.

No primeiro capítulo (Introdução) é feita uma contextualização do tema central deste projeto, esclarecendo sobre as crescentes restrições impostas em termos de eficiência energética e necessidade de aumento do conforto térmico dos edifícios. Dado este enquadramento, apresenta-se o principal objetivo deste trabalho, que compreende o estudo e caracterização de tintas e massas de regularização termicamente isolantes.

No segundo capítulo (Contexto e Estado de Arte), após o esclarecimento sobre os princípios científicos inerentes à transferência de calor, são descritos os principais meios passivos de climatização existentes. Ainda neste capítulo, é dada ênfase ao estado de desenvolvimento tecnológico e científico das tintas termicamente isolantes.

No terceiro capítulo (Materiais e Métodos) são descritos os produtos desenvolvidos, bem como os ensaios realizados que permitiram a caracterização dos mesmos.

No quarto capítulo (Resultados e Discussão) é feita uma análise crítica dos resultados provenientes da caracterização dos produtos.

No quinto capítulo (Conclusões) são sumarizadas as principais ilações resultantes deste projeto.

No sexto capítulo (Avaliação do Trabalho Realizado) é feita uma reflexão crítica da globalidade do projeto e são apontados os principais pontos de partida para trabalhos vindouros.

No sétimo capítulo (Referências) são apresentadas as referências bibliográficas, que é sucedido pela secção dos Apêndices, na qual é apresentada informação complementar.

2 Contexto e Estado da Arte

Neste capítulo são apresentadas as bases científicas que suportam o desenvolvimento dos revestimentos termicamente isolantes. As tintas podem exercer um papel importante na transferência de calor. Uma vez que constituem um material contínuo, verifica-se a transferência de calor por condução e, caso sejam aplicadas no exterior dos edifícios, o mecanismo de radiação também exerce uma influência significativa, devido à incidência de radiação solar. Importa, portanto, conhecer detalhadamente os mecanismos de transferência de calor, para que seja possível intervir adequadamente no sentido de aumentar o isolamento térmico.

Visto que as tintas termicamente isolantes ainda não têm uma forte presença comercial, importa caracterizar alguns os materiais e sistemas de isolamento mais comumente utilizados. No final deste capítulo são apresentadas as várias cargas funcionais e é analisado o estado de desenvolvimento científico e tecnológico na área das tintas termicamente isolantes.

2.1 Mecanismos de transferência de calor

Com vista a melhorar o conforto térmico dos edifícios, é essencial conhecer os três mecanismos de transferência de calor, denominados de condução, convecção e radiação [8, 12, 13].

A transferência de calor por condução pode ocorrer através de interação molecular ou eletrões livres. No primeiro caso, as moléculas que se encontram a uma temperatura superior interagem com as moléculas adjacentes, transferindo energia que provoca um aumento da temperatura [12]. O calor pode também ser transferido por condução através de eletrões livres e permite explicar a razão dos metais serem excelentes condutores de calor. Este fenómeno é descrito matematicamente pela lei de Fourier, apresentada na equação (2.1) [8, 12, 13].

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.1)$$

onde Q é a taxa de transferência de calor, k é a condutividade térmica do material e $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ o gradiente de temperatura.

A convecção é um mecanismo de transferência de calor que ocorre em fluidos e é explicado pela lei de Newton para o arrefecimento (equação (2.2)) [8, 12, 13]. Quanto maior foi a diferença de calor entre o fluido e a superfície do sólido, maior será a força motriz para transferência de calor por convecção.

$$\frac{Q}{A} = h (T_{\text{superfície}} - T_{\infty}) \quad (2.2)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, $T_{\text{superfície}}$ é a temperatura da superfície do corpo e T_{∞} é a temperatura do fluido.

A radiação térmica é emitida por qualquer corpo que apresente uma temperatura superior a 0 K e não necessita de um meio físico para se propagar: desta forma, contrariamente à convecção e condução de calor, a transferência de calor por radiação pode ocorrer no vácuo. Segundo a lei de Stefan-Boltzmann, a energia radiante emitida por um corpo é proporcional à quarta potência da temperatura [8, 12, 13]:

$$\frac{Q}{A} = \sigma T^4 \quad (2.3)$$

onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann.

A radiação térmica corresponde à emissão de ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda entre 0,1 e 100 μm , e compreende uma fração do espectro eletromagnético que abrange o visível e uma parte do infravermelho e ultravioleta [8, 12]. A energia irradiada sobre uma superfície pode ser refletida, absorvida ou transmitida. Uma vez que a maioria dos sólidos são opacos à radiação térmica, a quantidade de energia transmitida pode ser considerada nula. Os coeficientes de absorção, α , e reflexão, ρ , são calculados de acordo com as equações (2.4) e (2.5) [12].

$$\alpha = \frac{I}{I_{\text{abs}}} \quad (2.4)$$

$$\rho = \frac{I}{I_{\text{ref}}} \quad (2.5)$$

onde I é a irradiância e I_{abs} e I_{ref} são os fluxos de radiação absorvida e refletida.

Um corpo negro tem a capacidade de absorver a globalidade da energia que nele incide e, a uma dada temperatura, estes corpos emitem o máximo de radiação, pelo que são considerados corpos ideais. A emissividade, ε , é uma característica que depende da temperatura da superfície e que pode ser calculada através da equação (2.6). Um corpo real não pode assumir valores de emissividade zero e um, uma vez que estes dois valores extremos correspondem à idealidade [8, 12, 13].

$$\varepsilon = \frac{E}{E_{\text{corpo negro}}} \quad (2.6)$$

onde E e $E_{\text{corpo negro}}$ são as potências emissivas de um corpo real e um corpo negro.

2.1.1 Mecanismos de transferência de calor em materiais termicamente isolantes

Um isolante térmico é caracterizado por apresentar um baixo valor de k , ou seja, estes materiais apresentam uma baixa capacidade de transferência de calor por condução [13]. Segundo Notario *et al.* [14] e Jelle [15], a condutividade térmica total de um material termicamente isolante está relacionada com diferentes contribuições, nomeadamente a condução nas fases sólida e gasosa, convecção no interior dos poros e radiação. As espumas poliméricas são uma classe de materiais termicamente isolantes que apresenta uma estrutura altamente porosa. Uma vez que a fração sólida do material é baixa, a transferência de calor por condução é reduzida. Por outro lado, as moléculas de gás que estão no interior dos poros não apresentam uma elevada mobilidade, pelo que a transferência de calor por convecção é igualmente baixa.

2.2 Materiais termicamente isolantes convencionais

Os materiais termicamente isolantes convencionais utilizados no âmbito da construção civil, bem como os valores típicos de k são apresentados na Tabela 2.1. Ao longo dos anos, e caso estes materiais não sejam devidamente acondicionados, pode ocorrer um aumento do teor de água nestes materiais que provoca aumentos indesejáveis no valor de k [15].

Tabela 2.1 - Condutividade térmica de materiais termicamente isolantes convencionais

Material	$k / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Cortiça [8]	0,045
Lã de rocha [8]	0,040
Lã de vidro [8]	0,038
Poliestireno expandido [8]	0,033
Poliestireno extrudido [8]	0,028
Poliuretano [13]	0,026
Poliisocianurato [8]	0,023
Sílica sintética amorfa [15]	0,013

2.3 Sistema ETICS

O Sistema Compósito de Isolamento Térmico pelo Exterior (em inglês: ETICS - *External Thermal Insulation Composite System*) compreende a justaposição de diferentes revestimentos e acessórios, entre as quais uma camada com material termicamente isolante [16]. O Grupo CIN possui um sistema ETICS, denominado de CIN-k, que se apresenta na Figura 2.1 e que é composto pelos seguintes elementos [17]:

1. Suporte sobre o qual é aplicado o sistema
2. Reboco, que permite a regularização da superfície
3. Argamassa, que funciona como um elemento de colagem e de regularização da superfície
4. Placas de material isolante
5. Pregos, que atuam como elementos de fixação mecânica do material isolante
6. Argamassa
7. Rede de reforço em fibra de vidro
8. Argamassa
9. Primário, para proteger as camadas subjacentes e garantir uma maior adesão da camada de tinta
10. Revestimento final.

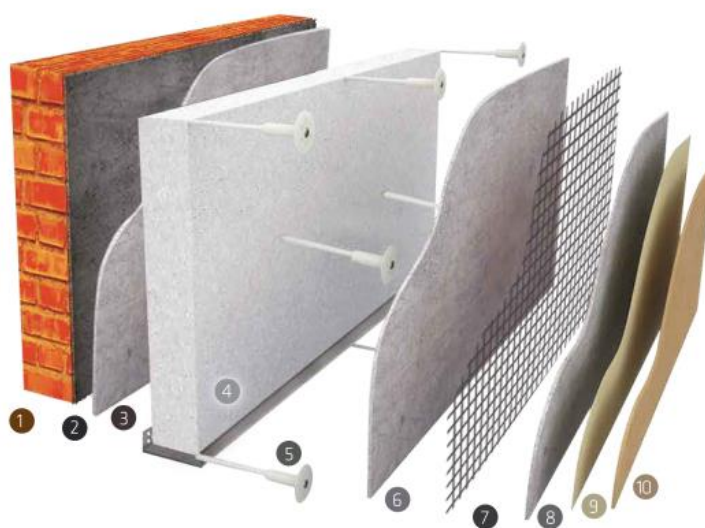


Figura 2.1 - Representação das várias camadas características do sistema ETICS [17].

O Grupo CIN dispõe de uma gama de materiais termicamente isolantes que podem ser utilizados no âmbito deste sistema, nomeadamente, o poliestireno expandido ou extrudido, lã de rocha, aglomerado negro de cortiça e poliisocianaurato [17].

A reduzida condutividade do material termicamente isolante e a camada espessa com que este é aplicado são fatores determinantes que explicam o excelente isolamento térmico. Uma vez que este sistema é aplicado nas fachadas dos edifícios, não se verifica uma redução do espaço habitável [18].

Ainda assim, este sistema poderá não configurar uma hipótese viável quando existem restrições referentes à alteração do aspeto da fachada dos edifícios [18]. Além do mais, a necessidade de aplicação das diferentes camadas reflete-se num aumento indesejável da mão de obra. A análise e correção das anomalias em edifícios com o sistema ETICS tem vindo a ser alvo de variados estudos. Segundo Amaro *et al.* [16], a menor resistência ao impacto deste sistema, quando comparado com as paredes comuns, pode provocar descontinuidades, tais como fissuras, que originam pontes térmicas.

2.4 Tintas refletoras da radiação solar

Têm sido desenvolvidas tintas com propriedades refletoras da radiação solar (em inglês: *cool paints*), cuja aplicação apresenta maior relevância em locais de elevada incidência de luz solar. Nestes revestimentos, o conforto térmico não é conseguido através da reduzida condutividade térmica do material, mas pela reflexão da radiação solar incidente e emissão de energia [19]. Da globalidade da radiação solar que atinge a superfície terrestre, *ca.* de 5 % encontra-se na gama da radiação ultravioleta, *ca.* 45 % na gama do visível e *ca.* 50 % corresponde a radiação infravermelha [1, 8, 12].

A refletância solar total (em inglês: *Total Solar Reflectance* - TSR) corresponde à fração de radiação solar total incidente que é refletida por uma superfície [1]. Quanto maior for este valor, menor será a quantidade de energia absorvida pelo revestimento, o que permite diminuir a temperatura no interior da habitação. Embora as tintas com cores mais claras apresentem geralmente uma capacidade superior de reflexão da radiação térmica na gama o visível, têm vindo a ser desenvolvidos pigmentos com várias tonalidades que apresentam elevados valores de refletância na gama do infravermelho [20].

A temperatura do revestimento está também relacionada com a capacidade de emissão de energia térmica. As tintas possuem normalmente valores de ε elevados e próximos de 0,9 [1, 21].

A utilização de *cool paints* na camada de revestimento final no sistema ETICS potencia o conforto térmico, bem como a durabilidade do sistema, devido à redução da temperatura superficial da fachada [22].

O Grupo CIN dispõe de tintas com a tecnologia *Thermocin*, que permite a reflexão da radiação incidente em coberturas [23].

2.5 Tintas termicamente isolantes

2.5.1 Cargas funcionais para tintas termicamente isolantes

As cargas fazem parte do extrato sólido de uma tinta e, para além de permitirem aumentar o teor de sólidos, podem influenciar outras propriedades, tais como o brilho ou a viscosidade. Uma vez que se encontram agregadas e são praticamente insolúveis na dispersão em que são incorporadas, estes materiais são geralmente introduzidos durante a etapa de dispersão, dado que as elevadas forças de corte promovem a desagregação e a distribuição uniforme das mesmas na matriz líquida [10, 24].

A introdução de cargas funcionais permite formular tintas com propriedades diferenciadas. Com este projeto pretende-se estudar e projetar tintas e massas de regularização termicamente isolantes através da incorporação de cargas funcionais, tais como microesferas ocas e partículas de sílica sintética amorfa. Para além da baixa massa volúmica e condutividade térmica, estes materiais possuem outras propriedades diferenciadas que se abordam de seguida.

Microesferas de vidro ocas

As microesferas ocas de vidro são constituídas por vidro borossilicato [25] (Figura 2.2). Segundo Sahu *et al.* [26], este tipo de microesferas permite aumentar a resistência ao polimento dos revestimentos em que são inseridas. Os mesmos autores referem que estas cargas possuem uma boa resistência à radiação ultravioleta, que foi evidenciada pelo ensaio da resistência à radiação QUV-A.

Uma vez que o gás presente no interior das microesferas é responsável pela baixa condutividade térmica deste material, a quantidade de microesferas quebradas tem uma influência crucial no aumento da condutividade do revestimento. Porém, Wypych [27] refere que um aumento da fração de microesferas de vidro quebradas tem um impacto positivo nas propriedades mecânicas do material.

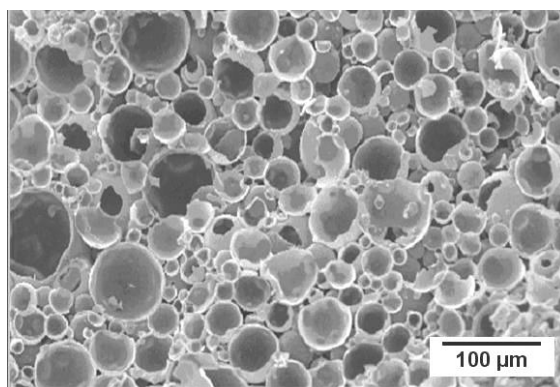


Figura 2.2 - Imagem de microscopia eletrônica de varrimento de microesferas de vidro [28].

Microesferas cerâmicas ocas

As microesferas cerâmicas ocas podem ser sintetizadas ou obtidas como um subproduto do processo de queima do carvão (Figura 2.3). Para além da reduzida condutividade térmica, segundo Sahu *et al.* [26], estes materiais possuem uma boa capacidade de reflexão e emissão de calor. Estes autores indicam que os revestimentos com microesferas cerâmicas apresentam uma maior resistência ao risco do que os produtos que são formulados com microesferas de vidro. Este resultado poderá ser explicado pela elevada concentração de aluminossilicatos na fase sólida, que confere uma elevada resistência mecânica [29]. Tanto as microesferas cerâmicas como as microesferas de vidro apresentam uma boa resistência à esfrega húmida, pelo que têm potencial para aplicação em tintas de interior.

As boas propriedades das microesferas cerâmicas foram exploradas e utilizadas pela NASA no desenvolvimento de um revestimento que permitisse proteger as naves espaciais do sobreaquecimento durante a descolagem. A adoção desta tecnologia foi também estendida a outros setores da sociedade através do desenvolvimento de um produto que, ao ser misturado com tintas, confere propriedades termicamente isolantes e refletoras da radiação [30, 31]. No entanto, esta solução não se apresentou economicamente viável para a extensa aplicação em edifícios [31].

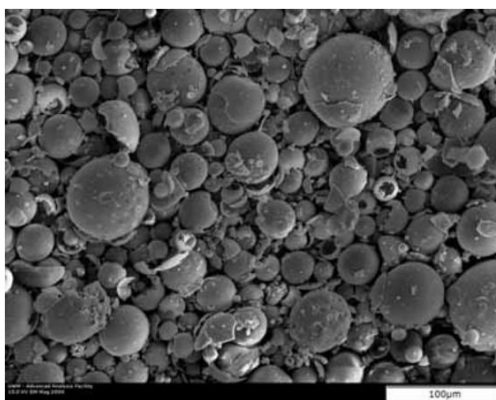


Figura 2.3 - Imagem de microscopia eletrônica de varrimento de microesferas cerâmicas ocas obtidas como subproduto da queima do carvão [32].

Microesferas poliméricas ocas

A parede das microesferas poliméricas ocas pode ser constituída por diversos materiais, tais como o poliestireno, poliácridonitrilo ou compostos fenólicos [26]. Este tipo de microesferas possui uma parede termoplástica e no interior da cavidade oca existe um gás que atua como agente de expansão. Caso estas microesferas sejam expostas a uma temperatura superior à temperatura de transição vítrea do polímero que constitui a parede, ocorre uma expansão destas estruturas. Deste modo, a razão espessura da parede/diâmetro das esferas diminui, o

que se traduz numa redução da massa volúmica e da condutividade térmica (Figura 2.4) [19]. No caso de formulação de tintas, são geralmente usadas microesferas poliméricas já expandidas, uma vez que não são atingidas temperaturas suficientemente elevadas durante o fabrico que permitam a expansão [19].

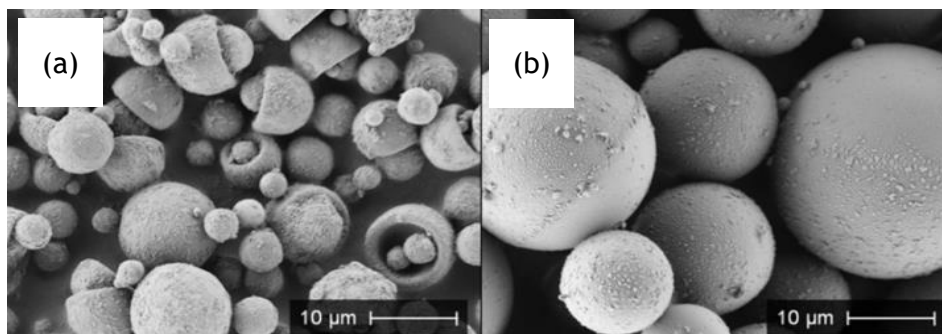


Figura 2.4 - Imagens de microscopia eletrónica de varrimento de microesferas poliméricas ocas (a) não expandidas e (b) expandidas [33].

Sandin *et al.* [19] desenvolveram um estudo sobre as propriedades óticas de microesferas poliméricas ocas. Na Figura 2.5 são apresentados os espectros de refletância de uma resina acrílica pura e revestimentos de dois componentes, contendo resina acrílica e diferentes pigmentos ou cargas, nomeadamente dióxido de titânio (TiO_2), carbonato de cálcio (CaCO_3) e microesferas poliméricas. Devido à sua cor branca, a formulação com TiO_2 registou elevados valores de refletância na gama do visível, que contrastou com a maior absorção de radiação na gama do infravermelho próximo. A formulação com CaCO_3 registou um comportamento pior do que o TiO_2 , uma vez que a refletância deste material foi inferior para quase todos os comprimentos de onda analisados. Por último analisou-se a formulação com microesferas poliméricas ocas, tendo-se verificado elevados valores de refletância para as gamas do ultravioleta e visível. Embora na zona do infravermelho ocorra a absorção de uma maior quantidade de energia, os valores da refletância são largamente superiores aos que foram registados para os revestimentos com TiO_2 e CaCO_3 .

Os mesmos autores referem que microesferas com menores tamanhos de partícula permitem aumentar o número de locais onde a radiação incidente é refletida. Ainda assim, e tal como referido por Kiil [34], a utilização de partículas com menor tamanho pode ter um efeito adverso na condutividade térmica, uma vez que partículas mais pequenas possuem geralmente uma fração gasosa menor.

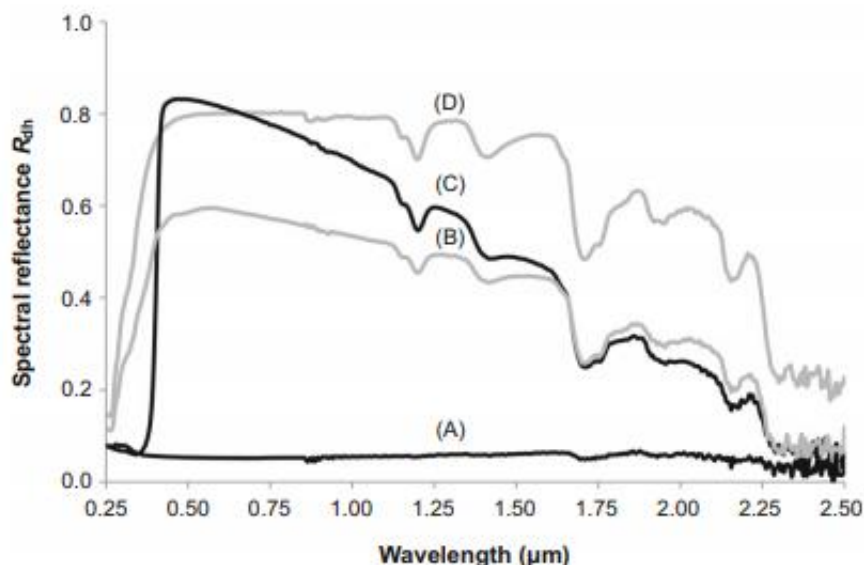


Figura 2.5 - Espectros da refletância da radiação solar de (A) uma resina acrílica pura e revestimentos com resina acrílica e 30 % (v/v) de (B) $CaCO_3$, (C) TiO_2 e (D) microesferas poliméricas ocas [19].

