



MUHAMAD CHIRAZE ASSANE
Licenciado em Engenharia Civil

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TINTAS TÉRMICAS EM PERÍODO DE ARREFECIMENTO EM EDIFÍCIOS

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL – PERFIL DE CONSTRUÇÃO
Universidade NOVA de Lisboa
Novembro, 2023



AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TINTAS TÉRMICAS EM PERÍODO DE ARREFECIMENTO EM EDIFÍCIOS

MUHAMAD CHIRAZE ASSANE

Licenciado em Engenharia Civil

Orientador: Luís Manuel Cordeiro Matias
Investigador Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Coorientador: Maria Paulina Faria Rodrigues
Professora Associada, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Armando Manuel Sequeira Nunes Antão
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

Arguente: Luís Gonçalo Correia Baltazar
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Orientador: Luís Manuel Cordeiro Matias
Investigador Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Avaliação da eficiência de tintas térmicas em período de arrefecimento em edifícios

Copyright © Muhamad Chiraze Assane, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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

Aos meus pais, Abdul Cawio e Nurba Daud

AGRADECIMENTOS

A elaboração da presente dissertação de mestrado foi possível graças às valiosas contribuições de várias pessoas e instituições, às quais gostaria de expressar o meu sincero reconhecimento.

Em primeiro lugar, desejo agradecer ao Doutor Luís Matias, meu orientador, pelo acompanhamento dedicado e próximo, pela transmissão de conhecimento, disponibilidade, cordialidade, sugestões pertinentes e incentivo constante em todas as etapas deste trabalho.

À Professora Doutora Paulina Faria, da NOVA FCT, minha coorientadora, manifesto a minha gratidão pela total disponibilidade, partilha de conhecimentos, e recomendações profícuas que permitiram enriquecer e aperfeiçoar esta dissertação.

Ao Técnico José Carlos Matos, sou grato pela assistência solícita, camaradagem, apoio imprescindível e incondicional no decurso da investigação experimental; agradeço também à Engenheira Helena Silva pela colaboração generosa nos ensaios de refletância e ao Engenheiro João Parracha pela cedência e processamento dos dados da estação meteorológica.

Às empresas que disponibilizaram as amostras de tintas térmicas e convencionais utilizadas, as quais foram fundamentais para a obtenção dos resultados, manifesto o meu reconhecimento e agradecimento.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), especialmente ao Departamento de Edifícios (DED), sou grato por proporcionar excelentes condições para o desenvolvimento desta dissertação.

Por fim, aos meus pais, Abdul e Nurba, minha eterna gratidão pelos sólidos princípios e valores inculcados, alicerces que sustentam a minha formação profissional e humana.

“Então, certamente com as dificuldades vem a facilidade.” (Alcorão 94:5)

RESUMO

A presente dissertação teve como objetivo avaliar, por meio de abordagem experimental, o desempenho térmico de tintas térmicas em comparação a tinta convencional, quando aplicadas nas superfícies interiores e exteriores de paredes no período de arrefecimento. Após prospeção e recolha junto de empresas em Portugal, foram caracterizadas três tintas térmicas brancas e um primário térmico, comparativamente a uma tinta convencional branca. Inicialmente onze provetes revestidos com as tintas e os sistemas em estudo foram submetidos a ensaio laboratorial para avaliação da refletância. As tintas térmicas estudadas são caracterizadas por apresentarem alta refletância à radiação solar, quando comparadas às tintas brancas convencionais disponíveis no mercado nacional.

Aplicaram-se os sistemas de pintura no revestimento interior das paredes oeste e norte de uma célula experimental localizada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), e monitorizou-se na estação de arrefecimento a temperatura superficial através de termopares instalados nas paredes. Foram aplicadas as mesmas tintas em estudo na fachada exterior sul da mesma célula experimental, para avaliar o desempenho térmico através de termografia de infravermelhos na mesma estação.

Os resultados obtidos na avaliação do desempenho térmico das tintas no interior da célula experimental demonstram que as tintas térmicas não apresentam vantagens significativas em comparação com a tinta convencional. Entretanto, quando aplicadas na superfície exterior sul da célula e expostas à radiação solar incidente, as tintas térmicas revelaram desempenho térmico superior comparativamente à tinta convencional, na estação de arrefecimento.

Palavras chave: Revestimento por pinturas, fachadas, termografia de infravermelhos, refletância, célula experimental, temperatura superficial.

ABSTRACT

The present dissertation aimed to evaluate, through an experimental approach, the thermal performance of thermal paints compared to conventional paint when applied on internal and external wall surfaces during the cooling season. After surveying and collecting data from companies in Portugal, three white thermal paints and one thermal primer were characterized and compared to a conventional white paint. Initially, eleven samples coated with the paints and systems under study were subjected to laboratory testing to evaluate reflectance. The studied thermal paints are characterized by having high reflectance to solar radiation when compared to conventional white paints available in the national market.

The painting systems were applied on the inner walls of the west and north façades of an experimental cell located at the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC), and the surface temperature was monitored in the cooling season, through thermocouples installed on the walls. The same paints were applied on the south exterior facade of the same experimental cell to evaluate thermal performance through infrared thermography in the same season.

The results obtained in the evaluation of paint performance inside the experimental cell demonstrate that the thermal paints do not present significant advantages compared to the conventional paint. However, when applied on the exterior south surface of the cell and exposed to incident solar radiation, the thermal paints revealed superior thermal performance compared to conventional paint during the cooling season.

Keywords: Paint coating, facades, infrared thermography, reflectance, experimental cell, surface temperature.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos e metodologia.....	2
1.3	Estrutura da dissertação.....	3
2	TINTAS TÉRMICAS E TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS	5
2.1	Tintas térmicas.....	5
2.1.1	Considerações gerais.....	5
2.1.2	Desempenho das tintas térmicas.....	8
2.1.3	Fatores que influenciam a refletância	13
2.1.4	Síntese do desempenho das tintas térmicas.....	13
2.2	Conceitos sobre a termografia de infravermelhos.....	15
2.2.1	Conceitos gerais.....	15
2.2.2	Transferência de calor	15
2.2.3	Espectro eletromagnético	17
2.2.4	Radiação do corpo negro.....	18
2.2.5	Radiação do corpo não negro	19
2.2.6	Emitância	21
2.2.7	Aplicação de termografia de infravermelhos em edifícios.....	21
2.2.8	Análise dos resultados dos ensaios de termografia de infravermelhos	22
2.2.9	Fatores que influenciam a medição em análises termográficas de edifícios.....	22
3	CAMPANHA EXPERIMENTAL	25

3.1	Prospecção de tintas térmicas no mercado nacional.....	25
3.2	Contextualização da campanha experimental.....	26
3.3	Materiais estudados.....	27
3.3.1	Características das tintas	28
3.3.2	Provetes.....	29
3.3.3	Célula experimental	31
3.4	Avaliação da refletância total	32
3.5	Avaliação em condições reais.....	35
3.5.1	Avaliação do desempenho de tintas térmicas aplicadas no interior.....	36
3.5.2	Avaliação do desempenho de tintas térmicas aplicadas pelo exterior	42
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS	45
4.1	Considerações iniciais	45
4.2	Refletância total.....	45
4.2.1	Influência da aplicação dos primários na refletância	47
4.2.2	Cálculo da refletância total.....	50
4.3	Condições reais.....	51
4.3.1	Desempenho das tintas térmicas no interior da célula experimental	51
4.3.2	Desempenho de tintas térmicas no exterior da célula experimental.....	67
5	CONCLUSÕES.....	73
5.1	Considerações finais	73
	Avaliação da refletância	74
	Efeito das tintas térmicas quando aplicadas no interior	74
	Efeito das tintas térmicas quando aplicadas no exterior	75
5.2	Sugestões para desenvolvimentos futuros	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
	ANEXOS.....	83
A.1	<i>Template</i> do e-mail enviado as Empresas	83
A.2	Características técnicas da ThermaCam P640.....	84
A.3	Calibração dos termopares	85

A.4	Folha de cálculo representativa para cada dia analisado.....	91
A.5	Dias adicionais da análise do desempenho térmico das tintas no interior	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 — Princípios básicos de tintas térmicas aplicadas na envolvente exterior dos edifícios (adaptado de Santamouris et al. (2011)).	7
Figura 2.2 — Espectro eletromagnético (Matias, 2001).	17
Figura 2.3 — Poder emissivo espectral de um corpo negro segundo a lei de Planck (Matias, 2001).	18
Figura 2.4 Radiação nas superfícies (Henriques, 2011).	20
Figura 3.1 — Representação dos provetes utilizados e as suas respetivas nomenclaturas.	31
Figura 3.2 — Célula experimental.	32
Figura 3.3 — Espectrofotómetro HITACHI U-3300.	33
Figura 3.4 — Esfera integradora.	33
Figura 3.5 — Esfera integradora com duas amostras padrão de óxido de alumínio.	34
Figura 3.6 — Esfera integradora com a amostra revestida com tinta e amostra de óxido de alumínio.	35
Figura 3.7 — Remoção do regranulado de cortiça das caixas de ar das paredes interiores norte e oeste.	36
Figura 3.8 — Disposição dos ladrilhos cerâmicos no exterior da parede oeste.	37
Figura 3.9 — Representação das áreas das tintas na parede oeste interior.	37
Figura 3.10 — Representação das áreas das tintas na parede norte interior.	38
Figura 3.11 — Paredes interiores: oeste (a) e norte (b), com posicionamento de termopares.	39
Figura 3.12 — Sistema de aquisição de dados no interior da célula experimental constituído por <i>data logger</i> e <i>hydrolog</i> .	40
Figura 3.13 — Estação meteorológica instalada na cobertura do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do LNEC.	40
Figura 3.14 — Parede sul exterior com diferentes sistemas de pintura: da esquerda para a direita, com a tinta térmica 1 (PrN+BrT1), a tinta convencional (PrN+BrC) e a tinta térmica 3 (PrT+BrT3).	42
Figura 3.15 — Câmara termográfica ThermaCam P640.	43

Figura 4.1 — Variação da refletância das amostras ensaiadas.....	46
Figura 4.2 — Variação da refletância das amostras revestidas somente por tintas térmicas e convencionais.....	46
Figura 4.3 — Variação da refletância das amostras revestidas pelos primários: convencional (PrN) e térmico (PrT).	47
Figura 4.4 — Variação da refletância total das amostras BrC e PrN+BrC.....	48
Figura 4.5 — Variação da refletância total das amostras BrC e PrT+BrC.....	48
Figura 4.6 — Variação da refletância total das amostras BrT1 e PrN+BrT1.	49
Figura 4.7 — Variação da refletância total das amostras BrT2 e PrT+BrT2.	49
Figura 4.8 — Variação da refletância total das amostras BrT3 e PrT+BrT3.	50
Figura 4.9 — Temperatura superficial obtida para a parede interior oeste.	52
Figura 4.10 — Temperatura superficial obtida para a parede interior norte.	52
Figura 4.11 — Radiação solar e temperatura exterior do dia 20 a 23 de junho.	53
Figura 4.12 — Parede interior oeste: temperaturas superficiais antes da calibração dos termopares 1 a 6.....	54
Figura 4.13 — Parede interior norte: temperaturas superficiais antes da calibração dos termopares 7 a 13.....	55
Figura 4.14 — Parede interior oeste (área revestida pelos ladrilhos brancos no exterior): antes da calibração (esquerda) e depois de efetuar a calibração (direita).	55
Figura 4.15 — Parede interior oeste (área revestida pelos ladrilhos pretos no exterior): antes da calibração (esquerda) e depois de efetuar a calibração (direita).....	56
Figura 4.16 — Parede interior norte: antes da calibração (esquerda) e depois de efetuar a calibração (direita).....	56
Figura 4.17 — Condições climáticas do dia 16 de julho.....	58
Figura 4.18 — Parede interior oeste (área revestida por ladrilho branco exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).	59
Figura 4.19 — Parede interior oeste (área revestida por ladrilho preto no exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).	59
Figura 4.20 — Parede interior norte: temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).	60
Figura 4.21 — Condições climáticas do dia 7 de agosto.	61
Figura 4.22 — Parede interior oeste (área revestida por ladrilho branco exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).	62

Figura 4.23 — Parede interior oeste (área revestida por ladrilho preto no exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).	63
Figura 4.24 — Parede interior norte: temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).	64
Figura 4.25 — Condições climáticas do dia 15 de julho.	64
Figura 4.26 — Parede interior oeste (área revestida por ladrilho branco exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).	65
Figura 4.27 — Parede interior oeste (área revestida por ladrilho preto no exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).	66
Figura 4.28 — Parede interior norte: temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).	67
Figura 4.29 — Termograma da parede sul exterior no dia 18 de agosto às 8 horas da manhã.....	68
Figura 4.30 — Termograma da parede sul exterior no dia 18 de agosto às 15 horas.....	69
Figura 4.31 — Termograma da parede sul exterior no dia 18 de agosto às 17 horas (céu pouco nublado).....	70
Figura 4.32 — Termograma da parede sul exterior no dia 31 de agosto às 15 horas.....	70
Figura A.2.1 — Características técnicas da câmara ThermaCam P640 (FLIR, 2007).....	84
Figura A.5.1 — Dia 3 de julho: condições climáticas.....	99
Figura A.5.2 — Dia 3 de julho: parede interior oeste (área revestida por ladrilho branco exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).....	99
Figura A.5.3 — Dia 13 de julho: parede interior oeste (área revestida por ladrilho preto no exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).....	100
Figura A.5.4 — Dia 13 de julho: parede interior norte: temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).....	100
Figura A.5.5 — Dia 6 de agosto: condições climáticas.	101
Figura A.5.6 — Dia 6 de agosto: parede interior oeste (área revestida por ladrilho branco exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).....	101

Figura A.5.7 — Dia 6 de agosto: parede interior oeste (área revestida por ladrilho preto no exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).....	102
Figura A.5.8 — Dia 6 de agosto: parede interior norte: temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).....	102
Figura A.5.9 — Dia 27 de julho: condições climáticas.....	103
Figura A.5.10 — Dia 27 de julho: parede interior oeste (área revestida por ladrilho branco no exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).....	103
Figura A.5.11 — Dia 27 de julho: parede interior oeste (área revestida por ladrilho preto no exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).....	104
Figura A.5.12 — Dia 27 de julho: parede interior norte: temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).....	104

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 — Síntese dos estudos sobre a aplicação de tintas térmicas.....	9
Tabela 3.1 — Lista de empresas contactadas.....	25
Tabela 3.2 — Amostras da tinta térmica recebida pela Empresa 1.....	27
Tabela 3.3 — Amostras de tintas e primário térmico recebidas pela Empresa 2.....	27
Tabela 3.4 — Amostras de tintas e primários convencionais recebidos pela Empresa 1.	28
Tabela 3.5 — Comparação entre tinta convencional e tintas térmicas.....	29
Tabela 3.6 — Descrição dos sistemas de pintura aplicados nos provetes utilizados.....	30
Tabela 4.1 — Refletância total na região do visível e infravermelho próximo.	51
Tabela A.3.1 — Dados da temperatura superficial do dia 22 de junho, obtida pelos termopares antes da aplicação das tintas nas paredes interiores.	85
Tabela A.3.2 — Dia 22 de junho, parede oeste: obtenção das diferenças entre os termopares, com o intuito de fazer a calibração.	86
Tabela A.3.3 — dia 22 de junho, parede oeste: temperaturas dos termopares calibrados em relação aos termopares instalados na aérea de controle (3 e 6).	87
Tabela A.3.4 — Dia 22 de junho, parede norte: cálculo das médias entre os termopares de cada área de aplicação de tinta.	88
Tabela A.3.5 — Dia 22 de junho, parede norte: diferenças entre as médias dos termopares de cada área de aplicação de tinta.	89
Tabela A.3.6 — Dia 22 de junho, parede norte: temperaturas dos termopares calibrados em relação aos termopares instalados na aérea de controle (9, 10 e 11).	90
Tabela A.4.1 — Dia 16 de julho: temperaturas superficiais obtidas através dos termopares..	91
Tabela A.4.2 — Dia 16 de julho, parede oeste: calibração dos termopares com os dados do dia de referência.....	92
Tabela A.4.3 — Dia 16 de julho, parede oeste: temperaturas superficiais após a calibração...	93
Tabela A.4.4 — Dia 16 de julho, parede oeste: diferenças entre áreas de aplicação de tinta. ..	94

Tabela A.4.5 — Dia 16 de julho, parede norte: cálculo das médias dos termopares de cada área de aplicação de tinta.....	95
Tabela A.4.6 — Dia 16 de julho, parede norte: calibração dos termopares com os dados do dia de referência	96
Tabela A.4.7 — Dia 16 de julho, parede norte: temperaturas superficiais após a calibração ..	97
Tabela A.4.8 — Dia 16 de julho, parede norte: diferenças entre as áreas de aplicação de tinta.....	98

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O aumento da temperatura global tem provocado uma crescente necessidade de arrefecimento artificial nos edifícios, que se traduz numa maior procura energética para alimentar os sistemas de climatização. Estima-se atualmente que aproximadamente 12% de toda a eletricidade consumida mundialmente seja utilizada para acionar equipamentos de AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) em edificações (Wijewardane, 2022). Adicionalmente, o setor dos edifícios é responsável globalmente por cerca de 33% do consumo total energético e quase 25% das emissões de CO₂, como apontam González-Torres et al. (2022). Assim, a otimização do desempenho térmico das construções por meio de soluções passivas reveste-se de grande importância na promoção da sustentabilidade energética e ambiental

Os edifícios absorvem radiação solar através dos seus elementos construtivos, nomeadamente, as paredes, janelas e coberturas. Tal facto afeta o desempenho térmico das edificações, resultando num maior consumo energético devido à climatização. No estudo efetuado por Peoples et al. (2022), foi quantificado o potencial de redução anual de 118 mil toneladas de emissões de CO₂ por redução da produção de eletricidade, que poderia ser alcançada se a necessidade de arrefecimento para residências fosse reduzida em 1% em todo os Estados Unidos.

De acordo com Oke et al. (1991), o efeito *Urban Heat Island* manifesta-se através de temperaturas mais elevadas nas zonas urbanas relativamente às áreas rurais, estando associado à alta densidade de edificações e estruturas urbanas que absorvem radiação solar, à utilização de materiais altamente absorventes e à falta de espaços verdes. Santamouris e Yun (2020) constataram que este efeito pode incrementar cerca de 10°C a temperatura nas cidades. Estudos prévios de Synnefa et al. (2007) indicaram que este efeito pode ser mitigado mediante a aplicação de tintas térmicas.

Segundo Revel et al. (2014), o uso de tintas térmicas, caracterizadas por ter elevada refletância solar e elevada emitância térmica, é um método eficaz de reduzir os ganhos térmicos e a necessidade de arrefecimento dos edifícios, pois aumentam a quantidade radiação solar refletida pelos componentes do envelope do edifício resultando na redução da temperatura superficial.

Em Portugal uma grande parte das habitações não apresenta condições higrotérmicas adequadas, de que resulta um baixo conforto e contributos negativos para a saúde (Carvalho, 2019). Nos últimos anos tem-se verificado um interesse crescente em encontrar soluções que promovam o conforto térmico e a eficiência energética nos edifícios. Como resultado da implementação de soluções ativas, observa-se um maior consumo de energia para climatização. Como esse aumento de custos energéticos é insuportável por muitas famílias, é urgente a procura e implementação de medidas passivas, mas que sejam eficazes (Chouriço, 2017). Neste contexto, as tintas térmicas surgem no mercado como sendo uma possível abordagem para a melhoria do desempenho higrotérmico dos edifícios, maioritariamente energeticamente ineficientes, e para o bem-estar dos seus ocupantes (Pisello, 2017). Surgem no mercado sistemas com tintas para aplicação no exterior ou no interior do edifício. É importante quantificar o respetivo contributo, de forma a validar, ou não, se a sua aplicação justifica o investimento neste tipo de tintas térmicas.

1.2 Objetivos e metodologia

A presente dissertação tem como objetivo avaliar o desempenho térmico de sistemas constituídos por tintas térmicas, comercializadas em Portugal, aplicadas em superfícies interiores e exteriores de edificações, analisando a sua influência na temperatura superficial, viabilidade de utilização para redução dos ganhos térmicos, e conseqüente melhoria do comportamento térmico e energético dos edifícios.

A metodologia da dissertação consiste em:

- Revisão da literatura sobre o uso e as aplicações das tintas térmicas, bem como métodos de medição e de avaliação do desempenho térmico dos sistemas com tintas térmicas.
- Seleção das tintas térmicas para utilização no presente estudo, baseada numa estratégia inicial de mapeamento de fabricantes e distribuidores nacionais e prospeção do mercado, incluindo contacto com diversas empresas para obtenção de informação técnica, amostras e identificação das opções disponíveis em Portugal.
- Ensaios experimentais em laboratório para análise da refletância das tintas por espectrofotometria.

- Realização de ensaios experimentais *in situ* para medição da temperatura superficial interior através de termopares e da temperatura superficial exterior através de termografia de infravermelhos.
- Análise dos resultados obtidos nos ensaios experimentais, comparando o desempenho térmico dos sistemas com e sem tintas térmicas.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, os quais abordam as seguintes temáticas:

O primeiro capítulo expõe o enquadramento do tema da dissertação, delineando os objetivos principais, a metodologia adotada e a forma como a dissertação foi estruturada.

O segundo capítulo contempla o estado dos conhecimentos relativo à aplicação de tintas térmicas no interior e exterior de edificações, assim como os conceitos fundamentais concernentes à termografia de infravermelhos.

O terceiro capítulo descreve a prospeção de mercado realizada sobre tintas térmicas disponíveis e a metodologia utilizada na campanha experimental conduzida em laboratório e em condições reais numa célula experimental.

O quarto capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de refletância das tintas em estudo e nos ensaios efetuados na célula experimental com termopares e termografia de infravermelhos.

O quinto capítulo expõe as conclusões finais do estudo realizado no âmbito desta dissertação e algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

Por fim, são apresentados as referências bibliográficas consultadas e os anexos, os quais contêm informações complementares relevantes para o entendimento integral do trabalho desenvolvido.

TINTAS TÉRMICAS E TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

2.1 Tintas térmicas

2.1.1 Considerações gerais

A aplicação de tintas térmicas no interior e exterior dos edifícios tem vindo a ganhar cada vez mais interesse na área da construção e reabilitação de edifícios. É provável que as tintas térmicas sejam consideradas soluções eficazes para melhorar o desempenho térmico, reduzir o consumo de energia e promover o conforto higrotérmico. Mas as evidências científicas são ainda limitadas, pelo que é necessária investigação complementar.

Segundo Pisello (2017), a aplicação de tintas térmicas nas superfícies exteriores dos edifícios apresenta uma série de benefícios significativos, nomeadamente: redução de consumo de energia e a redução das necessidades de arrefecimento do edifício, que contribui para a eficiência energética e para o melhor desempenho térmico no interior, diminuição dos efeitos do stress térmico resultando no prolongamento da vida útil das estruturas do edifício, redução as emissões de CO₂ provenientes do funcionamento dos sistemas de ventilação e ar condicionado dos edifícios, especialmente durante os meses de arrefecimento (verão).

As tintas são formulações compostas principalmente por resinas, pigmentos, solventes e aditivos, que, quando aplicadas em camadas finas, formam películas sólidas após secagem, com a função de proteger e proporcionar um acabamento estético às superfícies (Dornelles, 2008). O veículo, normalmente uma resina ou polímero diluído em solvente, atua como meio de dispersão e suspensão dos pigmentos na tinta.

Os pigmentos são substâncias sólidas com granulometria fina, insolúveis no veículo, que são responsáveis por adicionar cor e opacidade à tinta. Desempenham também um papel importante nas propriedades anticorrosivas, mecânicas, de brilho e de envelhecimento do revestimento por pintura (Ikematsu, 2007).

Segundo Uemoto et al. (2010), os pigmentos convencionais são divididos em duas classes: orgânicos, que tem resistência à luz e opacidade relativamente limitadas, e inorgânicos, que geralmente são mais duráveis, menos suscetíveis à degradação pela radiação solar e também possuem maior estabilidade em altas temperaturas. As tintas com pigmentos convencionais têm tendência a absorver radiação infravermelha. Esses pigmentos podem ser substituídos por pigmentos especiais, resultando no aumento da refletância solar e emitância, que faz com que a tinta absorva menos radiação infravermelha.

A diferença entre uma tinta térmica e uma convencional reside principalmente na utilização de microesferas e/ou pigmentos especiais, conhecidos como *cool pigments* e por vezes as tintas são designadas como *cool paints*. Estes pigmentos possuem uma elevada capacidade de refletir a radiação infravermelha proveniente do Sol. Isso permite que a tinta térmica apresente um desempenho superior em termos de refletância do calor resultante da incidência solar em comparação com tintas convencionais (L. Gonçalves, 2014). Essa distinção na composição da tinta proporciona benefícios como redução das temperaturas superficiais e minimização do ganho térmicos nos edifícios, contribuindo para a redução do consumo energético.

Os *cool pigments* são apresentados em duas formas diferentes (Dias, 2008):

- Pigmentos refletores da radiação infravermelha com InfraRed Reflective (IRR) Technology;
- Pigmentos transparentes aos infravermelhos que têm boa resistência ao calor e à luz, boa opacidade e que devem ser aplicados sobre um primário refletor.

Num estudo desenvolvido por Santamouris et al. (2011) concluiu-se que as tintas térmicas, com elevada refletância, são materiais que contribuem para a eficiência energética de edifícios. Isso ocorre porque as tintas refletem a luz solar, o que ajuda a reduzir o calor recebido pelos edifícios, diminuindo a necessidade de arrefecimento e, conseqüentemente, o consumo de energia. Conforme referido, estas tintas caracterizam-se por apresentarem elevada refletância solar (que mede, numa escala de 0 a 1 ou 0 a 100%, a capacidade de a superfície do material refletir a radiação solar), e por terem elevada emitância (que mede, também numa escala de 0 a 1, a capacidade da superfície do material libertar o calor absorvido).

O uso de tintas térmicas pode ter um impacto significativo na temperatura superficial das fachadas e coberturas dos edifícios, que resulta no aumento do conforto térmico interior durante a época do verão e, como consequência, reduz as necessidades de arrefecimento. Esta técnica de melhoria de conforto em edifícios pode ser económica, eficiente e de baixo custo (Uemoto et al., 2010).

No entanto, ainda que a refletância da radiação solar térmica conduza a uma redução da temperatura superficial dos elementos da envolvente, o que é vantajoso para minimizar os ganhos térmicos excessivos na estação quente, tal pode revelar-se prejudicial na estação fria do inverno (Pisello, 2017).

Quando uma superfície com alta refletância solar e emitância é exposta à radiação solar, a superfície apresentará uma temperatura superficial mais baixa em comparação com uma superfície similar que tenha menor refletância solar e menor emitância. Se a tinta térmica for aplicada na envolvente do edifício, haverá uma redução da quantidade de calor que entra para o seu interior e, em áreas urbanas, contribui para reduzir a temperatura do ar interior porque a intensidade da convecção do calor é menor em superfícies mais frias (Santamouris et al., 2011). Na Figura 2.1 é demonstrado o efeito que a aplicação das tintas térmicas tem no comportamento térmico do edifício.

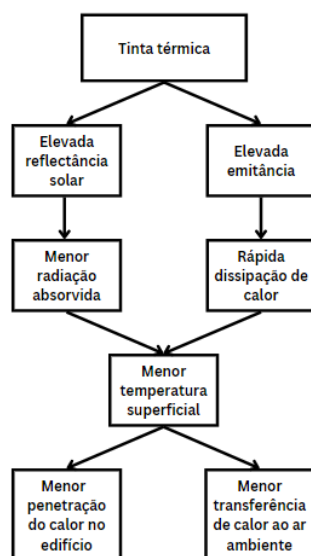


Figura 2.1 — Princípios básicos de tintas térmicas aplicadas na envolvente exterior dos edifícios (adaptado de Santamouris et al. (2011)).

Os estudos de investigação sobre a aplicação de tintas térmicas em edifícios têm-se concentrado principalmente no uso externo, com menor ênfase em aplicações internas. Isto deve-se ao facto de que um dos principais mecanismos de funcionamento dessas tintas ser a refletância da radiação solar incidente. Para que a tinta térmica reflita eficientemente a luz solar e arrefeça a superfície, precisa de estar exposta à radiação solar direta. Em ambientes interiores, o acesso à luz solar é limitado, restringindo a capacidade de refletância e arrefecimento das tintas.