Sílica sintética amorfa

A sílica sintética amorfa pode ser sintetizada com uma estrutura altamente porosa (Figura 2.6), correspondente a uma dispersão coloidal derivada de um gel, ou seja, uma dispersão de um sólido num líquido, em que a fase líquida é extraída e substituída por um gás [35]. A elevada porosidade destes materiais (85 a 99 %) permite reduzir a condução de calor na fase sólida, sendo este o principal fator que permite explicar a baixa condutividade térmica [36].

Uma vez que estes materiais são caracterizados por poros nanométricos compridos e estreitos, as moléculas de gás colidem maioritariamente contra as paredes dos poros em vez de interagirem umas com as outras. Este fenómeno, denominado de efeito de difusão de Knudsen, permite desprezar o efeito da condução de gás no interior dos poros [15].

Segundo Achar e Procopio [37], a introdução de sílica sintética amorfa nas formulações permite aumentar o alongamento até à rotura do material. O melhoramento desta propriedade pode ser bastante vantajoso no âmbito de tintas termicamente isolantes, uma vez que a diminuição da ocorrência de fissuras permite reduzir as pontes térmicas.

Devido à sua estrutura altamente porosa, as partículas de sílica sintética amorfa apresentam também uma elevada área superficial. As suas características excecionais sugerem a sua aplicação em áreas tão distintas como a catálise ou o isolamento térmico e elétrico, mas a sua utilização ainda está restringida pelo elevado custo de produção [38].

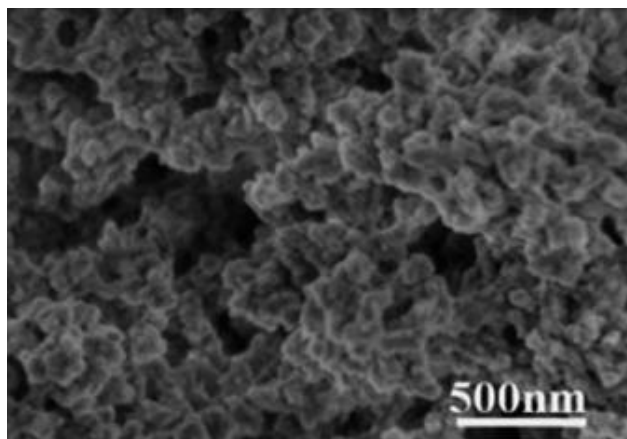


Figura 2.6 - Imagem de microscopia eletrônica de varrimento de sílica sintética amorfa [39].

Na Tabela 2.2 são apresentados os valores de k dos materiais suprarreferidos. A informação referente à condutividade térmica das microesferas de vidro e poliméricas foi obtida através do boletim técnico das cargas funcionais utilizadas. Por questões de confidencialidade, não se apresenta a referência bibliográfica.

Tabela 2.2 - Condutividade térmica característica das cargas funcionais utilizadas no âmbito da formulação de tintas termicamente isolantes

Cargas funcionais	$k / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Microesferas de vidro	0,050 - 0,200
Microesferas cerâmicas [40]	0,080
Microesferas poliméricas	0,025 - 0,030
Sílica sintética amorfa [36]	0,010 - 0,020

2.5.2 Incorporação de cargas funcionais para tintas termicamente isolantes

As características diferenciadas das cargas funcionais influenciam a forma como estas são incorporadas numa formulação. Segundo Atiemo-Obeng *et al.* [41], o vidro borossilicato das microesferas de vidro ocas confere uma baixa molhabilidade a estas partículas. Quanto maior for a tensão superficial estabelecida entre a dispersão e a superfície sólida da microesfera, menor será a molhabilidade da microesfera, pelo que a interação entre as duas fases é menor. Como consequência, é mais difícil obter uma homogénea distribuição das microesferas na dispersão. Além do mais, a introdução de partículas sólidas com uma menor massa volúmica do que a dispersão exige uma acrescida dificuldade na homogeneização, uma vez que tendem a flutuar. Para ultrapassar este problema, sugere-se que a energia necessária para dispersar estas cargas seja superior à que geralmente é aplicada para cargas convencionais, tais como o CaCO_3 . Tal como referido no subcapítulo 2.2.4, as elevadas forças de corte durante a introdução das

microesferas ocas pode provocar a quebra destas estruturas. Caso isso ocorra, o gás presente na cavidade oca destas estruturas é libertado e a condutividade térmica da tinta aumenta. Segundo Pidhurney e Pescatore [42], as elevadas forças de corte não têm um efeito negativo nas formulações em que são incorporadas partículas de sílica sintética amorfa e, de acordo com os autores, isso deve-se ao pequeno tamanho dos poros existentes nestas partículas.

2.5.3 Formulação de tintas termicamente isolantes

Um dos principais parâmetros que influencia a formulação de qualquer tipo de tinta é a concentração de pigmento por volume (em inglês: *Pigment Volume Concentration* - PVC) que permite quantificar a fração, em volume, de pigmentos e cargas na globalidade de componentes não voláteis existentes nas tintas (equação (2.7)) [43].

$$PVC = \frac{V_p + V_c}{V_r + V_p + V_c} \times 100 \quad (2.7)$$

onde V_p , V_c e V_r são o volume de pigmentos, cargas e resina numa tinta, respetivamente.

A concentração crítica de pigmento por volume (em inglês: *Critical Pigment Volume Concentration* - CPVC) corresponde à situação em que a quantidade de resina presente na tinta é apenas a necessária para preencher todos os interstícios entre as partículas de pigmento e carga. O valor do CPVC é deveras importante e depende do tipo de resina utilizada e das propriedades do pigmento e cargas, tais como o formato e características da superfície. Um aumento do valor do PVC provoca geralmente uma redução do brilho, bem como uma diminuição da resistência à abrasão e da adesão ao substrato, que se tornam ainda mais severas para valores próximos e superiores ao CPVC. Além do mais, a durabilidade da película de tinta também pode ficar comprometida [43].

No âmbito da formulação de uma tinta termicamente isolante, a substituição das cargas convencionais pelas cargas funcionais deve ser feita em volume. Achar e Procopio [37] estudaram, através da metodologia de Planeamento de Experiências, tintas de base aquosa com propriedades termicamente isolantes. Para tal, foram formuladas tintas com diferentes quantidades e combinações de microesferas de vidro ocas e partículas de sílica sintética amorfa, mantendo um PVC de 75%. Para as formulações com resinas acrílicas, as tintas que apresentam uma menor condutividade térmica são as que têm somente microesferas de vidro ocas, tendo sido determinado o valor de $0,08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Ao introduzir diferentes quantidades de sílica sintética amorfa, verificou-se um aumento da condutividade térmica. A formulação que contém apenas sílica sintética amorfa possui um valor de condutividade térmica de

$0,12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Embora a sílica sintética amorfa seja a carga funcional que apresenta uma menor condutividade térmica, uma eventual intrusão polimérica nos poros pode justificar o fenómeno observado.

Kiil [34, 36] realizou vários estudos tendo por base simulações matemáticas em tintas de dois componentes, nomeadamente a resina e as cargas funcionais, com vista a determinar os fatores que exercem uma maior influência no desempenho das tintas termicamente isolantes. Verificou-se que o PVC, a espessura e o material que constitui a parede das microesferas são os fatores com maior preponderância. Foi possível concluir que devem ser incluídas microesferas ocas com uma reduzida razão espessura de parede/diâmetro uma vez que a condutividade térmica do material que compõe as esferas é geralmente bastante maior do que a do ar estagnado ($26 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) que está contido na cavidade das microesferas. Verificou-se também que o valor do PVC deve ser elevado, dado que uma maior porosidade confere uma menor condutividade térmica. No entanto, tal como referido, não é aconselhável formular na proximidade ou para valores superiores ao CPVC, uma vez que algumas características, tais como as propriedades mecânicas, são pioradas. Tal como é frisado pelo autor, todas estas conclusões foram realizadas para formulações com apenas resina e cargas, pelo que tintas comerciais, que apresentam uma maior complexidade, devem ser alvo de mais estudos.

3 Materiais e Métodos

Numa primeira fase deste projeto procedeu-se à formulação de tintas de interior e exterior e massas de regularização termicamente isolantes. As características foram avaliadas e comparadas com produtos existentes no mercado (em inglês: *benchmarking*). Por fim, elaborou-se uma simulação da transferência de calor com base na aplicação informática *SolidWorks*, para avaliar o desempenho de isolamento térmico de tintas e massas de regularização termicamente isolantes e comparar com as tintas convencionais e sistema ETICS.

3.1 Produtos desenvolvidos

As tintas são geralmente aplicadas com uma espessura na ordem dos micrómetros, enquanto que as massas de regularização podem ser aplicadas com uma maior camada, geralmente entre 2 e 4 mm. Portanto, a utilização de uma massa de regularização termicamente isolante constitui uma resistência adicional à transferência de calor por condução ao longo da parede, tal como apresentado na Figura 1.1. A massa de regularização termicamente isolante deve ser utilizada para fazer um barramento total da superfície interna da parede, sobre a qual é aplicada a tinta de interior.

Os produtos desenvolvidos no âmbito deste projeto são apresentados na Tabela 3.1. Numa primeira fase, foram incorporadas cargas convencionas nas tintas de interior e exterior e massa de regularização, que são apelidadas de I_I, E_A e MR_O, respetivamente. De seguida procedeu-se à substituição parcial (P) e total (T) com cinco cargas funcionais diferentes. As cargas utilizadas correspondem às que foram indicadas no capítulo Contexto e Estado de Arte mas, por questões de confidencialidade, os nomes encontram-se codificados.

As tintas de exterior foram formuladas com um ligante acrílico fotorreticulável, que potencia a elasticidade e resistência à intempérie do produto [44]. As tintas de interior e massa de regularização foram formuladas com uma resina vinílica, que não necessita de incidência de radiação UV para curar, sendo adequada para aplicação em interior.

Para que as formulações fossem comparáveis, a concentração de sólidos em volume foi mantida aproximadamente constante, para uma dada categoria de produtos, tal como é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 -Tintas e massas de regularização desenvolvidas

Produto	Nomenclatura	Cargas Funcionais	Substituição da carga funcional	% Sólidos (v/v)
Tintas de Exterior	E_A	-	-	50 - 52
	E_B_P	Carga 1	Parcial	
	E_C_T	Carga 1	Total	
	E_D_P	Carga 2	Parcial	
	E_E_T	Carga 2	Total	
	E_F_T	Carga 3	Total	
	E_G_T	Carga 4	Total	
	E_H_T	Carga 5	Total	
Tintas de Interior	I_I	-	-	36 - 39
	I_J_P	Carga 1	Parcial	
	I_K_T	Carga 1	Total	
	I_L_P	Carga 2	Parcial	
	I_M_T	Carga 2	Total	
	I_N_T	Carga 5	Total	
Massas de regularização	MR_O	-	-	53 - 55
	MR_P_T	Carga 1 Carga 3	Total	
	MR_Q_T	Carga 1 Carga 5	Total	
	MR_R_T	Carga 2 Carga 5	Total	

Para balizar as características dos produtos formulados, foi realizada uma análise de *benchmarking* (B) com os produtos apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Tintas e massa de regularização sujeitas à análise comparativa

Produto	Nomenclatura	Cargas funcionais	Resina
Tintas de interior / exterior	IE_B_1	Microesferas de vidro	Acrílica
	IE_B_2	Microesferas de vidro	Vinílica
	IE_B_3	Microesferas de vidro	Acrílica
Tinta de exterior	E_B_1	Microesferas cerâmicas	Acrílica fotorreticulável
Tinta de interior	I_B_1	Microesferas de vidro, cerâmicas e poliméricas	Acrílica
Massa de regularização	MR_B_1	Microesferas de vidro	-

3.2 Ensaios de caracterização das tintas e massas de regularização

Os ensaios realizados no decorrer deste projeto e que permitiram caracterizar detalhadamente os produtos desenvolvidos, bem como os produtos da concorrência, são apresentados na Tabela 3.3. Nos subcapítulos seguintes estes ensaios são descritos.

Tabela 3.3 - Ensaios de caracterização por tipologia de produto

Produto	Caracterização base	Caracterização exaustiva
Tintas de interior e exterior	- Viscosidade (<i>Stormer</i>, Cone e prato, <i>Brookfield</i>) - Razão de contraste - Brilho - Índices de brancura e amarelecimento	- Fissuração a espessuras elevadas - Fissuração <i>mudcraking</i> - Resistência à água e amónia - Temperatura mínima de formação de película - Resistência aos álcalis dos ligantes hidráulicos - Aplicação prática
Tintas de exterior	-	- Manchamento pela água ('<i>Snail Trails</i>'/ Exsudações) - Resistência à lixiviação de surfactantes - Resistência às cinzas
Tintas de interior	-	- Resistência às nódoas - Resistência ao polimento - Resistência à esfrega húmida
Massas de regularização	- Viscosidade <i>Penetrometer</i>	- Aplicação prática - Dureza <i>Hermelin</i> - Resistência à absorção de água - Repintura / aderência
Caracterização específica		
- Refletância solar total (TSR) - Tintas de exterior - Calor específico a pressão constante - Microscopia eletrónica de varrimento (SEM) - Condutividade térmica - Simulação em <i>SolidWorks</i>		

3.2.1 Caracterização base de tintas

A avaliação do pH, massa volúmica (em $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$), brilho (em unidades de brilho, ub) e a razão de contraste seca (em %) são ensaios essenciais para a caracterização de qualquer tinta. O comportamento reológico é avaliado em três equipamentos distintos, nomeadamente *Brookfield* (em P), *Stormer* (em KU) e Cone e Prato (em P), que permitem estudar o comportamento da tinta a baixas, médias e elevadas taxas de corte, respetivamente. Em tintas brancas, como é o caso de todas as que foram formuladas no âmbito deste projeto, os índices de brancura e amarelecimento (em %) também são registados. Todos estes ensaios, com exceção do brilho, que foi determinado com recurso à norma NP EN ISO 2813, foram determinados segundo normas internas [45].

3.2.2 Caracterização exaustiva transversal a tintas de interior e exterior

Resistência à fissuração de uma tinta para espessuras elevadas

A determinação da resistência à fissuração para espessuras elevadas é realizada segundo uma norma interna e com o auxílio de um bloco que apresenta uma rampa com profundidades entre 0 e 2000 μm . A tinta é aplicada no bloco e é determinada a espessura a partir da qual são visíveis fissuras, após a completa secagem da tinta. Os procedimentos de realização do ensaio estão de acordo com uma norma interna.

Fissuração *mudcracking*

A fissuração *mudcracking* permite avaliar a ocorrência de fissuras numa espessa camada de tinta exposta a reduzidas temperaturas de secagem. Os resultados são expressos numa escala qualitativa de 1 (película sem fissuração) a 5 (película com fissuração visível a olho nu). Este ensaio foi efetuado segundo uma norma interna.

Resistência à água e amónia

Os ensaios da resistência à água e amónia permitem avaliar a resposta de revestimentos expostos ao contacto direto com estas substâncias. Após a completa secagem da película de tinta, procede-se à colocação de uma reduzida quantidade de água e uma solução aquosa de amónia em duas zonas distintas. É registado um tempo (entre 0 e 10 minutos) ao fim do qual ocorre uma alteração do aspeto da película de tinta, tal como o empolamento. É também importante verificar se, após a remoção da amónia ou água, existe uma recuperação do aspeto inicial, assinalando a letra R. Caso ao fim de 10 minutos não ocorra nenhuma modificação, deve avaliar-se o amolecimento da película de tinta, que deve ser registado com a letra S. Estes ensaios de resistência formam determinados segundo normas internas.

Temperatura mínima de formação de película

Durante o processo de cura, as cadeias poliméricas das partículas de ligante contactam entre si e deformam-se, o que culmina na formação de uma película de tinta. A temperatura mínima à qual ocorre a coalescência das partículas depende de vários fatores, tais como o tipo de ligante ou os plastificantes presentes na formulação [46]. Para valores inferiores à temperatura mínima de formação de película (TMFP), a tinta apresenta um indesejável aspeto pulverulento. Este valor crítico é determinado numa película de tinta que é aplicada na superfície de um equipamento em que é imposto um gradiente de temperatura. Este ensaio é realizado segundo a norma ISO 2115 [47].

Resistência aos álcalis dos ligantes hidráulicos

O cimento Portland, sobre o qual são aplicadas as tintas a ensaiar, é um ligante hidráulico e possui a capacidade de endurecer quando submerso em água. Os óxidos de potássio e de sódio presentes no cimento possuem um elevado pH, pelo que podem provocar alterações na película de tinta quando se encontram em solução [48]. Este ensaio, realizado segundo uma norma interna, permite avaliar qualitativamente as alterações provocadas pelos álcalis, tais como alterações de cor, empolamento ou amarelecimento.

Aplicação prática

O ensaio de aplicação prática pretende simular a colocação de um revestimento numa situação real, quando aplicado a trincha ou rolo. São avaliadas características bastante importantes para o cliente, tais como a brancura, opacidade, aplicabilidade e espalhamento, sendo que no caso das tintas de interior é também avaliada a suavidade ao toque. Os resultados são expressos numa escala compreendida entre 1 (mau) e 5 (muito bom), de acordo com uma norma interna.

3.2.3 Caracterização exaustiva para tintas de exterior

Manchamento pela água (*'Snail Trails'* / Exsudações)

Neste ensaio são avaliadas alterações na película de tinta, tais como manchamento ou alterações de brilho (exsudações), através da simulação de chuva intensa pouco tempo decorrido da aplicação da tinta. Os resultados são expressos numa escala entre 0 (manchamento da cor evidente) e 2 (não se regista manchamento da cor) e devem ser registadas as exsudações (E), de acordo com o que é descrito numa norma interna.

Resistência à lixiviação de surfactantes

O ensaio da resistência à lixiviação de surfactantes permite simular a forma como estes compostos interagem e são solubilizados pela chuva ou através de fenómenos de condensação, pouco tempo após a aplicação de uma tinta de exterior. Após a colocação de uma gota de água sobre a película e secagem completa devem ser anotadas todas as alterações na película, tais como o manchamento ou mudanças de brilho. Os resultados são expressos numa escala entre 0 (sem alteração) e 2 (manchamento severo ou marcas de brilho evidentes), de acordo com o está estabelecido por uma norma interna.

Resistência de uma película de tinta às cinzas

Com este ensaio pretende-se simular a resposta de uma tinta exposta a poluentes, pelo que é mais direccionado para tintas de exterior [44]. Este ensaio permite determinar quantitativamente a retenção de sujidade de uma tinta seca. Sobre metade da área da película de tinta são colocadas cinzas. Depois de remover o excesso e lavar com água, procede-se à leitura da diferença de cor (ΔE), num espectrofotómetro, entre a parte que esteve exposta às cinzas e a que permaneceu intacta. Este procedimento está de acordo com o que é descrito numa norma interna. Uma vez que as tintas de exterior formuladas são fotorreticuláveis, os provetes foram previamente colocados durante 48 h numa câmara de arco de xénon.

3.2.4 Caracterização exaustiva para tintas de interior

Resistência às nódoas (manchamento prático)

Este ensaio é realizado 28 dias depois da aplicação prática do revestimento. Neste caso, sobre a película de tinta são colocadas 14 nódoas em áreas distintas e, após contacto direto, são removidas e limpas com o auxílio de uma solução de detergente. Cada nódoa é avaliada numa escala de 0 (sem alteração) a 2 (alteração profunda) e o resultado corresponde à média das classificações, tal como descrito numa norma interna.

Resistência ao polimento (polimento prático)

O polimento prático é efetuado 28 dias após a aplicação prática, tal como no ensaio da resistência às nódoas. A superfície é polida manualmente a seco (polimento seco) e com recurso a uma solução de limpeza (polimento húmido). Findada a secagem da película de tinta, a variação de brilho a 85° é registada. Este ensaio está de acordo com uma norma interna.

Resistência à esfrega húmida

No ensaio de esfrega é determinada a perda de espessura (em μm) de uma película de tinta seca, provocada por 200 ciclos de limpeza, ou seja, este ensaio é bem mais agressivo do que o polimento prático. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN ISO 11998 [49].

3.2.5 Caracterização base de massas de regularização

Viscosidade *penetrometer*

No ensaio da viscosidade *penetrometer*, é determinado o deslocamento, em mm, decorrente da penetração de um cone sobre uma massa de regularização, que é deixado cair de uma altura normalizada. Baixos valores de deslocamento revelam que o produto apresenta uma elevada resistência à penetração do cone, pelo que a massa de regularização é muito viscosa. O procedimento associado a este ensaio encontra-se descrito numa norma interna.

3.2.6 Caracterização exaustiva de massas de regularização

Aplicação prática

Para além da aplicabilidade e espalhamento, na aplicação prática de massas de regularização é avaliada a fissuração / abatimento nos esquadros de 2 e 4 mm, bem como a lixabilidade, ou seja, a facilidade de lixar um revestimento. Tal como a aplicação prática de tintas de interior e exterior, este ensaio está de acordo com uma norma interna.

Dureza *Hermelin*

A resistência à indentação ou penetração de um objeto sólido é avaliada pela dureza *Hermelin* [10]. O ensaio inicia-se com a aplicação do maior diâmetro do elemento que realiza o risco na superfície da massa de regularização, que corresponde ao valor 17 na escala do equipamento. O diâmetro do elemento é diminuído até obter um corte com uma espessura de 1 mm na superfície do revestimento. O resultado é expresso de acordo com uma norma interna e com os valores da escala do equipamento, compreendidos entre 0 (elevada dureza) e 17 (baixa dureza).

Resistência à absorção de água

Para que os materiais construtivos ofereçam uma grande resistência à degradação, é essencial que sejam impermeáveis à água. A resistência à absorção de água é determinada com o auxílio de um tubo de *Karsten* que é colocado na superfície da massa de regularização seca [18]. É medida a diminuição do nível do líquido, em mL, que corresponde à quantidade de água que é absorvida pela massa de regularização. São realizadas várias medições ao longo do tempo, até perfazer 48 h. O procedimento experimental deste ensaio está de acordo com uma norma interna.

Repintura / aderência

No ensaio de repintura, é avaliado o aspeto final da superfície com o esquema de pintura recomendado, que compreende a aplicação de primários de base aquosa e solvente, seguida de uma tinta de interior. Optou-se por aplicar a tinta de interior que possui apenas cargas convencionais, tinta I_I.

Após a secagem da última camada de tinta, é realizado o ensaio de aderência através do destacamento de um adesivo que é colocado em contacto direto com a película de tinta. Os defeitos provocados são avaliados e é determinada a camada em que ocorreu o destacamento.

3.2.7 Caracterização específica

Refletância Solar Total (TSR)

A refletância solar total, abordada na secção 2.2.3, foi determinada com o auxílio do espectrofotómetro *UV-VIS-NIR Shimadzu UV-3600*, existente nas instalações do Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia, LEPABE. A radiação refletida é determinada para 20 comprimentos de onda compreendidos entre 336,3 e 2131,6 nm. O resultado corresponde à média dos valores da refletância para todos os comprimentos de onda em que se realizou a medição. Dado que esta é uma medida da refletância solar, apenas foram efetuadas medições para tintas de exterior. Este procedimento experimental foi realizado de acordo com a norma ASTM G173 [50].

Calor específico a pressão constante

O calor específico a pressão constante, C_p , corresponde à quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa em 1 °C, considerando que a pressão é mantida constante [13].

A determinação do valor do C_p dos revestimentos foi realizada segundo a norma ISO 11357-4 através de Calorimetria Diferencial de Varrimento (em inglês: *Differential Scanning Calorimetry* - DSC), com o equipamento *DSC Polyma (NEZTCH)* no LEPABE [51].

Numa primeira fase é ensaiado um cadinho sem amostra, correspondente ao branco. Este procedimento permite eliminar a interferência das paredes de alumínio dos cadinhos utilizados nas medições. De seguida, é ensaiado um material de referência, que corresponde ao padrão de calibração. É em relação a este material que é determinado o C_p de todas as amostras. Selecionou-se α -alumina como o material de referência ($C_{p\alpha\text{-alumina}} = 897 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). O valor do C_p da amostra é determinado através da equação (3.1).

$$Cp_{amostra} = Cp_{calibração} \frac{m_{calibração}}{m_{amostra}} \left(\frac{p_{amostra} - p_{branco}}{p_{calibração} - p_{branco}} \right) \quad (3.1)$$

onde $Cp_{amostra}$ e $Cp_{calibração}$ são o calor específico a pressão constante da amostra e do padrão de calibração, $m_{amostra}$ e $m_{calibração}$ são as massas da amostra e do padrão de calibração, $p_{amostra}$, $p_{calibração}$ e p_{branco} são as taxas de transferência de calor medidas pelo equipamento para os ensaios com a amostra, padrão de calibração e cadinho vazio.

Microscopia eletrónica de varrimento

O ensaio de microscopia eletrónica de varrimento (em inglês: *Scanning Eletron Microscopy* - SEM) permitiu complementar a análise dos resultados e foi realizado no equipamento *Phenom XL Desktop* presente nas instalações do laboratório da Associação Rede de Competência em Polímeros, ARCP. Para a análise da morfologia utilizou-se a aplicação informática *Prosuít*, enquanto que a determinação da composição foi realizada com recurso ao *Elemental Mapping*.

Condutividade térmica

Não foi possível obter valores de condutividade térmica das tintas e massas de regularização. Ainda assim, apresenta-se o método utilizado para estimar esses valores.

Procedeu-se à determinação desta grandeza física através do método da capacitância (em inglês: *Lumped Heat Capacity Analysis*) que assume uma transferência de calor em estado pseudo-estacionário, ou seja, supõe-se que a temperatura do corpo depende apenas do tempo. Este modelo ideal constitui uma aproximação razoável para corpos em que a resistência interna é muito menor do que a soma total das resistências externas. Na maior parte das situações, esta premissa pode ser sucintamente descrita em função do número adimensional Biot, Bi , que deve ser inferior 0,1 para que este modelo seja aplicável (equação (3.2)) [8, 13].

$$Bi = \frac{U_{\text{externo}} (V/A)}{k} \quad (3.2)$$

onde U_{externo} é coeficiente global de transferência de calor externo ao corpo e V é o volume do corpo.

Para a determinação da condutividade térmica dos revestimentos utilizou-se um termopar do tipo K, que sendo constituído por metais possui uma reduzida resistência interna. Este equipamento é pintado com uma película uniforme e é introduzido na estufa a 50 °C durante 1 h, o que permite a secagem da película de tinta. Findado este tempo, o termopar é retirado da estufa e é determinada a espessura da película seca. No tempo decorrido durante este último

passo, o termopar arrefece até à temperatura ambiente, que deverá ser próxima de 20 °C. De seguida, o termopar é conectado ao sistema de aquisição de dados e é introduzido na estufa a 50 °C, sendo registada a história da temperatura. Para que os resultados sejam reproduzíveis, a evolução da temperatura para uma dada espessura da película de revestimento é registada em triplicado. Este procedimento é repetido para duas e três camadas de tinta.

Desde que o termopar é inserido na estufa até ao momento em que a temperatura estabiliza, ocorre transferência de calor por convecção no ar e condução através da película de tinta, o que provoca um aumento da temperatura no termopar, tal como expresso pela equação (3.3).

$$m_{\text{termopar}} C_{p_{\text{termopar}}} \frac{dT}{dt} = U_{\text{externo}} A (T_{\text{termopar}} - T_{\infty}) \quad (3.3)$$

onde m_{termopar} , $C_{p_{\text{termopar}}}$ e T_{termopar} são a massa, calor específico a pressão constante e temperatura do termopar.

Para além da camada de ar estagnado, o valor de U_{externo} contabiliza a película de tinta que reveste o termopar, e pode ser calculado através da equação (3.4).

$$\frac{1}{U_{\text{externo}}} = \frac{1}{h} + \frac{\Delta x_{\text{tinta}}}{k_{\text{tinta}}} \quad (3.4)$$

onde Δx_{tinta} e k_{tinta} são a espessura e condutividade térmica da tinta.

Após integração e linearização da equação (3.3) obtém-se a equação (3.5).

$$\ln \left(1 - \frac{T - T_{\text{inicial}}}{T_{\infty} - T_{\text{inicial}}} \right) = -\frac{1}{\tau} t \quad (3.5)$$

Por fim o valor da condutividade térmica é calculado através da equação (3.6).

$$\tau = \frac{m_{\text{termopar}} C_{p_{\text{termopar}}}}{U A} = \frac{m_{\text{termopar}} C_{p_{\text{termopar}}}}{h A} + \frac{m_{\text{termopar}} C_{p_{\text{termopar}}}}{k_{\text{tinta}} A} \Delta x_{\text{tinta}} \quad (3.6)$$

Simulação em SolidWorks

Recorreu-se à aplicação informática *SolidWorks* para prever a transferência de calor por condução ao longo de uma parede revestida. Para o efeito, foram considerados quatro casos de estudo distintos, correspondentes a uma parede com:

- Tintas convencionais (sem isolamento)
- Sistema ETICS com 40 mm de poliestireno expandido
- Sistema ETICS com 5,8 mm de poliestireno expandido

- Tintas e massa de regularização termicamente isolantes (espessura total de revestimentos termicamente isolantes: 5,8 mm).

Em todos os casos de estudo enunciados, o suporte, que é constituído por uma parede de alvenaria de tijolo e rebocos interior e exterior, foi mantido constante. No Apêndice D (Figura E.1), apresentam-se os esquemas de sobreposição das várias camadas que foram utilizados para o desenvolvimento da simulação. No caso do sistema ETICS, a disposição das várias camadas foi baseada na Figura 2.1. Não foram considerados os pregos nem a rede de reforço, uma vez que não constituem camadas contínuas. A camada de primário também não foi contemplada, visto que esta é aplicada com uma espessura muito reduzida e, não se tratando de um material termicamente isolante, a contribuição para o aumento da resistência térmica no sistema ETICS é desprezável. O poliestireno expandido foi o material termicamente isolante selecionado.

Os valores das espessuras das paredes e condutividade térmica das várias camadas também são apresentados no Apêndice D. Tal como referido, não foi possível estimar o valor de k das tintas, pelo que se assumiram os valores de 0,20 e 0,10 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para as tintas convencionais e termicamente isolantes, respetivamente.

Antes de iniciar a simulação a globalidade do sistema encontra-se a 20 °C e no momento inicial é realizada uma perturbação em degrau nas condições do exterior: a temperatura do ar aumenta para 30 °C e inicia-se a incidência de radiação solar com um ângulo de 45° e uma potência de 700 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ [8]. Na Tabela 3.4 são apresentados os coeficientes de transferência de calor e temperatura na parte externa da habitação após a perturbação, sendo que estes valores foram definidos para a estação de verão [13].

Tabela 3.4 - Coeficientes de transferência de calor por convecção nas superfícies interior e exterior da parede

	$h / \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ [13]	$T / ^\circ\text{C}$
Interior da habitação	8,3	20
Exterior da habitação	22,7	30

Realizou-se um estudo adicional sobre a influência da cor das tintas de exterior. Na Tabela 3.5 são apresentados os valores de emissividade e coeficiente de absorção da radiação solar que permitiu diferenciar as tintas branca e escura.

Tabela 3.5 - Emissividade e coeficiente de absorção solar das tintas de exterior

	Emissividade, ε [1, 21]	Coeficiente de absorção, α
Tinta branca	0,9	0,10
Tinta escura	0,9	0,65

4 Resultados e Discussão

4.1 Resultados da caracterização base das tintas

4.1.1 Tintas de exterior

A caracterização base das tintas de exterior estudadas durante este projeto apresenta-se na Tabela 4.1, da qual é possível retirar as conclusões descritas de seguida. Verificou-se que a adição de cargas funcionais provoca uma diminuição da massa volúmica, algo que seria esperado, uma vez que a massa volúmica destas cargas é inferior à das cargas convencionais. Os produtos com a carga 2 apresentam uma maior massa volúmica quando comparados com as outras formulações com cargas funcionais. Este inesperado resultado poderá estar relacionado com uma intrusão polimérica nos poros desta carga. Esta hipótese encontra-se descrita na literatura e, caso se verifique, a condutividade térmica dos revestimentos deve também ser superior, dado que ocorre uma diminuição da porosidade [37]. Visto que não foi possível determinar a condutividade térmica dos revestimentos, não foi possível verificar a veracidade desta hipótese. O ensaio de microscopia eletrónica de varrimento também não permitiu retirar conclusões sobre uma eventual intrusão polimérica, dado que o equipamento não possui uma resolução suficientemente elevada.

Também nas formulações em se introduziu a carga 2 observou-se um aumento do brilho. Este aumento foi ainda mais notório quando se realizou uma substituição total das cargas convencionais com a carga 2, E_E_T, pelo que se optou por incorporar silicatos de magnésio que possuem um maior tamanho de partícula e maior capacidade de absorção de óleo. Dadas as características dos silicatos de magnésio, a quantidade de resina necessária para apenas preencher todos os interstícios entre as partículas é maior, pelo que o valor do CPVC diminui (equação 2.7)). Deste modo, a razão PVC/CPVC aumenta, ou seja, o valor da concentração de pigmento em volume aproxima-se do valor crítico, o que culmina numa diminuição do brilho. Embora a tinta não possa ser considerada mate, uma vez que apresenta um brilho a 85° superior a 10 ub, verificou-se uma redução bastante significativa deste parâmetro, quando comparada com a formulação em que não foram introduzidos silicatos de magnésio [52]. A tinta E_H_T, formulada com a carga 5, apresenta um brilho bastante reduzido e este resultado pode ser explicado pelo elevado tamanho de partícula desta carga funcional.

A formulação com substituição total com a carga 3, E_F_T, registou uma redução do índice de brancura que pode ser explicado pela cor acinzentada da própria matéria-prima. Será importante referir que, uma vez que esta carga funcional apresenta um tamanho de partícula deveras elevado, a tinta fica texturada, pelo que não foi medido o brilho especular.

Com exceção da tinta IE_B_2, todas as tintas da concorrência apresentam valores de viscosidade substancialmente inferiores aos das tintas que foram formuladas. As tintas IE_B_2, IE_B_3 e E_B_1 apresentam uma reduzida razão de contraste e índices de brancura. Todas as tintas sujeitas a esta análise apresentam brilhos reduzidos e, para além de serem similares entre si, são idênticos aos da formulação E_H_T.

4.1.2 Tintas de interior

Os resultados referentes à caracterização base de tintas de interior apresentam-se sumariados na Tabela 4.2. Tal como para a tinta de exterior, verificou-se uma redução da massa volúmica com a introdução de cargas funcionais, que foi menos notória nas formulações com a carga 2 (I_L_P e I_M_T), um aumento do brilho nas formulações com a carga 2 e diminuição deste parâmetro para a formulação com a carga 5 (I_N_T). De salientar que se observou um aumento da razão de contraste e aumento do índice de brancura na formulação com em que se realizou uma substituição total com a carga 2, I_M_P. A tinta da concorrência I_B_1 destaca-se das tintas de interiores formuladas pela menor razão de contraste e índice de brancura.

Tabela 4.1 - Caracterização básica das tintas de exterior

Característica	E_A	E_B_P	E_C_T	E_D_P	E_E_T	E_F_T	E_G_T	E_H_T	IE_B_1	IE_B_2	IE_B_3	E_B_1
Massa Volúmica, g·mL ⁻¹	1,402	1,11	0,933	1,257	1,211	1,014	0,967	0,951	1,545	0,943	1,102	1,022
Viscosidade Brookfield, P	316	297	299	279	257	256	278	285	192	254	120	39
Razão de Contraste, %	96,0	96,0	96,9	96,4	97,8	97,4	96,6	95,4	96,2	90,0	92,1	92,3
Índice de Brancura, %	87,3	87,3	87,1	87,7	88,8	74,2	88,9	86,6	84,8	70,8	80,9	75,1
Brilho (60° / 85°), ub	4,6/4,2	6,5/4,7	4,2/2,4	10,1/16,1	10,8/22,1	-	5,0/3,3	2,6/0,8	2,1/1,1	2,0/0,7	2,1/0,5	2,1/1,0

Tabela 4.2 - Caracterização base de tintas de interior

Característica	I_!	I_J_P	I_K_T	I_L_P	I_M_P	I_N_P	IE_B_1	IE_B_2	IE_B_3	I_B_1
Massa Volúmica, g·mL ⁻¹	1,383	1,122	1,078	1,261	1,268	1,045	1,545	0,943	1,102	0,975
Viscosidade Stormer, UK	117	123	119	115	123	126	138	-	107	122
Razão de Contraste, %	95,8	94,3	93,2	95,9	97,2	92,2	96,2	90,0	92,1	87,1
Índice de Brancura, %	85,0	85,2	86,1	86,7	88,2	84,6	84,8	70,8	80,9	81,7
Brilho (60°/85°), ub	2,3/2,5	2,4/2,6	2,3/2,5	2,7/17,7	2,8/25,7	2,0/0,5	2,1/1,1	2,0/0,7	2,1/0,5	2,4/1,3

4.2 Resultados da caracterização exhaustiva das tintas de interior e exterior

4.2.1 Caracterização transversal a tintas de exterior e interior

Resistência à fissuração de uma tinta para espessuras elevadas

Para aumentar o conforto térmico, é aconselhável que as tintas sejam aplicadas com uma maior camada, pelo que é importante avaliar a espessura a partir da qual começam a ser notórias fissuras. Tal como apresentado na Figura 4.1, nenhuma das tintas de exterior apresentou fissuras para uma espessura húmida igual ou inferior a 2000 μm , pelo que foram agrupadas na mesma coluna. Este bom resultado pode ser explicado pela elevada quantidade de ligante presente nestas formulações.

Nas tintas de interior, verifica-se que um aumento da quantidade da carga 1, nas formulações I_J_P e I_K_T, provoca uma diminuição da espessura de película a partir do qual começam a ser visíveis fissuras. Por outro lado, a incorporação da carga 2, nas formulações I_L_P e I_M_T, tem uma influência positiva na resistência à fissuração para espessuras elevadas.

Da globalidade das tintas formuladas, as que apresentam um pior desempenho são aquelas em que se realizou uma substituição total das cargas convencionais com carga 5 e carga 1, I_N_P e I_K_T, respetivamente.

No que se refere às tintas da concorrência, salienta-se o bom comportamento de IE_B_3 e E_B_1, que contrastam com os resultados dos produtos IE_B_1 e I_B_1.

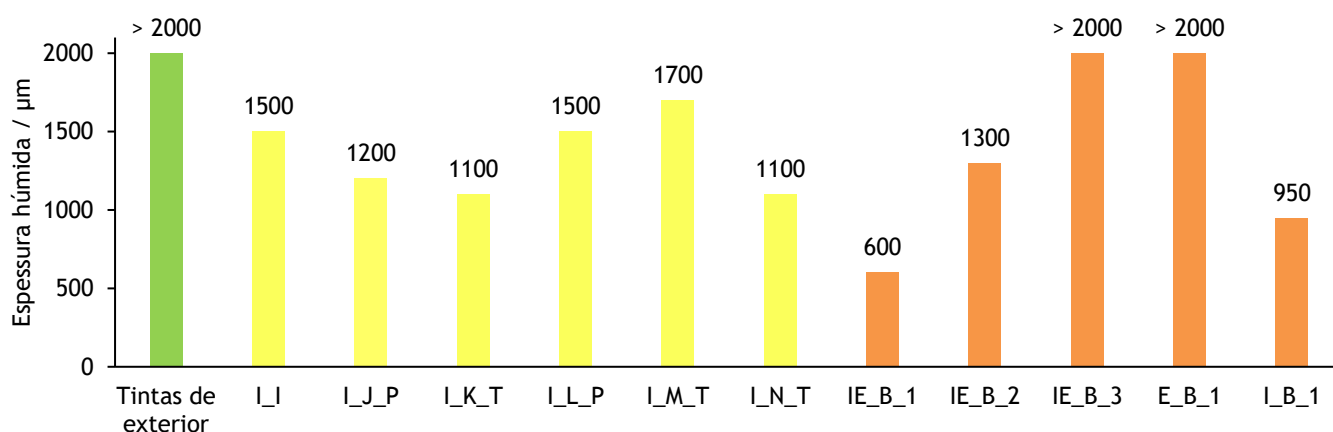


Figura 4.1 - Espessura húmida (em μm) a partir da qual são visíveis fissuras.

Fissuração *mudcraking*

Da globalidade das tintas ensaiadas, apenas duas registaram alterações da película no ensaio da fissuração *mudcraking*. A tinta de interior em que se realizou uma substituição parcial das cargas convencionais com a carga 5, I_N_P, apresenta fissuras apenas detetáveis à lupa, sendo classificada com 3, enquanto na que tinta da concorrência IE_B_3 se verificaram fissuras dificilmente visíveis a olho nu, pelo que foi avaliada com 2.

Resistência à água e amónia

No ensaio da resistência à amónia, apenas a tinta da concorrência I_B_1 apresentou empolamento da película ao fim de 9 minutos com posterior recuperação. Todas as restantes tintas ensaiadas apresentaram um bom desempenho em ambos os ensaios, sendo que ao fim de 10 minutos apenas se verificou um amolecimento da película.

Temperatura mínima de formação de película

Todas as tintas avaliadas no contexto deste ensaio apresentam um bom desempenho, uma vez que a temperatura mínima de formação de película é superior a 0 °C. Este resultado significa que as partículas de ligante de todas as tintas estudadas têm a capacidade de coalescer a temperaturas superiores a 0 °C, o que permite a formação de películas uniformes.