No entanto, as tintas térmicas no interior baseiam-se num mecanismo diferente, que é a refletância seletiva da radiação infravermelha. Segundo Ibrahim et al. (2018), essas tintas são formuladas com pigmentos especiais e aditivos que lhe conferem uma baixa emitância térmica. Quando a radiação infravermelha proveniente dos ocupantes e equipamentos interiores incide sobre uma superfície pintada com tinta térmica, em vez da maioria da radiação ser absorvida pela parede interior, ela é refletida pela tinta de volta para o interior, retendo o calor radiante no interior dos ambientes e minimizando as trocas radiativas com as paredes. Já no

verão, refletem a radiação infravermelha das paredes exteriores aquecidas pela radiação solar, minimizando os ganhos térmicos e a necessidade de arrefecimento.

Portanto, a aplicação de tintas térmicas no exterior permite maximizar o desempenho refletante e demonstrar melhor a eficácia das tintas térmicas. Por outro lado, pesquisas focadas no uso de tintas térmicas em superfícies internas são escassas, representando uma parcela reduzida dos estudos na área.

De acordo com Ibrahim et al. (2018), as tintas com baixa emitância aplicadas no interior de paredes podem trazer benefícios para a poupança de energia e conforto térmico em edifícios. Estas tintas refletem a radiação infravermelha, reduzindo a troca de calor entre superfícies interiores. No inverno, as tintas de baixa emitância ajudam a reter o calor radiante dentro do espaço, reduzindo as necessidades de aquecimento entre 7% e 16%, dependendo das características da construção. Como as pessoas sentem menos o efeito de paredes frias, também melhora o conforto térmico. No verão, as tintas de baixa emitância reduzem igualmente as necessidades de arrefecimento. Entretanto, conferem uma aparência metálica às superfícies, nem sempre esteticamente agradável e perdem eficácia se as paredes exteriores possuírem bom isolamento térmico.

Segundo Zinzi (2016), a aplicação e os efeitos das tintas térmicas em fachadas exteriores de edifícios são pouco investigados, principalmente devido à menor incidência da radiação solar em comparação com a incidência da radiação solar em coberturas. Porém nos casos dos edifícios altos, a quantidade de radiação solar que incide nas fachadas é consideravelmente maior quando comparada com a cobertura, devido à diferença de áreas, resultando em maiores contribuições para a melhoria do desempenho térmico e energético do edifício.

Para estudar os mecanismos de redução das temperaturas das fachadas utilizando tintas térmicas, é importante considerar os mecanismos de transferência de calor, que serão explicados posteriormente, e que são:

- Condução;
- Convecção;
- Radiação.

2.1.2 Desempenho das tintas térmicas

Muitos estudos foram realizados para analisar o desempenho térmico das tintas térmicas aplicadas na envolvente exterior dos edifícios, sendo a cobertura a área mais investigada, devido à maior exposição à radiação solar durante grande parte do dia, com menos obstáculos que providenciem sombreamento comparativamente às fachadas.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo dos objetivos, métodos e principais resultados de diversos estudos sobre o desempenho das tintas térmicas aplicadas no exterior e no interior, de modo a proporcionar uma visão geral.

Tabela 2.1 — Síntese dos estudos sobre a aplicação de tintas térmicas

Referência	Aplicação	Objetivo	Método	Principais resultados
Synnefa e Santamouris (2006)	Exterior	Investigar o efeito de tintas térmicas na redução das temperaturas superficiais de edifícios	Ensaio experimental com 14 amostras de tintas térmicas em condições de verão, medição das temperaturas superficiais	Redução média de 4°C durante o dia e 2°C durante a noite com tintas térmicas em relação a convencionais
Dias et al. (2014)	Exterior	Estudar impacto de tintas térmicas exteriores no desempenho térmico e consumo energético de edifício residencial	Simulação computacional de modelos de edifícios novos e antigos com tintas térmicas	O aumento da refletância solar de 50% para 92% resultou numa diminuição da temperatura interior entre 2°C e 4,7°C no verão. O consumo anual de energia aumentou cerca de 30% para aquecimento, mas praticamente eliminou a necessidade de arrefecimento.
Guo et al. (2017)	Exterior	Analisar desempenho térmico de novo revestimento refletante aplicado em parede exterior	Medições experimentais em duas salas idênticas, uma com revestimento refletante e outra sem.	Redução da temperatura interna de até 4,7°C e do consumo energético anual de até 30% no modelo de edifício antigo com tinta térmica
Hernández-Pérez et al. (2018)	Exterior	Avaliar desempenho térmico de coberturas brancas refletantes comparativamente a coberturas convencionais	Medições experimentais em células de ensaio durante duas semanas	As coberturas brancas refletantes reduziram a temperatura superficial entre 10-14,6°C e o ganho de calor diário entre 59-80%
Chaowanapanit et al. (2021)	Exterior	Avaliar economia de energia com uso de tinta de alta refletância solar no exterior	Medições experimentais em duas casas e simulação computacional	A tinta de alta refletância solar reduziu a temperatura superficial em até 8,1°C e proporcionou economia de energia de 31,2%
Joudi et al. (2013)	Interior/exterior	Avaliar potencial de revestimentos refletantes interiores e exteriores para melhorar desempenho térmico de edifícios	Ensaio experimental e simulação computacional em 3 modelos de cabines	O uso de revestimentos refletantes em superfícies interiores e exteriores de edifícios pode melhorar significativamente o desempenho térmico e eficiência energética.

Tabela 2.1 — Síntese dos estudos sobre a aplicação de tintas térmicas (continuação)

Referência	Aplicação	Objetivo	Método	Principais resultados
Sharkawi e Baharun (2017)	Interior	Estudar efeito de tinta refletiva no interior de edifício residencial	Medições experimentais em duas salas com tintas diferentes.	A tinta refletiva reduziu a temperatura do ar interior em cerca de 1,9°C em comparação à tinta convencional.
Simpson et al. (2019)	Interior	Avaliar desempenho térmico de tintas térmicas aplicadas no interior em climas de aquecimento	Ensaio laboratorial e simulação computacional	As tintas térmicas não apresentaram desempenho superior a revestimentos convencionais quando aplicadas internamente.
Malz et al. (2020)	Interior	Analisar impacto de tinta de baixa emitância aplicada no interior em termos de economia de energia e conforto térmico.	Simulação computacional de um quarto com dimensões 3 m x 3 m x 2,4 m.	A tinta de baixa emitância reduziu as perdas de calor até 22% quando aplicada no interior

Segundo os estudos efetuados por Haberl e Cho (2004), a utilização de tintas térmicas nas coberturas de edifícios residenciais e comerciais resultaram em reduções de consumo de energia que variam entre os 2% e 44%, sendo a maior parte dos estudos sido realizados para a estação arrefecimento.

Synnefa et al. (2006) investigaram o efeito das tintas térmicas na redução das temperaturas superficiais de edifícios. Este estudo comprovou a capacidade das tintas térmicas ensaiadas em diminuir significativamente as temperaturas superficiais dos elementos construtivos, tanto em períodos diurnos como noturnos, promovendo um arrefecimento passivo benéfico durante a estação quente.

Dias et al. (2014) consideraram edifícios com características térmicas que representam tanto construções antigas quanto novas. Para um edifício de estudo em Portugal, no verão, foi verificado que um aumento no valor da refletância solar total da cobertura e da fachada de 50% para 92% reduziu a temperatura interna entre 2,0°C e 4,7°C na construção antiga (sem isolamento térmico), e entre 1,2°C e 3,0°C na nova construção (com isolamento térmico). Os resultados do consumo anual de energia para aquecimento mostraram um aumento máximo de cerca de 30% ao usar *cool paints*. No entanto, foi demonstrado que o consumo de arrefecimento quase desaparece, eliminando a necessidade de instalar dispositivos de ar condicionado.

O estudo experimental desenvolvido por Guo et al. (2017) analisou o efeito de um novo revestimento de elevada refletância aplicado na face exterior da parede sul de uma sala de teste, comparando seu desempenho térmico com uma sala idêntica sem o revestimento. As

salas foram construídas na cobertura de um edifício na China, em clima de verão muito quente e inverno frio. Sensores de temperatura e fluxo de calor permitiram monitorar as condições internas e externas em contínuo no verão. Os resultados mostraram temperaturas internas significativamente menores na sala com o revestimento de alta refletância (até 4,30°C de diferença). O fluxo também foi três vezes menor nesta sala. O estudo demonstra o potencial do revestimento ensaiado em refletir radiação solar incidente, reduzindo ganhos térmicos no interior e melhorando o desempenho térmico e conforto térmico nos edifícios.

Hernández-Pérez et al. (2018) avaliaram o desempenho térmico de uma tinta convencional vermelha e de duas coberturas revestidas com tintas brancas refletantes em duas células de ensaio ao ar livre situadas em Cuernavaca, México. Os autores analisaram as duas células de ensaio durante duas semanas e mediram a temperatura superficial das coberturas, a temperatura do ar interior e determinaram o fluxo de calor das coberturas. A cobertura vermelha teve uma temperatura superficial 3,0°C mais alta do que a cobertura cinza e essa diferença foi a causa de a cobertura vermelha demonstrar um pico de fluxo de calor 20% maior. Por outro lado, as coberturas brancas refletantes reduziram a temperatura da superfície entre 10,0°C e 14,6°C em comparação com o cinza. As coberturas brancas refletantes tiveram um ganho diário de calor entre 59% e 80% menor do que a cinza, enquanto a cobertura vermelha teve um ganho de calor 22% maior. Finalmente, os autores estimaram o custo-benefício dos revestimentos das coberturas e concluíram que os revestimentos brancos refletantes são uma estratégia custo-efetiva para reduzir o consumo de energia em edifícios no México porque o seu período de retorno é inferior a 2 anos.

O estudo de Chaowanapanit et al. (2021) foi realizado em duas casas idênticas com uma área de piso de 24 m² cada e localizadas em Samut Prakan, Tailândia. Uma das casas teve sua fachada exterior pintada com tinta de alta refletância solar e a outra com tinta convencional. Foi selecionada a cor castanho-escuro para ambas as casas de modo a analisar um caso extremo, dado que tons escuros tendem a absorver mais calor quando comparados com tons claros. Os autores concluíram que a tinta de alta refletância solar permitiu reduzir a temperatura da superfície externa em até 8,1°C e economizar energia em 31,2% devido à redução do ganho térmicos. Para verificar o efeito dos resultados, os autores realizaram uma simulação energética através do software EnergyPlus que demonstrou uma economia de energia de 32,7%.

Joudi et al. (2013) estudaram o uso de revestimentos de elevada refletância para melhorar o desempenho térmico de edifícios. O estudo considerou diferentes cenários com revestimentos refletantes interiores e exteriores em três cabines com dimensão 3,60 m x 4,20 m x 2,90 m e o efeito térmico combinado de ambos os tipos de revestimentos. O estudo concluiu que os revestimentos de alta refletância têm potencial substancial para melhorar o desempenho

térmico do edifício como *cool roof* e redução da ilha de calor para revestimentos exteriores e como barreiras de radiação para revestimentos interiores.

Sharkawi e Baharun, (2017) realizaram um estudo experimental sobre o efeito de diferentes tipos de tintas quando aplicadas no interior no desempenho térmico e energético de um edifício residencial na Malásia, que é um país com clima quente e húmido. Os autores basearam-se na hipótese de que a tinta térmica poderia reduzir a temperatura interna do edifício e melhorar o conforto térmico e a economia de energia dos ocupantes. Compararam a tinta térmica com uma tinta convencional. Os autores selecionaram duas salas idênticas de um apartamento localizado no centro da cidade de Kuching, aplicaram as tintas nas paredes interiores das salas e mediram a temperatura do ar e da superfície interior durante 11 horas, das 7h30 às 18h30, recorrendo a termopares e *data loggers* para medir a temperatura. Os resultados mostraram que a tinta térmica teve um efeito significativo na redução da temperatura do ar e da superfície interior. A temperatura do ar foi reduzida em cerca de 1,9°C pela aplicação da tinta térmica nas paredes interiores, o que pode diminuir a necessidade de uso de ar condicionado e ventiladores. A temperatura da superfície foi reduzida em até 2,8°C, sendo que o maior efeito ocorreu na parede oeste, que recebe mais radiação solar durante o dia. Isso indica que a parede oeste é a melhor orientação para aplicar a tinta térmica no interior, na Malásia. Os autores concluíram que a tinta térmica é uma boa solução para melhorar o desempenho térmico e energético de um edifício residencial em um clima quente e húmido.

Simpson et al. (2019) investigaram o desempenho térmico de tintas térmicas e revestimentos superficiais aplicados no interior de edifícios em climas com predominância de aquecimento. Foram ensaiadas seis diferentes tintas térmicas no interior disponíveis no Reino Unido e comparadas com revestimentos interiores convencionais como tinta acrílica, papéis de parede e placas de poliestireno expandido moldado (EPS). A resistência e condutibilidade térmica das tintas foram medidas por métodos padrão, e um modelo dinâmico de uma casa vitoriana foi usado para avaliar a economia de energia, custos e período de retorno do investimento. Os resultados mostraram que o aumento na resistência térmica das tintas térmicas com menos de 0,55 mm de espessura foi muito pequeno, representando uma melhoria de apenas 0,6-1,8% numa parede de alvenaria não isolada. O desempenho das tintas térmicas aplicadas no interior não foi muito superior ao de revestimentos convencionais como papel de parede vinílico. O modelo de simulação previu economia de energia de menos de 1% para a maioria das tintas ensaiadas, com período de retorno de centenas de anos, não justificando as alegações comerciais. Os autores consideram que os materiais isolantes tradicionais, como o EPS, têm desempenho térmico e relação custo-benefício superiores para melhorar o isolamento térmico de edificações.

Malz et al. (2020) analisaram o uso de tintas de baixa emitância no revestimento interior de paredes e a eficácia na economia de energia em edifícios existentes, bem como seu impacto

no conforto térmico. Avaliaram o uso de tinta de baixa refletância aplicadas como revestimento nas superfícies interiores, em conjunto com a aplicação de isolamento térmico na face exterior da parede de alvenaria de tijolos num quarto com dimensão de 3,0 m x 3,0 m x 2,4 m. Os resultados mostraram que a tinta de baixa emitância pode diminuir as perdas de calor em até 18% e até 22%.

2.1.3 Fatores que influenciam a refletância

Diversos fatores condicionam a refletância solar apresentada pelas superfícies, conforme evidenciado em múltiplos estudos.

Berdahl e Bretz (1997), num estudo sobre a refletância solar de materiais de cobertura, afirmam que a rugosidade de uma superfície contribui para a diminuição da sua refletância. De acordo com estes autores, o acabamento rugoso ou liso resulta numa dispersão difusa da radiação incidente, reduzindo a componente especular refletida e, conseqüentemente, o índice de refletância solar global da superfície.

Materiais com coloração clara, apresentam tipicamente elevada refletância na região visível do espectro e tendem a apresentar também refletância superior no infravermelho próximo, de acordo com Berdahl e Bretz (1997). Contudo, uma refletância superior no espectro visível não implica, necessariamente, um comportamento análogo em todo o espectro solar, conforme salientam estes autores.

De acordo com Synnefa et al. (2006), a degradação da superfície com o passar dos anos resultante da contaminação por poluentes da atmosfera, agentes biológicos e alterações derivadas da ação da radiação UV diminui a refletância ao longo do tempo. Constata-se, portanto, que a degradação decorrente da exposição ambiental é causada pela contaminação por diversos agentes, incluindo poluição do ar e radiação UV, sendo crucial considerar as condições climáticas específicas para uma correta avaliação da refletância da tinta ao longo do tempo.

2.1.4 Síntese do desempenho das tintas térmicas

A revisão da literatura revela que a investigação se tem focado principalmente no estudo de tintas com elevada refletância solar e emitância térmica, as quais são aplicadas mais frequentemente em superfícies exteriores do que interiores. Por outro lado, alguns investigadores têm formulado tintas térmicas através da adição de determinados componentes a tintas convencionais, com o objetivo de melhorar o seu desempenho térmico. Conduzem ensaios experimentais para comparar essas novas tintas térmicas com produtos convencionais e avaliar se de facto se verificam melhorias ao nível das propriedades térmicas. Deste modo, a comunidade científica tem estudado soluções para expandir o potencial do arrefecimento passivo das tintas, complementando as formulações existentes otimizadas para elevada refletância solar.

A investigação no âmbito das tintas térmicas tem recorrido frequentemente a uma abordagem experimental em duas fases. Numa primeira etapa, têm sido produzidos provetes padronizados que são pintados com as tintas em estudo. As propriedades destes provetes, como a refletância, têm sido quantificadas laboratorialmente através de técnicas de espectrofotometria. Numa segunda fase, têm-se o desempenho térmico real das tintas quando aplicadas em elementos construtivos e sujeitas às condições de exposição solar. Para tal, têm sido construídos modelos experimentais como células experimentais, compartimentos, secções de fachada ou de cobertura, nos quais são aplicados sistemas de pintura com as tintas previamente caracterizadas. A instrumentação destes modelos com termopares e fluxímetros tem permitido uma análise quantitativa do efeito das tintas estudadas ao nível do fluxo de calor e temperaturas quando expostas à radiação solar. Esta combinação de ensaios laboratoriais e campanhas experimentais *in situ* tem possibilitado uma avaliação do potencial de arrefecimento proporcionado pelas tintas térmicas.

Entre as técnicas mais frequentemente utilizadas na investigação para avaliar o comportamento de tintas térmicas destacam-se:

- Termografia de infravermelhos, como método de análise não destrutivo;
- Ensaios laboratoriais para quantificar parâmetros como a refletância solar e emittância térmica;
- Simulações computacionais do desempenho energético recorrendo a programas como o EnergyPlus, Esp-r ou IDA Indoor Climate and Energy.

Estas abordagens complementares têm permitido uma caracterização abrangente do comportamento térmico das tintas, conjugando técnicas de inspeção *in situ*, quantificação rigorosa das propriedades térmicas em laboratório e simulações prévias ao desempenho em condições reais.

A análise dos resultados obtidos nos diversos casos de estudo revelou algumas melhorias nas temperaturas superficiais após a aplicação de tintas térmicas, comparativamente a tintas convencionais. Essas melhorias traduziram-se em reduções da temperatura que variam entre 2,8°C a 8,0°C dependendo das condições e propriedades da tinta. Adicionalmente, na maioria dos estudos analisados foi realizada uma simulação energética através do software EnergyPlus para estimar o impacto destas tintas no desempenho energético dos modelos. As simulações permitiram concluir que o uso de tintas térmicas tem potencial para melhorar o comportamento energético dos casos de estudo, resultando numa diminuição dos consumos energéticos anuais que varia entre 10% a 37%. Esta poupança depende das características de cada edifício e da eficiência da tinta aplicada

2.2 Conceitos sobre a termografia de infravermelhos

2.2.1 Conceitos gerais

Atualmente as câmaras termográficas apresentam um aspeto mais compacto e versátil, permitindo o registo simultâneo da imagem real e do termograma, bem como a realização de vídeos. Isto foi possível a partir da década de 90 do séc. XX, quando os sistemas de refrigeração por azoto líquido foram substituídos por sistemas termoelétricos, o que permitiu o desenvolvimento de equipamentos com detetores matriciais para leitura simultânea da temperatura superficial em vários pontos (Barreira, 2004).

A termografia de infravermelhos constitui um método não destrutivo que possibilita a medição da radiação infravermelha irradiada por objetos e convertê-la em uma imagem térmica. Essa imagem é usada para avaliar a temperatura superficial do objeto. Na área de construção civil, este método é usado para avaliar o desempenho térmico de edifícios e para detetar problemas de isolamento térmico e fugas de águas. Este método também é considerado uma técnica útil para avaliar a eficácia de tintas em fachadas, como foi o caso da dissertação de mestrado de (L. Gonçalves, 2014).

2.2.2 Transferência de calor

A temperatura do ar exterior e a radiação solar são as variáveis climáticas com maior influência sobre o comportamento térmico dos edifícios. No inverno, o aumento das perdas de calor para o ambiente exterior compromete as condições de conforto no interior das construções. O isolamento térmico das paredes e coberturas, bem como a instalação de vidros duplos, mostram-se medidas muito eficazes para diminuir estas perdas e reter o calor produzido internamente (H. Gonçalves e Graça, 2004).

A radiação solar assume uma importância crucial no desempenho térmico dos edifícios, constituindo uma variável climática determinante. No inverno, a radiação solar é uma fonte de aquecimento benéfica, contribuindo para elevar as temperaturas interiores. Já no verão, a radiação solar excessiva contribui para o sobreaquecimento do interior dos edifícios (H. Gonçalves e Graça, 2004).

Tal como foi referido anteriormente, as transferências de calor podem ocorrer de três formas (Henriques, 2011): Condução, convecção e radiação.

Condução

“É o fenómeno de transferência de calor entre duas zonas com temperaturas diferentes que pode ocorrer em corpos sólidos ou fluidos.” (Henriques, 2011), representada na equação 2.1:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (2.1)$$

em que q é o fluxo de calor [em W/m^2], Q a quantidade de calor [em W] e A é a área perpendicular ao sentido do fluxo que ocorre a transmissão de calor.

O fluxo de calor que resulta das transferências de calor por condução é dado pela equação 2.2 (Henriques, 2011):

$$q = \frac{(T_{si} - T_{se})}{R} \quad (2.2)$$

em que T_{si} é a temperatura superficial interior, T_{se} é a temperatura superficial exterior e R é o somatório das resistências térmicas das camadas que constituem o elemento construtivo.

Convecção

"A convecção é um mecanismo de transmissão de calor próprio dos fluidos, já que pressupõe a existência de movimentos que são incompatíveis com os corpos sólidos." (Henriques, 2011).

Radiação

Segundo (Henriques, 2011), radiação é o resultado da energia emitida por todos os corpos com temperatura superior ao zero absoluto (0 K). *"A radiação propaga-se a velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s), em longas distâncias através de gases e vácuos, e possui como características próprias uma determinada frequência (f) em Hertz e comprimento de onda (λ) em metros"* (Henriques, 2011), com a seguinte relação na equação 2.3:

$$c = \lambda \times f \quad (2.3)$$

"A propagação da radiação pode ser analisada em termos de energia quântica, segundo a qual a interação da radiação com a matéria é feita sob a forma de fótons, possuindo energia quantificável" (Henriques, 2011), através da seguinte equação 2.4:

$$E = h \times f = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (2.4)$$

em que E é a energia de radiação eletromagnética e h é a constante de Planck que assume o valor de $6,625 \times 10^{-34}$ J.s

Através da equação 2.4, conclui-se que a energia da radiação eletromagnética é inversamente proporcional ao comprimento de onda, isto é, quanto maior for a energia de radiação eletromagnética, menor será o comprimento de onda.

2.2.3 Espectro eletromagnético

A radiação eletromagnética assume um espectro eletromagnético (Figura 2.2) muito vasto em termos de comprimento de onda, que varia entre os raios Gama, de comprimentos de onda muito pequenos até aos grandes comprimentos de ondas de rádio e televisão (Henriques, 2011).

De acordo com Henriques (2011), os estudos sobre o comportamento térmico dos edifícios focam-se numa faixa específica do espectro eletromagnético conhecida como radiação térmica, que compreende comprimentos de onda entre 0,1 e 100 μm . Essa radiação térmica abrange a radiação ultravioleta (0,1 a 0,4 μm), a luz visível (0,4 a 0,78 μm) e a radiação infravermelha (0,78 a 100 μm). Ou seja, na análise do desempenho térmico das construções, considera-se apenas esse intervalo restrito de radiação térmica, e não todo o espectro, por ser o mais relevante nos processos de transferência de energia térmica nos edifícios.

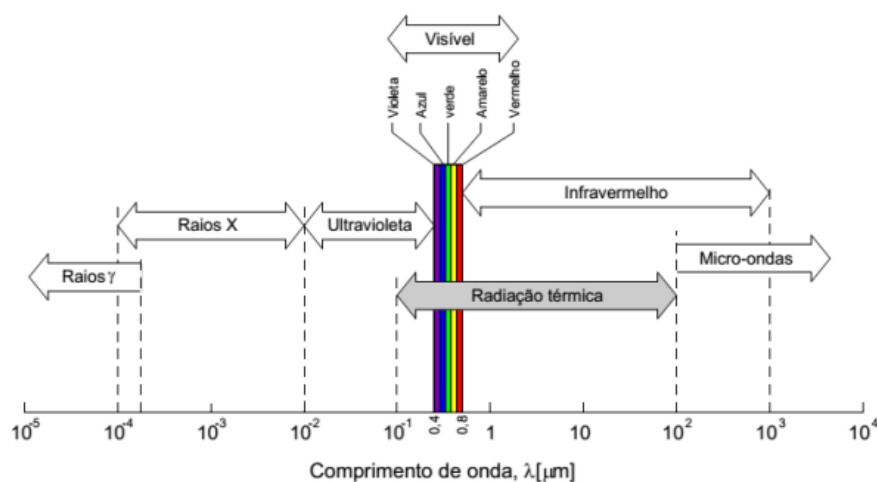


Figura 2.2 — Espectro eletromagnético (Matias, 2001).

A radiação solar constitui uma parcela restrita dentro da ampla banda da radiação térmica, correspondendo especificamente à radiação eletromagnética proveniente do Sol cujos comprimentos de onda se situam entre 0,1 e 3 μm (Henriques, 2011).

A radiação infravermelha é o resultado do aumento da agitação térmica das partículas por aquecimento que ocupa também grande parte da radiação térmica (Maldague, 2001a). As câmaras termográficas detetam a radiação infravermelha, uma vez que a termografia utiliza a banda espectral de infravermelhos que engloba os comprimentos de onda entre 0,78 – 1000 μm (Figura 2.2), que é subdividida em três categorias (Maldague, 2001b):

- infravermelho próximo (0,78 – 1,5 μm);

- infravermelho médio (1,5 – 20 μm);
- infravermelho extremo (20 – 1000 μm).

Na presente dissertação, a banda espectral de infravermelhos é de maior relevância no espectro eletromagnético, uma vez que as câmaras de termografia de infravermelhos operam na gama do infravermelho médio (1,5 – 20 μm).

2.2.4 Radiação do corpo negro

Um corpo negro designa um objeto com a propriedade de absorver na totalidade a radiação eletromagnética incidente sobre ele. Esta absorção ocorre independentemente da direção ou do comprimento de onda da radiação incidente (Maldague, 2001b).

Lei de Planck

A lei de Planck (equação 2.6) descreve a distribuição da energia emitida em função do comprimento de onda para uma dada temperatura. A seguinte expressão demonstra o poder emissivo espectral de um corpo negro (Hart, 1991):

$$E_{\lambda,n}(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad (2.6)$$

em que h é a constante de Planck [em J.s], T é a temperatura termodinâmica [em K], λ é o comprimento de onda [em μm], c é a velocidade da luz [em m.s^{-1}] e K é a constante de Boltzmann [em J.K^{-1}].

A lei de Planck pode ser representada através de curvas, demonstrada na Figura 2.3.

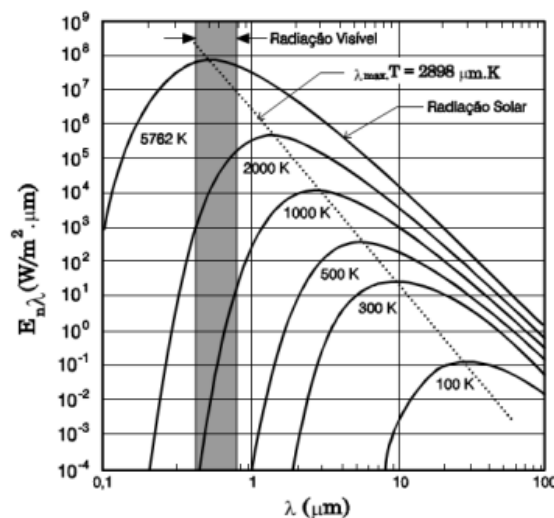


Figura 2.3 — Poder emissivo espectral de um corpo negro segundo a lei de Planck (Matias, 2001).

A Figura 2.3 mostra que, para uma determinada temperatura, a emitância espectral de um corpo negro depende do comprimento de onda da radiação. Quanto maior for a temperatura do corpo negro, menor será o seu comprimento de onda correspondente à radiação emitida.