Resistência aos álcalis e ligantes hidráulicos

Da globalidade de tintas ensaiadas na resistência aos ligantes hidráulicos, apenas se verificou empolamento na película da tinta da concorrência IE_B_2, cuja alteração se apresenta na

Figura 4.2.

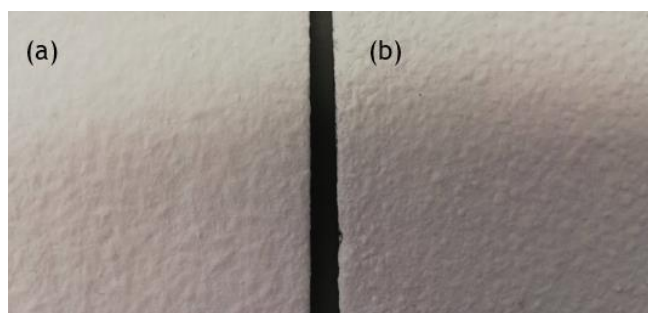


Figura 4.2 - Empolamento da película da tinta IE_B_2, decorrente do ensaio da resistência aos álcalis. (a) Padrão e (b) provete sujeito ao ensaio.

Aplicação prática

Para facilitar a leitura, os resultados da aplicação prática das tintas de exterior e exterior são apresentados no Apêndice A. Relativamente à tinta de exterior (Figura A.1) destaca-se o bom desempenho de todas as formulações relativamente à aplicabilidade, espalhamento, opacidade seca e brancura de todas as tintas formuladas.

No que se refere às tintas da concorrência de exterior, a tinta IE_B_1 destaca-se pela melhor brancura. O produto IE_B_2 deixa uma maior camada durante a aplicação, o que se traduz num pior espalhamento. Uma consequência da maior espessura de produto é a maior opacidade seca que este apresenta. As tintas IE_B_3 e E_B apresentam resultados bastante similares, diferindo apenas no pior espalhamento do revestimento IE_B_3.

As tintas de interior (Figura A.2) apresentam mais uma vez uma boa e igual aplicabilidade e espalhamento. No que se refere à suavidade ao toque, salienta-se o melhoramento deste parâmetro com o aumento da quantidade de carga 1 (I_J_P e I_K_T). Todas as formulações com carga 2 (I_L_P e I_M_T) apresentam uma boa classificação neste parâmetro. A formulação com a carga 5 (I_N_T) apresenta uma reduzida suavidade ao toque, explicada pela maior rugosidade da película.

A tinta da concorrência I_B_1 difere das tintas de interior formuladas no âmbito deste projeto pela superior opacidade seca e brancura e menor suavidade ao toque. A tinta IE_B_2 apresenta mais uma vez uma opacidade seca consideravelmente superior.

4.2.2 Caracterização de tintas de exterior

Manchamento pela água (*'Snail Trails'* / Exsudações)

Não se verificou nenhuma alteração de brilho ou manchamento decorrentes da incidência continuada de água para nenhuma das tintas ensaiadas, pelo que se comprova que a introdução de cargas funcionais permite formular tintas bastante resistentes a alterações provocadas pela chuva intensa.

Resistência à lixiviação de surfactantes

Tal como no ensaio do manchamento pela água, não se verificou nenhum defeito na película para o ensaio da resistência à lixiviação de surfactantes. É possível concluir que as tintas formuladas com cargas funcionais são bastante resistentes a alterações provocadas pela interação com a água, mesmo para curtos tempos de secagem.

Resistência de uma película de tinta às cinzas

Na Figura 4.3 apresentam-se os resultados do ensaio da resistência às cinzas após limpeza húmida da película de tinta. Verificou-se que a introdução das cargas 3 e 5, introduzidas nas formulações E_F_T e E_H_T, diminui a resistência da tinta às cinzas. Este resultado poderá ser explicado pelo elevado tamanho de partícula de ambas as cargas, que confere maior rugosidade à película e dificulta o processo de limpeza. Na Figura 4.4 é apresentado o resultado do ensaio para a formulação E_F_T. Esta tendência também foi observada nos produtos da concorrência IE_B_2, IE_B_3 e E_B_1.



Figura 4.3 - Diferença de cor registada após limpeza húmida das películas de tinta sujeitas ao ensaio da resistência às cinzas.

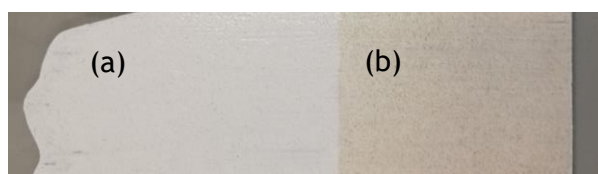


Figura 4.4 - Resultado do ensaio da resistência à cinzas para a tinta E_F_T, em que (a) corresponde à zona que se manteve inalterada e (b) o local que foi sujeito à aplicação das cinzas.

4.2.3 Caracterização de tintas de interior

Resistência às nódoas (manchamento prático)

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.5, todas as tintas avaliadas no âmbito do ensaio resistência às nódoas apresentam uma alteração entre moderada a muito profunda. O pior resultado da tinta I_N_P pode mais uma vez ser explicado pelo maior tamanho de

partícula da carga 5. As tintas da concorrência apresentaram piores resultados, com exceção da I_B_1. A tinta que verificou um manchamento mais severo foi a IE_B_1.

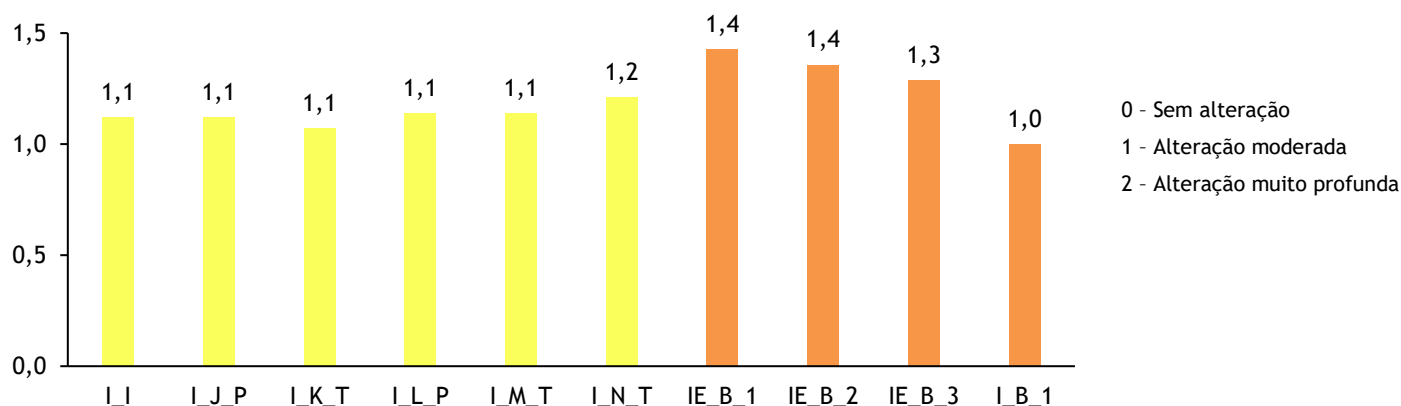


Figura 4.5 - Resultados do ensaio da resistência às nódoas.

Resistência ao polimento (polimento prático)

Tal como apresentado na Figura 4.6, referente aos resultados do polimento prático seco e húmido, verificou-se que a formulação que registou uma menor variação de brilho corresponde à que foi formulada só com cargas convencionais, tinta I_I. As formulações com a carga 1 possuem uma elevada variação de brilho, que poderá estar associado à baixa dureza desta carga funcional. Os produtos IE_B_1 e IE_B_3 possuem microesferas de vidro nas suas formulações e, tal como a tinta I_N_P, apresentam uma boa resistência em ambos os polimentos.

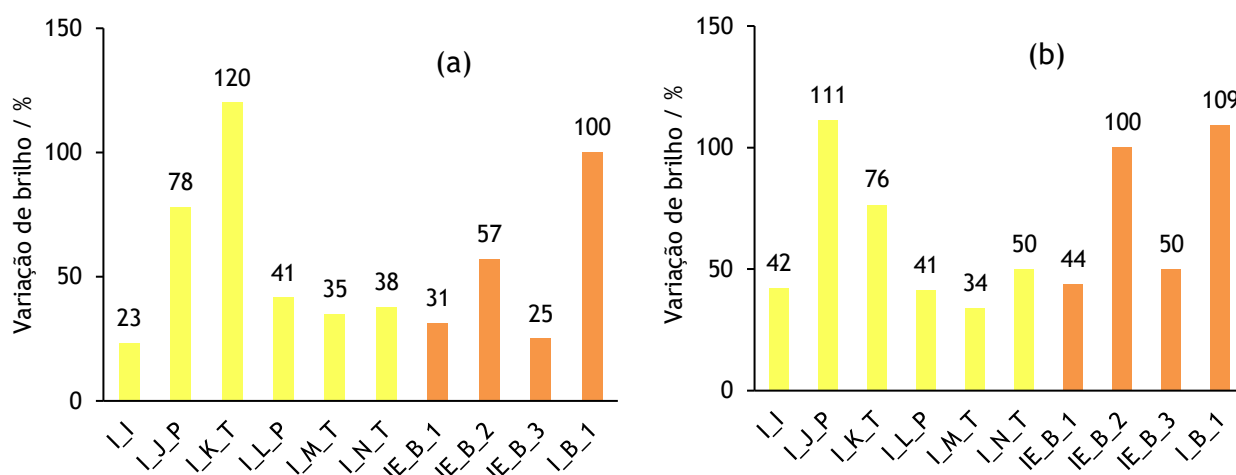


Figura 4.6 - Variação de brilho decorrente do polimento (a) seco e (b) húmido.

Resistência à esfrega húmida

As tintas são agrupadas em classes de acordo com a perda média de espessura de película decorrente do ensaio da resistência à esfrega húmida, tal como indicado na norma NP EN 13300 [53]. Todas as tintas formuladas, com exceção da I_K_T, apresentam uma boa resistência à esfrega, pelo que se inserem na classe 1. A tinta I_K_T apresenta um pior comportamento neste ensaio (classe 2), que poderá ser explicado pela menor dureza da carga 1.

Os produtos IE_B_3 e I_B_1, são classificados como classes 2 e 3, são as tintas da concorrência que obtiveram melhores resultados. As tintas IE_B_1 e IE_B_2 apresentam uma perda de espessura de película muito elevada, sendo que ao fim de 200 ciclos de limpeza é visível o substrato. Para estes dois revestimentos, seria necessário repetir o procedimento com menos ciclos de limpeza mas, devido à escassez de tempo, não foi possível realizar esta parte do ensaio. Deste modo, apenas é possível afirmar apresentam uma classe superior à 3. Na Figura B.1 (Apêndice B) estão representadas as imagens dos ensaios realizados com as tintas IE_B_1, IE_B_2 e I_B_1.

4.3 Resultados da regularização de massas de regularização

4.3.1 Caracterização base de massas de regularização

Viscosidade *penetrometer*

Na Figura 4.7 encontram-se sumariados os resultados do ensaio da viscosidade *penetrometer*. A massa de regularização formulada simultaneamente com cargas 1 e 3, MR_P_T, apresenta um valor de deslocamento decorrente da penetração do cone de 313 mm, que é consideravelmente superior ao valor de 295 mm que foi determinado para a formulação com cargas convencionais, MR_O. Por outro lado, as duas formulações que incorporam a carga 5 apresentam um valor de viscosidade *penetrometer* menor, sendo que a MR_R_T obteve um valor igual ao que foi determinado para a massa de regularização sem cargas funcionais, MR_O.

A massa de regularização da concorrência, MR_B_1, apresenta um valor de viscosidade *penetrometer* de 189 mm, que é bastante interior ao que foi determinado qualquer uma das formulações produzidas no âmbito deste projeto.

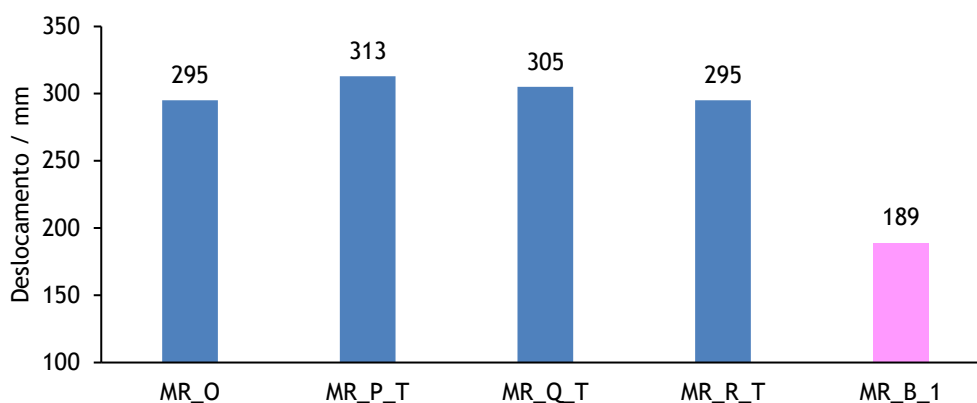


Figura 4.7 - Deslocamento provocado pela penetração do cone no ensaio da viscosidade penetromer.

4.3.2 Caracterização exhaustiva de massas de regularização

Aplicação Prática

Da aplicação prática das massas de regularização, que se apresenta no Apêndice A (Figura A.3), destaca-se a melhor aplicabilidade da massa de regularização com substituição total com as cargas 1 e 3, MR_P_T, que contrasta com o resultado obtido pela massa de regularização da concorrência, MR_B_1. A massa de regularização da concorrência e as formulações que contêm a carga 5, MR_Q_T e MR_R_T, destacam-se pela sua maior lixabilidade. Será importante referir que em nenhum dos produtos se observou fissuração ou abatimento nos esquadros de 2 e 4 mm.

Dureza *Hermelin*

Através da análise da análise da Figura 4.8, é possível verificar que a introdução de cargas funcionais provoca uma indesejável redução da dureza *Hermelin*. A introdução da carga 1 nas formulações MR_P_T e MR_Q_T pode justificar o pior desempenho neste ensaio, uma vez que esta matéria-prima é caracterizada pela reduzida dureza.

Formulou-se também uma massa de regularização em que se realizou uma substituição total das cargas convencionais com a carga 3. Embora apresentasse um maior valor de dureza, optou-se por não prosseguir com a caracterização, uma vez que apresentava maus resultados de lixabilidade e aplicabilidade. De igual forma foi formulada uma massa de regularização somente com a carga 1 mas, uma vez que apresentava fissuração nos esquadros de 2 e 4 mm, optou-se por não se prosseguir com os ensaios. Dada a má aplicação prática desta última formulação, não foi possível determinar a sua dureza *Hermelin*.

Tendo estes dois fatores em consideração, formulou-se uma massa de regularização que contém simultaneamente as cargas 1 e 3, MR_P_T, e que apresenta um valor de dureza *Hermelin* bastante superior ao das restantes formulações em que foram introduzidas cargas funcionais. De salientar que o risco nesta massa de regularização não é muito uniforme, o que pode ser explicado pelo elevado tamanho de partícula da carga 3.

As massas de regularização que contêm a carga 5, MR_Q_T e MR_R_T, apresentam uma baixa dureza, resultando num valor de dureza *Hermelin* similar ao que foi determinado para a massa de regularização da concorrência, MR_B_1.

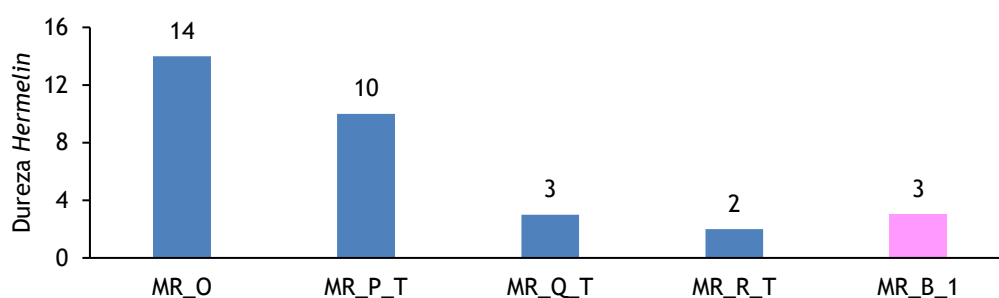


Figura 4.8 - Resultados do ensaio da dureza *Hermelin*.

Resistência à absorção de água

Tal como apresentado na Figura 4.9, a massa de regularização MR_P_T foi a que teve um melhor comportamento no ensaio de absorção de água, resultado que contrasta com o obtido pela massa de regularização da concorrência, MR_B_1. A formulação com as cargas 1 e 5, MR_Q_T, apresenta uma menor resistência à absorção de água e este comportamento é muito similar ao que foi registado para o produto que não incorpora cargas funcionais, MR_O.

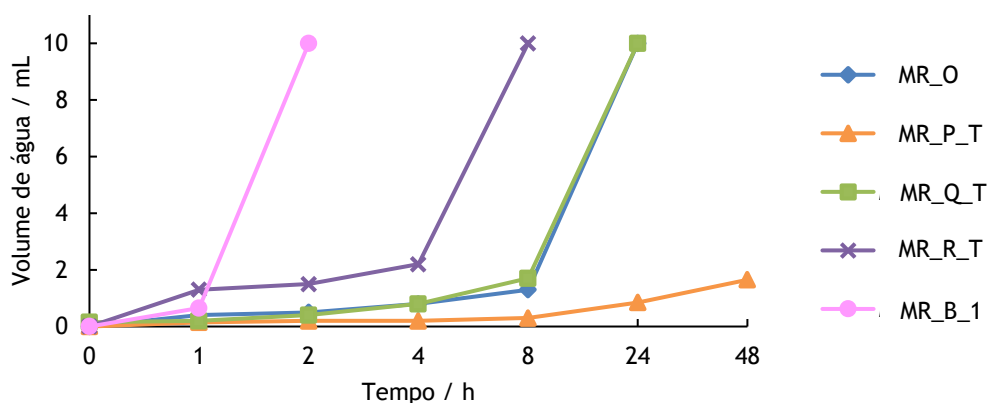


Figura 4.9 - Evolução da quantidade de água absorvida pelas massas de regularização, ao longo do tempo.

Repintura / aderência

Após a aplicação do esquema de pintura recomendado sobre as massas de regularização verificou-se, de uma forma geral, um bom acabamento de todas as superfícies. De salientar que a elevada rugosidade da superfície da massa de regularização MR_P_T não permite um acabamento final tão uniforme, explicado pelo elevado tamanho de partícula da carga 3. Deste modo, sobre este produto deve ser aplicado um produto com menor rugosidade que permita uniformizar a superfície e, só após este procedimento, é aconselhável aplicar o primário. Neste sentido, este revestimento está restringido à utilização como massa de enchimento, uma vez que não é adequado para fazer um barramento da superfície antes da aplicação direta do esquema de pintura. Visto que possuem um acabamento mais liso, os restantes produtos podem ser usados como massas de acabamento.

No Apêndice C (Figura C.1) é possível verificar que todas as massas de regularização, com exceção da que foi formulada com as cargas 1 e 3, MR_P_T, apresentam um grande destacamento da superfície. Em todos os casos, a falta de coesão aparenta ser da própria massa de regularização.

4.4 Resultados da caracterização específica

4.4.1 Refletância solar total

Da análise da Figura 4.10, evidencia-se o reduzido valor da TSR da formulação E_F_T, o que pode ser em parte explicado pela cor acinzentada da carga 3. O aspeto texturado desta tinta, o baixo índice de brancura e a baixa TSR constituíram fatores determinantes para o abandono da caracterização mais aprofundada através do ensaio de aplicação prática.

A tinta em que foi realizada a substituição parcial das cargas convencionais com a carga 2, E_D_P, apresenta um valor de TSR de 90%, que é superior ao que foi obtido para a formulação sem cargas funcionais, E_A, 89%. Devido ao elevado resultado de TSR da primeira formulação indicada, seria expectável que a formulação em que se realizou uma substituição total com a carga 2, E_E_T, tivesse também uma boa capacidade de reflexão da luz solar. Tal como foi referido, nesta formulação optou-se por incorporar silicatos de magnésio para reduzir o elevado brilho especular. Uma vez que a tinta E_E_T apresenta um valor de TSR de apenas 84%, optou-se por estudar a influência que a incorporação de silicatos de magnésio exerce na refletância das tintas. A Figura 4.11 apresenta o valor da refletância para todos os comprimentos de onda em que foi realizada a medição para três tintas diferentes com diferentes frações mássicas de silicatos de magnésio. Por questões de confidencialidade estes valores não são revelados e assume-se x e $2x\%$ como as concentrações mássicas de silicatos de magnésio usadas. Para

comprimentos de onda entre os 350 e 750 nm, que correspondem à fração de luz visível do espectro eletromagnético, verifica-se uma redução da refletância para as formulações que incorporam silicatos de magnésio, que pode ser explicada pela cor mais acinzentada da própria matéria-prima [8]. A maior parte dos comprimentos de onda na região do infravermelho próximo (em inglês: *Near-infrared* - NIR), registam também menores valores de refletância para maiores quantidades de silicatos de magnésio. Ainda assim, será importante reforçar que as formulações sem silicatos de magnésio e com apenas $x\%$ (m/m) desta carga não foram alvo de estudo uma vez que, para além do elevado brilho, apresentavam uma grande pegajosidade.