Lei de Wien

Derivando a equação 2.6 da lei de Planck em ordem ao comprimento de onda (λ), obtém-se a equação 2.7 que resulta em uma linha reta que está representada a tracejado na Figura 2.3 que determina o poder emissivo espectral máximo para uma dada temperatura (Hart, 1991).

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2898}{T} \quad (2.7)$$

em que $\lambda_{\text{máx}}$ é o comprimento de onda máximo [em μm] e T é a temperatura termodinâmica [em K].

Lei de Stefan-Boltzmann

A lei de Stefan-Boltzmann (eq. 2.8) determina a emitância térmica total de um corpo negro e é obtida através da integração da equação 2.6 da lei de Planck para todos os comprimentos de onda ($0 \leq \lambda \leq \infty$) (Hart, 1991):

$$E^0 = \sigma \cdot T^4 \quad (2.8)$$

em que $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ [em $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$] é a constante de Stefan-Boltzmann e T é a temperatura absoluta [em K].

2.2.5 Radiação do corpo não negro

Quando ocorre incidência de radiação térmica, os corpos não negros apresentam um comportamento distinto dos corpos negros, uma vez que a radiação incidente pode repartir-se em três componentes: uma fração absorvida (α), uma fração refletida (ρ) e uma fração transmitida (τ), que dependem de vários fatores como o comprimento de onda (λ), orientação (θ), temperatura (T). Deste modo, verifica-se que o fluxo incidente G_i (equação 2.9) é igual ao somatório dos fluxos absorvidos, refletidos e transmitidos (Maldague, 2001b).

$$G_i = G_\alpha + G_\rho + G_\tau \quad (2.9)$$

em que: G_i é radiância total, G_α é a radiância absorvida, G_ρ é a radiância refletida e G_τ é a radiação transmitida.

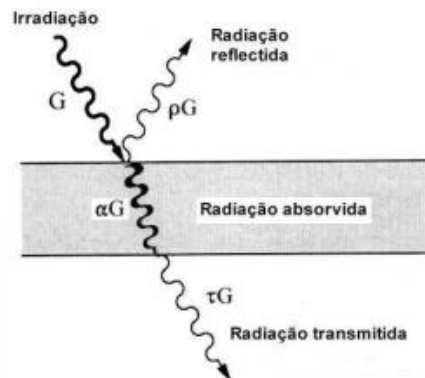


Figura 2.4 Radiação nas superfícies (Henriques, 2011).

Para um corpo opaco ($\tau = 0$), a energia incidente é parcialmente absorvida pelo corpo e refletida pela superfície (Henriques, 2011), apresentado na equação 2.10:

$$G_i = G_\alpha + G_\rho \quad (2.10)$$

Para um dado comprimento de onda, o somatório da absorptância, refletância e transmitância deve ser igual a um, como demonstra a equação 2.11:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (2.11)$$

em que: $\alpha_\lambda = \frac{G_\alpha}{G_i}$ é a absorptância espectral; $\rho_\lambda = \frac{G_\rho}{G_i}$ é a refletância espectral; $\tau_\lambda = \frac{G_\tau}{G_i}$ é a transmitância espectral.

As três propriedades são adimensionais e variam entre 0 e 1. Os corpos negros absorvem toda a radiação incidente, sendo assim, $\alpha_\lambda = 1$ e por consequência $\rho_\lambda = \tau_\lambda = 0$ (Modest, 2003).

Um corpo opaco é caracterizado por ter transmitância nula ($\tau = 0$), simplificando a equação 2.11 para a equação 2.12:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (2.12)$$

A energia absorvida pelo corpo tem de ser compensada pela energia que emite, para que seja verificado o equilíbrio do sistema. Emitância térmica espectral é o parâmetro que caracteriza a energia emitida pelo corpo sendo inferior ou igual a um. Segundo a lei de Kirchhoff, a emitância térmica e absorptância espectrais são iguais para qualquer material a uma dada temperatura e comprimento de onda, sendo assim, apresentado na equação 2.13:

$$\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda \quad (2.13)$$

2.2.6 Emitância

A emitância (ε) é a relação entre a radiância de um corpo corrente (E) e a radiância de um corpo negro (E^0), conforme a equação 2.14 (Henriques, 2011):

$$\varepsilon = \frac{E}{E^0} \quad (2.14)$$

em que ε é a emitância, E é a radiância de um corpo corrente e E^0 a radiância de um corpo negro.

Através da lei de Stefan-Boltzmann (equação 2.8), a radiância de uma superfície real pode ser calculada pela equação 2.15 (Henriques, 2011):

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.15)$$

em que ε é a emitância, T é a temperatura absoluta [em K] e $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ [em $W/m^2.K^4$].

2.2.7 Aplicação de termografia de infravermelhos em edifícios

A termografia infravermelha é um método de diagnóstico não destrutivo que permite detectar problemas não visíveis a olho nu nos edifícios. Com o auxílio de imagens térmicas fornecidas por uma câmara termográfica é possível detectar áreas onde há transferência significativa de calor através da estrutura do edifício, e através desta informação, os profissionais podem tomar medidas corretivas adequadas para melhorar o comportamento térmico do edifício e melhorar o conforto dos ocupantes.

De acordo com Barreira (2004), muitos edifícios necessitam de reduzir o consumo energético e melhorar o seu comportamento térmico, recorrendo a termografia de infravermelhos, é possível efetuar ensaios rápidos e económicos para verificar o desempenho térmico das soluções construtivas que foram adotadas na construção dos edifícios e identificar anomalias. Para que haja sucesso na termografia, o operador deve ser competente e especializado para efetuar corretamente os ensaios e interpretar os resultados.

No método passivo, a câmara termográfica é direcionada ao objeto em análise para inspeção sem influência térmica externa, aproveita-se a diferença de temperatura entre o ambiente interior e exterior, que resulta num fluxo de calor através da envolvente do edifício. Quanto maior essa diferença, tipicamente acima de $10^\circ C$, maior tende a ser a magnitude desse fluxo do lado mais quente para o mais frio, por efeito do gradiente térmico. Também influencia a

capacidade dos materiais da estrutura em oferecer resistência à transferência de calor (Matias, 2001).

2.2.8 Análise dos resultados dos ensaios de termografia de infravermelhos

A análise de resultados dos ensaios de termografia de infravermelhos é uma etapa importante que consiste na interpretação das imagens térmicas obtidas durante a inspeção. De acordo com Barreira (2004), a natureza do objeto em estudo e o objetivo do ensaio são fatores importantes para determinar se a análise é considerada qualitativa ou quantitativa.

2.2.8.1 Análise qualitativa

Segundo Barreira (2004), recomenda-se a utilização de uma análise qualitativa quando o objetivo for obter uma visão introdutória ou panorâmica da problemática, sem aprofundamento, por ser uma análise rápida e de fácil interpretação, são efetuados termogramas simples e sem grandes detalhes de medição que permitem avaliar e analisar termicamente o objeto em estudo. Como é pretendido avaliar as diferenças de temperaturas superficiais, as imagens térmicas podem ser obtidas com emitância térmica constante, e a sua interpretação pode ser feita *in situ*.

2.2.8.2 Análise quantitativa

De acordo com Barreira (2004), a análise quantitativa é mais exata que a análise qualitativa pois permite medir temperaturas, e é a mais demorada pois requer mais detalhe e condições de ensaio rígidas, são calculadas as temperaturas através de alguns parâmetros analíticos e das imagens térmicas. Os resultados da análise quantitativa não são avaliados *in situ*, sendo cuidadosamente anotados todas as informações essenciais para que seja analisado posteriormente após processamento de toda a informação.

2.2.9 Fatores que influenciam a medição em análises termográficas de edifícios

É importante conhecer a solução construtiva dos elementos e garantir que não haja fontes térmicas envolventes imprevistas. A quantidade de calor transferida através do componente construtivo será maior quanto maior for a diferença de temperatura entre o interior e exterior, por isso deve se ponderar essa diferença de temperatura na interpretação de resultados (Barreira, 2004).

Ao realizar um ensaio no interior de um edifício, é importante evitar a presença de correntes de ar provenientes de janelas abertas ou grelhas que possam incidir diretamente na área

a medir. Os dados recolhidos no ensaio efetuado no interior podem ser afetados pela modificação do fluxo térmico habitual do interior para o exterior, provocada pelo aquecimento da fachada exterior e também pela incidência direta da radiação solar na superfície analisada (Barreira, 2004).

A presença de áreas sombreadas no edifício ou fachada analisados, provocada pela proximidade de outras construções, vegetação ou obstáculos, tem potencial para modificar as temperaturas superficiais obtidas e, caso não devidamente ponderada aquando da interpretação dos resultados, pode ocasionar inferências equivocadas (Barreira, 2004).

A obtenção da imagem térmica é afetada pela distância de medição, porque a resolução dos termogramas diminui com o aumento da distância entre a câmara termográfica e o objeto, ou seja, um ponto do termograma corresponde a uma área específica da superfície do elemento, e a medida que a distância vai aumentando, o mesmo ponto do termograma vai corresponder a uma maior área específica da superfície do elemento e a radiação passa a ser uma média, resultando na diminuição do detalhe (Barreira, 2004).

CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 Prospeção de tintas térmicas no mercado nacional

No âmbito desta dissertação, realizou-se uma prospeção sobre as tintas térmicas comercializadas para aplicação no interior e no exterior de edifícios, disponíveis no mercado nacional português, através do contacto direto com os principais fabricantes e revendedores destes produtos. A amostra pesquisada incluiu fabricantes nacionais de tintas e empresas do setor da construção civil, visando identificar a disponibilidade comercial de tintas térmicas em Portugal. A 17 de março de 2023 foi enviado o email que consta no Anexo A.1 para a lista de empresas na Tabela 3.1, solicitando informações sobre a comercialização de tintas térmicas.

Tabela 3.1 — Lista de empresas contactadas

Empresa	E-mail
Barbot	barbot.sede@barbot.pt
Cin	customerservice@cin.pt
Color	geral@color.pt
Dyrup	hrodrigues@ppg.com
Ecolux	geral@ecolux.pt contact@labo-portugal.com
Labo-Portugal	marianacorreia@labo-portugal.com p.oliveira@labo-portugal.com
Mapei	geral@mapei.pt
Nacionalrev	geral@nacionalrev.pt
Neuce	portugal@neuce.com servico.tecnico@neuce.com
Nitin	nitin@nitin.pt
Nobeltinta	geral@nobeltinta.com

Tabela 3.1 — Lista de empresas contactadas (continuação).

Empresa	E-mail
Robbialac	robbialac@robbialac.pt
Sika	info@pt.sika.com
Sotinco	porto@sotinco.pt
Tintas vital	geral@tintas-vital.pt
Tintas2000	tintas2000@tintas2000.pt
Tintascompinta	geral@tintascompinta.com
Velacril	escritorio@velacril.com

Posteriormente, foi reenviado um novo e-mail de seguimento a 24 de março de 2023 às empresas que não responderam inicialmente. No total obteve-se resposta apenas de sete empresas, sendo que cinco empresas referiram não comercializar este tipo de tintas, uma empresa afirmou produzir tintas térmicas e outra declarou não produzir internamente, porém distribuir tintas térmicas de fornecedores externos. Apesar de, pelas poucas respostas, parecer que a maioria dos fabricantes não atua nesse mercado particular de tintas térmicas, a pesquisa permitiu mapear fabricantes e revendedores em atividade no país, obtendo-se dois contactos de empresas com comercialização das referidas tintas térmicas.

3.2 Contextualização da campanha experimental

As duas empresas que referiram possuir tintas térmicas na sua gama de produtos demonstraram de imediato o interesse em disponibilizarem amostras dessas tintas para utilização nesta dissertação. Além das referidas tintas, foram ainda fornecidas amostras de tintas e primários convencionais pelos mesmos fabricantes, nas quantidades sugeridas, para efeitos comparativos. A Empresa 1 disponibilizou amostras de tinta convencional e térmica para uso em exterior e interior (de acordo com informação da empresa), bem como de primário convencional para aplicação com essas tintas. Já a Empresa 2 cedeu amostras de duas tintas térmicas, sendo uma para interior e outra para exterior, além de amostras de primário térmico que pode ser usado tanto internamente quanto externamente.

As amostras de tintas térmicas e convencionais e de primários térmicos e convencionais que foram gentilmente cedidas por estas empresas constituíram assim os materiais estudados nesta dissertação.

O presente capítulo descreve os materiais e métodos de ensaio experimentais conduzidos no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) com o propósito de avaliar o desempenho das tintas térmicas em estudo. Este estudo envolveu duas componentes: campanha

experimental numa célula, com aproximadamente 14 m² de implantação, utilizada para avaliar o desempenho térmico das tintas em condições reais de exposição, no interior através do uso de termopares e no exterior através da utilização da termografia de infravermelhos, e um procedimento laboratorial para caracterizar a refletância das tintas em estudo que foram utilizadas na célula.

A campanha experimental na célula do LNEC, construída com materiais e técnicas representativas de edificações reais, permitiu ensaiar e comparar o efeito de diferentes tintas térmicas aplicadas nas superfícies interiores e exteriores da envolvente vertical. Foram realizadas medições da temperatura superficial interior das paredes através de termopares, humidade do ar interior na célula e fluxo de calor que atravessa as paredes, antes e após a aplicação das tintas para uma avaliação quantitativa do seu desempenho, e no exterior foi realizado a análise das temperaturas superficiais por termografia de infravermelhos.

Em complemento, foi realizado um ensaio laboratorial padronizado para quantificar e comparar a refletância das tintas térmicas e convencionais estudadas, em que foram aplicadas as tintas em provetes de membrana de betume polímero, como suportes a utilizar no equipamento de medição. A refletância total destes provetes foi determinada através do ensaio de espectrofotometria.

3.3 Materiais estudados

As amostras de tintas térmicas e primários térmicos analisadas nesta dissertação, tal como referido acima foram fornecidas por duas empresas, que neste documento serão denominadas como Empresa 1 e Empresa 2. Na Tabela 3.2, Tabela 3.3 e Tabela 3.4 apresenta-se a identificação das amostras estudadas.

Tabela 3.2 — Amostras da tinta térmica recebida pela Empresa 1.

Nomenclatura	Tipo de tinta	Cor	Aplicação
BrT1	Tinta térmica	Branco	Interior/Exterior

Tabela 3.3 — Amostras de tintas e primário térmico recebidas pela Empresa 2.

Nomenclatura	Tipo de tinta	Cor	Aplicação
BrT2	Tinta térmica	Branco	Interior
BrT3	Tinta térmica	Branco	Exterior
PrT	Primário térmico	Incolor	Interior/Exterior

Com o objetivo de possibilitar uma análise comparativa, além dos sistemas térmicos, também foram obtidas amostras de tintas e primários convencionais da Empresa 1, conforme descrito na Tabela 3.4. Dessa forma, amplia-se o escopo do estudo e fornece-se uma referência importante na avaliação dos sistemas térmicos investigados, através da análise comparativa com produtos convencionais.

Tabela 3.4 — Amostras de tintas e primários convencionais recebidos pela Empresa 1.

Nomenclatura	Tipo de tinta	Cor	Aplicação
BrC	Tinta convencional	Branco	Interior/Exterior
PrN	Primário convencional	Incolor	Interior/Exterior

3.3.1 Características das tintas

Para caracterizar adequadamente o desempenho das tintas térmicas e as tintas convencionais utilizadas neste estudo, foram analisadas as fichas técnicas dos fabricantes relativas à tinta térmica 1 (BrT1) da Empresa 1, tinta térmica 2 (BrT2) e tinta térmica 3 (BrT3) da Empresa 2, e à tinta convencional BrC da Empresa 1.

A Tabela 3.5 apresenta uma análise comparativa entre as principais características das tintas térmicas e convencional, com base nas informações fornecidas nas respectivas fichas técnicas.

As tintas térmicas apresentam potenciais vantagens quando comparadas às tintas convencionais, conforme os dados presentes na Tabela 3.5. Cabe ressaltar que estas informações se baseiam unicamente nas fichas técnicas das tintas, não havendo conclusões definitivas sobre o respectivo desempenho efetivo.

A tinta térmica 1 tem refletância de 90% e emitância de 85% segundo a ficha técnica, o que poderia conferir bom desempenho térmico em ambientes interiores e exteriores, reduzindo potencialmente gastos com arrefecimento. A tinta térmica 2 obteve classificação A+ em termos energéticos, também de acordo com a ficha, o que poderia gerar economia de custos e consumo. Por fim, as fichas das tintas térmicas 1 e 3 indicam que elas poderiam eliminar pontes térmicas.

No entanto, sem ensaios práticos e comparações reais do desempenho destas tintas, ainda não é possível tirar conclusões definitivas ou garantir que os dados das fichas estejam corretos, visto que não indicam a fonte dos resultados, nem como foram executados. As informações presentes nas fichas técnicas apenas serviram de base para avaliação inicial do potencial das tintas térmicas.

Tabela 3.5 — Comparação entre tinta convencional e tintas térmicas.

Tintas	Aplicação	Modo aplicação e rendimento	Refletância	Emitância	Vantagens
Tinta convencional (BrC)	Interior/ exterior.	Airless. Rolo. 8 m ² /kg em duas demãos.	ND	ND	Secagem rápida. Textura Microporosa.
Tinta térmica 1 (BrT1)	Interior/ exterior.	Airless. Rolo. Trincha. 0,4 a 0,6 l/m ² . variável com a porosidade do suporte.	90%	85%	Promove o isolamento térmico da superfície aplicada. Permite a redução de gastos energéticos. Contribui para a mitigação do efeito de Ilha de Calor Urbano.
Tinta térmica 2 (BrT2)	Interior.	Airless. Rolo. Trincha. 3 l/m ² em duas demãos.	ND	ND	Confere isolamento térmico nas superfícies interiores. Minimiza pontes térmicas interiores através da reflexão do calor radiante infravermelho.
Tinta térmica 3 (BrT3)	Exterior.	Pincel. Rolo. Spray. 2,5 l/m ² em duas demãos.	ND	ND	Permite a redução de consumos energéticos. A elevada refletância solar e infravermelha promove o isolamento térmico das superfícies exteriores.

ND - Não definido na ficha técnica

No entanto, sem ensaios práticos e comparações reais do desempenho destas tintas, ainda não é possível tirar conclusões definitivas ou garantir que os dados das fichas estejam corretos, visto que não indicam a fonte dos resultados, nem como foram executados. As informações presentes nas fichas técnicas apenas serviram de base para avaliação inicial do potencial das tintas térmicas.

3.3.2 Provetes

Foram recortados onze provetes de um rolo de membrana de betume polímero, com dimensões de 0,10 m x 0,10 m. Os provetes foram pintados com as três tintas térmicas diferentes obtidas para este estudo, uma tinta convencional sem propriedades térmicas adicionais, e as respetivas combinações entre primários e tintas térmicas e convencionais.

Os provetes ensaiados encontram-se identificados por códigos alfanuméricos onde a última letra indica o tipo de tinta aplicada como revestimento (Tabela 3.6). Assim, nas amostras com a letra "C" no final da designação, foi utilizada uma tinta convencional sem propriedades térmicas especiais. Já nos provetes com a letra "T", o revestimento final corresponde a uma tinta com características térmicas, também referida como tinta térmica. Esta notação permite distinguir facilmente, através das letras finais, os provetes com tinta de características térmicas daqueles revestidos por uma tinta convencional.

Nos provetes submetidos a ensaio onde foi aplicada unicamente uma camada de primário, sem tinta de acabamento posterior, adotou-se a seguinte simbologia para identificação: "PrN" para o primário convencional e "PrT" para designar o primário identificado como térmico. Assim, estes códigos identificam de forma sucinta os provetes constituídos unicamente pelo primário convencional ou pelo primário térmico, sem aplicação de uma tinta final. Através desta simbologia é possível diferenciar facilmente as amostras compostas exclusivamente por cada um dos primários ensaiados.

Nos provetes onde foram aplicadas combinações de primário e tinta de acabamento final, recorreu-se à seguinte notação sistemática: "PrX + BrTY". Neste código alfanumérico, "PrX" o tipo de primário associado, podendo este ser térmico "PrT" ou convencional "PrN", e "BrTY" identifica a tinta térmica utilizada, 1, 2 ou 3. Através desta simbologia concisa codificam-se, de forma inequívoca as distintas configurações de primário e tinta final ensaiadas nos diversos provetes, conforme discriminado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 — Descrição dos sistemas de pintura aplicados nos provetes utilizados.

Provetes	Descrição	Aplicação
PrN	Primário Convencional	Interior/Exterior
PrT	Primário Térmico	Interior/Exterior
BrC	Branco Convencional	Interior/Exterior
PrN + BrC	Primário Convencional + Branco Convencional	Interior/Exterior
PrT + BrC	Primário Térmico + Branco Convencional	Interior/Exterior
BrT1	Branco Térmico 1	Interior/Exterior
PrN+ BrT1	Primário Convencional + Branco Térmico 1	Interior/Exterior
BrT2	Branco Térmico 2	Interior
PrT + BrT2	Primário Térmico + Branco Térmico 2	Interior
BrT3	Branco Térmico 3	Exterior
PrT + BrT3	Primário térmico + Branco Térmico 3	Exterior

Com o intuito de complementar a descrição fornecida anteriormente sobre a composição e nomenclatura dos diversos provetes produzidos, estes são exibidos na Figura 3.1. Esta apresentação visual permite estabelecer a correspondência entre os códigos alfanuméricos de cada

amostra e o seu aspeto físico resultante das distintas combinações de primários e tintas aplicadas como revestimento.



Figura 3.1 — Representação dos provetes utilizados e as suas respectivas nomenclaturas.

Conforme ilustrado na Figura 3.1, nos provetes pintados com tintas brancas, tanto térmicas como convencionais, não se verificam diferenças visuais significativas em termos de tonalidade. Similarmente, do ponto de vista visual, os provetes revestidos unicamente com o primário térmico ou o primário convencional também não apresentam diferenças de cor. Estas observações qualitativas iniciais sugerem uma equivalência aproximada entre as tintas térmicas e convencionais no que respeita à refletância no espectro visível. Contudo, o ensaio de caracterização espectral por espectrofotometria, abrangendo as regiões do ultravioleta em parte, visível e infravermelho próximo, permitirá uma avaliação quantitativa do comportamento refletante total destas tintas, possibilitando conclusões mais rigorosas sobre as suas propriedades óticas.

3.3.3 Célula experimental

A célula experimental, apresentada na Figura 3.2, possui dimensões exteriores nominais de 3,68 m x 3,68 m. O pé-direito do espaço interior é de 2,45 m. Esta configuração geométrica confere à célula um volume interior de aproximadamente 34 m³, resultando num modelo físico compacto, mas com dimensões adequadas à aplicação prática de soluções construtivas em escala real. A célula permite assim ensaiar materiais e tecnologias em condições controladas similares às de uma edificação real (Pina, 1993).

De acordo com Pina (1993), originalmente a célula experimental foi construída com paredes duplas contendo alvenaria de tijolo cerâmico furado e caixa de ar preenchida com

regranulado de cortiça expandida como isolante térmico. Contudo, no âmbito de um trabalho de doutoramento posterior ao inicial, a parede sul foi modificada pela substituição do isolamento de regranulado de cortiça expandida por espuma de poliuretano projetada, preenchendo completamente a caixa de ar (retirando a eficácia da caixa de ar).



Figura 3.2 — Célula experimental.

3.4 Avaliação da refletância total

A determinação da refletância total através de metodologias laboratoriais normalizadas permite a quantificação de uma das características fundamentais das soluções refletantes assim como constitui um complemento frequente em estudos termográficos para análise do comportamento térmico de soluções construtivas.

O ensaio de determinação da refletância total decorreu no Núcleo de Materiais Orgânicos (NMO) do Departamento de Materiais do LNEC, utilizando o espectrofotómetro *HITACHI U-3300* (Figura 3.3) com funcionamento nas regiões do ultravioleta (UV), visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR). Este equipamento, dotado de uma esfera integradora que permite avaliar a refletância dos provetes, é adequado à determinação da refletância total de acordo com a norma ASTM E 903 – 96 (ASTM, 2012).

O espectrofotómetro, apresentado na Figura 3.3, mede a refletância num intervalo espectral entre 190 nm e 1100 nm. Contudo, para minimizar a presença de ruído excessivo nos comprimentos de onda superiores a 900 nm e inferiores a 300 nm, considerando-se na análise dos resultados apenas o intervalo entre 300 nm e 900 nm para aquisição e processamento dos dados através do Microsoft Excel. O aparelho possui duas lâmpadas distintas, uma de iodeto de

tungstênio para a região visível e infravermelho, e outra de descarga de deutério para os ultravioletas, ocorrendo a comutação entre 325 nm e 370 nm.



Figura 3.3 — Espectrofotômetro HITACHI U-3300.

Conforme ilustrado na Figura 3.4, foi necessário a utilização do acessório designado por esfera integradora para determinar a refletância total das amostras com o espectrofotômetro. O interior desta esfera encontra-se revestido com uma tinta branca de elevada refletância difusa. Deste modo, o feixe luminoso emitido pela fonte, ao penetrar na esfera, sofre múltiplas reflexões nas paredes antes de atingir a abertura onde se situa o detetor que, por sua vez, mede a fração total refletida, determinando a refletância total da amostra.



Figura 3.4 — Esfera integradora.

A metodologia do ensaio de espectrofotometria usada para obter a refletância total das amostras foi baseada na norma ASTM E 903-96 (ASTM, 2012) e na dissertação de Melrinho (2014):

1. Previamente à realização do ensaio, duas amostras padrão de óxido de alumínio são posicionadas na esfera integradora (Figura 3.5), uma na abertura da amostra de referência e outra na abertura da amostra sob ensaio.
2. Realiza-se o ajuste do espectrofotômetro para 100% de refletância com as amostras padrão.
3. Efetua-se a calibração espectral no intervalo de 190 nm a 900 nm. Após este processo o equipamento encontra-se preparado para a medição.
4. São configurados parâmetros como o tipo de espectro (refletância), velocidade de varrimento 300 nm/min, gama espectral de comprimento de onda de 190 nm a 900 nm e o intervalo de resolução de 5 nm.
5. A amostra a caracterizar é posicionada na abertura correspondente (Figura 3.6) e inicia-se o ensaio. Após alguns minutos, obtém-se o espectro de refletância no intervalo definido.
6. O espectro é gravado para posterior tratamento. O procedimento é repetido para todas as amostras.



Figura 3.5 — Esfera integradora com duas amostras padrão de óxido de alumínio.



Figura 3.6 — Esfera integradora com a amostra revestida com tinta e amostra de óxido de alumínio.

3.5 Avaliação em condições reais

Para esta avaliação em condições reais de uso, *in situ* no campus do LNEC, recorreu-se a uma célula experimental (Figura 3.2) construída à escala real no âmbito de uma tese de doutoramento anterior (Pina, 1993). Nesta célula experimental, as tintas em estudo foram aplicadas nas paredes interiores orientadas a norte e oeste, efetuando-se a monitorização do desempenho térmico das tintas através da instrumentação da superfície interior com termopares, os quais permitem medir em contínuo a temperatura superficial ao longo do tempo. Adicionalmente, as tintas foram aplicadas na fachada exterior virada a sul, avaliando-se o seu desempenho por inspeção termográfica. Pretendeu-se, assim, efetuar uma completa e abrangente caracterização abrangente do potencial das tintas quando aplicadas no revestimento interior e exterior de edifícios em condições reais de utilização.

Para a análise do comportamento térmico superficial do revestimento exterior na fachada sul da célula experimental será utilizado o método passivo (apresentado na seção 2.2.7). Este método, que não requer a imposição de um fluxo térmico artificial na superfície, permite comparar o desempenho das tintas térmicas face à tinta convencional quando sujeitas às condições climáticas exteriores (radiação solar e temperatura). Através da deteção remota, por termografia de infravermelhos, da radiação emitida pelas superfícies e representação da distribuição de temperaturas superficiais, pretende-se evidenciar diferenças nas temperaturas superficiais dos diversos revestimentos ensaiados. As medições serão pontuais e localizadas nesta fachada, embora se reconheça a necessidade de expandir a análise para todas as exposições solares no futuro. Com esta abordagem experimental, pretende-se compreender o comportamento térmico subjacente e sustentar hipóteses relativas à alteração de temperatura propiciada pelas tintas térmicas face a tintas convencionais.