Figura 4.10 - Refletância solar total das tintas de exterior.

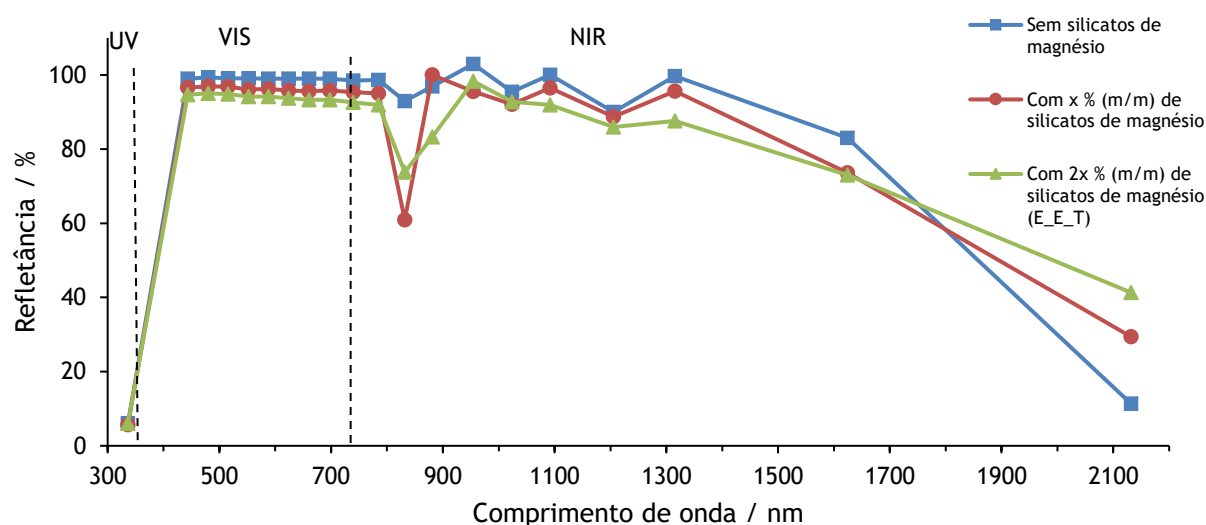


Figura 4.11 - Espectros da refletância da radiação solar para as formulações em que se realizou uma substituição total com carga 2 e com diferentes frações mássicas de silicatos de magnésio.

4.4.2 Calor específico a pressão constante

Na Figura 4.12 apresentam-se os resultados referentes do calor específico a pressão constante dos produtos. Verifica-se que as tintas possuem valores de C_p similares e que a introdução de cargas funcionais não exerce uma influência significativa na alteração deste valor. Destaca-se também o menor valor de C_p das massas de regularização.

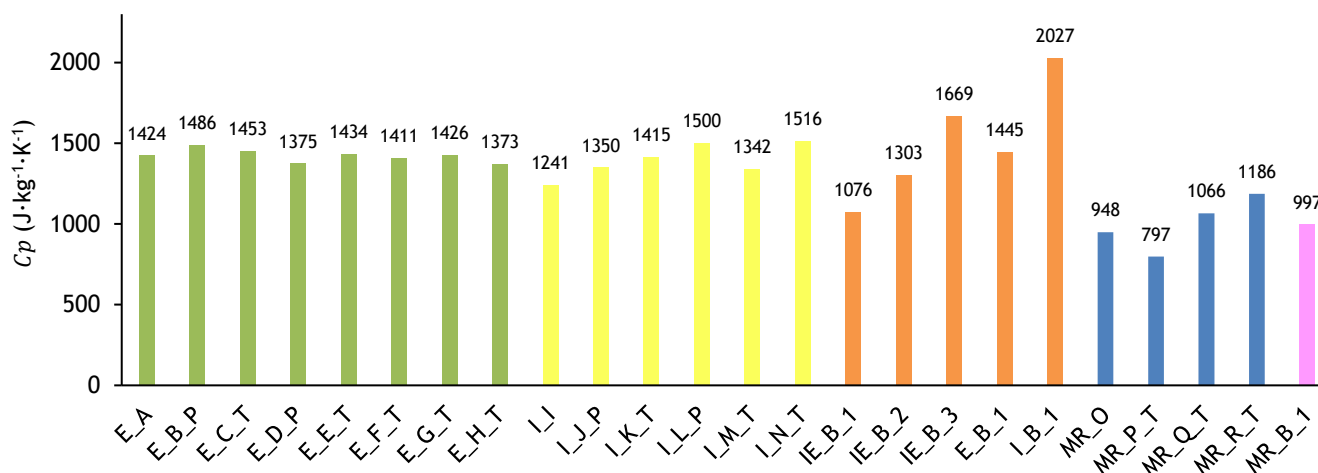


Figura 4.12 - Calor específico a pressão constante dos produtos.

Salienta-se o facto de a tinta da concorrência I_B_1 apresentar um valor de C_p mais elevado. Uma análise mais cuidada dos resultados obtidos por DSC permitiu também retirar outras conclusões interessantes para esta tinta (Figura 4.13). Verificaram-se dois picos endotérmicos de 1,43 e 10,62 kJ·kg⁻¹ para as temperaturas de 0 e 27 °C, respetivamente, que deverão estar relacionados com a presença de *phase change materials* (PCM). Estas cargas funcionais possuem materiais encapsulados com transição de fase às temperaturas referidas anteriormente [54]. Durante a mudança de fase é absorvido calor latente, pelo que não ocorre um aumento de temperatura significativo. A inércia térmica está associada à elevada capacidade em absorver ou libertar energia sob a forma de calor sensível ou latente [54]. Assim, a incorporação de PCM pode ser interessante para aumentar a inércia térmica dos revestimentos. Será importante referir que este tipo de materiais não é caracterizado por uma baixa condutividade térmica, pelo que não pode ser considerado termicamente isolante.

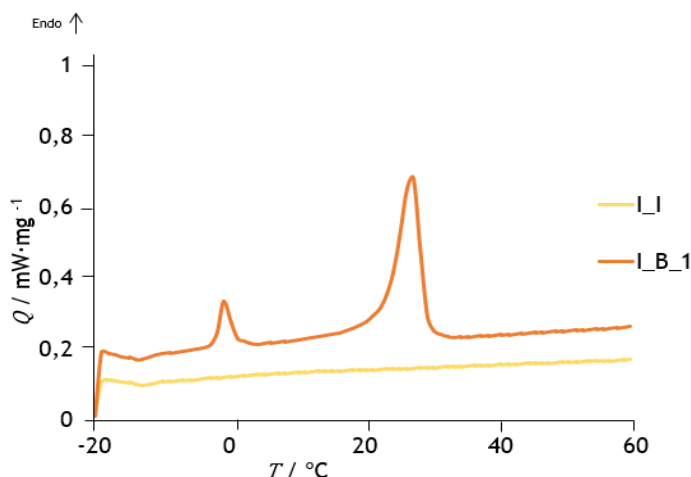


Figura 4.13 - Resultados da análise da tinta I_B_1 por Calorimetria Diferencial de Varrimento.

4.4.3 Microscopia eletrónica de varrimento

O ensaio de microscopia eletrónica de varrimento permitiu retirar conclusões acerca da morfologia de todos os revestimentos. No Apêndice D, é apresentada a globalidade das imagens captadas neste ensaio.

Tal como seria de esperar, as formulações que apenas incorporam cargas convencionais (E_A, I_I e MR_O) apresentam uma estrutura bastante compacta e a introdução das cargas funcionais permite aumentar a porosidade. Este aumento da porosidade dever-se-á refletir numa desejável diminuição da condutividade térmica dos revestimentos, dado que a condução de calor na fase sólida é largamente reduzida. Uma vez que não é visível nenhuma intrusão polimérica no interior das microsferas, a rutura das microsferas, que é visível em muitas das imagens, deverá estar apenas relacionada com o modo de preparação das amostras, dado que se realizou um corte transversal para avaliar a morfologia.

Nas imagens referentes às tintas formuladas com a carga 2, E_E_T e I_M_T, não é possível identificar claramente esta carga funcional. Será importante referir que a carga lamelar na formulação E_E_T corresponde aos silicatos de magnésio.

As tintas de interior apresentam uma menor quantidade de ligante do que as tintas de exterior, dado que as últimas são tintas elastoméricas que são caracterizadas por uma grande quantidade deste componente que conferem, por exemplo, uma boa resistência à intempérie. As massas de regularização destacam-se pela maior quantidade de cargas funcionais e, dado que este é o revestimento que é aplicado com uma maior espessura, deverá ser o que mais contribuirá para o aumento do isolamento térmico.

Este ensaio foi uma mais valia para identificar o tipo de cargas funcionais utilizadas nos produtos da concorrência. A análise elementar, cujos espectros também se apresentam no Apêndice D, permitiu concluir que os produtos IE_B_1, IE_B_2 e MR_B_1 apresentam microesferas de vidro na sua composição.

4.4.4 Condutividade térmica

Tal como referido na secção 3.2.7, não foi possível obter valores de condutividade térmica que estivessem de acordo com os dados presentes na literatura. Achar e Procopio [37] estudaram tintas aquosas com resina acrílica que incorporavam microesferas de vidro ocas e partículas de sílica sintética amorfa, obtendo valores de condutividade térmica entre 0,08 e 0,13 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Os valores da condutividade térmica das formulações estudadas no âmbito desta dissertação estimaram-se entre os 0,01 e 0,03 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, que para além de serem muito inferiores aos que são referidos na literatura, não são razoáveis, tendo em conta que as próprias cargas funcionais apresentam uma condutividade térmica superior (Tabela 2.2).

As limitações da aplicação deste método estão relacionadas com vários fatores, entre os quais a falta de dados das características do termopar, nomeadamente o $C_{p_{\text{termopar}}}$ e m_{termopar} . Utilizou-se um termopar embainhado para que a película de tinta aplicado fosse o mais uniforme possível. No entanto, há que salientar que a própria bainha do termopar constitui uma resistência à transferência de calor, cuja contribuição não foi possível estimar de forma adequada.

Para que o modelo da capacitância seja aplicável, a resistência externa ao termopar deve ser muito elevada. Uma vez que a película de tinta aplicada em torno do termopar tem uma espessura bastante reduzida, é muito provável que a tinta não exerça uma resistência térmica suficientemente elevada. Isto é comprovado pelo valor de Bi que, em muitos dos casos avaliados, chega a ser igual a 0,3.

4.4.5 Simulação em *SolidWorks*

Os resultados referentes à temperatura da superfície interna da parede obtidos através da simulação em *SolidWorks* apresentam-se sumariados na

Figura 4.14. Dado que inicialmente a superfície interna se encontra a 20 °C, a aplicação do sistema ETICS permitiu obter uma menor alteração neste parâmetro, ou seja, conclui-se que este sistema confere um isolamento térmico mais eficaz.

Quando é aplicada a cor branca no exterior, a tintas e massa de regularização termicamente isolantes contribuem pouco para o aumento do conforto térmico, uma vez que a diferença de

temperatura em comparação com a aplicação de tintas convencionais é de apenas 0,2 °C. A diferença de temperaturas entre a aplicação das tintas e massa de regularização termicamente isolante e o sistema ETICS com 40 mm de EPS foi superior e igual a 1,2 °C. Este resultado está de acordo com o esperado, uma vez que a camada de poliestireno expandido, que é colocado no sistema ETICS, apresenta um valor de $R_{t\acute{e}rmica}$ - calculado através da equação (1.1) - cerca de 21 vezes superior ao que é obtido pela aplicação das tintas e massa de regularização termicamente isolantes.

Colocou-se também a hipótese de aplicar apenas 5,8 mm de material termicamente isolante no sistema ETICS. Este valor corresponde à espessura total de tintas e massa de regularização termicamente isolantes. Tal como seria de esperar, a temperatura da superfície interna é muito mais próxima do sistema com tintas e massa de regularização, mas inferior, dado que o poliestireno expandido possui uma condutividade térmica muito menor.

Adicionalmente, o estudo da cor da superfície externa da parede permitiu obter resultados interessantes. Será importante referir que não se apresentam os resultados referentes à tinta e massa de regularização termicamente isolantes com revestimento exterior escuro, dado que o Grupo CIN não pretende apostar em tintas isolantes escuras. Visto que o coeficiente de absorção da radiação solar da cor escura é muito maior ao que foi estabelecido para a cor branca (Tabela 3.5), a temperatura no interior da habitação é superior. Em superfícies escuras, a fração de energia absorvida é consideravelmente superior, sendo depois transferida por condução ao longo da parede, o que provoca um aumento da temperatura da superfície interna. Salienta-se o facto de a aplicação do sistema ETICS com um revestimento exterior escuro permitir um isolamento melhor do que a aplicação do sistema com tintas e massa de regularização termicamente isolantes com um revestimento exterior branco, dado que a alteração da temperatura da superfície interna é superior no segundo caso.

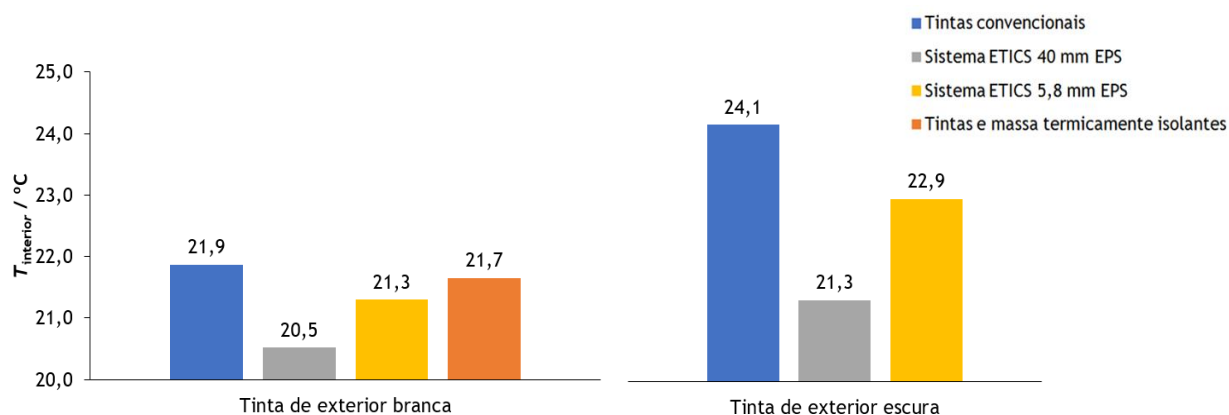


Figura 4.14 - Temperatura da superfície interna da parede.

Para todos os casos de estudo determinaram-se os perfis de temperatura ao longo da parede, que são apresentados e analisados no Apêndice E.

5 Conclusões

O conforto térmico das habitações é um tema central na atualidade, sendo que uma forma de alcançar esse objetivo é através do desenvolvimento de meios passivos de climatização eficientes e economicamente viáveis. A presente dissertação teve como principal objetivo o estudo de tintas e massas de regularização termicamente isolantes, através da incorporação de cargas funcionais. Foi também realizado um estudo dos produtos da concorrência, através de uma análise de *benchmarking*.

Os ensaios de caracterização permitiram estudar a influência da incorporação de microesferas ocas e partículas de sílica sintética amorfa nas propriedades dos produtos formulados. Para além da baixa condutividade térmica, estas cargas são também caracterizadas pela reduzida massa volúmica, o que provoca uma diminuição da massa volúmica do próprio produto.

Verificou-se que a introdução da carga 2 provoca um aumento brilho. Uma vez que se pretende formular tintas de baixo brilho, mate, este problema foi minimizado nas tintas de exterior através da introdução de silicatos de magnésio, que possui um maior tamanho de partícula e maior absorção de óleo. Por outro lado, o elevado tamanho de partícula da carga 3 provoca uma diminuição do brilho das formulações.

Em relação às tintas de exterior, a introdução de das cargas 3 e 5 afetou negativamente a resistência às cinzas, que mais uma vez pode ser consequência do elevado tamanho de partícula. Adicionalmente, verificou-se que a carga 3 diminui o valor da refletância solar total da película, que em parte pode ser explicado pela cor acinzentada desta carga funcional. A carga 1 deverá ser a mais adequadas para tintas de exterior, uma vez que demonstraram ter um melhor resultado na globalidade dos ensaios.

Relativamente às tintas de interior, a introdução da carga 1 diminui a resistência mecânica da película de tinta, algo que se manifestou no pior desempenho dos ensaios da resistência à esfrega e polimento. Este resultado poderá estar relacionado com a baixa dureza desta matéria prima. Da globalidade dos resultados, a carga 2 poderá ser a mais interessante para a aplicação em tintas de interior. Ainda assim, é necessário corrigir o elevado brilho provocado por esta carga, que poderá ser feito através da introdução de silicatos de magnésio, tal como se fez para a tinta de exterior.

No que se refere às massas de regularização, salienta-se o facto de a introdução da carga 3 potenciar a resistência à absorção de água e a aderência ao esquema de pintura. Ainda assim, esta carga funcional deverá ser utilizadas em conjunto com a carga 1, que permite melhorar a lixabilidade e aplicabilidade. Salienta-se o facto de uma formulação deste tipo não ser adequada como massa de acabamento, devido à elevada rugosidade.

Os produtos avaliados por intermédio da análise de *benchmarking* apresentam, de uma forma geral, um pior desempenho. Esta conclusão é evidenciada pela análise dos resultados da resistência à esfrega, resistência aos álcalis e ligantes hidráulicos, resistência às cinzas e resistência à absorção de água.

A determinação da condutividade térmica dos revestimentos foi inicialmente baseada no modelo da capacitância. Uma vez que os resultados obtidos segundo este método não se enquadravam no que está descrito na literatura, estudou-se a possibilidade de realizar um ensaio normalizado através de uma entidade externa; no entanto, verificou-se mais tarde não ser possível.

A realização da simulação em *SolidWorks* permitiu concluir que o sistema ETICS é a solução mais adequada para garantir um melhor conforto térmico da habitação. Este resultado está de acordo com o previsto, dado que o poliestireno expandido, material termicamente isolante convencional selecionado para realizar a simulação, apresenta uma resistência à condução do calor cerca de 21 vezes superior a um sistema constituído por tintas e massa de regularização termicamente isolantes.

A avaliação da viabilidade dos revestimentos formulados para aumentar a resistência térmica dos edifícios deverá ser complementada com a determinação rigorosa da condutividade térmica.

6 Avaliação do trabalho realizado

6.1 Objetivos Realizados

O principal objetivo deste projeto prendia-se com a formulação e caracterização de tintas e massas de regularização termicamente isolantes. Este objetivo pode considerar-se parcialmente realizado, dado que não foi possível determinar a condutividade térmica dos revestimentos. Ainda assim, salienta-se a estudo detalhado sobre a avaliação das características das cargas funcionais nos três tipos de revestimentos desenvolvidos.

A simulação em *SolidWorks*, que constitui um ponto inovador neste projeto, foi essencial para analisar comparativamente a contribuição de três tipos de revestimentos no aumento do conforto térmico da habitação. Este estudo permitiu adicionalmente evidenciar que a cor do revestimento aplicado na superfície externa do edifício exerce uma grande influência no conforto térmico.

6.2 Outros Trabalhos Realizados

A curta duração do projeto bem como a dificuldade de realização do ensaio de condutividade limitaram o desenvolvimento de um estudo mais alargado sobre os revestimentos termicamente isolantes. De seguida enumeram-se alguns tópicos que podem constituir um ponto de partida para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de um método e instalação experimental que permita uma correta avaliação da condutividade térmica. Este trabalho poderá ser baseado na norma EN 12667, referente à determinação da resistência térmica pelos métodos de placa quente protegida e fluxometria de calor.
- Realização de ensaios adicionais da caracterização exaustiva dos revestimentos, tais como a resistência à radiação QUV-A e permeabilidade à água líquida e vapor de água.
- Estudo da introdução de materiais de mudança de fase (PCM).

6.3 Apreciação Final

O trabalho realizado no âmbito deste projeto constitui um bom ponto de partida para o desenvolvimento de tintas e massas de regularização termicamente isolantes, dada a caracterização aprofundada que foi realizada. Embora os materiais termicamente isolantes convencionais apresentam geralmente uma maior resistência térmica, devido à maior espessura com que são aplicados e muito baixa condutividade térmica, as tintas e massas de regularização são um produto com potencial, devido à maior facilidade de aplicação.

7 Referências

1. Dias, D., J. Machado, V. Leal e A. Mendes, *Impact of using cool paints on energy demand and thermal comfort of a residential building*. Applied Thermal Engineering, 2014. **65**(1-2): p. 273-281.
2. Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho. Jornal Oficial da União Europeia, 2018.
3. Giuseppe, E.D., *Nearly Zero Energy Buildings and Proliferation of Microorganisms - A Current Issue for Highly Insulated and Airtight Building Envelopes*, ed. Springer. 2010, Marcos. pag: 1 - 3.
4. Eurostat, C.E. - *Can you afford to heat your home?*. Acedido a 13 de março de 2019; Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20190131-1?inheritRedirect=true&redirect=%2Feurostat%2F>.
5. *Energy performance of buildings*. Acedido a 4 de abril de 2019; Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings>.
6. Verbeke, S. e A. Audenaert, *Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **82**: p. 2300-2318.
7. Dumitrescu, L., I. Baran, e R.A. Pescaru, *The Influence of Thermal Bridges in the Process of Buildings Thermal Rehabilitation*. Procedia Engineering, 2017. **181**: p. 682-689.
8. Holman, J.P., *Heat Transfer*. 10 ed. 2010, Londres: McGraw-Hill.
9. Stoye, D. e W. Freitag, *Paints, Coatings and Solvents*. 2 ed. 1998, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH.
10. Nogueira, J.L., *Noções Básicas de Tintas e vernizes* Vol. I. 2008: Coleção ARCP - Associação Rede de Competência em Polímeros, Porto.
11. CIN Corporativo. Acedido a 14 de março de 2019; Disponível em: <https://www.cin.com/pt/corporativo.htm>.
12. R. Welty, J., C. E. Wicks, e R. E. Wilson, *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*. 2008, Oregon: John Wiley & Sons, Inc.
13. Y. A. Cengel, e A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer - Fundamentals & Applications*. 5 ed. 2015, Nova Iorque: McGraw-Hill.
14. Notario, B., J. Pinto, e E. Solorzano, *Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams*. Polymer, 2015. **56**: p. 57-67.
15. Jelle, B., *Nano-based thermal insulation for energy-efficient buildings*. 2016. p. 129-181.
16. Amaro, B., D. Saraiva, e J. de Brito, *Inspection and diagnosis system of ETICS on walls*. Construction and Building Materials, 2013. **47**: p. 1257-1267.
17. Sistema CIN-K. Acedido a 20 de março de 2019; Disponível em: https://deco.cin.com/pt/produtos/cin-k_343.html.
18. Oliveira Malanho, S.d., *Avaliação do desempenho de ETICS com acabamento de ladrilhos cerâmicos*, in Engenharia Civil. 2012, Universidade de Aveiro.
19. Sandin, O., J. Peter, e M. Jonsson, *Reflective properties of hollow microspheres in cool roof coatings*. 2017. pag: 1-5.

20. Chen, J., Y. Xiao, e B. Huang, *Sustainable cool pigments based on iron and tungsten co-doped lanthanum cerium oxide with high NIR reflectance for energy saving*. Dyes and Pigments, 2018. **154**: p. 1 - 7.
21. Pal, S., V. Contaldi, e A. Licciulli, *Self-Cleaning Mineral Paint for Application in Architectural Heritage*. Vol. 6. 2016. 48.
22. Matias, L., L. Gonçalves, e A. Costa, *Cool Façades - Thermal Performance Assessment Using Infrared Thermography*. Key Engineering Materials, 2015. **634**: p. 14-21.
23. *Tintas e vernizes de elevado desempenho e reduzido impacto ambiental*. Acedido a 4 de abril de 2019; Disponível em: https://www.cin.com/pt/corporativo/sustentabilidade/produtos-sustentaveis_68.html.
24. Sousa, B., *Desenvolvimento de Formulações Orientativas de Tintas para Renovação*, in *Engenharia Química*. 2018, Universidade Nova de Lisboa.
25. Amos, S.E. e W. Beck, *Hollow Glass Microspheres for Plastics, Elastomers, and Adhesives Compounds*, ed. S.E. Amos and B. Yalcin. 2015, Oxford: William Andrew Publishing.
26. Sahu, P.K., P. Mahanwar, e V.A. Bambole, *Effect of hollow glass microspheres and cenospheres on insulation properties of coatings*. Vol. 42. 2013.
27. Wypych, G., *Functional Fillers: Chemical Composition, Morphology, Performance, Applications*. 2018, Toronto: ChemTec Publishing.
28. Robert, M., J. Almeida, e F. Gatamorta, *Thixoinfiltration: a new approach to produce cellular and other low density metallic materials*. Vol. 40. 2010.
29. Żyrkowski, M., R.C. Neto, e L. Santos, *Characterization of fly-ash cenospheres from coal-fired power plant unit*. Fuel, 2016. **174**: p. 49-53.
30. *Insulating Paint Powder*. Acedido a 27 de abril de 2019; Disponível em: https://www.nasa.gov/topics/nasalife/green_paint.html.
31. Wang, F., J. Sheng Liang, e Q. Guo Tang, *Preparation and Properties of Thermal Insulation Latex Paint for Exterior Wall Based on Defibred Sepiolite and Hollow Glass Microspheres*. Vol. 58. 2009. 103-108.
32. Abu-Zahra, N. e P. Khoshnoud, *Effect of Cenosphere Fly Ash on the Thermal, Mechanical, and Morphological Properties of Rigid PVC Foam Composites*. Vol. 4. 2015. 1-14.
33. Loomis, J., P. Xu, e B. Panchapakesan, *Stimuli-responsive transformation in carbon nanotube/expanding microsphere-polymer composites*. Nanotechnology, 2013. **24**(18): p. 185703.
34. Kiil, S., *Model-based analysis of thermal insulation coatings*. Journal of Coatings Technology and Research, 2014. **11**(4): p. 495-507.
35. Thapliyal, P.C. e K. Singh, *Aerogels as Promising Thermal Insulating Materials: An Overview*. Journal of Materials, 2014.
36. Kiil, S., *Quantitative analysis of silica aerogel-based thermal insulation coatings*. Progress in Organic Coatings, 2015. **89**: p. 26-34.
37. Achar, S. e L.J. Procopio, *Developments in waterborne thermal insulation coatings*. Vol. 30. 2013. 48-59.
38. Gao, T., B.P. Jelle, e A. Gustavsen, *Aerogel-incorporated concrete: An experimental study*. Construction and Building Materials, 2014. **52**: p. 130-136.

39. Yun, S., H. Luo, e Y. Gao, *Ambient-pressure drying synthesis of large resorcinol-formaldehyde-reinforced silica aerogels with enhanced mechanical strength and superhydrophobicity*. J. Mater. Chem. A, 2014. 2.
40. Chávez-Valdez, A., A. Arizmendi-Morquecho, e G. Vargas, *Ultra-low thermal conductivity thermal barrier coatings from recycled fly-ash cenospheres*. Acta Materialia, 2011. 59(6): p. 2556-2562.
41. Atiemo-Obeng, V., W. Penney, e P. Armenante, *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*. 2004, Nova Jérĩa: JohnWiley & Sons, Inc.
42. Pidhurney, J. e P. Pescatore, *Aerogel for Highly Thermally Insulative Coatings*. Vol. 9. 2012. 46-48.
43. Müller, B. e U. Poth, *Coatings Formulation*. 2 ed. 2012, Hanover: Vincentz.
44. Nogueira, J.L., *Noções Básicas de Tintas e Vernizes*. Vol. II. 2008: Coleção ARCP - Associação Rede de Competência em Polímeros, Porto.
45. NP EN ISO 2813, - "Tintas e vernizes. Determinação do brilho especular de revestimentos por pintura não-metálicos a 20°, 60° e 85°".
46. Pashley, R.M., M.E. Karaman, e B.W. Ninham, *A new approach to the measurement of the minimum film formation temperature of latex dispersions*. Colloids and Surfaces: Physicochemical and Engineering Aspects, 2002. 211(2): p. 285-293.
47. ISO 2115:2016, "Plastics - Polymer dispersions - Determination of white point temperature and minimum film-forming temperature".
48. NP EN 197-1:2001, "Cimento - Parte 1: Composição, especificação e critérios de conformidade para cimentos correntes".
49. NP EN ISO 11998:2012, "Determinação da resistência à esfrega húmida e da lavabilidade de revestimentos por pintura".
50. ASTM G173, - "Standard tables for reflectance solar spectral irradiances".
51. ISO 11357-4:2014, "Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 4: Determination of specific heat capacity".
52. Marques, M.d.S., *Revestimentos Anti-fingerprint*, in *Engenharia Química*. 2015, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
53. NP EN 13300, "Tintas e vernizes. Produtos de pintura e esquemas de pintura aquosos para paredes e tetos no interior. Classificação".
54. Arce, M.E., M.A. Alvarez Feijoo, e A. Suarez Garcia, *Novel Formulations of Phase Change Materials-Epoxy Composites for Thermal Energy Storage*. Materials (Basel, Switzerland), 2018. 11(2): p. 195.
55. Santos, C.A.P. e L. Matias, *Coefficiente de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*, L.N.d.E. Civil, Editor. 2006: Lisboa.

Apêndice A - Resultados da aplicação prática

Nas Figura A.1 a A.3 apresentam-se os resultados referentes à aplicação prática das tintas e massas de regularização.

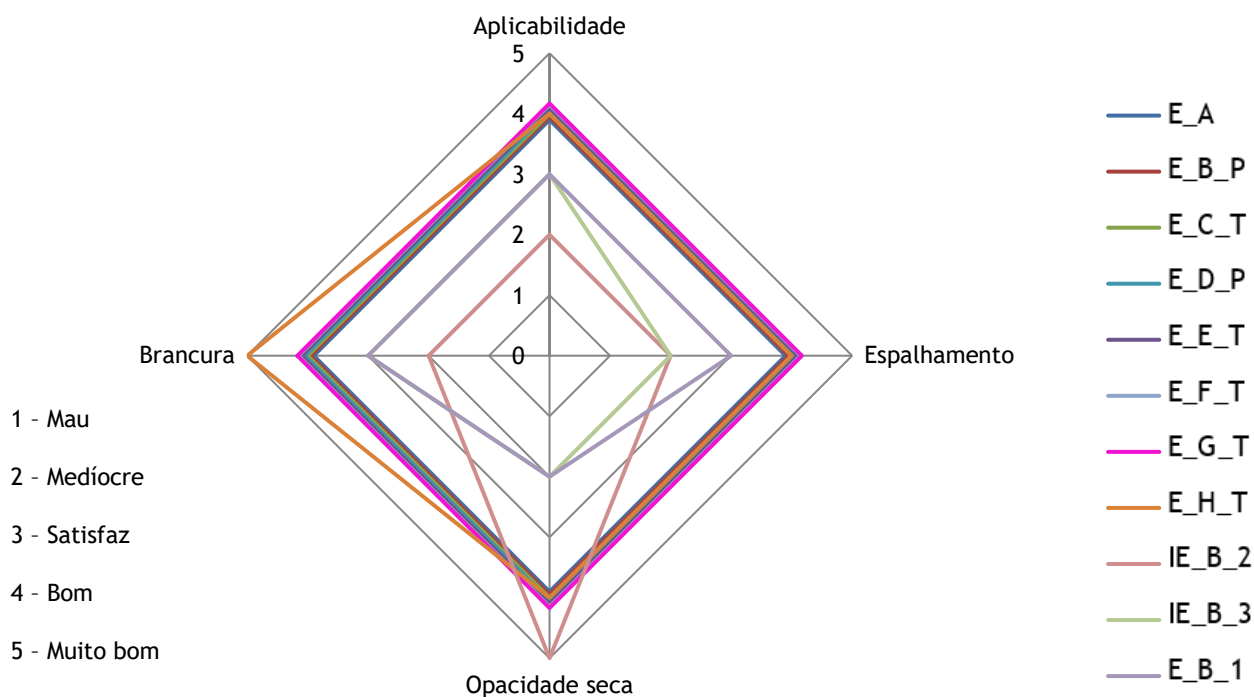


Figura A.1 - Aplicação prática das tintas de exterior.

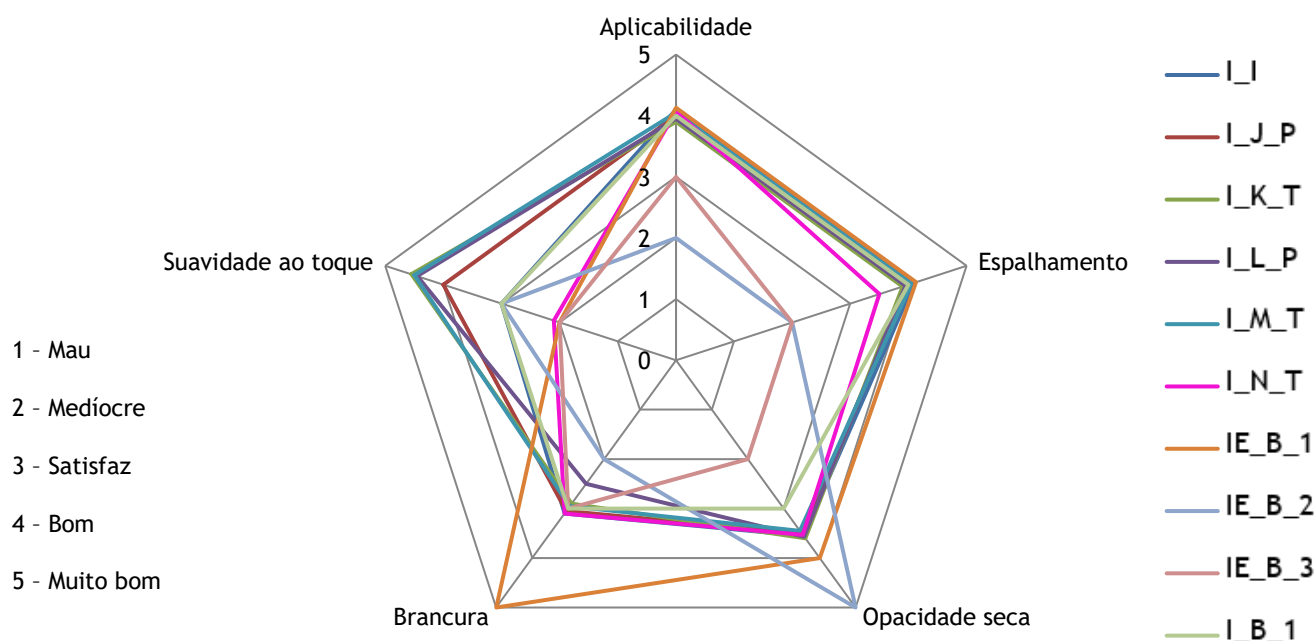


Figura A.2 - Aplicação prática de tintas de interior.

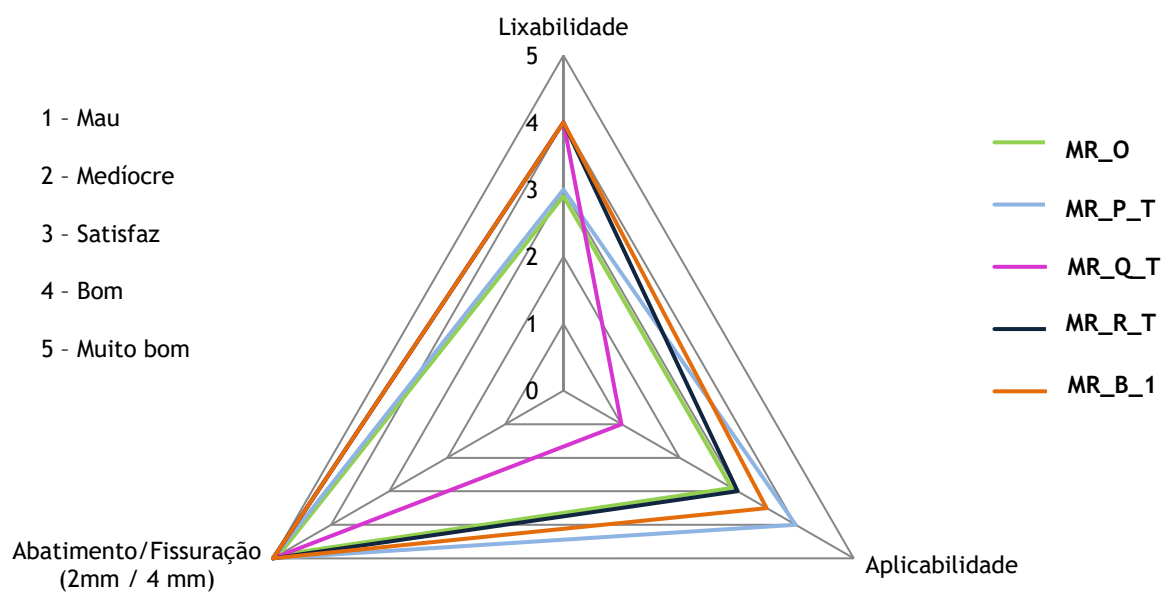


Figura A.3 - Aplicação prática das massas de regularização.

Apêndice B - Resultados do ensaio da esfrega húmida (tintas de interior)

Dada a elevada perda de espessura de película das tintas da concorrência IE_B_1, IE_B_2 e I_B_1 no ensaio da resistência à esfrega húmida, apresentam-se as fotografias dos provetes submetidos aos ciclos de limpeza (Figura B.1).

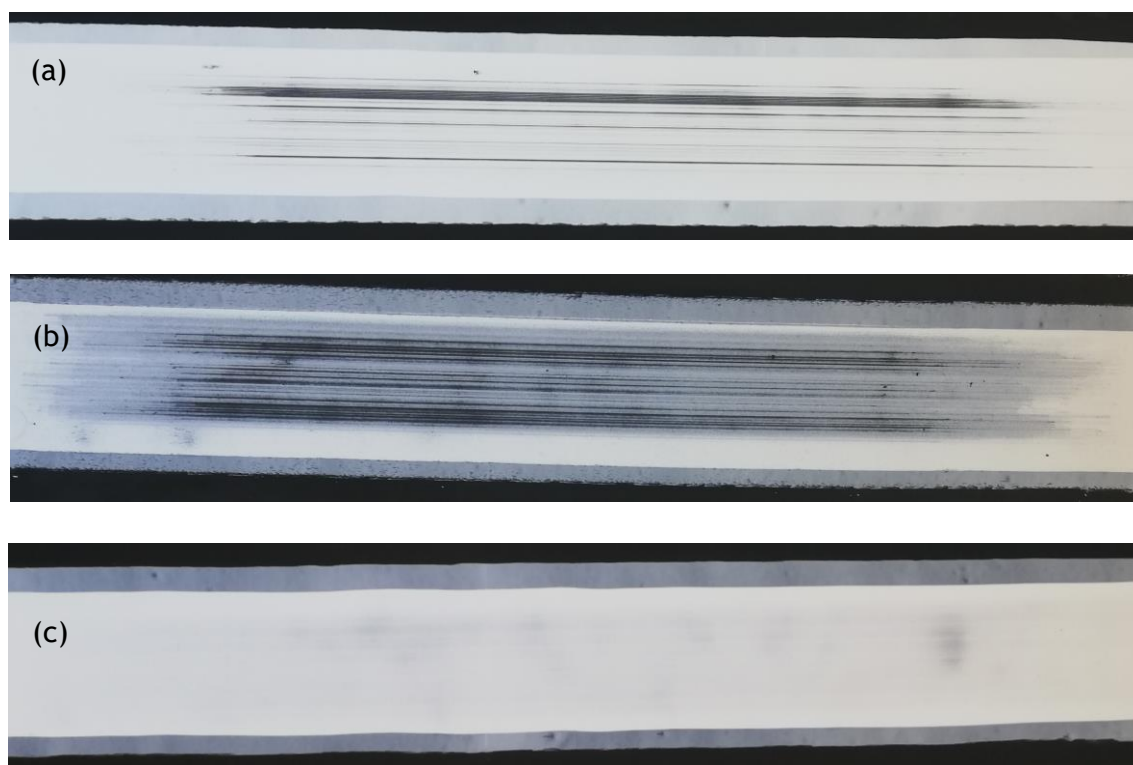
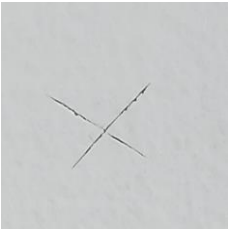
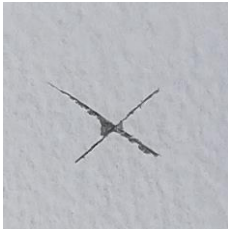


Figura B.1 - Fotografias dos revestimentos (a) IE_B_1, (b) IE_B_2 e (c) I_B_1 após o ensaio da resistência à esfrega húmida.

Apêndice C - Resultados do ensaio de aderência (massas de regularização)

As fotografias referentes ao ensaio de aderência das massas de regularização são apresentadas na Tabela C.1.

Tabela C.1 - Fotografias dos revestimentos após o ensaio de aderência

Produto	Primário de base aquosa e tinta I_I	Primário de base solvente e tinta I_I
MR_O		
MR_P_T		
MR_Q_T		
MR_R_T		
MR_B_1		

Apêndice D - Resultados do ensaio de microscopia eletrónica de varrimento

As imagens obtidas através do ensaio de microscopia eletrónica de varrimento são apresentadas nas Figuras D.1 a D.3.