3.5.1 Avaliação do desempenho de tintas térmicas aplicadas no interior

Para o presente ensaio experimental, foram utilizadas as paredes interiores com exposição solar a norte e oeste. Não obstante, para permitir uma mais adequada avaliação do desempenho térmico das tintas, sem a influência do isolamento existente no interior das paredes¹, procedeu-se à remoção manual do regranulado de cortiça expandida que preenchia originalmente a caixa de ar das paredes da célula. Estas paredes possuem pequenas janelas translúcidas que foram abertas de modo a possibilitar o acesso e extração do material isolante do seu interior (Figura 3.7). Após a remoção completa do regranulado, as janelas foram fechadas com placas de poliestireno expandido moldado (EPS) com as mesmas dimensões, de forma a manter novamente a estanquidade destas zonas. Deste modo, assegurou-se que os resultados obtidos traduzem exclusivamente o efeito das próprias tintas aplicadas sobre as paredes, sem qualquer interferência do material isolante originalmente presente nestas paredes duplas.



Figura 3.7 — Remoção do regranulado de cortiça das caixas de ar das paredes interiores norte e oeste.

No âmbito de uma dissertação de mestrado anterior (Lourenço, 2016), a parede oeste exterior da célula experimental foi revestida por duas áreas distintas de ladrilhos cerâmicos (Figura 3.8), uma branca e outra preta, com o propósito de avaliar o comportamento térmico nas duas soluções construtivas.

¹ Tendo em conta a data de construção da célula (final dos anos 80), não é totalmente certo que as paredes estejam completamente preenchidas com os grânulos.



Figura 3.8 — Disposição dos ladrilhos cerâmicos no exterior da parede oeste.

Devido a esta modificação pré-existente, a seleção das áreas interiores de aplicação das tintas em estudo na parede interior oeste foi condicionada, tendo-se optado pela disposição de três áreas horizontais (Figura 3.9). Este arranjo permite que cada uma das tintas ensaiadas fique em contacto tanto com a zona sob influência térmica da área exterior de ladrilhos brancos como com a zona sob influência térmica da área de ladrilhos pretos. Deste modo, através da monitorização contínua das temperaturas superficiais interiores, é possível correlacionar o desempenho de cada tinta com o efeito específico provocado sobre si pelo tipo de revestimento exterior adjacente em cada parte da parede.

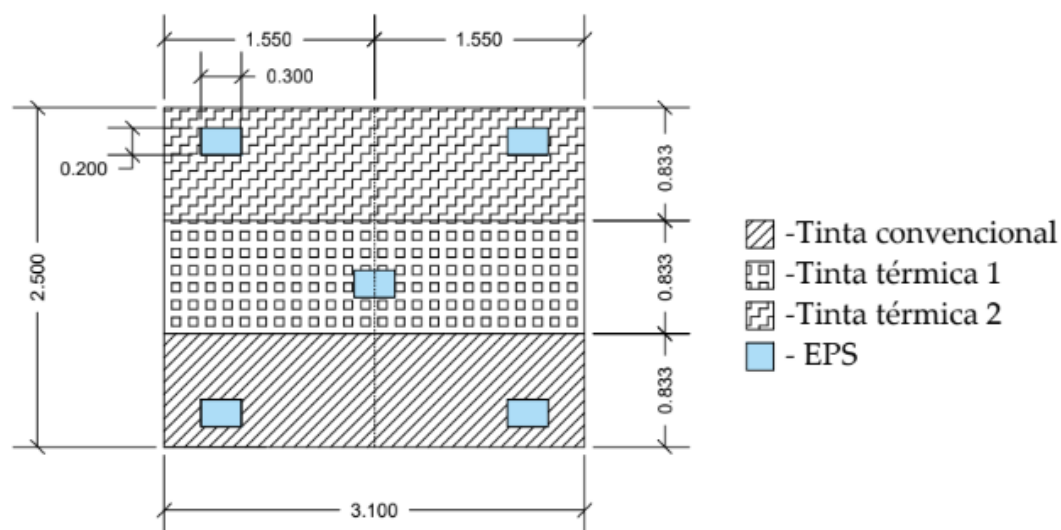


Figura 3.9 — Representação das áreas das tintas na parede oeste interior.

Como demonstrado na Figura 3.9, é possível observar as três áreas de tintas distintas aplicadas na parede oeste interior, correspondendo de cima para baixo aos sistemas de pintura com: a tinta térmica 2 (PrT+BrT2), a tinta térmica 1 (PrN+BrT1) e a tinta convencional (PrN+BrC). Visualiza-se também a separação vertical ao centro da parede, que delimita os revestimentos cerâmicos brancos (lado esquerdo) e pretos (lado direito) na face exterior. Por

fim, identificam-se as placas de poliestireno expandido utilizadas para fechar os vãos anteriormente abertos para remoção do isolamento da caixa de ar. Esta disposição permite relacionar o desempenho térmico de cada área interior com as características particulares do revestimento exterior adjacente.

Na parede norte optou-se pela disposição vertical das áreas de tinta, por não existirem revestimentos exteriores diferenciados que pudessem influenciar termicamente esta orientação. Contudo, esta parede possui uma janela que foi posteriormente fechada através da colocação de um bloco de betão com dimensões de 0,84 m x 0,90 m, o qual se encontra envolvido por placas de poliestireno expandido com espessura de 0,04 m, conforme ilustrado na Figura 3.10.

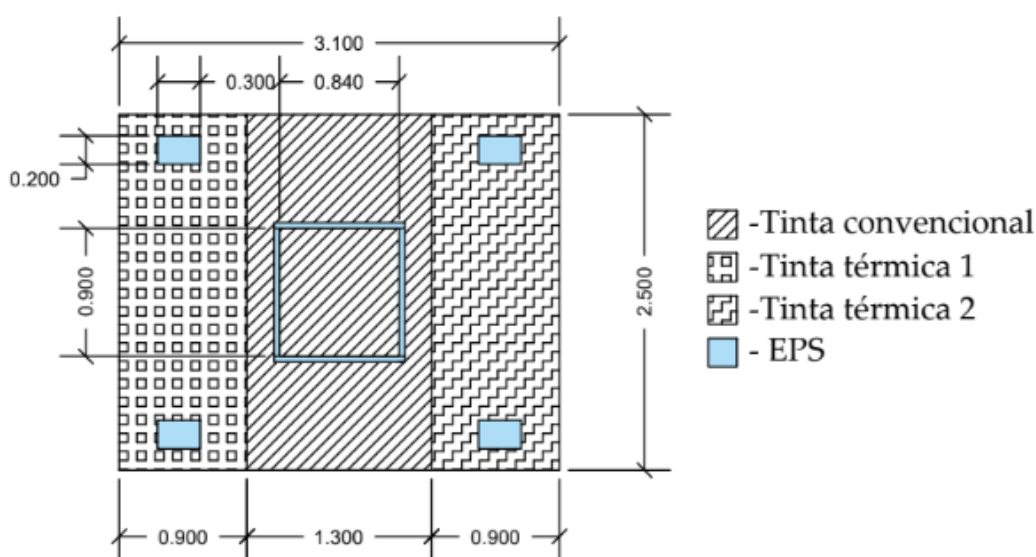


Figura 3.10 — Representação das áreas das tintas na parede norte interior.

Conforme ilustrado na Figura 3.10 e explicado anteriormente, a parede norte interior apresenta, assim, três áreas verticais com diferentes sistemas de pintura, correspondendo, da esquerda para a direita, a sistemas com as tintas: térmica 1 (PrT+BrT1), convencional (PrN+BrC) e térmica 2 (PrN+BrT2).

3.5.1.1 Registo de dados

Para monitorização das temperaturas superficiais nas paredes interiores norte e oeste, recorreu-se à instrumentação com termopares do tipo T (cobre-constantan) posicionados entre o substrato e as camadas de tinta (Figura 3.11). A inclusão desta cadeia de medição nas paredes interiores da célula experimental possibilitou a medição das temperaturas nas superfícies revestidas pelas diversas tintas em estudo, de modo a avaliar os efeitos térmicos diferenciados das tintas quando aplicadas no interior. Através da aquisição, em contínuo, dos valores de temperatura superficial, foi possível realizar uma análise comparativa do desempenho térmico de cada sistema de pintura com cada tinta ensaiada.



Figura 3.11 — Paredes interiores: oeste (a) e norte (b), com posicionamento de termopares.

A parede interior oeste (Figura 3.11a) encontra-se instrumentada com seis termopares para monitorização das temperaturas superficiais. Os termopares 1 e 4 estão instalados na área de tinta térmica 2 (BrT2), medindo o termopar 1 a temperatura desta tinta sob influência térmica dos ladrilhos brancos exteriores, e o termopar 4 (BrT2) sob influência dos ladrilhos pretos. Idêntica configuração foi adotada nas restantes áreas de tinta, estando os termopares do lado esquerdo (1, 2 e 3) a medir as temperaturas das respetivas amostras sob o efeito térmico dos ladrilhos brancos, e os do lado direito (4, 5 e 6) sob influência dos ladrilhos pretos exteriores. Este posicionamento visa correlacionar o desempenho de cada tinta com as características particulares do revestimento exterior adjacente.

A parede interior norte (Figura 3.11b) encontra-se instrumentada com sete termopares para monitorização das temperaturas superficiais. Os termopares 7 e 8 estão alocados à área de tinta térmica 1 (BrT1). Os termopares 9, 10 e 11 situam-se na área de tinta convencional (BrC), posicionando-se os termopares 9 e 11 adjacentes à zona da janela preenchida com betão, para avaliar a possível influência térmica deste material. Por fim, os termopares 12 e 13 estão instalados na área de tinta térmica 2 (BrT2). Este posicionamento dos termopares de temperatura foi planeado para permitir avaliar o comportamento térmico de cada uma das três tintas quando aplicadas como revestimento interior nesta parede exposta à radiação solar muito reduzida.

Na célula experimental foi também instalado um sistema de aquisição de dados formado por um *data logger* e um *hygrolog* com função de registo (Figura 3.12). Todos os parâmetros foram monitorados a cada minuto; porém foram calculados e armazenados valores médios a cada intervalo de 30 minutos. Esta configuração do equipamento de medição visa uma aquisição em alta frequência, com posterior processo de consolidação horária, garantindo uma caracterização detalhada da evolução das temperaturas ao longo do tempo de ensaio. O registo digital contínuo com este grau de resolução temporal permite uma avaliação precisa do

comportamento térmico e higrométrico na célula experimental quando sujeita às condições ambientais exteriores.



Figura 3.12 — Sistema de aquisição de dados no interior da célula experimental constituído por *data logger* e *hydrolog*.

Para complementar os dados de humidade relativa e temperatura do ar registados pelo *hydrolog* na célula experimental, procedeu-se igualmente à monitorização em contínuo da temperatura e da humidade exterior ambiente. Esta medição adicional foi efetuada numa estação meteorológica localizada no campus do LNEC (Figura 3.13), permitindo avaliar a temperatura exterior em simultâneo com os parâmetros medidos internamente na célula experimental. A recolha paralela de dados nesta estação meteorológica exterior possibilita relacionar o desempenho térmico interior com as condições climáticas verificadas no local ao longo do ensaio. Esta correlação é essencial para uma correta interpretação do comportamento térmico na célula experimental quando sujeita às flutuações ambientais características de cada dia.



Figura 3.13 — Estação meteorológica instalada na cobertura do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do LNEC.

3.5.1.2 Metodologia

Inicialmente, instalaram-se termopares do tipo T nas paredes interiores oeste e norte, no dia 20 de junho, antes da aplicação das tintas. Foram utilizados seis termopares na parede oeste e sete termopares na parede norte, distribuídos uniformemente para permitir a comparação das temperaturas superficiais, conforme descrito anteriormente.

As temperaturas superficiais das paredes interiores não pintadas no âmbito desta dissertação foram monitorizadas durante três dias para analisar o comportamento térmico das paredes interiores. Verificaram-se diferenças de temperatura entre os termopares localizados na parede oeste e também na parede norte. Realizou-se então o ajuste e calibração das temperaturas dos termopares para que fosse feita uma comparação aproximada da realidade.

De seguida, foi feita a aplicação dos sistemas de pintura com as tintas nas paredes de acordo com as especificações dos fabricantes, e a recolha de dados foi efetuada no período do dia 30 de junho a 1 de setembro. A análise dos dados foi realizada comparando as temperaturas superficiais internas das áreas pintadas com as tintas térmicas com as da tinta convencional e as suas respetivas diferenças em dias com diferentes condições climáticas. Foram selecionados dias com céu limpo com temperatura baixa, dias nublados e dias com céu limpo com temperatura alta. As diferenças de temperatura superficial entre cada área com tinta térmica e com a tinta convencional foram calculada para os diferentes dias e os registos são apresentados em anexo.

Para uma melhor análise, a apresentação dos resultados do dia em análise está dividida em duas partes. Primeiro, é apresentado o comportamento da temperatura exterior, temperatura interior e da radiação solar ao longo do dia. Em seguida, são demonstradas as temperaturas superficiais internas e as respetivas diferenças de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional para:

- parede oeste com a área revestida pelo ladrilho branco no exterior;
- parede oeste com a área revestida pelo ladrilho preto no exterior;
- parede norte.

A apresentação dos resultados dividida por parede e, no caso da parede oeste, segmentada por cada tipo de revestimento exterior, possibilita uma análise direcionada do desempenho térmico de cada tinta ensaiada face às condições iniciais específicas. Desta forma, é viável estudar isoladamente o impacto de cada tinta térmica nas temperaturas superficiais interiores para cada situação concreta. Esta abordagem dividida simplifica a interpretação dos dados experimentais obtidos em cada dia analisado.

3.5.2 Avaliação do desempenho de tintas térmicas aplicadas pelo exterior

Para avaliar o desempenho das tintas térmicas quando aplicadas no exterior, foram aplicados sistemas de pintura com as tintas em estudo no exterior da parede sul da célula experimental, e foi utilizada a termografia de infravermelhos para analisar o desempenho térmico das tintas quando expostas à radiação solar. As fachadas sul e oeste são as mais expostas à radiação solar direta, contudo a utilização da parede oeste exterior foi inviabilizada devido à existência prévia de revestimentos cerâmicos diferenciados neste alçado (Lourenço, 2016), conforme explanado anteriormente na seção 3.5.1.

Inspeção termográfica

O ensaio de termografia de infravermelhos foi realizado na parede sul exterior da célula experimental (Figura 3.14). Nesta parede foram aplicadas verticalmente três áreas de tintas distintas, com disposição análoga à da parede norte interior, uma vez que ambas apresentam uma área de betão correspondente à janela original.



Figura 3.14 — Parede sul exterior com diferentes sistemas de pintura: da esquerda para a direita, com a tinta térmica 1 (PrN+BrT1), a tinta convencional (PrN+BrC) e a tinta térmica 3 (PrT+BrT3).

Conforme ilustrado na Figura 3.14, da esquerda para a direita observam-se na parede sul exterior da célula experimental as áreas revestidas com sistemas de pintura com: tinta térmica 1 sobre primário convencional (PrN+BrT1), tinta convencional sobre primário convencional (PrN+BrC) e tinta térmica 3 sobre primário térmico (PrT+BrT3). Esta disposição vertical das diferentes de tinta viabilizou a posterior análise comparativa do seu desempenho térmico através da câmara termográfica quando sujeitas à radiação solar incidente nesta orientação.

Câmara termográfica

A câmara termográfica mede e representa em imagens a radiação infravermelha emitida pelos objetos, e o facto de essa radiação ser resultante da temperatura da superfície do objeto, permite que a câmara calcule (Equação 3.1) e mostre essa temperatura. Porém, é importante destacar que a radiação não depende apenas da temperatura do objeto, mas também é influenciada pela emitância e pelo meio exterior que depois é refletida no objeto (FLIR, 2007).

$$U_{\text{obj}} = \frac{1}{\varepsilon\tau} U_{\text{tot}} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} U_{\text{refl}} - \frac{1 - \tau}{\varepsilon\tau} U_{\text{atm}} \quad (3.1)$$

Na equação 3.1, ε é a emitância do objeto, τ é a transmitância da atmosfera, U_{obj} é uma tensão que pode ser convertida em temperatura real, U_{tot} é a tensão de saída da câmara para o caso real, U_{refl} é a tensão de saída teórica para um corpo negro de temperatura T_{refl} e U_{atm} é a tensão de saída teórica para um corpo negro de temperatura T_{atm} .

Neste ensaio termográfico foi utilizada a câmara termográfica *ThermaCam P640* (Figura 3.15) produzida pela *FLIR Systems*, com alcance espectral de 7,5 – 13 μm , precisão de medição de $\pm 2,0^\circ\text{C}$, sensibilidade térmica de $0,06^\circ\text{C}$ e um detetor do tipo Focal Plane Array. Informações adicionais sobre as especificações técnicas desta câmara termográfica podem ser consultadas no Anexo A.2.



Figura 3.15 — Câmara termográfica ThermaCam P640.

Metodologia

Foram realizados ensaios termográficos em dois dias distintos: 18 e 31 de agosto. No dia 18 de agosto, efetuaram-se três inspeções termográficas:

- primeira inspeção às 8h, sem incidência solar sobre a parede sul exterior;
- segunda inspeção às 15h, horário de máxima radiação solar incidente na parede sul;
- terceira inspeção às 17h, com céu parcialmente nublado.

Já no dia 31 de agosto, foi realizada apenas uma inspeção termográfica, às 15h, para analisar o desempenho das tintas no período de máxima incidência solar sobre a parede sul exterior. Desta forma, as inspeções foram planeadas em diferentes horários e condições climáticas, de modo a possibilitar uma avaliação abrangente do comportamento térmico das tintas através da termografia. O dia 18 permitiu comparar o desempenho com e sem incidência solar, enquanto o dia 31 focou-se na análise sob radiação solar máxima. Em todos os ensaios, efetuou-se uma termografia geral da parede sul exterior a uma distância de 10 metros, para uma vista geral do desempenho das tintas aplicadas.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Considerações iniciais

Após a realização dos ensaios laboratoriais e em condições reais para caracterização e avaliação do desempenho térmico das tintas térmicas e convencionais no interior e exterior da célula experimental, neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e respetiva análise. Num primeiro momento, efetuou-se a avaliação da refletância por espectrofotometria dos provetes revestidos pelas tintas em estudo em ambiente controlado de laboratório. Posteriormente, o desempenho térmico real foi investigado quando sujeito a condições reais de exposição solar. Para o efeito, recorreu-se ao uso de termopares para monitorização das temperaturas superficiais nos revestimentos interiores. Adicionalmente, a termografia de infravermelhos foi utilizada como método de inspeção do comportamento térmico das tintas quando aplicadas no exterior. A conjugação destes ensaios em laboratório e *in situ* permitiu uma vasta avaliação experimental das potencialidades dos sistemas de pintura com tintas térmicas face às convencionais.

4.2 Refletância total

As onze amostras com diferentes combinações de tintas térmicas e convencionais (apresentadas na secção 3.3), foram analisados através de um espectrofotómetro *HITACHI U-3300*, com o objetivo de determinar a refletância total de cada amostra. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.1.

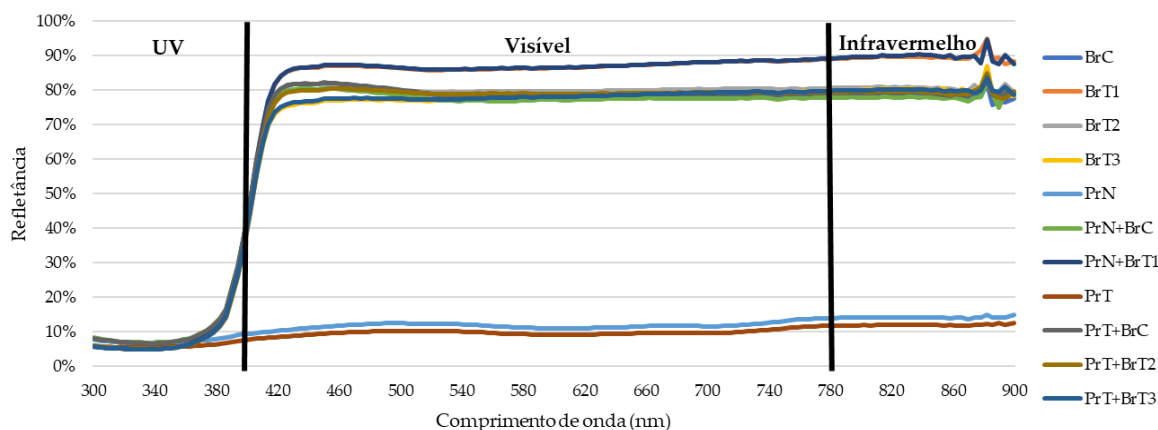


Figura 4.1 — Variação da refletância das amostras ensaiadas.

A Figura 4.1 apresenta os valores de refletância total, nas regiões do ultravioleta (300-400 nm), visível (400-780 nm) e infravermelho próximo (780-900 nm), para todas as amostras analisadas. Os ensaios realizados com o equipamento disponível permitiram analisar apenas um pequeno intervalo do infravermelho próximo, entre 780 nm e 900 nm. Este intervalo limitado não possibilita uma avaliação abrangente do comportamento das tintas térmicas na gama completa do infravermelho, onde se esperaria que revelassem o seu melhor desempenho refletante (até aproximadamente 2500 nm). Para uma caracterização precisa da refletância no infravermelho destas tintas, seriam necessários ensaios num espectro mais amplo, o que não foi viável com o equipamento utilizado. Assim, os dados obtidos fornecem apenas uma indicação parcial da refletividade no infravermelho próximo, não substituindo análises em gamas espectrais maiores, fundamentais para quantificar adequadamente esta propriedade.

Analisando a Figura 4.2, os resultados dos ensaios de refletância demonstram que, na região do infravermelho próximo (780-900 nm), a amostra revestida pela tinta térmica 1 (BrT1) apresenta os valores mais elevados, na ordem dos 90%.

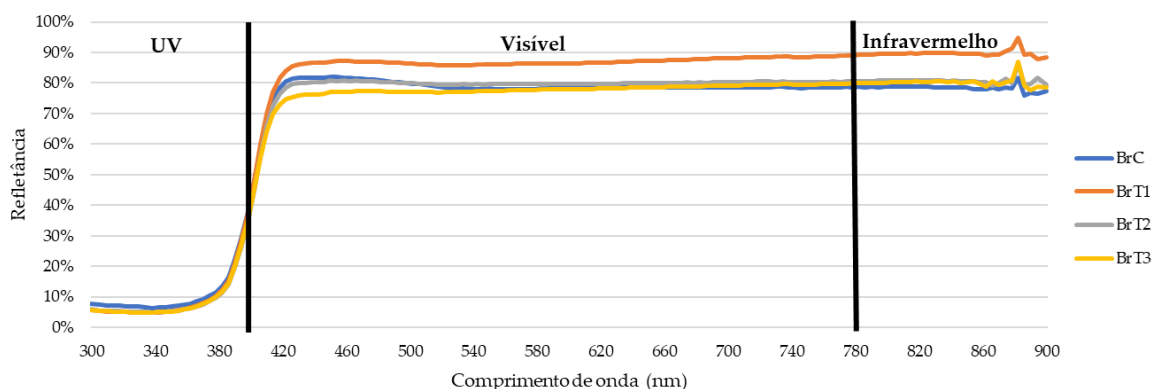


Figura 4.2 — Variação da refletância das amostras revestidas somente por tintas térmicas e convencionais.

Já as amostras revestidas pela tinta convencional (BrC), tinta térmica 2 (BrT2) e tinta térmica 3 (BrT3) demonstram desempenhos semelhantes nesta gama espectral, com refletância entre aproximadamente 79% e 81%.

Na região do visível (400-780 nm), as amostras BrC e BrT2 possuem refletância discretamente superior à amostra BrT3 nos comprimentos de onda entre 420 e 540 nm. Contudo, nos comprimentos de onda subsequentes, as amostras BrC, BrT2 e BrT3 apresentam valores semelhantes de refletância. Em comparação, a amostra BrT1 revela-se consideravelmente mais refletiva que as demais em toda a faixa do visível analisada.

Estes resultados indicam que a tinta térmica da amostra BrT1 é mais eficiente na refletância da radiação eletromagnética, tanto no infravermelho próximo quanto no espectro visível. Com base nestes dados, é bastante provável que esta tinta térmica BrT1 demonstre um desempenho superior às demais em termos de refletância nos ensaios seguintes. Já entre as amostras revestidas pelas tintas térmicas BrT2 e BrT3, apenas se constata uma diferença discreta no desempenho refletante no visível, sendo que no infravermelho próximo as duas apresentam valores semelhantes de refletância.

4.2.1 Influência da aplicação dos primários na refletância

Analisando a Figura 4.3, ao comparar as amostras revestidas unicamente pelos primários convencional (PrN) e térmico (PrT) incolores, verifica-se que o primário convencional (PrN) apresenta refletância ligeiramente superior ao primário térmico (PrT) nas regiões do ultravioleta, visível e infravermelho. No entanto, ambos os primários possuem baixa refletância, inferior a aproximadamente 15%, devido à influência da cor escura do suporte ensaiado. Isso indica que nenhum dos primários, quando aplicados isoladamente, contém aditivos suficientes para proporcionar alta refletância.

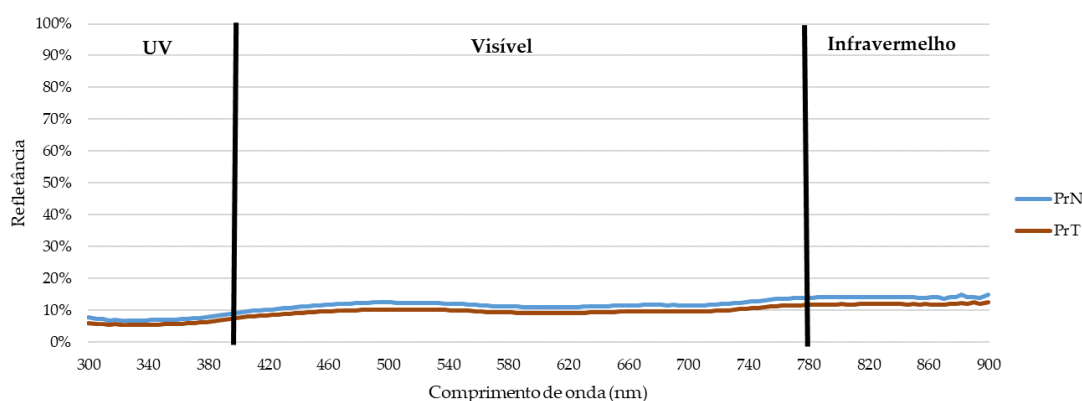


Figura 4.3 — Variação da refletância das amostras revestidas pelos primários: convencional (PrN) e térmico (PrT).

Esta constatação demonstra que, tal como expectável, a utilização de revestimentos exteriores escuros, tais como os primários, não é aconselhável em fachadas, uma vez que a sua

baixa refletância (elevada absorção) amplifica a transferência de calor do exterior para o interior dos espaços. Assim, a seleção de materiais exteriores com alta refletância é essencial para limitar os ganhos térmicos e garantir condições térmicas adequadas nos espaços interiores.

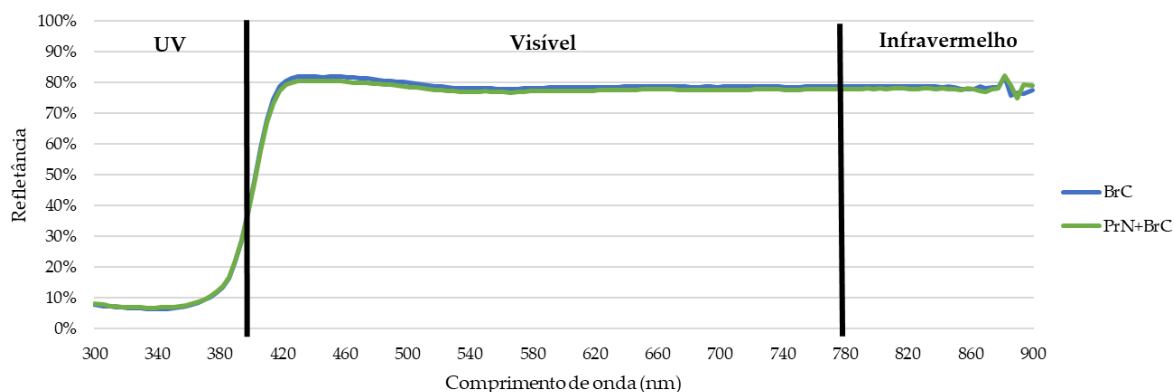


Figura 4.4 — Variação da refletância total das amostras BrC e PrN+BrC.

Analisando os resultados apresentados na Figura 4.4, observa-se que a amostra revestida apenas com tinta branca convencional (BrC) exibe refletância discretamente superior à amostra composta pelo primário convencional e tinta branca convencional (PrN+BrC), especificamente na região do visível (400-780 nm). Contudo, as diferenças nos valores de refletância total entre as duas amostras são bastante subtis, indicando que a presença do primário convencional não promove um impacto significativo no desempenho refletante da tinta branca na faixa espectral ensaiada.

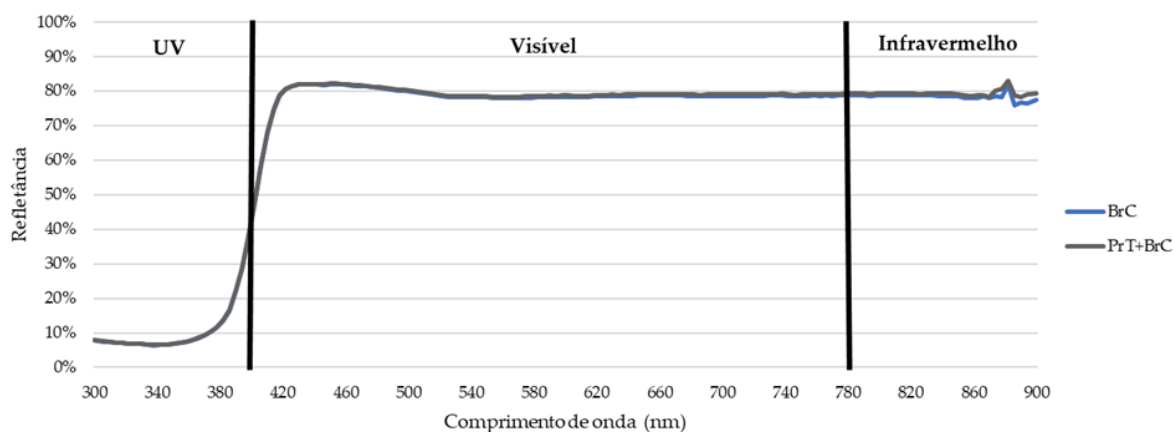


Figura 4.5 — Variação da refletância total das amostras BrC e PrT+BrC

Os resultados apresentados na Figura 4.5 indicam que a amostra revestida com tinta branca convencional (BrC) demonstra valores de refletância semelhantes aos da amostra revestida com o primário térmico e tinta branca convencional (PrT+BrC), na maior parte da faixa espectral analisada. Contudo, observa-se que a amostra PrT+BrC começa a exibir uma refletância superior na região do infravermelho próximo, especificamente entre os comprimentos de onda de 860-900 nm. Esta observação sugere que a aplicação do primário térmico, quando

combinado à tinta branca convencional, não promove um aumento expressivo na refletância total em grande parte do espectro, em comparação à utilização exclusiva da tinta branca convencional. O benefício do primário térmico parece manifestar-se principalmente na porção final da faixa do infravermelho próxima ensaiada, onde se verifica um ligeiro incremento na refletância com a presença do primário térmico.

A presença dos primários térmico e convencional não promove um aumento expressivo na refletância total da tinta branca convencional na maior parte da gama espectral estudada, verificando-se apenas diferenças subtis nos valores de refletância.

Seguidamente, a Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8 ilustram os resultados dos ensaios de refletância das amostras revestidas unicamente pelas tintas térmicas e das amostras com a combinação de primário e tinta térmica, nomeadamente: BrT1 (tinta térmica 1) e PrN+BrT1 (combinação de primário convencional e tinta térmica 1), BrT2 (tinta térmica 2) e PrT+BrT2 (primário térmico e tinta térmica 2) e por fim, BrT3 (tinta térmica 3) e PrT+BrT3 (primário térmico e tinta térmica 3).

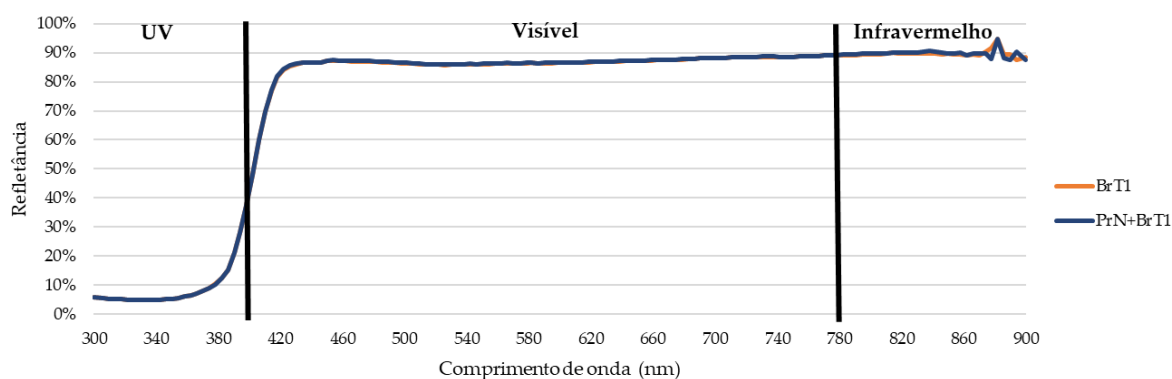


Figura 4.6 — Variação da refletância total das amostras BrT1 e PrN+BrT1.

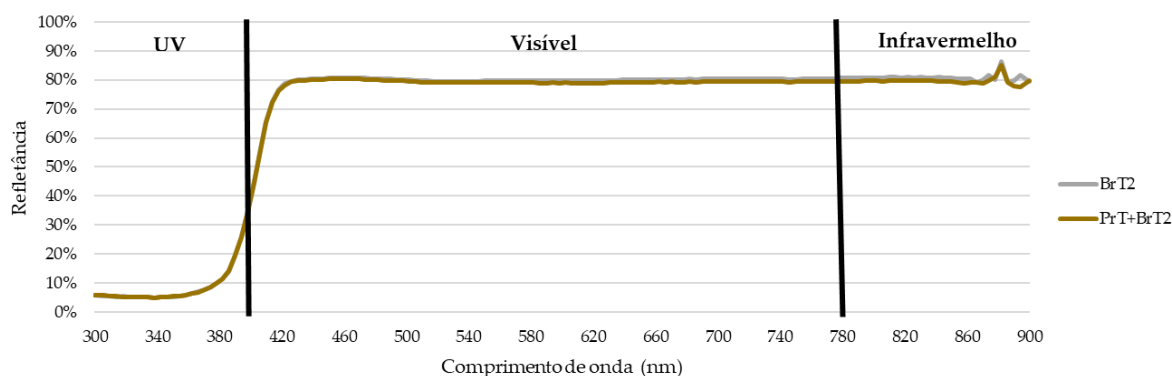


Figura 4.7 — Variação da refletância total das amostras BrT2 e PrT+BrT2.

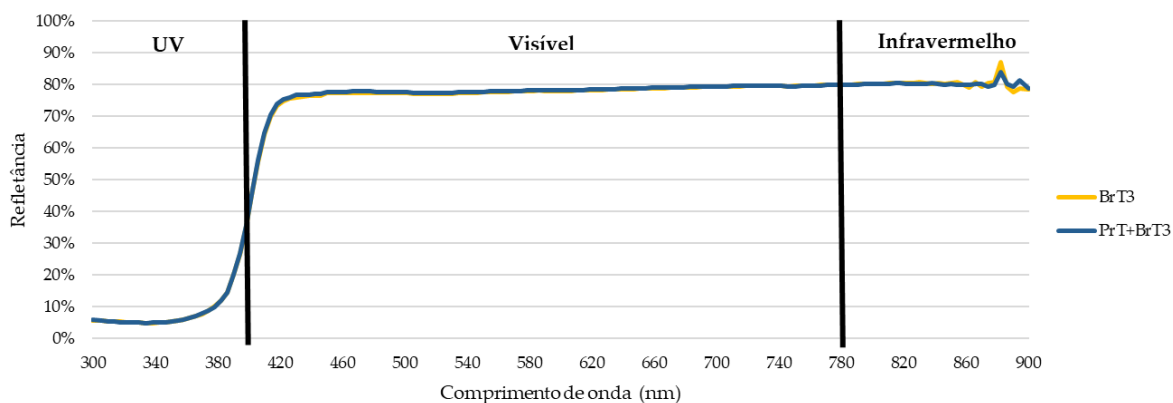


Figura 4.8 — Variação da refletância total das amostras BrT3 e PrT+BrT3.

Constata-se que, nas faixas do ultravioleta (300-400 nm) e do visível (400-780 nm), as amostras revestidas pelas tintas térmicas 1 (BrT1), 2 (BrT2) e 3 (BrT3) apresentam valores de refletância total semelhantes às amostras que combinam as mesmas tintas térmicas com os primários térmico e convencional (PrN+BrT1, PrT+BrT2 e PrT+BrT3). Ou seja, a presença dos primários não promove alterações substanciais na refletância nessas duas regiões do espectro.

4.2.2 Cálculo da refletância total

De acordo com a norma *ASTM E 903* (ASTM, 2012), e com base na análise prévia do espectro de refletância total obtido para as amostras entre os comprimentos de onda que variam entre os 300 nm e 900 nm, é possível efetuar o cálculo da refletância total neste intervalo espectral estudado. É também viável subdividir o espectro de interesse em duas regiões, de modo a determinar a refletância total na região do visível (400-780 nm) e a refletância total na região do infravermelho próximo (780-900 nm).

A refletância total em cada região espectral é calculada recorrendo à média aritmética dos valores de refletância medidos nos comprimentos de onda específicos dentro dessa região espectral, aplicando a equação 4.1 (ASTM, 2012):

$$\rho_{\text{total}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \rho(\lambda_i) \quad (4.1)$$

em que ρ_{total} é a refletância total na região espectral, $\rho(\lambda_i)$ a refletância espectral no comprimento λ_i e no número de comprimentos de onda considerados na região espectral.

Assim, através da aplicação do procedimento normativo detalhado na *ASTM E 903* (ASTM, 2012) aos dados de refletância espectral previamente determinados, será possível

determinar, de forma rigorosa, a refletância total das amostras ensaiadas na região visível (400-780 nm) e na região do infravermelho próximo (780-900 nm) (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 — Refletância total na região do visível e infravermelho próximo.

Provetes	ρ_{total} (400-780nm) (%)	ρ_{total} (780-900nm) (%)
BrC	78.6	78.6
BrT1	86.8	89.5
BrT2	80.1	80.7
BrT3	77.9	80.2
PrN	11.6	14.1
PrN+BrC	77.6	77.9
PrN+BrT1	87.0	89.8
PrT	9.7	11.9
PrT+BrC	79.0	79.2
PrT+BrT2	79.3	79.6
PrT+BrT3	78.0	80.0

Com base nos resultados expostos na Tabela 4.1, constata-se que as tintas térmicas revelam um desempenho ligeiramente superior na região do infravermelho próximo relativamente à região visível do espectro eletromagnético, apesar de as diferenças serem reduzidas. Adicionalmente, verifica-se que a aplicação de primários, tanto térmicos como convencionais, não promove melhorias expressivas. Assim, os incrementos proporcionados pela utilização de primários podem ser negligenciados. Dessa forma, a utilização de um primário térmico específico parece não se justificar; basta aplicar um primário corrente.

As tintas térmicas analisadas exibem elevada refletância nas regiões do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, particularmente a Tinta Térmica 1 (BrT1), que exibiu os maiores valores de refletância nas duas regiões mencionadas. Visto que cerca de 89% da radiação térmica incidente à superfície terrestre se encontra compreendida nestas faixas espectrais, como afirmam Prado e Ferreira (2005), elevados índices de refletância nestas faixas espectrais são determinantes para se alcançar melhor desempenho térmico com este tipo de revestimentos.

4.3 Condições reais

4.3.1 Desempenho das tintas térmicas no interior da célula experimental

Conforme explicado na secção 3.5.1, antes das aplicações das tintas térmicas nas paredes interiores (oeste e norte) da célula experimental, foi efetuada a leitura das temperaturas

superficiais através dos termopares instalados nas mesmas paredes interiores durante um período de três dias, do dia 20 de junho ao dia 23 de junho, e foram obtidos os resultados apresentados na Figura 4.9 (parede interior oeste - termopares 1 a 6) e Figura 4.10 (parede interior norte - termopares 7 a 13).

Através da Figura 4.9, podem-se verificar diferenças significantes nas temperaturas superficiais obtidas pelos termopares na parede interior oeste. Os termopares 1, 2 e 3, instalados na área revestida exteriormente pelos ladrilhos brancos (conforme descrito na secção 3.5.1), apresentam temperaturas mais baixas em comparação aos termopares 4, 5 e 6, instalados na área revestida exteriormente pelos ladrilhos pretos.

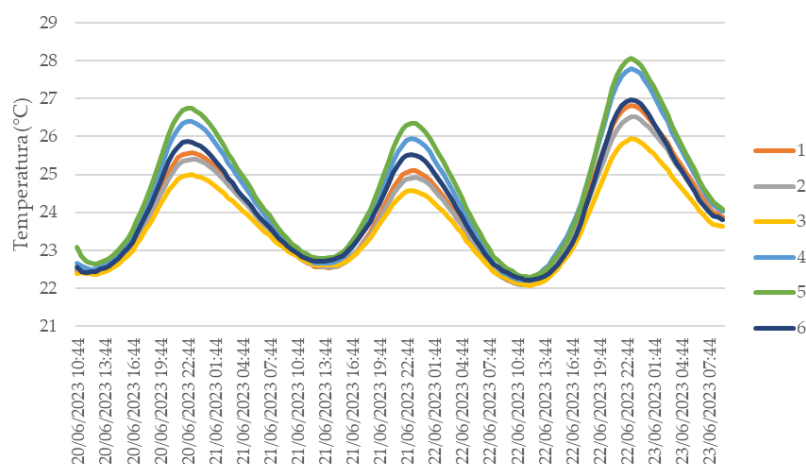


Figura 4.9 — Temperatura superficial obtida para a parede interior oeste.

Essa diferença de temperaturas ocorre devido à baixa refletância (elevada absorção) dos ladrilhos pretos, que aumenta a temperatura superficial nessa área. Os ladrilhos brancos, por outro lado, refletem mais a radiação solar incidente, resultando em menor aquecimento da superfície onde estão instalados.

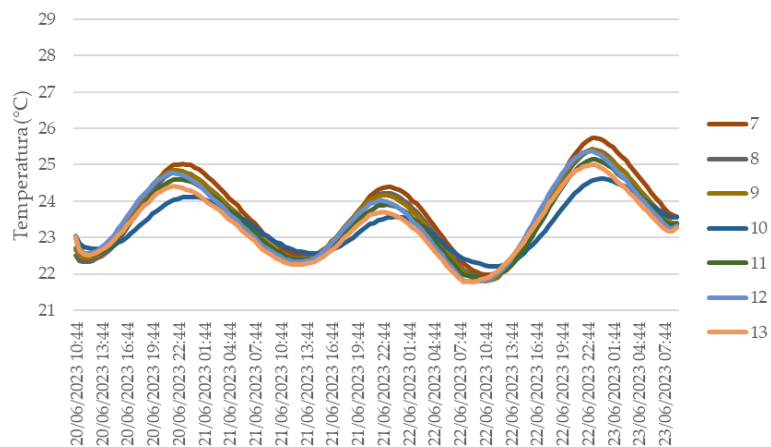


Figura 4.10 — Temperatura superficial obtida para a parede interior norte.

Conforme ilustrado na Figura 4.10, foram verificadas também diferenças nas temperaturas superficiais da parede interior norte. Contudo, as diferenças entre os termopares instalados na mesma área de aplicação de cada tinta foram inferiores em comparação às observadas na parede interior oeste, devido à incidência solar muito reduzida sobre a parede norte.

Com o objetivo de reduzir as diferenças iniciais nas temperaturas superficiais medidas pelos diversos termopares (Figura 4.9 e Figura 4.10) e obter valores semelhantes aos termopares onde se encontravam aplicadas as tintas convencionais, revelou-se necessário proceder à calibração dos restantes termopares instalados nas paredes interiores (oeste e norte).

4.3.1.1 Calibração dos termopares

Com base nos dados obtidos através da estação meteorológica do LNEC, foi possível verificar a variação da radiação solar e da temperatura exterior (Figura 4.11) dos três dias (20 de junho a 23 de junho) em que foram recolhidos os dados dos termopares antes da aplicação das tintas.

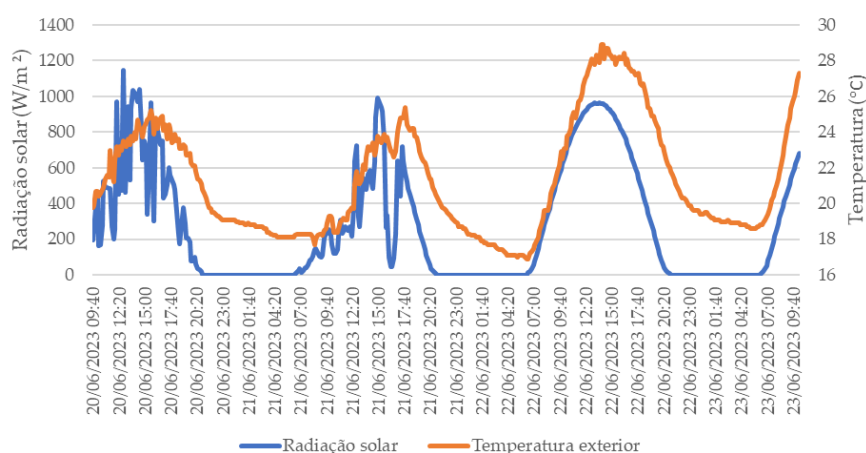


Figura 4.11 — Radiação solar e temperatura exterior do dia 20 a 23 de junho.

Conforme ilustrado na Figura 4.11, é possível verificar, através do comportamento da radiação solar nos dias 20 e 21 de junho, que o tempo esteve nublado, devido à oscilação dos valores de radiação solar. Já no dia 22 de junho, observa-se um comportamento linear da radiação solar, indicando tratar-se de um dia de céu limpo.

Para a calibração dos termopares, visando a análise dos dados da Figura 4.11, utilizaram-se os dados do dia 22 de junho (Tabela A.3.1) por ser um dia de céu limpo. A escolha de um dia sem nebulosidade para a calibração procurou reduzir possíveis interferências climáticas nas leituras das temperaturas superficiais. Assim, ao calibrar os termopares com dados do dia de céu limpo, foi possível obter medições mais precisas para avaliar os efeitos das diferentes tintas aplicadas.

Para cada parede interior, a calibração foi realizada com base nos termopares instalados na área onde seria aplicada a tinta convencional. Deste modo, as diferenças de temperatura obtidas serão representativas do comportamento térmico das tintas térmicas relativamente à tinta convencional.

Ao calibrar os termopares das áreas com tintas térmicas tendo como referência os termopares da área com tinta convencional, qualquer diferença de temperatura medida poderá ser atribuída ao efeito da tinta térmica. Assim, é possível uma comparação direta do desempenho térmico entre as tintas térmicas e convencionais.

A calibração dos termopares foi realizada separadamente para cada parede interior, de acordo com os seguintes procedimentos:

- Na parede oeste, utilizaram-se como referência os termopares 3 e 6, instalados na área de aplicação da tinta convencional.
- Na parede norte, como não há influência de revestimento exterior, e as áreas de pintura são verticais, para evitar as pequenas diferenças de temperatura devido a estratificação (diferença de temperatura na mesma área devido a altura), calculou-se primeiramente a média das temperaturas superficiais dos termopares em cada área de pintura [média dos termopares 7 e 8 (BrT1), média dos termopares 9, 10 e 11 (BrC) e média dos termopares 12 e 13 (BrT2)]. Em seguida, os valores foram calibrados com base nos termopares 9, 10 e 11, situados na área de aplicação da tinta convencional.

Antes de efetuar a calibração dos termopares das paredes interiores (oeste e norte), a Figura 4.12 (parede interior oeste) e a Figura 4.13 (parede interior norte) demonstram as temperaturas superficiais interiores obtidos pelos termopares no dia 22 de junho.

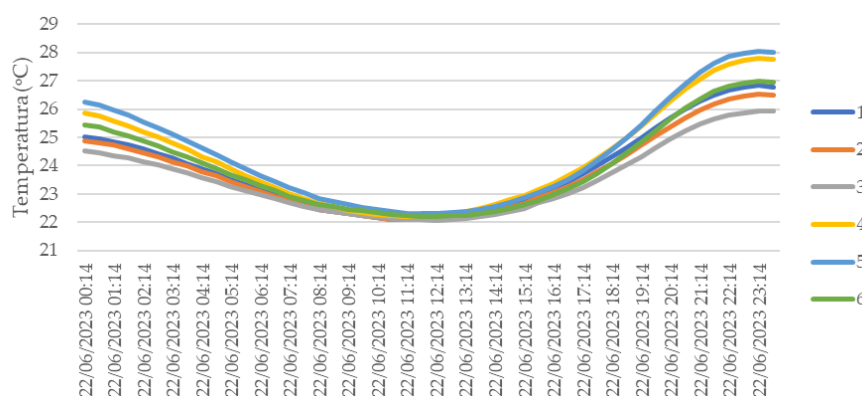


Figura 4.12 — Parede interior oeste: temperaturas superficiais antes da calibração dos termopares 1 a

6.

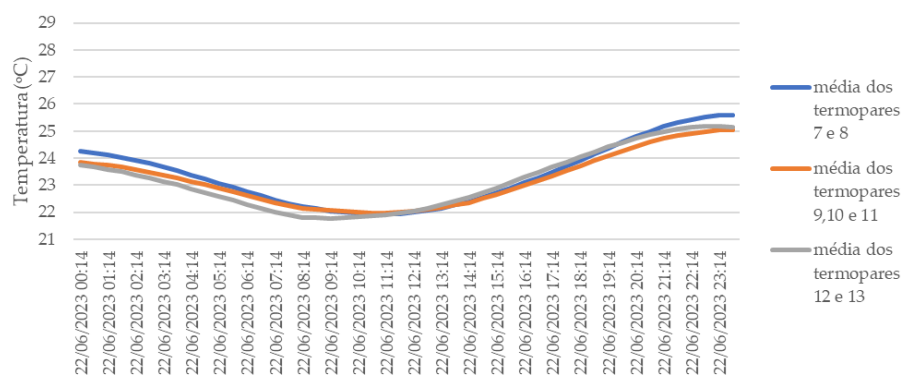


Figura 4.13 — Parede interior norte: temperaturas superficiais antes da calibração dos termopares 7 a 13.

Após o processo de calibração das temperaturas dos termopares, foram elaborados gráficos com os resultados obtidos para ambas as paredes interiores, apresentados na Figura 4.14 (parede interior oeste, área revestida pelos ladrilhos brancos no exterior), Figura 4.15 (parede interior oeste, área revestida pelos ladrilhos pretos no exterior) e na Figura 4.16 (parede interior norte).

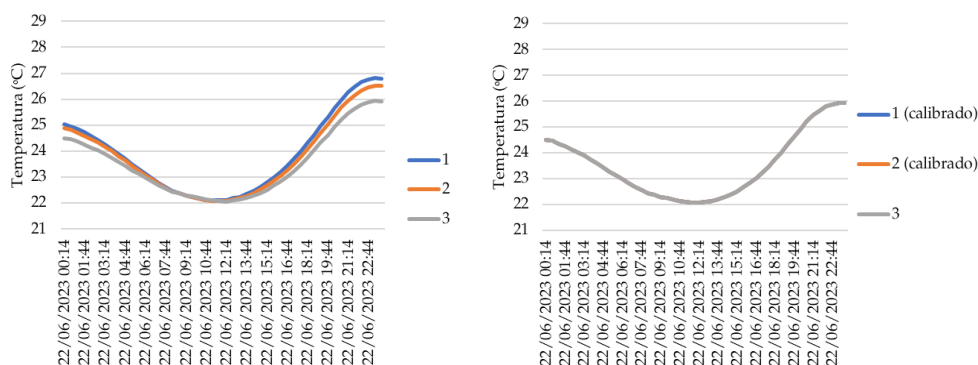


Figura 4.14 — Parede interior oeste (área revestida pelos ladrilhos brancos no exterior): antes da calibração (esquerda) e depois de efetuar a calibração (direita).

A análise da Figura 4.14 permite observar, no gráfico do lado esquerdo, a evolução das temperaturas superficiais medidas pelos termopares instalados na área da parede oeste revestida exteriormente por ladrilhos brancos, antes da calibração. Já o gráfico do lado direito ilustra os valores dos termopares 1 e 2 após o processo da calibração, onde estas temperaturas foram equiparadas à do termopar 3, localizado na área de aplicação da tinta convencional (Tabela A.3.3).

De forma análoga, a Figura 4.15 apresenta, no gráfico do lado esquerdo, as temperaturas superficiais medidas pelos termopares instalados na área da parede oeste revestida exteriormente por ladrilhos pretos, antes do procedimento de aferição. O gráfico do lado direito demonstra os valores dos termopares 4, 5 e 6 após calibração, onde estas temperaturas foram equiparadas à do termopar 6, o qual se localiza na zona de aplicação da tinta convencional (Tabela A.3.3).

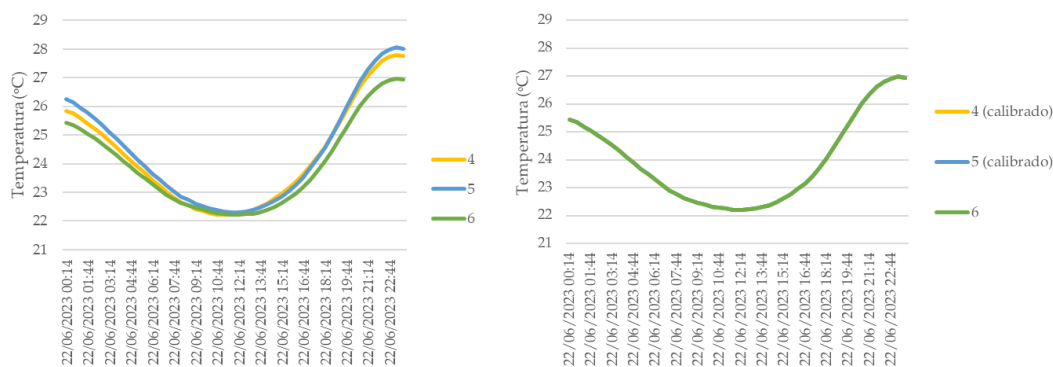


Figura 4.15 — Parede interior oeste (área revestida pelos ladrilhos pretos no exterior): antes da calibração (esquerda) e depois de efetuar a calibração (direita).

A Figura 4.16 ilustra, no gráfico do lado esquerdo, as temperaturas superficiais medidas pelos diversos termopares instalados na parede norte interior, antes do procedimento de calibração. O gráfico do lado direito apresenta os valores desses mesmos termopares após o processo de calibração, no qual se equipararam as suas temperaturas às dos termopares localizados na área de aplicação da tinta convencional, considerada a área de controlo (Tabela A.3.6).

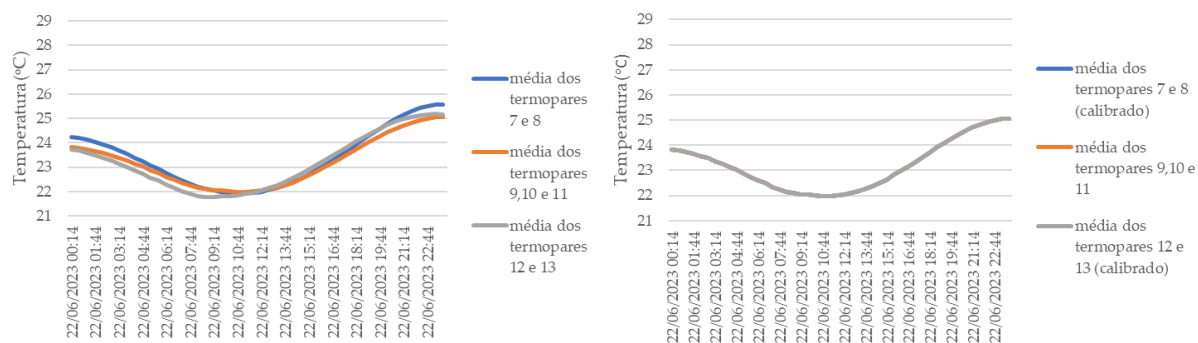


Figura 4.16 — Parede interior norte: antes da calibração (esquerda) e depois de efetuar a calibração (direita).