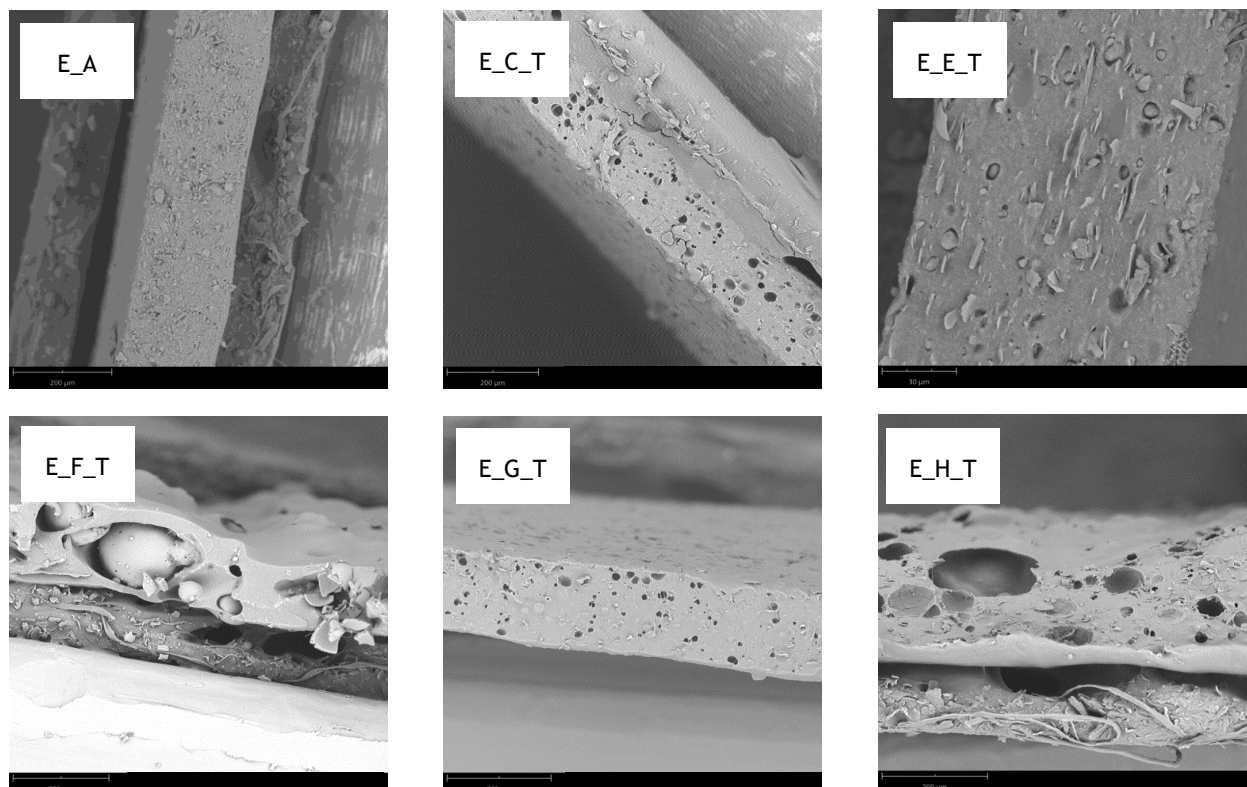


Figura D.1 - Imagens da morfologia das tintas de exterior.

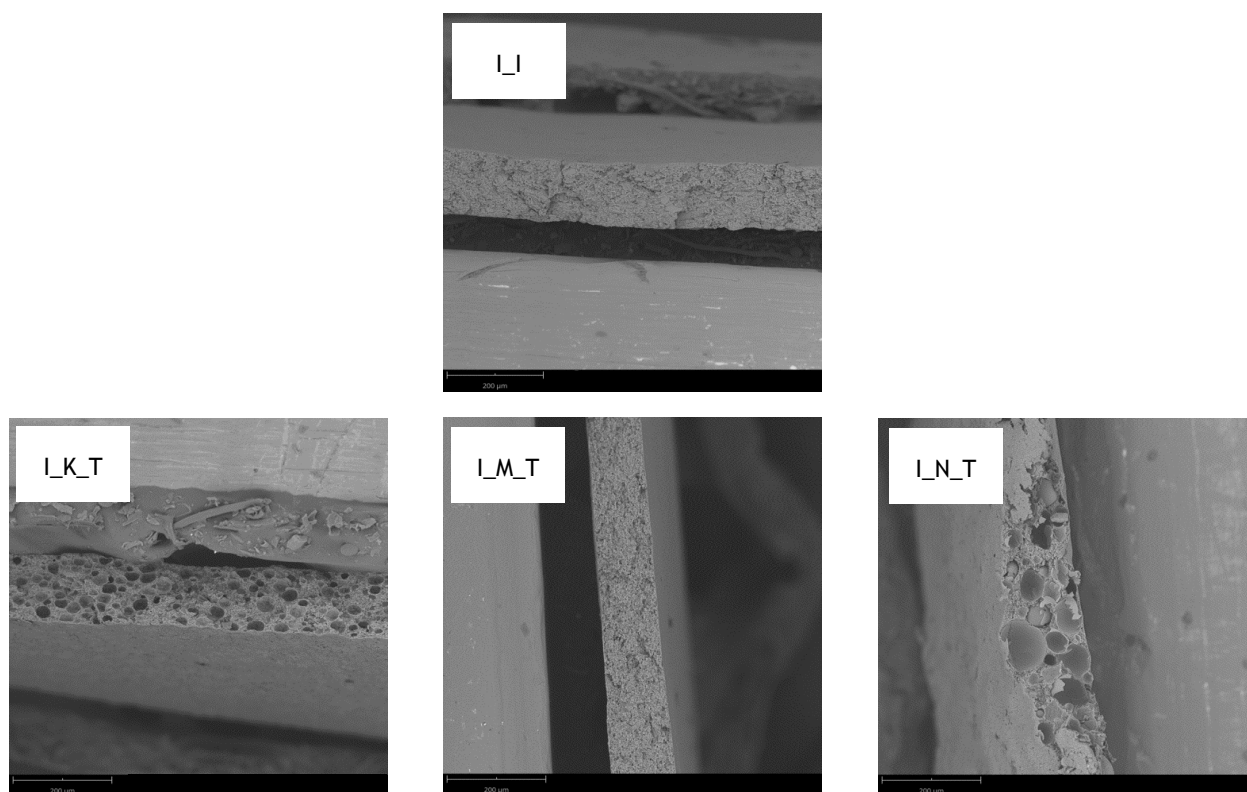


Figura D.2 - Imagens da morfologia das tintas de interior.

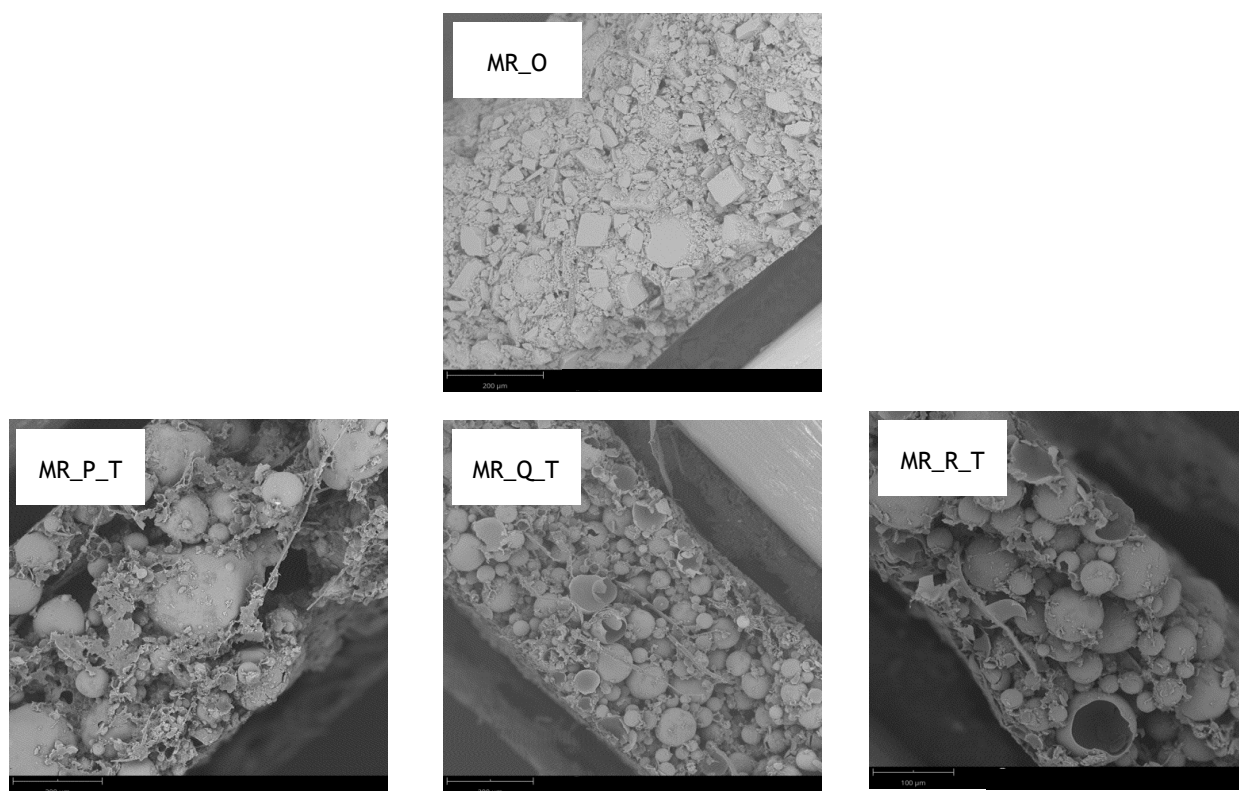


Figura D.3 - - Imagens da morfologia das massas de regularização.

A análise elementar dos produtos da concorrência IE_B_1, IE_B_2 e MR_B_1 é apresentada de seguida:

- IE_B_1

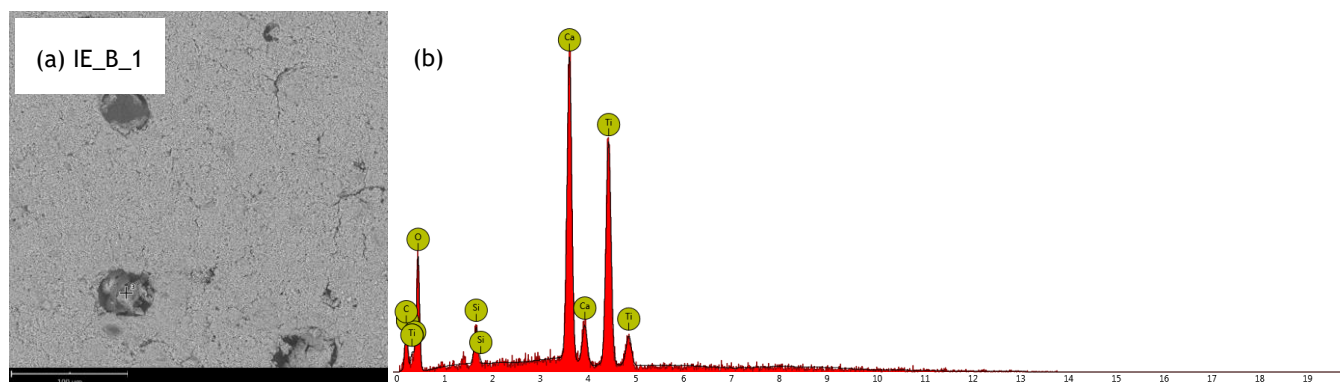


Figura D.4 - a) Imagem de microscopia eletrónica de varrimento e (b) espetro da análise elementar da tinta da concorrência IE_B_1.

Tabela D.1 - Composição elementar da tinta da concorrência IE_B_2 no local assinalado na Figura D.4 (a)

Elemento	Concentração mássica / %
O	34,03
Ti	33,11
Ca	25,06
C	6,26
Si	1,54

- IE_B_2

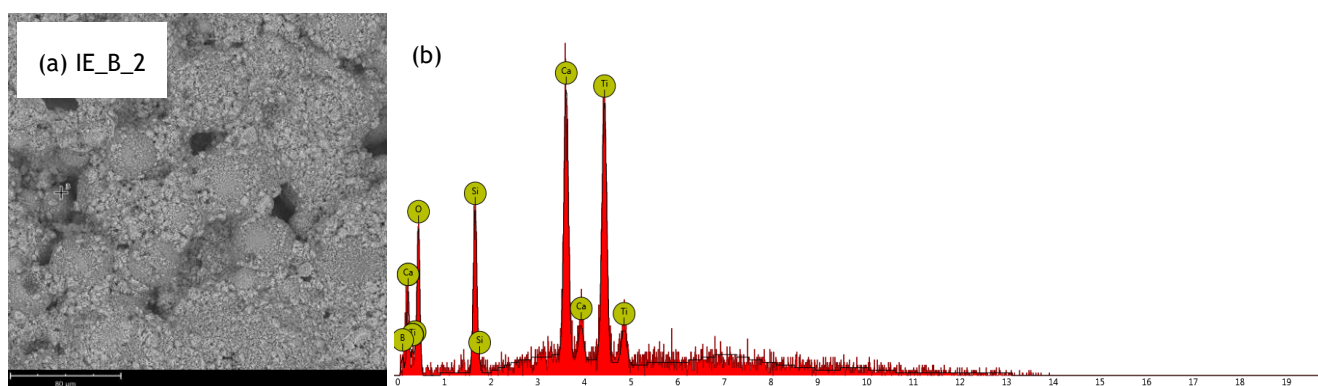


Figura D.5 - (a) Imagem de microscopia eletrónica de varrimento e (b) espetro da análise elementar da tinta da concorrência IE_B_2.

Tabela D.2 - Composição elementar da tinta da concorrência IE_B_2 no local assinalado na Figura D.5 (a)

Elemento	Concentração mássica / %
O	29,91
Ti	28,23
B	19,93
Ca	16,74
Si	5,19

- MR_B_1

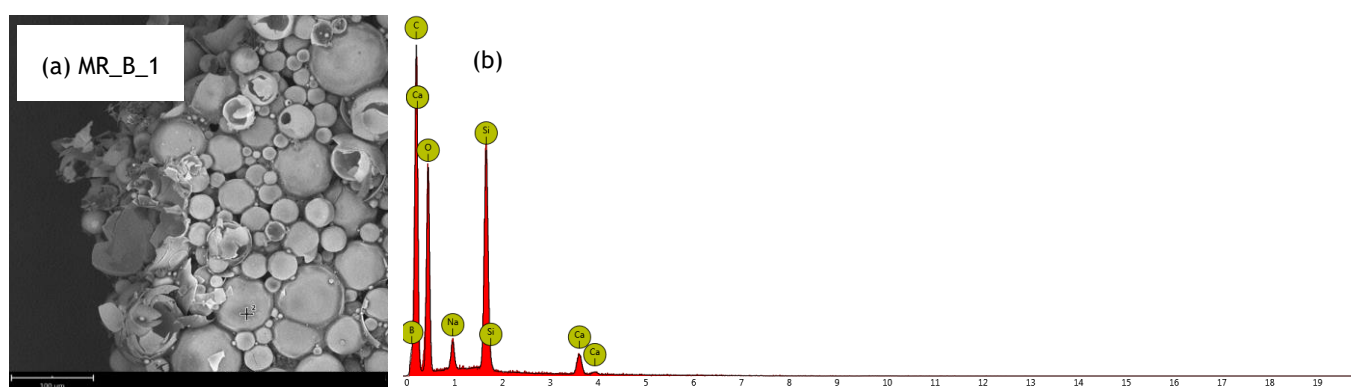


Figura D.6 - (a) Imagem de microscopia eletrónica de varrimento e (b) espectro da análise elementar da tinta da concorrência MR_B_1.

Tabela D.3 - Composição elementar da tinta da concorrência IE_B_2 no local assinalado na Figura D.6 (a)

Elemento	Concentração mássica / %
C	57,55
O	23,67
B	12,69
Si	4,36
Ca	0,90
Na	0,83

Nos revestimentos IE_B_2 e MR_B_1 foi possível identificar os elementos boro, silício e oxigénio, o que indicia a existência de vidro borossilicato, que compõe as microesferas de vidro. No caso da tinta IE_B_1 não se identificou o elemento boro, mas a morfologia das microesferas é bastante similar às tintas que foram formuladas com microesferas de vidro, bem como dos revestimentos IE_B_2 e MR_B_1.

Apêndice E - Simulação em *Solidworks*

Para realizar a simulação em *SolidWorks*, foi necessário definir as diversas camadas utilizadas em cada um dos três casos de estudo (Figura E.1) que melhor mimetizariam uma parede revestida com tintas convencionais, tintas e massa de regularização termicamente isolantes e sistema ETICS. Nas Tabela E.1 a D.4 são apresentadas as espessuras de cada camada e a condutividade térmica dos materiais.

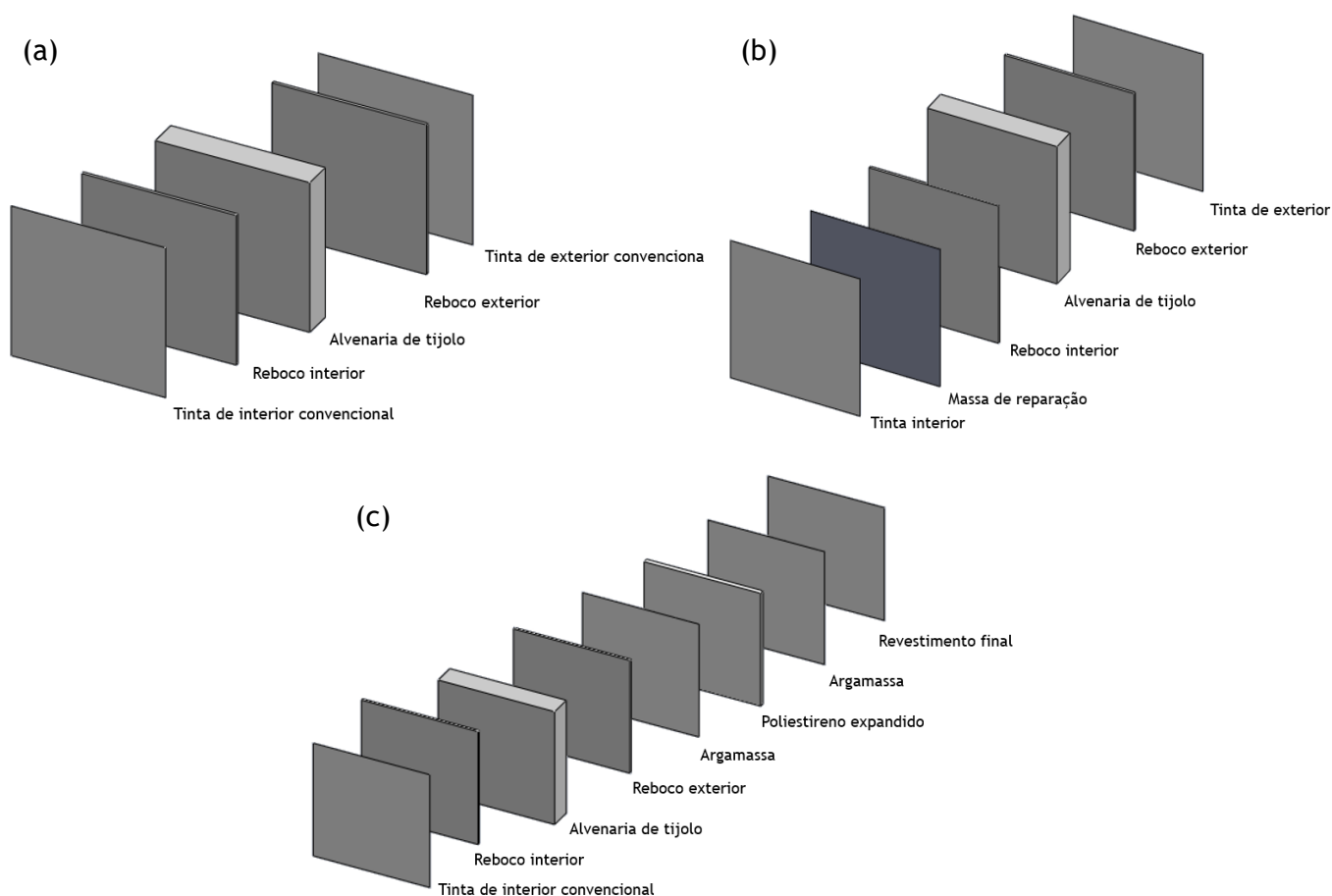


Figura E.1 - Esquemas das camadas referentes às paredes com (a) tintas convencionais, (b) tintas e massa de regularização termicamente isolantes e (c) sistema ETICS.

Tabela E.1 - Espessuras e condutividade térmica dos elementos da parede

Elemento	Espessura / mm [55]	k / $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ [8]
Reboco interior / exterior	20,0	1,37
Alvenaria de tijolo	190,0	0,69

Tabela E.2 - Espessura condutividade térmica das tintas convencionais

Elemento	Espessura / mm	$k / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Tinta de interior convencional	0,4	0,20
Tinta de exterior convencional	0,4	0,20

Para o caso de estudo com as tintas e massas termicamente isolantes, assumiu-se a aplicação de três camadas de tinta de exterior e interior, cada uma delas com uma espessura superior e que foi estabelecida em 300 μm , com vista a aumentar o isolamento térmico.

Tabela E.3 - Espessuras e condutividade térmica das tintas e massa de regularização termicamente isolante

Elemento	Espessura / mm	$k / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Tinta de interior isolante	0,9	0,10
Massa de regularização isolante	4,0	0,10
Tinta de exterior isolante	0,9	0,10

Tal como referido no subcapítulo 4.4.5, no caso de estudo da parede com o sistema ETICS foram assumidas duas espessuras diferentes de material termicamente isolante, nomeadamente 40 e 5,8 mm.