Os valores obtidos na calibração realizada para o dia 22 de junho (verificar anexo A.3) serão utilizados para os restantes dias analisados. Por se tratar de um dia com condições climáticas mais estáveis, essa calibração inicial possibilita verificar o desempenho das tintas térmicas em comparação às tintas convencionais quando aplicadas no interior, em diferentes condições climáticas nos dias selecionados para análise.

Ao calibrar previamente os termopares com dados do dia de céu limpo, garante-se uma base comum de comparação das temperaturas superficiais medidas nos revestimentos interiores. Assim, nas análises posteriores para outros dias, as diferenças de temperatura observadas poderão ser atribuídas aos efeitos das propriedades térmicas de cada tipo de tinta ensaiada.

Após a calibração dos termopares e a aplicação das tintas nas paredes, procedeu-se à recolha de dados durante dois meses, com início a 30 de junho e término em 1 de setembro de

2023. Contudo, para efeitos de análise dos dados e mais clara explicação dos resultados, tal como anteriormente referido, foram selecionados dias característicos com diferentes condições climáticas (conforme descrito na secção 3.5.1). Foram escolhidos três cenários: dias de céu limpo com temperatura baixa, dias nublados e dias de céu limpo com temperatura elevada. Essa escolha teve como objetivo avaliar o desempenho das tintas térmicas em comparação à tinta convencional, sob diversas condições climáticas.

A estratégia de restringir a análise a alguns dias específicos, intencionalmente escolhidos por suas distintas condições climáticas, permite uma avaliação direcionada da resposta térmica das tintas ensaiadas. Ao selecionar dias contrastantes quanto à nebulosidade e temperatura, é possível verificar o comportamento térmico relativo das tintas em diferentes situações. A seguir, serão apresentados os resultados obtidos na análise de cada dia para cada condição climática.

Com o intuito de efetuar uma apresentação concisa e clara dos resultados, serão exibidos os gráficos referente a apenas um dia de medições para cada cenário de condição climática, uma vez que nos restantes dias analisados (para a mesma condição climática) foram observados comportamentos similares das temperaturas superficiais e as respetivas diferenças entre as tintas térmicas e a tinta convencional. Os gráficos contendo os dados de temperaturas superficiais interiores registados durante os restantes dias de medições, sob condições climáticas semelhantes, são disponibilizados no anexo A.5. Os gráficos apresentados em anexo, permitem corroborar as ilações apresentadas relativamente ao comportamento térmico das tintas nos diversos dias de medições sob condições atmosféricas semelhantes.

4.3.1.2 Dia 16 de julho, céu limpo com temperatura baixa

Numa primeira fase, com base nos dados obtidos na estação meteorológica do LNEC e pelo sistema de registos instalado na célula experimental (*hygrolog*), foi possível proceder à análise do comportamento das temperaturas do ar exterior e interior da célula experimental, bem como da radiação solar, no dia 16 de julho, conforme apresentado na Figura 4.17.

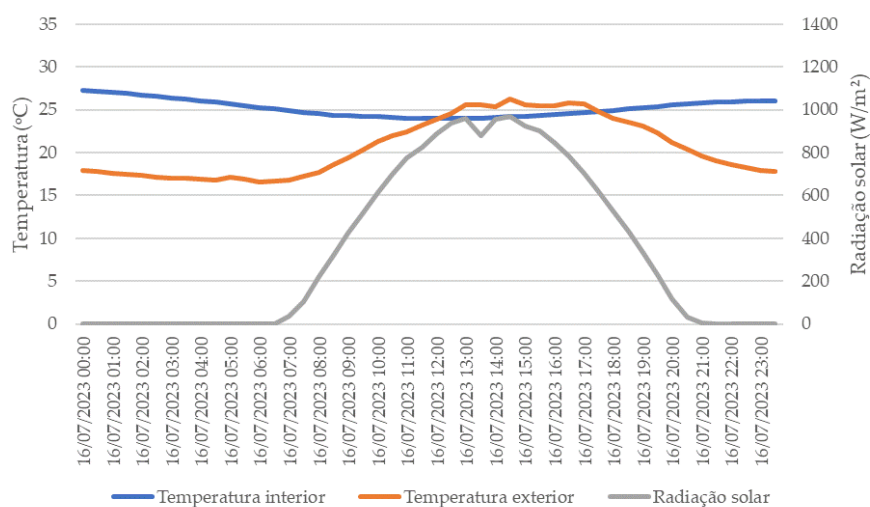


Figura 4.17 — Condições climáticas do dia 16 de julho.

A análise da Figura 4.17 permite constatar que, no dia 16 de julho, a variação da radiação solar manteve-se sem oscilações pontuais durante todo o período diurno, o que indica a ocorrência de céu limpo nesse dia. Verifica-se que a temperatura máxima exterior, de aproximadamente 26°C, foi registrada por volta das 15h, mesmo horário em que se observou a temperatura mínima interior de cerca de 24°C. Já a temperatura máxima interior, de aproximadamente 27°C, foi atingida cerca da meia-noite, período em que se registou a temperatura mínima exterior de cerca de 17°C. Este padrão evidencia a elevada inércia térmica da célula experimental, com atraso e amortecimento térmico de cerca de 12 horas.

A análise da Figura 4.18 permite observar, no gráfico à esquerda, a evolução diária das temperaturas superficiais interiores da parede oeste das tintas aplicadas na área com revestimento exterior constituído por ladrilhos brancos.

Da análise da Figura 4.18 verifica-se que as temperaturas mais elevadas são atingidas durante a madrugada e as menores temperaturas por volta das 15 horas. O gráfico à direita complementa o gráfico à esquerda, apresentando as diferenças de temperatura superficial entre as áreas revestidas com tintas térmicas e com a tinta convencional. Constata-se que essas diferenças são negativas ao longo de todo o dia, o que indica temperaturas inferiores para as áreas revestidas com as tintas térmicas em comparação com as com a tinta convencional.

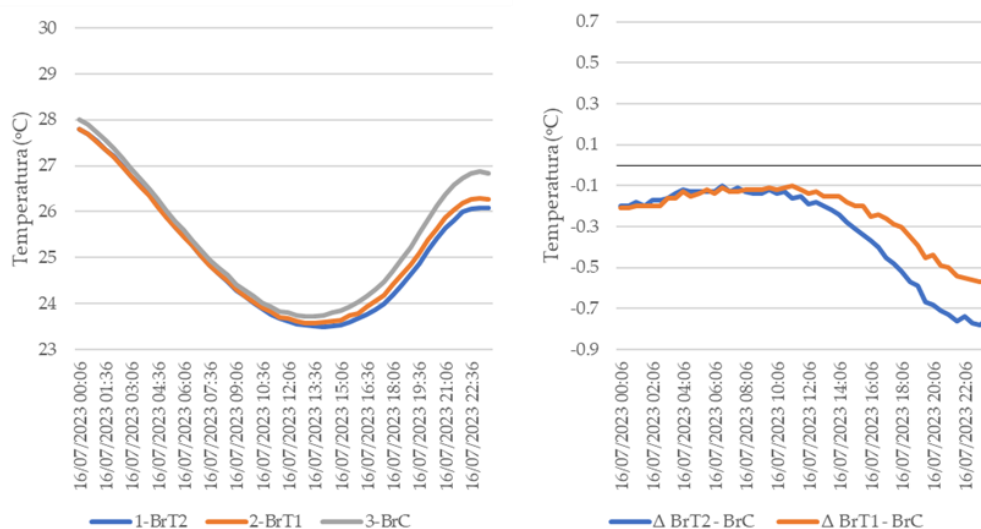


Figura 4.18 — Parede interior oeste (área revestida por ladrilho branco exterior): temperatura superficial interior (esq.), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).

Verificam-se diferenças máximas de aproximadamente $0,8^{\circ}\text{C}$ para a tinta BrT2 e $0,6^{\circ}\text{C}$ para as com a tinta BrT1. Este resultado sugere um melhor desempenho térmico das tintas BrT1 e BrT2 na minimização dos ganhos térmicos, em particular a tinta BrT2 pela mais elevada diferença de temperatura, que corresponde à área mais fria da referida parede.

A análise da Figura 4.19, à esquerda, permite verificar as temperaturas superficiais interiores da parede oeste das tintas aplicadas na área revestida externamente por ladrilhos pretos.

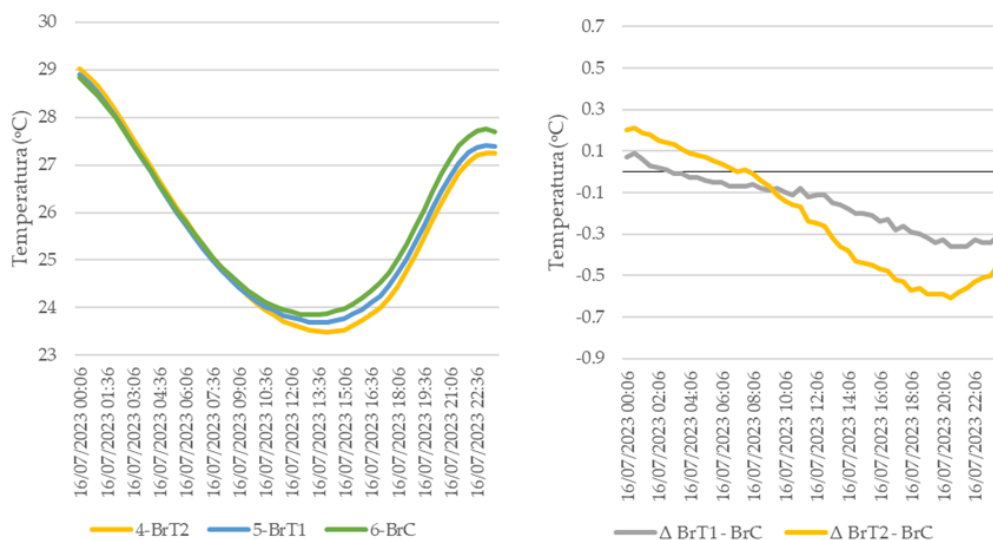


Figura 4.19 — Parede interior oeste (área revestida por ladrilho preto no exterior): temperatura superficial interior (esq.), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).

Constata-se a ocorrência de temperaturas mais elevadas, de cerca de 29°C , por volta da meia-noite. O gráfico à direita apresenta as diferenças de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional. Verifica-se que no início do período de registo as diferenças são

positivas, ou seja, as temperaturas das áreas revestidas com as tintas térmicas são superiores à da tinta convencional, em cerca de $0,2^{\circ}\text{C}$ para a tinta BrT2 e $0,1^{\circ}\text{C}$ para a tinta BrT1. Essas diferenças decrescem gradualmente até ao final do dia, atingindo valores negativos de aproximadamente $-0,4^{\circ}\text{C}$ para a tinta BrT2 e $-0,3^{\circ}\text{C}$ para a tinta BrT1 às 23 horas.

Este comportamento poderá ser explicado pelo atraso do efeito de arrefecimento promovido pelas tintas térmicas devido à inércia térmica da parede. Inicialmente, as áreas com as tintas térmicas apresentam temperaturas ligeiramente superiores, mas à medida que o seu efeito térmico se manifesta, inverte-se essa diferença e as áreas com as tintas térmicas passam a evidenciar temperaturas superficiais inferiores no final do dia, que parece indiciar um menor transferência de calor por radiação na célula.

A Figura 4.20 apresenta as temperaturas superficiais internas da parede norte. Como esta parede está sujeita a uma baixa incidência solar comparativamente à parede oeste, verifica-se no gráfico à esquerda a ocorrência de temperaturas inferiores às observadas na parede oeste. Consequentemente, observam-se também diferenças menos acentuadas entre as áreas das tintas térmicas e da tinta convencional, de aproximadamente $0,1^{\circ}\text{C}$, tanto positivas como negativas.

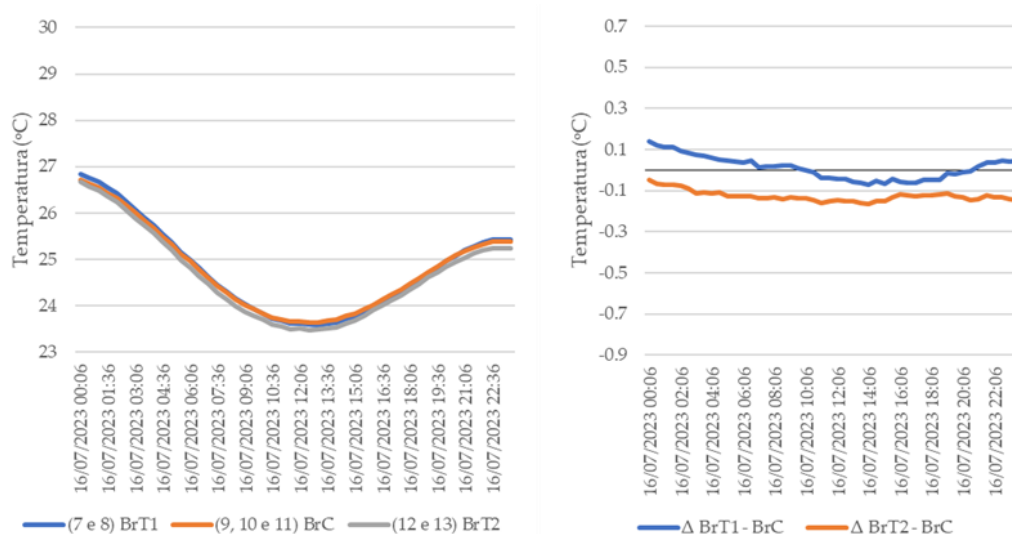


Figura 4.20 — Parede interior norte: temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).

Devido a este valor reduzido, que se situa dentro da margem de erro dos sensores, as diferenças de temperatura na parede norte podem ser consideradas desprezáveis para efeitos de análise do desempenho térmico das tintas. Este resultado era expectável, uma vez que a parede norte não se encontra exposta à radiação solar direta.

4.3.1.3 Dia 7 de agosto, céu limpo com temperatura alta

A análise da Figura 4.21 permite constatar que, no dia 7 de agosto, a temperatura exterior máxima registada foi de aproximadamente 40°C, por volta das 16 horas. Este mesmo horário corresponde à temperatura interior mínima de cerca de 29°C, verificando-se uma diferença de aproximadamente 11°C entre a temperatura exterior e interior. A temperatura máxima interior, de cerca de 32°C, foi atingida por volta da meia-noite, período em que se registou uma temperatura exterior mínima de aproximadamente 26°C. Este padrão corrobora a ocorrência do efeito de inércia térmica na célula experimental, conforme explicado anteriormente. Neste tipo de dias, para garantir condições mínimas de conforto interior de forma passiva, será indispensável recorrer a medidas de arrefecimento noturno (nomeadamente através de abertura de vãos envidraçados, que seja compatível com condições de conforto acústico e de segurança à intrusão).

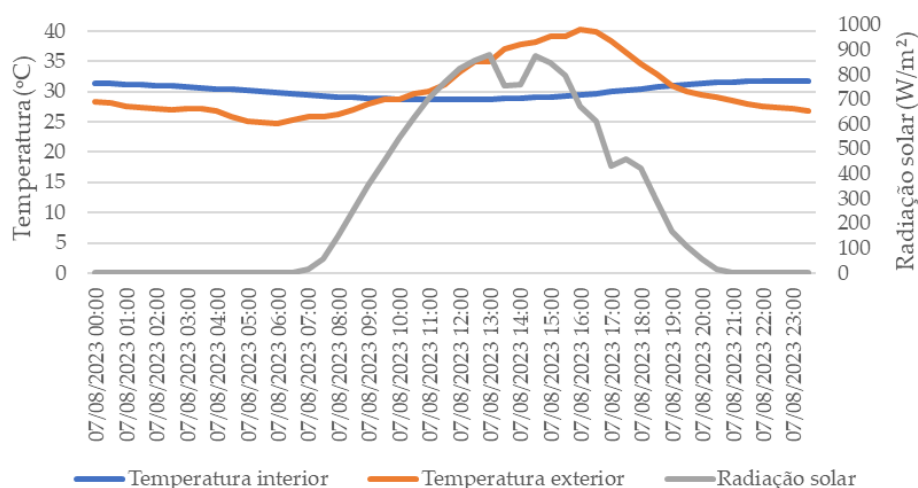


Figura 4.21 — Condições climáticas do dia 7 de agosto.

A análise da Figura 4.22, à esquerda, permite verificar uma diferença de aproximadamente 4°C entre a temperatura superficial máxima, de cerca de 32°C, atingida às 0 horas, e a mínima, de aproximadamente 28°C, obtida entre as 13 e as 14 horas. O gráfico à direita possibilita examinar as diferenças entre as temperaturas superficiais das áreas revestidas com as tintas térmicas e com a tinta convencional.

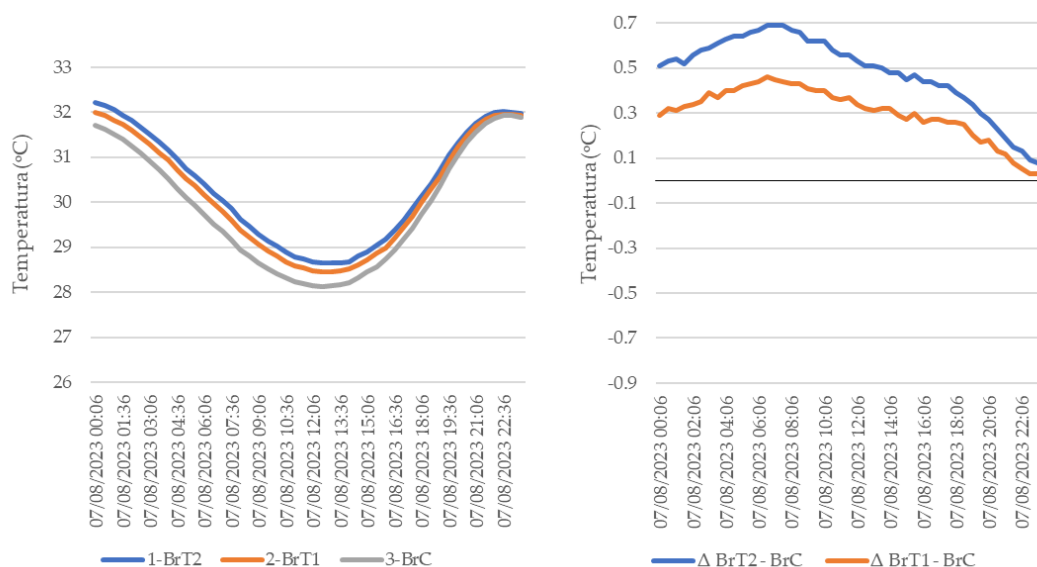


Figura 4.22 — Parede interior oeste (área revestida por ladrilho branco exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).

Constata-se que todas as diferenças são positivas, ou seja, as áreas revestidas com as tintas térmicas apresentam temperaturas superiores à com tinta convencional. Especificamente, a área com tinta BrT2 regista uma temperatura cerca de $0,7^{\circ}\text{C}$ superior à com tinta BrC, enquanto a área com tinta BrT1 apresenta uma diferença de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$. Essas diferenças positivas vão decrescendo até atingirem menos de $0,1^{\circ}\text{C}$ no final do dia. Este padrão sugere um desempenho térmico inferior das tintas BrT1 e BrT2 em comparação à tinta convencional BrC, quanto à capacidade de minimizar o aquecimento superficial, num dia caracterizado por elevadas temperaturas, o que é contrário ao suposto.

No caso das medições interiores na área revestida por ladrilhos pretos no exterior, observando o gráfico à esquerda da Figura 4.23 verifica-se que as temperaturas superficiais internas das áreas com tintas térmicas se mantêm consistentemente acima da com tinta convencional, à semelhança do caso anterior (ladrilho branco). Verificam-se também diferenças significativas entre as áreas com tintas térmicas relativamente à com tinta convencional. Especificamente, da análise do gráfico à direita constata-se que a aplicação da tinta BrT2 conduziu a diferenças de temperatura superficial de aproximadamente $+1^{\circ}\text{C}$ (valor superior ao atingido na área dos ladrilhos brancos) em relação à aplicação da tinta convencional no período da madrugada, decrescendo progressivamente ao longo do tempo até atingir $+0,5^{\circ}\text{C}$ no final do dia.

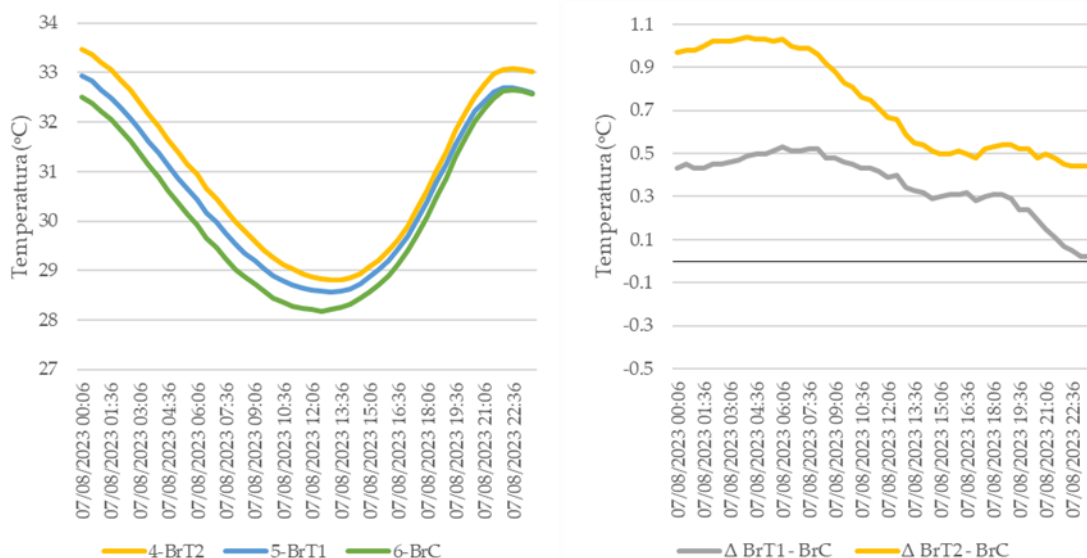


Figura 4.23 — Parede interior oeste (área revestida por ladrilho preto no exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).

Já a aplicação da tinta térmica BrT1 exibiu diferenças de temperatura superficial de cerca de 0,5°C, metade do valor registado pela tinta BrT2, igualmente decrescendo ao longo do dia até igualar a temperatura superficial da tinta convencional no final do dia.

A tendência verificada em ambas as áreas analisadas (ladrilhos brancos e pretos) sugere um efeito de aquecimento das superfícies internas promovido pelas áreas revestidas com as tintas BrT1 e BrT2, em contraste com a da tinta convencional que parece indiciar uma capacidade de reter o calor minimizando a transferência de calor por radiação para o interior da célula, considerando que ambas as tintas (térmicas e convencional) tenham emitância semelhantes. Infelizmente não foi possível avaliar a emitância das tintas.

A análise da Figura 4.24 à esquerda permite comprovar, à semelhança do observado nos dias anteriores, que a parede norte interior apresenta temperaturas inferiores às observadas na parede oeste interior. A evolução das diferenças de temperatura apresentadas no gráfico da Figura 4.24 (esquerda) corrobora igualmente o padrão constatado e as ilações tiradas previamente, em que as diferenças de temperatura superficial entre as aplicações das tintas térmicas e da tinta convencional são reduzidas, inferiores a 0,3°C.

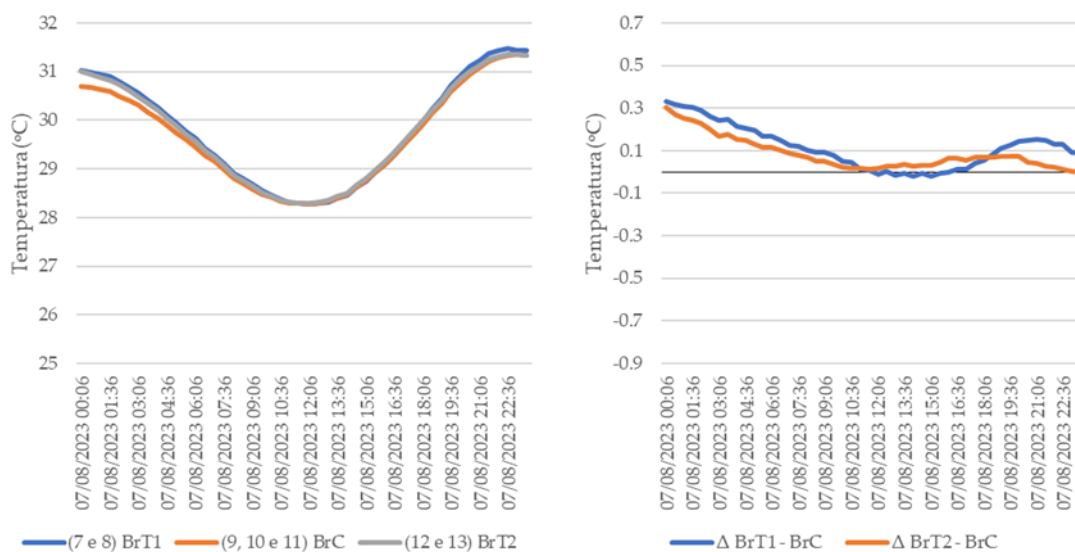


Figura 4.24 — Parede interior norte: temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).

4.3.1.4 Dia 15 de julho, dia nublado

A análise da Figura 4.25 permite inferir que o dia 15 de julho foi um dia nublado, dado o padrão de variação irregular observado nos níveis de radiação solar. O desfasamento entre os momentos de ocorrência das temperaturas máximas e mínimas, interior e exterior, corrobora as observações efetuadas anteriormente relativamente ao efeito de inércia térmica na célula experimental.

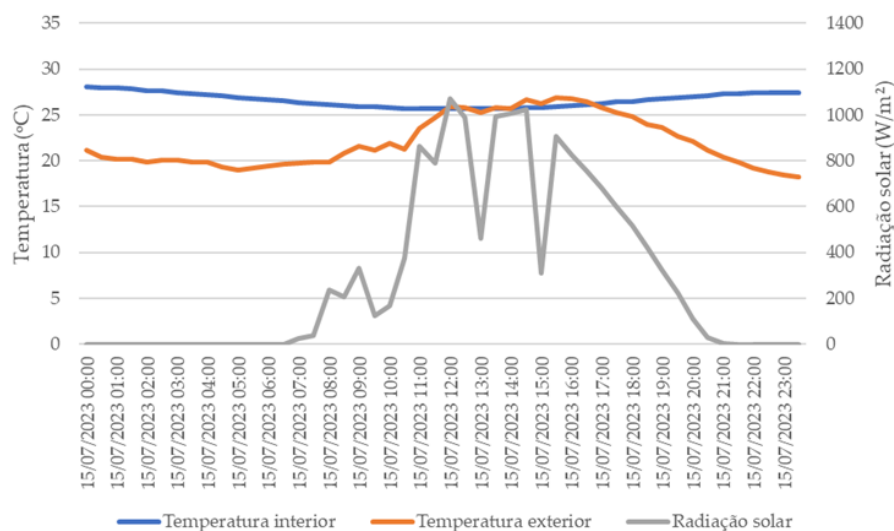


Figura 4.25 — Condições climáticas do dia 15 de julho.

O atraso do pico de temperatura interior para o período noturno e do valor de temperatura interior para as horas centrais do dia é indicativo da capacidade de armazenamento e libertação retardada de calor proporcionada pela massa térmica da célula. Este

comportamento, típico de materiais com inércia térmica elevada é consistente com o verificado nos dias anteriores.

Com base na Figura 4.26 à esquerda, verifica-se que as temperaturas superficiais interiores das áreas pintadas atingiram, num dia nublado, valores máximos de aproximadamente 28°C durante o período noturno. O gráfico à direita demonstra que, às 0 horas, as tintas térmicas apresentavam temperaturas cerca de -0,1°C inferiores à tinta convencional. À medida que o tempo foi passando, essa diferença foi aumentando, atingindo cerca de +0,1°C para a tinta BrT2 e aproximadamente 0°C para a tinta BrT1, às 8 horas da manhã. Posteriormente, as diferenças voltaram a decrescer, alcançando valores máximos de -0,5°C para a tinta BrT1 e aproximadamente -0,5°C para a tinta BrT2.

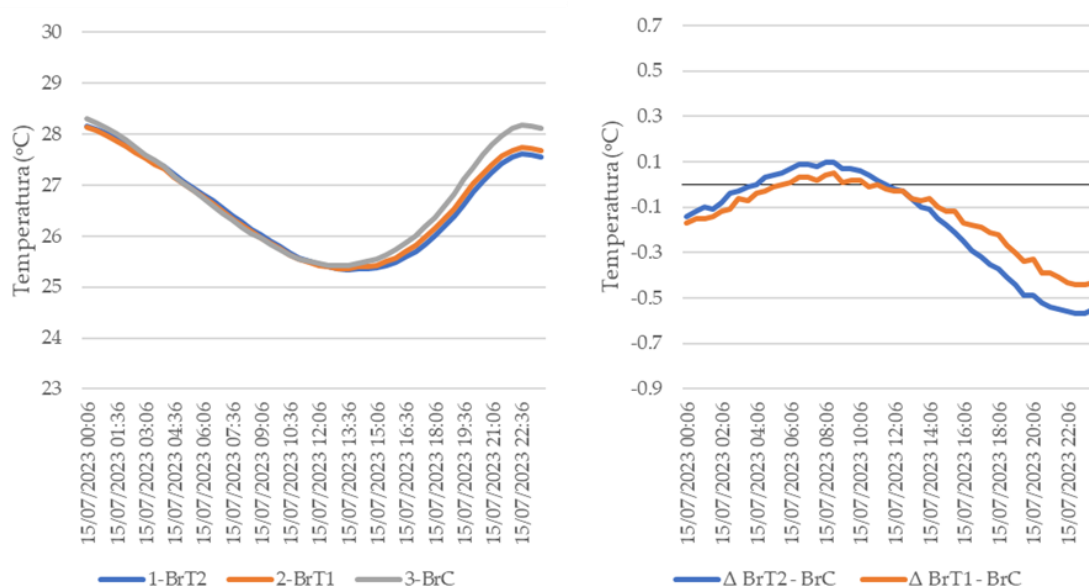


Figura 4.26 — Parede interior oeste (área revestida por ladrilho branco exterior): temperatura superficial interior (esq.), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).

Este padrão, consistente com o observado em dias de céu limpo, embora em menor escala, assemelha-se em grande parte com o verificado na parede norte, naturalmente pelo facto da incidência solar ser reduzida.

A Figura 4.27 vem corroborar as observações prévias relativamente ao comportamento térmico da área revestida com ladrilhos pretos e brancos no exterior da parede interior oeste, independentemente das condições climáticas do dia em análise. Analisando o gráfico da esquerda, constata-se que a temperatura superficial da área com revestimento em ladrilhos pretos é superior à da área revestida com ladrilhos brancos ao longo de todo o período diurno. Este resultado era esperado, dado que superfícies escuras absorvem mais quantidade de radiação térmica calor quando expostas à radiação solar.

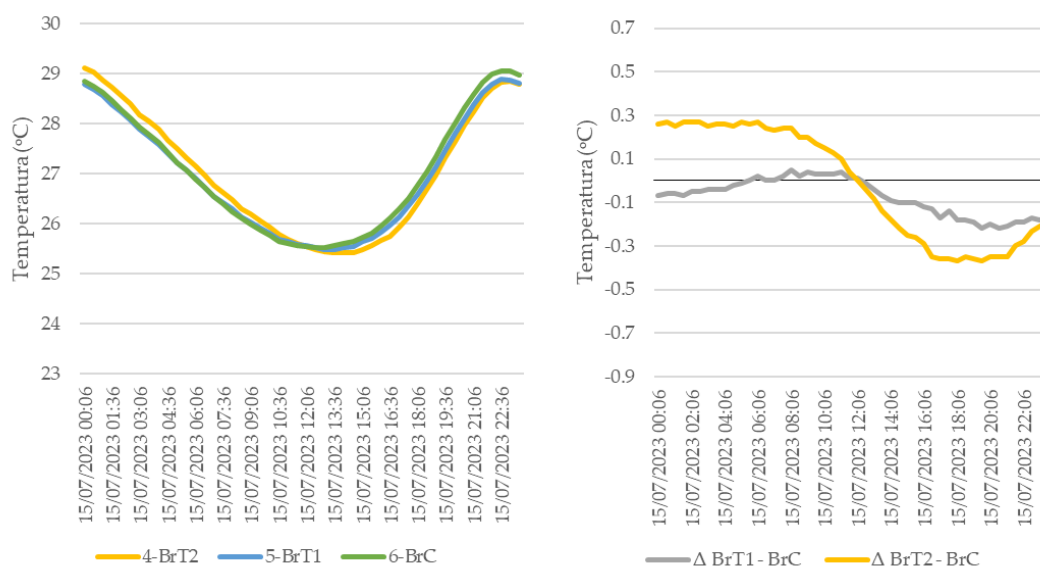


Figura 4.27 — Parede interior oeste (área revestida por ladrilho preto no exterior): temperatura superficial interior (esq.), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).

No que concerne às tintas térmicas, verifica-se que a aplicação da tinta BrT2 conduz a maiores diferenças de temperatura relativamente à tinta BrT1. Especificamente, no início do dia, a área com tinta BrT2 regista diferenciais positivos de cerca de $+0,3^{\circ}\text{C}$ face à com tinta BrC. Contudo, essa diferença vai diminuindo, tornando-se negativa a partir do meio da tarde. Entre as 16h e as 20h, os diferenciais mais negativos rondam os $-0,3^{\circ}\text{C}$. Assim, constata-se que o desempenho térmico das duas tintas térmicas ensaiadas varia ao longo do dia.

Através da observação do gráfico da Figura 4.28 (lado direito), referente aos diferenciais de temperatura entre as áreas revestidas com as tintas térmicas e as com tinta convencional BrC na superfície interior, verificam-se diferenças pouco expressivas, à semelhança dos dias anteriores. Especificamente, a aplicação da tinta térmica BrT1 conduz a valores de temperatura superficial praticamente idênticos aos da tinta convencional BrC, com desvios máximos inferiores a $0,1^{\circ}\text{C}$ em módulo.

Já no caso da aplicação da tinta BrT2, observam-se maiores variações nos diferenciais face à da tinta convencional ao longo do dia.

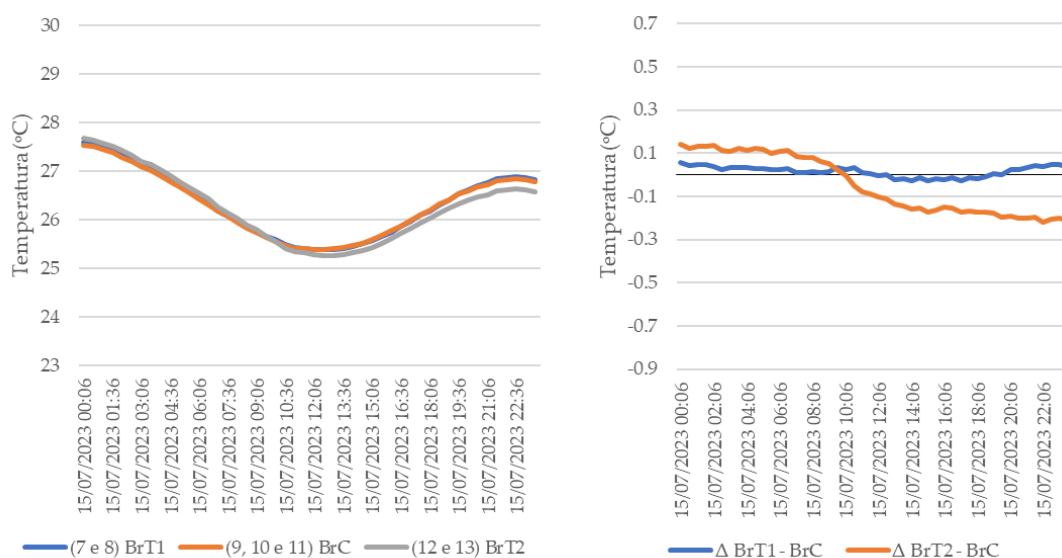


Figura 4.28 — Parede interior norte: temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional (direita).

Na parte da noite, as áreas com esta tinta registam valores superiores em cerca de $+0,1^{\circ}\text{C}$. Durante o dia, os diferenciais vão diminuindo progressivamente, atingindo o valor mínimo de $-0,2^{\circ}\text{C}$ por volta das 22h00. Contudo, apesar destas oscilações, denota-se que a magnitude dos diferenciais das áreas com a tinta BrT2 é reduzida, não excedendo $0,2^{\circ}\text{C}$. Portanto, as diferenças de temperatura das aplicações das tintas térmicas face à tinta convencional podem ser consideradas desprezáveis para ambas as tintas térmicas ensaiadas.

4.3.2 Desempenho de tintas térmicas no exterior da célula experimental

Para avaliar o desempenho dos sistemas de pintura com tintas térmicas aplicadas pelo exterior utilizou-se o método de análise por termografia de infravermelhos. Recorreu-se ao método de análise qualitativa (secção 2.2.8.1), por ser uma abordagem expedita e de fácil interpretação dos resultados. Obteve-se um conjunto de termogramas, que permitiram avaliar e analisar a distribuição de temperaturas superficiais das tintas aplicadas na parede sul exterior.

Tal como referido antes, as análises termográficas decorreram em dois dias distintos. No dia 18 de agosto realizaram-se três inspeções, às 8 horas (Figura 4.29), às 15 horas (Figura 4.30) e às 17 horas (Figura 4.31). Estes horários foram selecionados de modo a possibilitar a análise em diferentes condições de incidência solar sobre a parede sul exterior. Já no dia 31 de agosto foi efetuada apenas uma inspeção termográfica, às 15 horas (Figura 4.32), para avaliar o desempenho térmico dos sistemas de pintura com as tintas no momento de máxima radiação solar com o propósito de comparar os resultados com o ensaio do mesmo horário do dia 18 de

agosto, por se considerar esse o momento mais crítico e representativo para diferenciar o comportamento das diversas tintas ensaiadas.

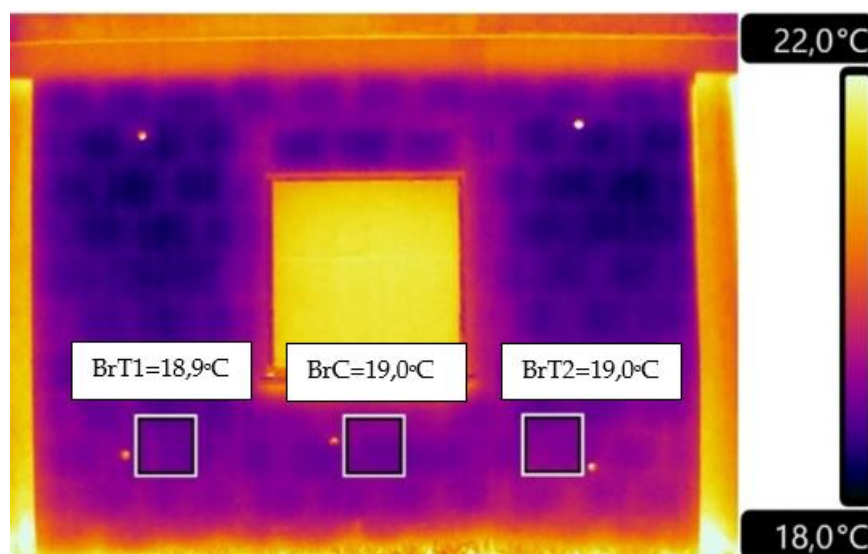


Figura 4.29 — Termograma da parede sul exterior no dia 18 de agosto às 8 horas da manhã.

A análise da Figura 4.29 permite constatar que, às 8 horas da manhã, as tintas apresentam temperaturas superficiais semelhantes, o que seria de esperar, dado que nesse período matinal ainda não ocorre incidência solar sobre a parede sul da célula experimental. Especificamente, a área revestida com a tinta térmica BrT1 apresenta uma temperatura superficial de 18,9°C, enquanto as com tinta convencional BrC e a tinta térmica BrT2 registam ambas uma temperatura de 19,0°C. Esta proximidade de valores era expectável numa situação sem radiação solar direta sobre as tintas, na qual os seus mecanismos de refletância ainda não foram ativados. Assim, sob ausência de radiação solar incidente, as propriedades térmicas das tintas térmicas BrT1 e BrT2, naturalmente, não conferem vantagem adicional face à tinta convencional BrC, observando-se um comportamento térmico similar entre as três tintas ensaiadas.

De acordo com a Figura 4.30, verifica-se que às 15 horas, momento de incidência máxima da radiação solar sobre a parede sul, surgem diferenças significativas nas temperaturas superficiais das três tintas ensaiadas.

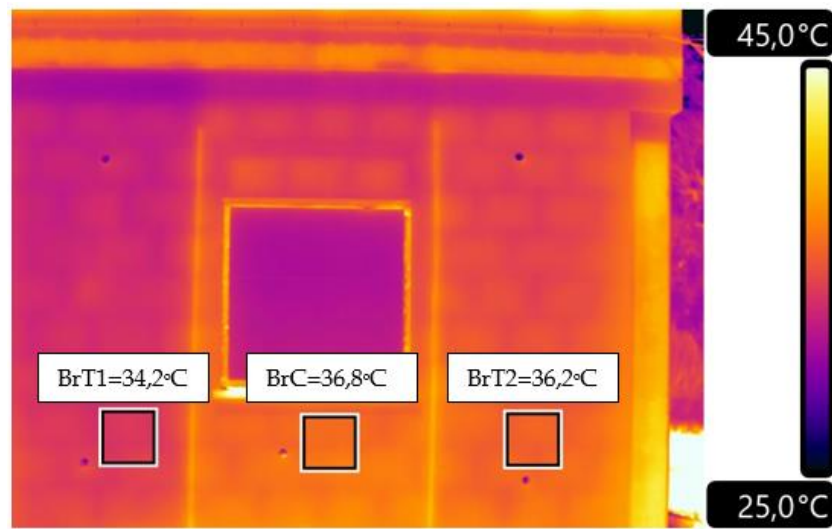


Figura 4.30 — Termograma da parede sul exterior no dia 18 de agosto às 15 horas.

Enquanto a área com a tinta térmica BrT1 apresenta uma temperatura de 34,2°C, cerca de 2°C inferior à tinta convencional BrC, com 36,8°C, a área com tinta térmica BrT2 exibe uma temperatura ligeiramente mais baixa do que a tinta convencional BrC, com uma diferença de apenas 0,6°C. Este resultado demonstra que, em situações em que radiação solar é elevada, a tinta térmica BrT1 revela melhor capacidade de manter a superfície mais fria em comparação às outras tintas. Tal comportamento era expectável, uma vez que a tinta térmica BrT1 apresentou a refletância mais elevada entre todas as tintas estudadas (secção 4.2). Assim, a refletância superior da tinta térmica BrT1 permite-lhe refletir uma maior fração da radiação solar incidente, absorvendo menos radiação térmica e consequentemente, atingindo uma menor temperatura superficial nestas condições.

A Figura 4.31 permite verificar o efeito da nebulosidade na redução das temperaturas superficiais das três tintas analisadas. Nestas condições de céu nublado, às 17h, a aplicação da tinta térmica BrT1 continua a exibir a temperatura mais baixa, de 33,0°C, mantendo aproximadamente 2°C de diferença para a área com a tinta convencional BrC, que regista 34,8°C. Já a área com aplicação da tinta térmica BrT2 apresenta uma temperatura um pouco inferior à da tinta BrC, de 34,3°C, porém com uma diferença menos acentuada e pouco significativa. Este comportamento reitera o melhor desempenho térmico da tinta térmica BrT1 mesmo sob condições de radiação solar difusa e reduzida, provocada pela nebulosidade. A capacidade da tinta térmica BrT1 manter a superfície mais fria que as demais tintas é resultante da sua maior refletância, que minimiza a absorção de radiação térmica (principalmente na gama do infravermelho), reforçando assim o seu efeito de arrefecimento passivo.

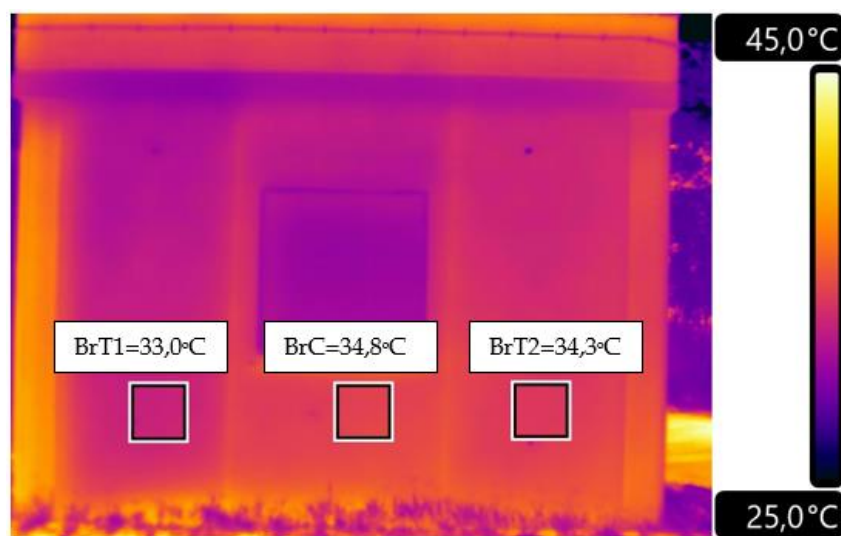


Figura 4.31 — Termograma da parede sul exterior no dia 18 de agosto às 17 horas (céu pouco nublado).

A Figura 4.32 apresenta o termograma obtido no dia 31 de agosto às 15 horas, período de máxima incidência solar, no qual se observam temperaturas superficiais mais elevadas em comparação com o dia 18 de agosto.

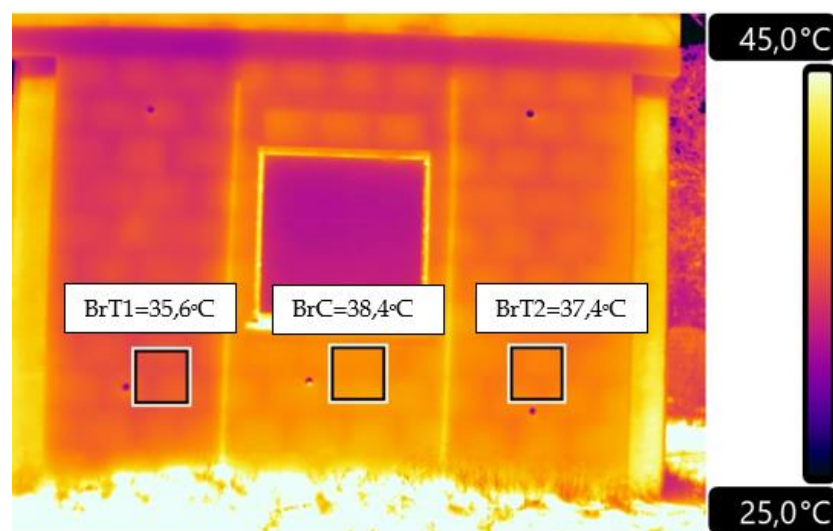


Figura 4.32 — Termograma da parede sul exterior no dia 31 de agosto às 15 horas.

Especificamente, a área revestida com a tinta térmica BrT1 regista uma temperatura superficial de 35,6°C, cerca de 3°C inferior à com tinta convencional BrC, que atinge 38,4°C. Já a área com a tinta térmica BrT2 apresenta uma temperatura de 37,4°C, aproximadamente 1°C abaixo da tinta convencional BrC. Este resultado comprova o melhor desempenho térmico da tinta BrT1 face às restantes na minimização dos ganhos solares.

A análise termográfica efetuada permite retirar diversas conclusões relevantes. Verificou-se que, na ausência de radiação solar direta, as tintas térmicas e convencional apresentam um comportamento térmico similar, com temperaturas superficiais próximas dado a falta de incidência solar sobre a parede exterior. Porém, sob condições de incidência solar, em especial no

período de máxima radiação, as tintas térmicas destacam-se por manterem a temperatura significativamente mais baixa. Entre as tintas térmicas ensaiadas, a BrT1 revelou o melhor desempenho térmico, com até 3,0°C de diferença para a temperatura da tinta convencional BrC. Mesmo com céu nublado, a tinta BrT1 continuou a apresentar a temperatura mais baixa, corroborando a sua capacidade superior de refletir radiação infravermelha.

CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

A presente dissertação teve como objetivo analisar o contributo que tintas térmicas podem ter para a eficiência energética quando aplicadas no interior e exterior de edifícios. Para tal foi realizada uma prospeção ao mercado nacional, através do envio de e-mails para empresas produtoras e comercializadores de tintas, para recolha de informação sobre os sistemas de pinturas com tintas térmicas comercializados e de amostras de tintas térmicas. Com base na resposta da indústria, foi avaliado o desempenho térmico de duas tintas térmicas brancas em comparação a uma tinta convencional branca, e de um primário térmico face a um primário convencional. Inicialmente, foi necessário determinar a refletância das tintas térmicas e convencionais em ambiente controlado de laboratório, utilizando o espectrofotómetro disponível no Núcleo de Materiais Orgânicos do Departamento de Materiais (NMO/DED) do LNEC. Em seguida, o desempenho térmico foi avaliado aplicando, no interior e no exterior, os sistemas com as tintas térmicas e convencional em condições reais de uso numa célula experimental do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do Departamento de Edifícios (NRI/DED) do LNEC. Para isso, foram instalados termopares internamente para medir a temperatura superficial das paredes interiores revestidas com as tintas. No exterior, utilizou-se a termografia de infravermelhos para avaliar as temperaturas superficiais das áreas com as diferentes tintas aplicadas na parede sul da célula experimental.

Foram aplicados os seguintes sistemas de pintura nas paredes interiores e exteriores da célula experimental:

- primário convencional e tinta branca convencional (BrC);
- primário convencional e tinta térmica branca 1 (BrT1);
- primário térmico e tinta térmica branca 2 (BrT2);
- primário térmico e tinta térmica branca 3 (BrT3).

Avaliação da refletância

Através de ensaios de espectrofotometria em ambiente controlado de laboratório, determinou-se a refletância total das amostras revestidas pelas diferentes tintas nas regiões do ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Os resultados mostraram que o sistema de pintura com a tinta térmica BrT1 apresentou os maiores índices de refletância total tanto na região do visível (86,8%), como na região do infravermelho próximo (89,5%), quando comparada às demais tintas analisadas. Em contrapartida, os sistemas de pintura com as tintas BrT2, BrT3 e BrC apresentaram valores similares de refletância total nas regiões estudadas, em torno de 80% no visível e infravermelho próximo. Além disso, verificou-se que a presença de primários, tanto térmico como convencional, não promoveu melhorias expressivas na refletância das tintas na maior parte do espectro analisado.

Efeito das tintas térmicas quando aplicadas no interior

A análise dos resultados obtidos através dos termopares instalados na célula experimental e das sondas da estação meteorológica do LNEC permitiu constatar a ocorrência de uma inércia térmica elevada na célula experimental. Este efeito ficou evidenciado pelo desfasamento temporal entre o máximo das temperaturas superficiais internas, que ocorreram durante o período noturno, e o máximo das temperaturas do ar exterior, que aconteceram ao longo do dia aquando da radiação solar mais intensa. Devido a este efeito de inércia térmica elevada, as maiores diferenças de temperatura superficial entre áreas com as tintas térmicas e a tinta convencional ensaiadas no interior da célula experimental foram verificadas no período noturno. Isto porque a célula experimental foi capaz de absorver o calor ao longo do dia e libertá-lo de forma retardada durante a noite, amplificando as variações de temperatura das tintas em análise.

No que se refere especificamente ao desempenho das tintas analisadas, verificou-se que, nos dias caracterizados por uma temperatura amena de verão, os sistemas de pintura com as tintas térmicas BrT1 e BrT2 foram capazes de promover o arrefecimento da superfície interior da parede oeste, que se encontrava exposta ao Sol. Nestas condições, as temperaturas superficiais medidas pelos termopares nas áreas revestidas com tintas térmicas foram até cerca de 1°C inferiores às correspondentes na área de controlo revestida com o sistema de pintura com a tinta convencional BrC. Este resultado sugere uma maior capacidade de minimizar a absorção da radiação solar incidente por parte dos sistemas de pintura com as tintas térmicas BrT1 e BrT2, permitindo manter a superfície interna relativamente mais fria do que a tinta convencional. Importa realçar que as maiores diferenças de temperatura foram verificadas na área da parede oeste, revestida externamente por ladrilhos pretos, pelo facto de superfícies escuras

absorverem mais radiação térmica quando expostas à radiação solar, do que superfícies de cor clara.

Contudo, quando submetidas a dias de céu limpo com temperaturas altas, acima de 35,0°C, as tintas térmicas estudadas apresentaram um desempenho térmico inferior ao da tinta convencional. Especificamente, nestas condições de calor extremo (que atingiram cerca de 40°C), os sistemas de pintura com as tintas BrT1 e BrT2 registaram temperaturas superficiais internas até 1,0°C superiores em comparação à tinta BrC na parede oeste interior. Este padrão sugere limitações na capacidade de minimizar os ganhos térmicos e promover o arrefecimento passivo no interior por parte das tintas térmicas ensaiadas quando sujeitas a temperaturas exteriores muito altas. Portanto, os resultados obtidos salientam que, para condições climáticas de calor extremo atípico, o uso exclusivo de tintas térmicas no interior pode não ser suficiente para manter níveis adequados de conforto térmico. Nestes casos, deverão ser adotadas soluções adicionais de arrefecimento.

Por outro lado, para todas as condições climáticas analisadas (céu limpo, com temperaturas do ar amenas ou elevadas, e nublado), os sistemas de pintura com as tintas térmicas BrT1 e BrT2 apresentaram diferenças de temperatura superficiais muito reduzidas, inferiores a 0,3°C, em relação ao sistema de pintura com a tinta convencional BrC na parede interior norte, que se consideram insignificantes. Este resultado era expectável, uma vez que a parede norte não se encontra exposta à radiação solar direta.

Nos dias nublados, as diferenças de temperatura obtidas entre as paredes norte e oeste podem ser consideradas desprezáveis. Tal deve-se ao facto de, nestas condições climáticas, existir pouca radiação solar incidente sobre as fachadas. Assim, não se verifica um aquecimento significativo da parede oeste relativamente à parede norte, que normalmente ocorre nos dias de céu limpo.

Pelos resultados obtidos no presente estudo considera-se que o efeito das tintas térmicas quando aplicadas no interior no período de arrefecimento não justifica o investimento.

Efeito das tintas térmicas quando aplicadas no exterior

Verificou-se que, na ausência de radiação solar direta (inspeção às 8h), as tintas térmicas e convencional apresentaram temperaturas superficiais muito semelhantes, em torno de 19,0°C. Contudo, no momento de máxima incidência solar, por volta das 15h, registaram-se diferenças significativas entre as temperaturas superficiais medidas nos revestimentos pintados com as tintas. No sistema de pintura com a tinta térmica BrT1 registaram-se valores próximos dos 35,0°C, cerca de 3°C inferior à temperatura observada na tinta convencional BrC. Já a temperatura medida na área com tinta térmica BrT2 aproximou-se da temperatura superficial da com tinta convencional BrC. Este padrão comprova o efeito da refletância mais elevada do sistema de pintura com a tinta térmica BrT1, resultando em temperatura superficial mais

fria sob incidência de radiação solar intensa. Mesmo com céu nublado, por volta das 17h, o sistema de pintura com a tinta térmica BrT1 continuou a apresentar a temperatura mais baixa, 33,0°C, cerca de 2°C abaixo da com BrC, validando a sua capacidade em promover arrefecimento passivo mesmo com níveis reduzidos de radiação solar direta incidente. Porém, como seria de esperar, as diferenças de temperatura não foram tão acentuadas como se verificou em estudos de comparação do desempenho térmico de tintas de cores clara e escura conforme os resultados apresentados na dissertação de Gonçalves (2014). Portanto, dentro das limitações do estudo com tintas claras, pode-se concluir que o sistema de pintura com a tinta térmica BrT1 apresentou vantagens importantes na redução da temperatura superficial exterior evidenciada pelos termogramas em comparação com as restantes tintas em estudo. No entanto, o efeito dessa redução da temperatura superficial exterior no ambiente interior vai depender de diversos fatores relacionados com a envolvente do edifício, como sejam a constituição da parede, a existência de zonas de pontes térmicas, ou ainda o tipo de uso do edifício.