Tabela E.4 - Espessuras e condutividade térmica dos elementos do sistema ETICS

Elemento	Espessura / mm	$k / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Argamassa	3,0	0,47
Material termicamente isolante (EPS)	40,0 e 5,8	0,03
Revestimento final	1,0	0,2

Os perfis de temperatura na direção perpendicular à parede são apresentados nas Figuras E.2 a E.8. Dado que os perfis de temperatura para cada um dos materiais não são perfeitamente lineares, não é possível afirmar que o estado estacionário de transferência de calor se tenha atingido. Ainda assim, não deverá estar muito distante deste estado, pelo que o fluxo de calor deverá ser aproximadamente constante. Nas zonas em que são aplicados os materiais com um menor valor de k , como é o caso das tintas e massa de regularização termicamente isolantes e do EPS, verificou-se que o perfil de temperatura apresenta um maior declive, ou seja, a variação da temperatura ao longo destes materiais é superior. Este resultado está de acordo com a lei de Fourier (equação (2.1)).

- Tinta de exterior branca

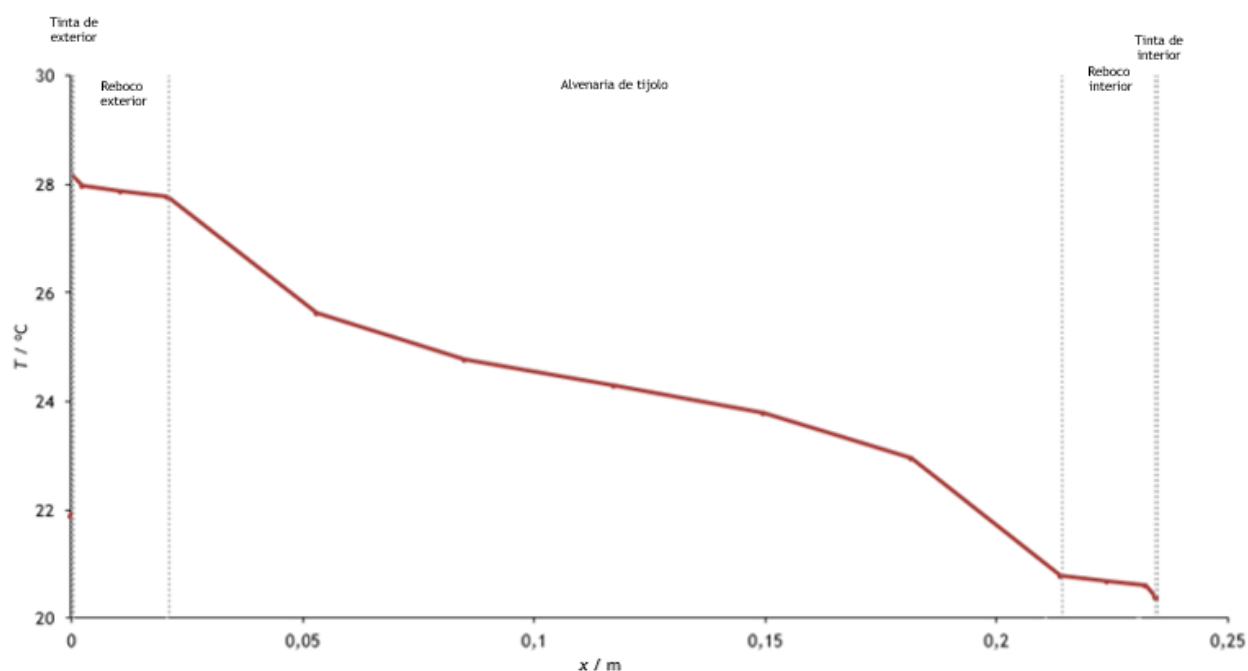


Figura E.2 - Perfil de temperatura na parede com tintas convencionais e tinta exterior branca.

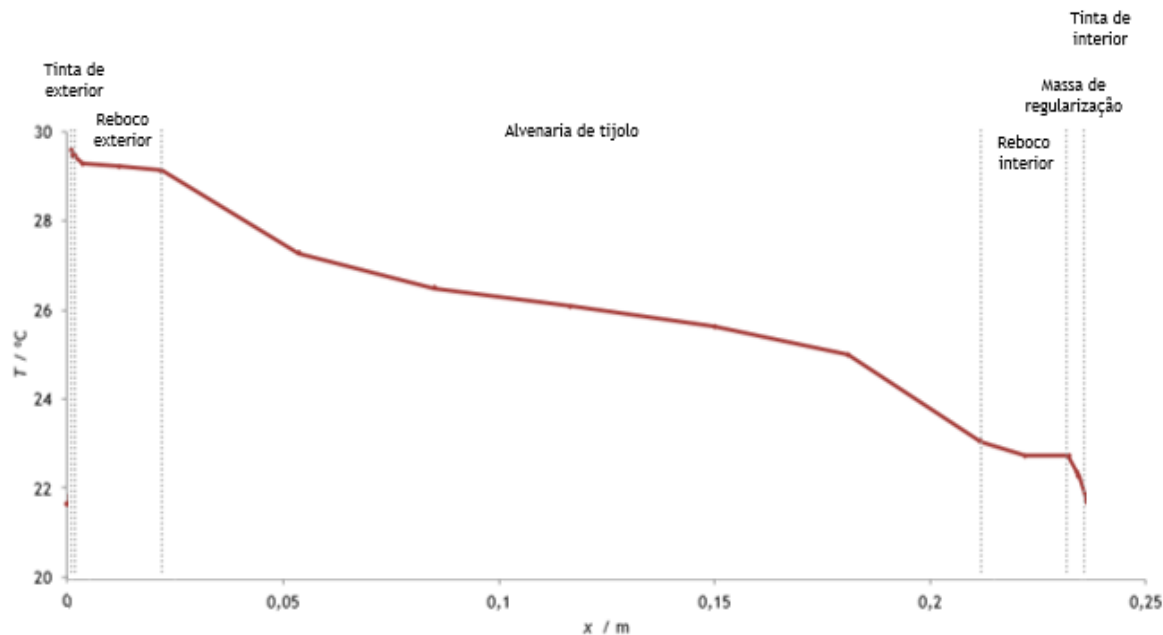


Figura E.3 - Perfil de temperatura na parede com tintas e massa de regularização termicamente isolantes e tinta exterior branca.

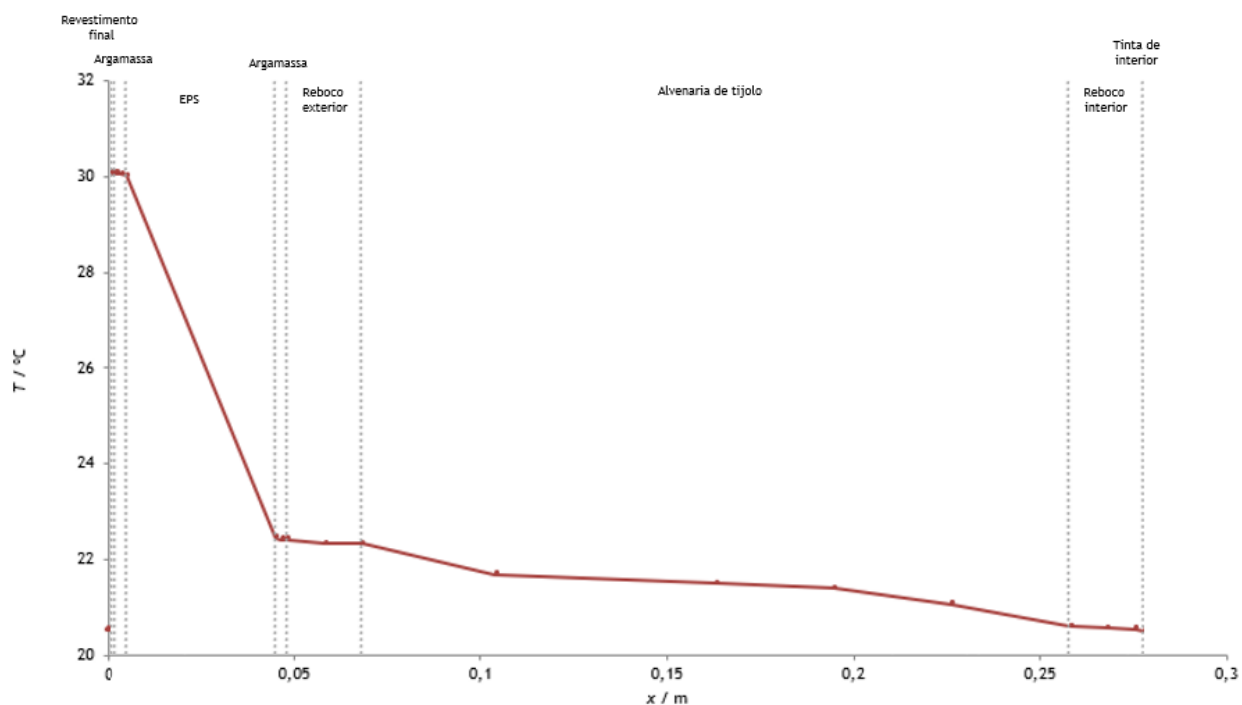


Figura E.4 - Perfil de temperatura na parede com sistema ETICS com 40 mm de EPS e revestimento final branco.

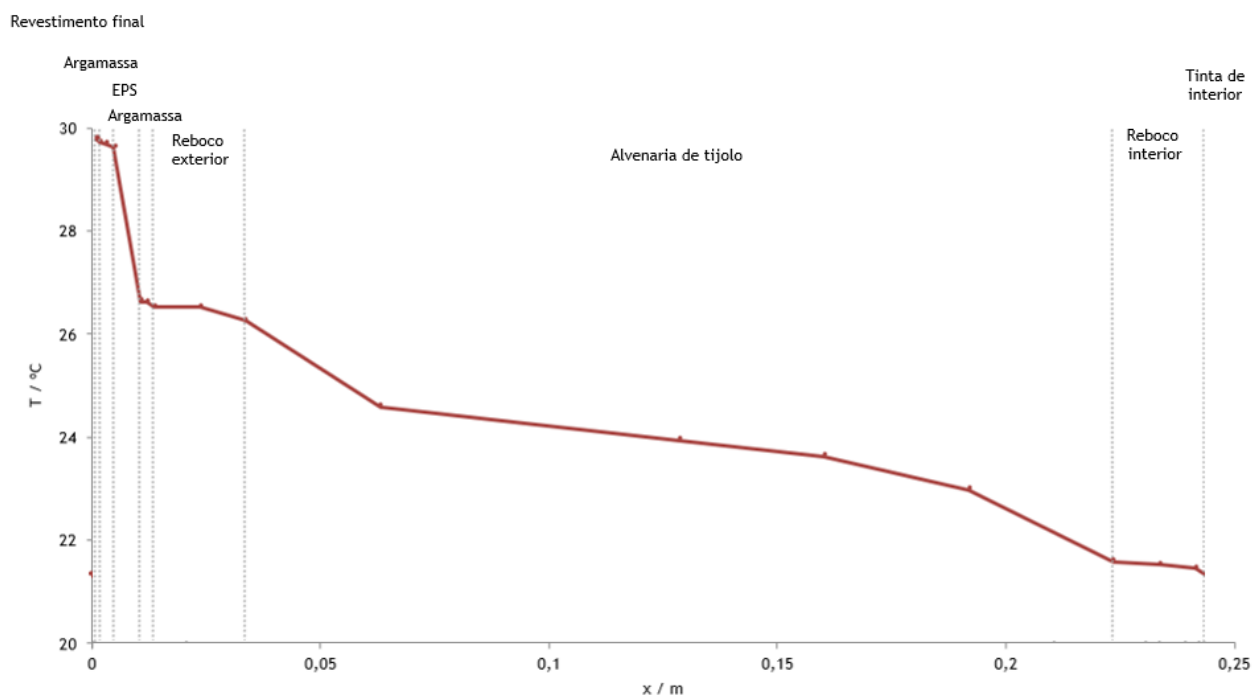


Figura E.5 - Perfil de temperatura na parede com sistema ETICS com 5,8 mm de EPS e revestimento final branco.

- Tinta de exterior escura

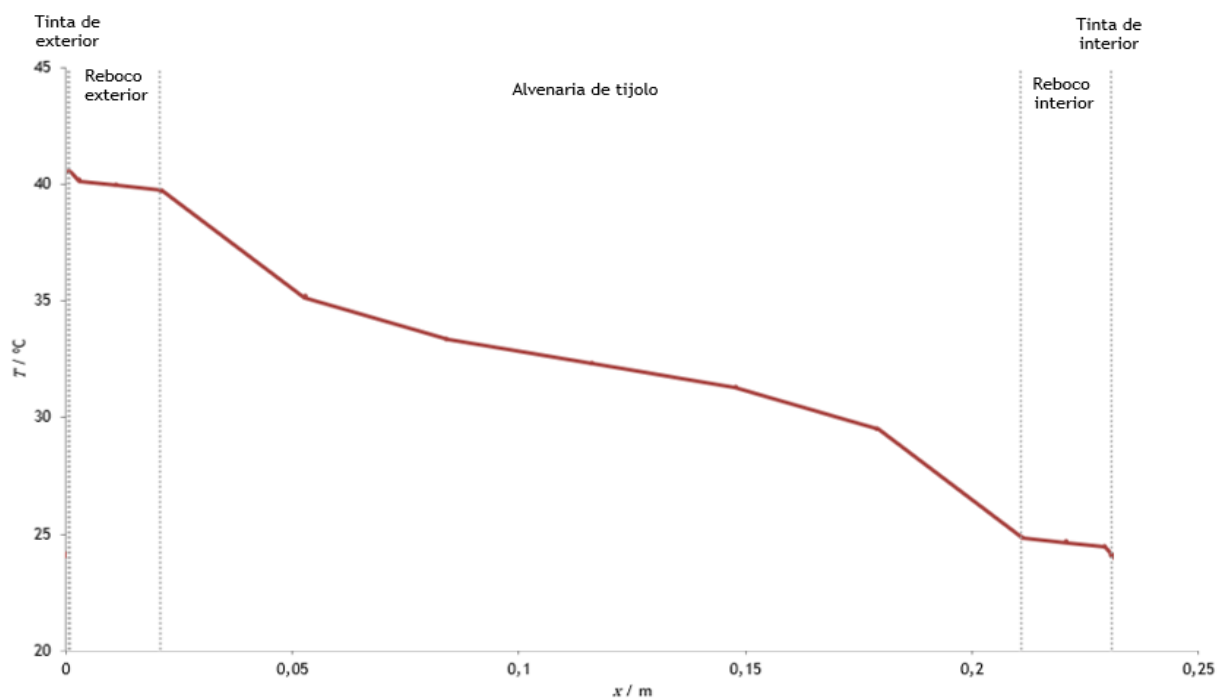


Figura E.6 - Perfil de temperatura na parede com tintas convencionais e tinta exterior escura.

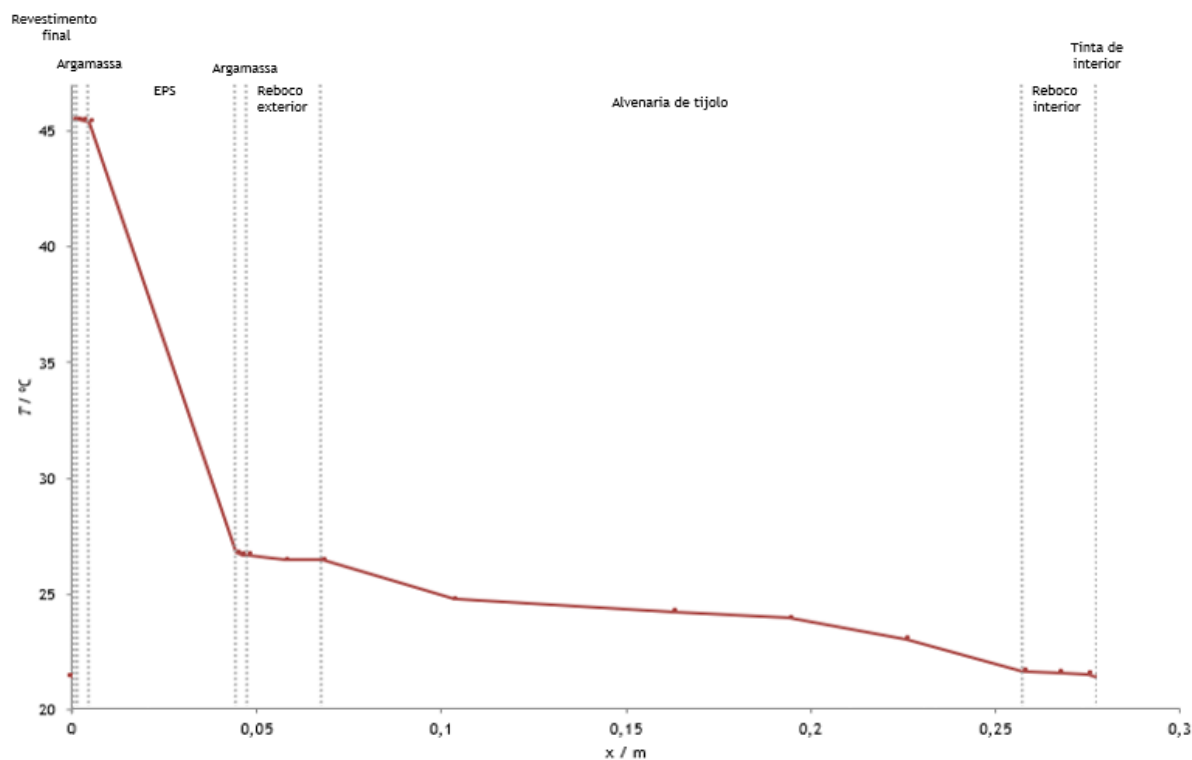


Figura E.7 - Perfil de temperatura na parede com sistema ETICS com 40 mm de EPS e revestimento final escuro.

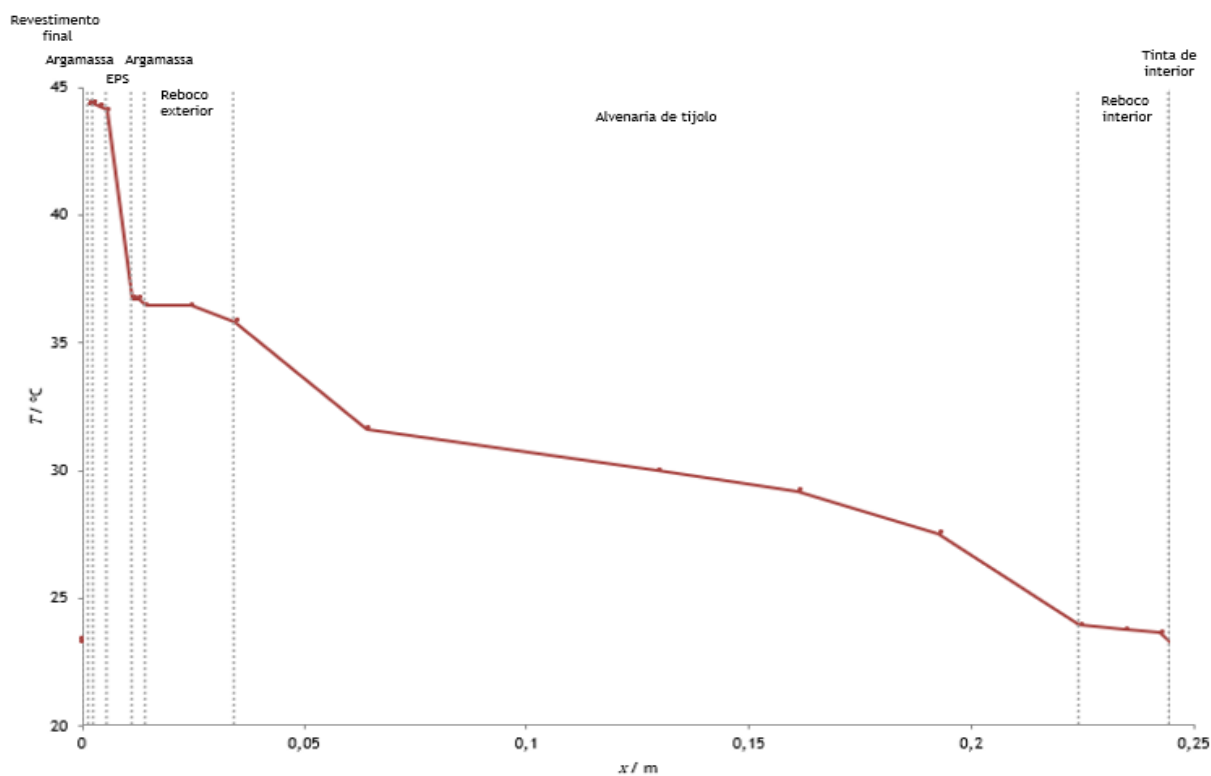


Figura E.8 - Perfil de temperatura na parede com sistema ETICS com 5,8 mm de EPS e revestimento final escuro.