Após a análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que o uso dos sistemas de pintura com tintas térmicas apresenta maiores vantagens quando aplicadas em superfícies exteriores, em comparação a superfícies interiores. Conforme evidenciado pelos resultados apresentados nesta dissertação, o uso de tintas térmicas em superfícies exteriores demonstrou uma redução significativa da temperatura superficial (da ordem de 3°C), quando comparado a tintas convencionais, confirmando estudos prévios. O uso de tintas térmicas no interior apresentou diferenças pouco significativas de temperatura entre tintas térmicas e convencionais durante o período de arrefecimento (verão).

5.2 Sugestões para desenvolvimentos futuros

Sugere-se para desenvolvimentos futuros:

- Analisar o efeito da aplicação do sistema de pintura com tintas térmicas no interior de edifícios durante o período de aquecimento (inverno), de forma a verificar se a sua aplicação contribui para um melhor desempenho térmico e, principalmente, se pode contribuir para a redução da ocorrência de condensações superficiais nas paredes interiores e outros elementos da envolvente.
- Estudar o efeito da aplicação do sistema de pintura com tintas térmicas em toda a envolvente de um edifício em condições reais de uso, quantificando a redução dos consumos energéticos.
- Realizar ensaios com sistemas de pintura com tintas térmicas noutras células ou modelos experimentais, variando os materiais de construção, geometria e inércia térmica, para as

diferentes orientações solares nas várias estações do ano. Tal permitiria avaliar o desempenho das tintas em diferentes situações.

- Complementar a caracterização das propriedades das tintas térmicas destinadas a aplicações em interiores, através da determinação da emitância térmica, parâmetro não avaliado no presente estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM (2012). ASTM E 903-12. Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres.
- Barreira, E. (2004). Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto.
- Berdahl, P., Bretz, S. E. (1997). Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. In *Energy and Buildings* 25(2), 149-158. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01004-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01004-3)
- Carvalho, B. (2019). Levantamento e caracterização higrotérmica de habitação social-caso de estudo. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto.
- Chaowanapanit, C., Katejanekarn, T., Mettanant, V., Prakulpawong, P. (2021). Energy consumption reduction by high solar reflective paint. *Engineering Journal*, 25(2), 215–222. <https://doi.org/10.4186/ej.2021.25.2.215>
- Chouriço, F. (2017). Estudo de Soluções de Otimização para melhoria da Eficiência Energética do Edifício Tec Labs. Dissertação de Mestrado. Universidade de Lisboa.
- Dias, D. (2008). Radiation control coatings. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto.
- Dias, D., Machado, J., Leal, V., Mendes, A. (2014). Impact of using cool paints on energy demand and thermal comfort of a residential building. *Applied Thermal Engineering*, 65(1–2), 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.056>
- Dornelles, K. (2008). Absortância solar de superfícies opacas: Métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. Tese de Doutoramento, Universidade Estadual de Campinas.
- FLIR (2007). Manual do utilizador - ThermaCAM reporter.
- Gonçalves, H., Graça, J. (2004). Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal. (Manual Técnico). Lisboa: Direção Geral de Geologia e Energia.
- Gonçalves, L. (2014). Avaliação do desempenho térmico de tintas reflectantes em fachadas por análise termográfica. Dissertação de mestrado, Universidade NOVA de Lisboa.
- González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Maestre, I. R., Yan, D. (2022). A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports*, 8, 626–637. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.280>
- Guo, X. G., Jia, W., Yue, W., Yu-Qiang, A., Liu, X. W. (2017). Experimental study of the thermal performance of a new type of building reflective coating in hot summer and cold winter zone of China. *Procedia Engineering*, 205, 603–608. <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2017.10.416>

- Haberl, J. S., Soolyeon Cho, P. E. (2004). Literature review of uncertainty of analysis methods (DOE-2 Program) report to the Texas commission on environmental quality energy systems laboratory Texas engineering experiment station Texas A&M university system. <https://hdl.handle.net/1969.1/2072>
- Hart, J. M. (1991). A practical guide to infra-red thermography for building surveys. Construction Research Communications Ltd.
- Henriques, A. (2011). Comportamento higrotérmico de edifícios. Versão 11.5. Universidade NOVA de Lisboa.
- Hernández-Pérez, I., Xamán, J., Macías-Melo, E. V., Aguilar-Castro, K. M., Zavala-Guillén, I., Hernández-López, I., Simá, E. (2018). Experimental thermal evaluation of building roofs with conventional and reflective coatings. *Energy and Buildings*, 158, 569–579. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.085>
- Ibrahim, M., Bianco, L., Ibrahim, O., Wurtz, E. (2018). Low-emissivity coating coupled with aerogel-based plaster for walls' internal surface application in buildings: Energy saving potential based on thermal comfort assessment. *Journal of Building Engineering*, 18, 454–466. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.04.008>
- Ikematsu, P. (2007). Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Joudi, A., Svedung, H., Cehlin, M., Rönnelid, M. (2013). Reflective coatings for interior and exterior of buildings and improving thermal performance. *Applied Energy*, 103, 562–570. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.019>
- Lourenço, T. (2016). Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography. Dissertação de mestrado, Universidade NOVA de Lisboa.
- Maldague, X. (2001a). Infrared and Thermal Testing. American Society for Nondestructive Testing, INC.
- Maldague, X. (2001b). Theory and practise of infrared technology for nondestructive testing. John Wiley and Sons.
- Malz, S., Krenkel, W., Steffens, O. (2020). Infrared reflective wall paint in buildings: Energy saving potentials and thermal comfort. *Energy and Buildings*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110212>
- Matias, L. (2001). Avaliação do desempenho térmico de protecções reflectantes aplicadas em coberturas inclinadas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa.
- Melrinho, A. (2014). Anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço: Detecção por termografia de infravermelhos. Dissertação de Mestrado, Universidade NOVA de Lisboa.
- Modest, M. (2003). Radiative heat transfer. Academic Press.

- Oke, T. R., Johnson, G. T., Steyn, D. G., Watson, I. D. (1991). Simulation of surface urban heat islands under ideal conditions at night part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 56(4), 339–358. <https://doi.org/10.1007/BF00119211>
- Peoples, J., Hung, Y. W., Fang, Z., Braun, J., Horton, W. T., Ruan, X. (2022). Energy savings of radiative cooling paints applied to residential buildings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123001>
- Pina dos Santos, C. (1993). Materiais granulares leves no isolamento térmico de edifícios. Estudo experimental da sua viabilidade e desempenho. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico.
- Pisello, A. L. (2017). State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities. *Solar Energy*, 144, 660–680. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.068>
- Prado, R. T. A., Ferreira, F. L. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37(4), 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.03.009>
- Revel, G. M., Martarelli, M., Emiliani, M., Celotti, L., Nadalini, R., Ferrari, A. De, Hermanns, S., Beckers, E. (2014). Cool products for building envelope - Part II: Experimental and numerical evaluation of thermal performances. *Solar Energy*, 105, 780–791. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.035>
- Santamouris, M., Synnefa, A., Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. In *Solar Energy*, 85(12), 3085–3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>
- Santamouris, M., Yun, G. Y. (2020). Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island. In *Renewable Energy*, 161, 792–807. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.109>
- Sharkawi, N., Baharun, A. (2017). Effect of different types of paint to residential building. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 2(7). <https://doi.org/https://doi.org/10.33736/jcest.306.2016>
- Simpson, A., Fitton, R., Rattigan, I. G., Marshall, A., Parr, G., Swan, W. (2019). Thermal performance of thermal paint and surface coatings in buildings in heating dominated climates. *Energy and Buildings*, 197, 196–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.027>
- Synnefa, A., Santamouris, M., Apostolakis, K. (2007). On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 81(4), 488–497. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.005>
- Synnefa, A., Santamouris, M., Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 80(8), 968–981. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.005>

- Uemoto, K. L., Sato, N. M. N., John, V. M. (2010). Estimating thermal performance of cool colored paints. *Energy and Buildings*, 42(1). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.026>
- Wijewardane, S. (2022). Inventions, innovations, and new technologies: Paints and coatings for passive cooling. *Solar Compass*, 3–4, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.sol-com.2022.100032>
- Zinzi, M. (2016). Characterisation and assessment of near infrared reflective paintings for building facade applications. *Energy and Buildings*, 114, 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.048>

ANEXOS

A.1 *Template* do e-mail enviado as Empresas

Assunto: Pedido de Informação sobre Tintas Térmicas

Exmo.(a) Sr.(a),

O meu nome é Muhamad Assane e sou estudante do Mestrado Integrado em Engenharia Civil na Universidade NOVA de Lisboa. Neste momento, encontro-me a desenvolver a minha dissertação de mestrado sobre a avaliação do efeito de sistemas com tintas “térmicas” para aplicação em interiores e exteriores de edifícios, sob a orientação do Doutor Luís Matias do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e da Professora Paulina Faria da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa.

Estou a entrar em contato com a vossa empresa para perguntar se comercializam tintas “térmicas” que possam ser utilizadas para desenvolver o meu estudo. O objetivo é realizar um levantamento das tintas “térmicas” existentes no mercado nacional e, posteriormente, avaliar a eficácia dos sistemas com algumas dessas tintas. Os resultados serão depois disponibilizados às empresas que contribuírem para o referido estudo.

Caso a vossa empresa comercialize tintas “térmicas”, gostaria que nos fornecessem a respetiva ficha técnica e dados técnicos complementares, tais como o âmbito de aplicação, condições de aplicação, composição dos sistemas, propriedades, ensaios realizados e normas seguidas, e benefícios para a eficiência energética.

Agradeço desde já a vossa atenção e fico a aguardar uma resposta. Caso necessitem de mais informações acerca do meu projeto de investigação, por favor não hesitem em contactar. Agradeço antecipadamente a vossa atenção e aguardo a vossa resposta.

Com os melhores cumprimentos,

Muhamad Assane

A.2 Características técnicas da ThermaCam P640

IMAGING PERFORMANCE	
Thermal:	
Field of view/min focus distance	24°x18° / 0.3 m
Spatial resolution (IFOV)	0.65 mrad
Thermal sensitivity	60mK at 30°C
Image frequency	30 Hz non-interlaced
Focus	Automatic or manual
Electronic zoom / pan function	1 - 8 x continuous, including pan function
Detector type	Focal Plane Array (FPA), uncooled microbolometer 640 x 480 pixels
Spectral range	7.5 to 13µm
Digital image enhancement	Normal and enhanced
Visual:	
Built-in digital video	1.3 Mpixel, full color / built-in Target Illuminator / exchangeable lens
Standard lens performance	f=8 mm / FOV 32°
IMAGE PRESENTATION	
Video output	RS170 EIA/NTSC or CCIR/PAL composite video, IEEE-1394 FireWire, USB
Viewfinder	Built-in, tiltable, high-resolution color viewfinder (800 x 480 pixels)
External display	Built-in 5.6" LCD (1024 x 600 pixels)
MEASUREMENT	
Temperature range	-40°C to +500°C, in 2 ranges; up to + 2000°C, optional
Accuracy	±2°C, ±2% of reading
Measurement mode	Spots/Areas (Boxes, Circles), Isotherms (above, below, interval), Delta T
Menu controls	Palettes , load custom palettes, auto adjust (manual/continuous/based on histogram equalization), on screen live and reference image (PoP), image gallery, sequence storage, programmable storage
Alarm Functions	Automatic alarm on any selected measurement function, audible/visible alarm above/below
Set-up controls	Date/time, Temperature °C/°F, language
Atmospheric transmission correction	Automatic, based on inputs for distance, atmospheric temperature and relative humidity
Optics transmission correction	Automatic, based on signals from internal sensors
Emissivity correction	Variable from 0.01 to 1.0 or select from listings in pre-defined materials list
Reflected ambient temperature correction	Automatic, based on input of reflected temperature
External optics/window correction	Automatic, based on input of optics/window transmission and temperature
IMAGE STORAGE	
Type	Removable SD-card (256 MB)
File formats - Thermal	Built-in RAM memory for burst recording
File formats - Visual	Standard JPEG, 14 bit measurement data included
Voice annotation of images	Standard JPEG, automatically associated with corresponding thermal image / possibility for visual marker
Text annotation of images	30 sec. of digital voice "clip" stored together with the image wired headset Predefined text selected and stored together with the image
VIDEO STORAGE	
Type	Recording of fully radiometric IR-video clips in camera, transferable to SD-card Recording of MPEG-4 non-radiometric video to SD-card
VIDEO STREAMING	
Type	MPEG-4, IP-link using FireWire or USB
LENSES (OPTIONAL)	
Field of view/min focus distance	12° x 9° / 0.9m telelens 45° x 34° / 0.1m wide angle lens Close-up 50µm 32 mm x 24 mm / 75 mm
Lens identification	Automatic
LASER POINTER	
Classification	Class 2
Type	Semiconductor AlGaInP Diode Laser: 1mW/635 nm red
BATTERY SYSTEM	
Type	Li-Ion, rechargeable, field replaceable
Operating time	3 hours continuous operation
Charging system	In camera (AC adapter or 12 V from car) or 2 bay intelligent charger
External power operation	AC adapter 110/220 V AC, 50/60 Hz or 12 V from car (cable with Std plug; optional)
Power saving	Automatic shutdown and sleep mode (user selectable)
ENVIRONMENTAL SPECIFICATION	
Operating temperature range	-15°C to +50°C
Storage temperature range	-40°C to +70°C
Humidity	Operating and storage 10% to 95%, non-condensing
Encapsulation	IP 54 IEC 529
Shock	Operational: 25G, IEC 68-2-29
Vibration	Operational: 2G, IEC 68-2-6
PHYSICAL CHARACTERISTICS	
Weight	1.7 kg incl. battery
Sae	120 mm x 145 mm x 220 mm
Tripod mounting	1/4" - 20
INTERFACES	
FireWire	IEEE-1394 FireWire output (real-time non-radiometric video / filetransfer to PC)
USB	Image (thermal and visual), measurement, voice and text transfer to PC
IrDA	Wireless communication
SD-card (2)	I/O slot; storage slot

Figura A.2.1 — Características técnicas da câmara ThermaCam P640 (FLIR, 2007).

A.3 Calibração dos termopares

Tabela A.3.1 — Dados da temperatura superficial do dia 22 de junho, obtida pelos termopares antes da aplicação das tintas nas paredes interiores.

Data	Parede oeste						Parede norte						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
22/06/2023 00:14	25.03	24.88	24.51	25.85	26.25	25.44	24.35	24.15	24.08	23.57	23.85	23.87	23.60
22/06/2023 00:44	24.96	24.82	24.46	25.75	26.13	25.36	24.31	24.10	24.01	23.56	23.80	23.80	23.55
22/06/2023 01:14	24.85	24.72	24.36	25.59	25.95	25.20	24.23	24.01	23.92	23.54	23.73	23.70	23.47
22/06/2023 01:44	24.74	24.60	24.26	25.41	25.78	25.05	24.14	23.92	23.84	23.51	23.65	23.60	23.38
22/06/2023 02:14	24.58	24.46	24.14	25.21	25.56	24.87	24.02	23.80	23.73	23.45	23.53	23.46	23.27
22/06/2023 02:44	24.43	24.33	24.03	25.02	25.35	24.70	23.93	23.70	23.61	23.41	23.44	23.36	23.19
22/06/2023 03:14	24.26	24.15	23.89	24.80	25.11	24.50	23.78	23.56	23.47	23.33	23.32	23.22	23.07
22/06/2023 03:44	24.08	24.00	23.75	24.58	24.88	24.31	23.65	23.42	23.35	23.27	23.20	23.09	22.94
22/06/2023 04:14	23.89	23.80	23.59	24.33	24.62	24.09	23.48	23.27	23.19	23.17	23.05	22.93	22.80
22/06/2023 04:44	23.72	23.65	23.45	24.12	24.38	23.89	23.35	23.14	23.07	23.09	22.93	22.80	22.67
22/06/2023 05:14	23.51	23.44	23.27	23.88	24.13	23.68	23.17	22.96	22.90	22.96	22.77	22.63	22.52
22/06/2023 05:44	23.33	23.27	23.13	23.66	23.90	23.49	23.02	22.82	22.75	22.87	22.63	22.50	22.38
22/06/2023 06:14	23.13	23.09	22.97	23.43	23.65	23.29	22.86	22.65	22.60	22.75	22.48	22.33	22.24
22/06/2023 06:44	22.96	22.92	22.84	23.23	23.45	23.10	22.71	22.51	22.46	22.67	22.35	22.20	22.11
22/06/2023 07:14	22.78	22.75	22.69	23.01	23.22	22.91	22.55	22.36	22.29	22.56	22.20	22.04	21.98
22/06/2023 07:44	22.61	22.60	22.55	22.83	23.03	22.77	22.41	22.23	22.17	22.48	22.08	21.93	21.87
22/06/2023 08:14	22.46	22.45	22.43	22.65	22.84	22.63	22.28	22.11	22.04	22.40	21.98	21.81	21.78
22/06/2023 08:44	22.37	22.37	22.37	22.54	22.74	22.55	22.20	22.05	21.98	22.38	21.95	21.79	21.79
22/06/2023 09:14	22.29	22.29	22.30	22.42	22.61	22.46	22.11	21.97	21.91	22.33	21.92	21.77	21.78
22/06/2023 09:44	22.22	22.23	22.25	22.35	22.52	22.40	22.05	21.94	21.88	22.31	21.92	21.79	21.81
22/06/2023 10:14	22.16	22.16	22.19	22.28	22.45	22.33	22.01	21.90	21.84	22.27	21.90	21.79	21.84
22/06/2023 10:44	22.11	22.11	22.13	22.23	22.37	22.28	21.97	21.87	21.81	22.24	21.89	21.82	21.88
22/06/2023 11:14	22.11	22.08	22.10	22.21	22.32	22.25	21.98	21.88	21.83	22.21	21.90	21.86	21.93
22/06/2023 11:44	22.11	22.08	22.08	22.22	22.30	22.21	21.99	21.91	21.86	22.21	21.93	21.93	21.99
22/06/2023 12:14	22.12	22.08	22.06	22.25	22.29	22.21	22.02	21.96	21.91	22.21	21.98	22.01	22.07
22/06/2023 12:44	22.19	22.14	22.11	22.31	22.33	22.24	22.09	22.04	22.02	22.24	22.05	22.11	22.19
22/06/2023 13:14	22.24	22.19	22.13	22.38	22.38	22.25	22.18	22.11	22.11	22.26	22.11	22.23	22.30
22/06/2023 13:44	22.34	22.27	22.19	22.50	22.46	22.31	22.29	22.23	22.24	22.31	22.24	22.39	22.42
22/06/2023 14:14	22.47	22.37	22.28	22.61	22.56	22.38	22.42	22.35	22.38	22.36	22.34	22.55	22.55
22/06/2023 14:44	22.62	22.52	22.39	22.79	22.71	22.49	22.58	22.50	22.56	22.46	22.51	22.74	22.72
22/06/2023 15:14	22.79	22.67	22.50	22.95	22.86	22.62	22.75	22.66	22.74	22.55	22.66	22.94	22.87
22/06/2023 15:44	23.00	22.86	22.68	23.15	23.05	22.78	22.94	22.84	22.96	22.68	22.84	23.15	23.05
22/06/2023 16:14	23.21	23.06	22.83	23.37	23.27	22.96	23.14	23.03	23.18	22.79	23.02	23.36	23.21
22/06/2023 16:44	23.44	23.27	23.02	23.63	23.52	23.17	23.34	23.22	23.39	22.90	23.21	23.56	23.38
22/06/2023 17:14	23.71	23.50	23.23	23.91	23.83	23.42	23.55	23.42	23.60	23.03	23.41	23.77	23.56
22/06/2023 17:44	23.99	23.77	23.48	24.23	24.16	23.73	23.77	23.63	23.82	23.18	23.60	23.98	23.73
22/06/2023 18:14	24.31	24.07	23.75	24.59	24.56	24.07	24.00	23.86	24.04	23.33	23.80	24.19	23.92
22/06/2023 18:44	24.63	24.38	24.03	24.98	24.99	24.45	24.23	24.07	24.26	23.48	24.00	24.38	24.09
22/06/2023 19:14	24.97	24.72	24.33	25.40	25.45	24.84	24.46	24.28	24.47	23.64	24.20	24.57	24.26
22/06/2023 19:44	25.32	25.04	24.63	25.84	25.94	25.24	24.68	24.49	24.66	23.78	24.37	24.74	24.41
22/06/2023 20:14	25.67	25.36	24.94	26.28	26.41	25.65	24.90	24.69	24.84	23.93	24.55	24.90	24.56
22/06/2023 20:44	25.99	25.69	25.22	26.71	26.88	26.03	25.09	24.89	25.00	24.07	24.70	25.05	24.70
22/06/2023 21:14	26.27	25.95	25.46	27.07	27.29	26.36	25.28	25.05	25.14	24.20	24.83	25.17	24.81
22/06/2023 21:44	26.49	26.17	25.64	27.36	27.61	26.62	25.43	25.17	25.23	24.31	24.95	25.25	24.88
22/06/2023 22:14	26.66	26.35	25.80	27.59	27.85	26.81	25.56	25.29	25.32	24.41	25.03	25.32	24.95
22/06/2023 22:44	26.76	26.45	25.87	27.73	27.99	26.92	25.65	25.36	25.37	24.50	25.09	25.35	24.98
22/06/2023 23:14	26.83	26.53	25.94	27.80	28.06	26.98	25.73	25.42	25.42	24.57	25.15	25.37	25.01
22/06/2023 23:44	26.79	26.51	25.92	27.75	28.00	26.94	25.74	25.41	25.40	24.60	25.14	25.32	24.99

Tabela A.3.2 — Dia 22 de junho, parede oeste: obtenção das diferenças entre os termopares, com o intuito de fazer a calibração.

Parede oeste			
diferenças verticais		diferenças verticais	
valores máximos		valores máximos	
0.89	0.59	1.08	0.82

Data	Δ (1-3)	Δ (2-3)	Δ (5-6)	Δ (4-6)
22/06/2023 00:14	0.52	0.37	0.81	0.41
22/06/2023 00:44	0.50	0.36	0.77	0.39
22/06/2023 01:14	0.49	0.36	0.75	0.39
22/06/2023 01:44	0.48	0.34	0.73	0.36
22/06/2023 02:14	0.44	0.32	0.69	0.34
22/06/2023 02:44	0.40	0.30	0.65	0.32
22/06/2023 03:14	0.37	0.26	0.61	0.30
22/06/2023 03:44	0.33	0.25	0.57	0.27
22/06/2023 04:14	0.30	0.21	0.53	0.24
22/06/2023 04:44	0.27	0.20	0.49	0.23
22/06/2023 05:14	0.24	0.17	0.45	0.20
22/06/2023 05:44	0.20	0.14	0.41	0.17
22/06/2023 06:14	0.16	0.12	0.36	0.14
22/06/2023 06:44	0.12	0.08	0.35	0.13
22/06/2023 07:14	0.09	0.06	0.31	0.10
22/06/2023 07:44	0.06	0.05	0.26	0.06
22/06/2023 08:14	0.03	0.02	0.21	0.02
22/06/2023 08:44	0.00	0.00	0.19	-0.01
22/06/2023 09:14	-0.01	-0.01	0.15	-0.04
22/06/2023 09:44	-0.03	-0.02	0.12	-0.05
22/06/2023 10:14	-0.03	-0.03	0.12	-0.05
22/06/2023 10:44	-0.02	-0.02	0.09	-0.05
22/06/2023 11:14	0.01	-0.02	0.07	-0.04
22/06/2023 11:44	0.03	0.00	0.09	0.01
22/06/2023 12:14	0.06	0.02	0.08	0.04
22/06/2023 12:44	0.08	0.03	0.09	0.07
22/06/2023 13:14	0.11	0.06	0.13	0.13
22/06/2023 13:44	0.15	0.08	0.15	0.19
22/06/2023 14:14	0.19	0.09	0.18	0.23
22/06/2023 14:44	0.23	0.13	0.22	0.30
22/06/2023 15:14	0.29	0.17	0.24	0.33
22/06/2023 15:44	0.32	0.18	0.27	0.37
22/06/2023 16:14	0.38	0.23	0.31	0.41
22/06/2023 16:44	0.42	0.25	0.35	0.46
22/06/2023 17:14	0.48	0.27	0.41	0.49
22/06/2023 17:44	0.51	0.29	0.43	0.50
22/06/2023 18:14	0.56	0.32	0.49	0.52
22/06/2023 18:44	0.60	0.35	0.54	0.53
22/06/2023 19:14	0.64	0.39	0.61	0.56
22/06/2023 19:44	0.69	0.41	0.70	0.60
22/06/2023 20:14	0.73	0.42	0.76	0.63
22/06/2023 20:44	0.77	0.47	0.85	0.68
22/06/2023 21:14	0.81	0.49	0.93	0.71
22/06/2023 21:44	0.85	0.53	0.99	0.74
22/06/2023 22:14	0.86	0.55	1.04	0.78
22/06/2023 22:44	0.89	0.58	1.07	0.81
22/06/2023 23:14	0.89	0.59	1.08	0.82
22/06/2023 23:44	0.87	0.59	1.06	0.81

Tabela A.3.3 — dia 22 de junho, parede oeste: temperaturas dos termopares calibrados em relação aos termopares instalados na aérea de controle (3 e 6).

Data	1 - $\Delta(1-3)$	2 - $\Delta(2-3)$	3	4 - $\Delta(4-6)$	5 - $\Delta(5-6)$	6
22/06/2023 00:14	24.51	24.51	24.51	25.44	25.44	25.44
22/06/2023 00:44	24.46	24.46	24.46	25.36	25.36	25.36
22/06/2023 01:14	24.36	24.36	24.36	25.20	25.20	25.20
22/06/2023 01:44	24.26	24.26	24.26	25.05	25.05	25.05
22/06/2023 02:14	24.14	24.14	24.14	24.87	24.87	24.87
22/06/2023 02:44	24.03	24.03	24.03	24.70	24.70	24.70
22/06/2023 03:14	23.89	23.89	23.89	24.50	24.50	24.50
22/06/2023 03:44	23.75	23.75	23.75	24.31	24.31	24.31
22/06/2023 04:14	23.59	23.59	23.59	24.09	24.09	24.09
22/06/2023 04:44	23.45	23.45	23.45	23.89	23.89	23.89
22/06/2023 05:14	23.27	23.27	23.27	23.68	23.68	23.68
22/06/2023 05:44	23.13	23.13	23.13	23.49	23.49	23.49
22/06/2023 06:14	22.97	22.97	22.97	23.29	23.29	23.29
22/06/2023 06:44	22.84	22.84	22.84	23.10	23.10	23.10
22/06/2023 07:14	22.69	22.69	22.69	22.91	22.91	22.91
22/06/2023 07:44	22.55	22.55	22.55	22.77	22.77	22.77
22/06/2023 08:14	22.43	22.43	22.43	22.63	22.63	22.63
22/06/2023 08:44	22.37	22.37	22.37	22.55	22.55	22.55
22/06/2023 09:14	22.30	22.30	22.30	22.46	22.46	22.46
22/06/2023 09:44	22.25	22.25	22.25	22.40	22.40	22.40
22/06/2023 10:14	22.19	22.19	22.19	22.33	22.33	22.33
22/06/2023 10:44	22.13	22.13	22.13	22.28	22.28	22.28
22/06/2023 11:14	22.10	22.10	22.10	22.25	22.25	22.25
22/06/2023 11:44	22.08	22.08	22.08	22.21	22.21	22.21
22/06/2023 12:14	22.06	22.06	22.06	22.21	22.21	22.21
22/06/2023 12:44	22.11	22.11	22.11	22.24	22.24	22.24
22/06/2023 13:14	22.13	22.13	22.13	22.25	22.25	22.25
22/06/2023 13:44	22.19	22.19	22.19	22.31	22.31	22.31
22/06/2023 14:14	22.28	22.28	22.28	22.38	22.38	22.38
22/06/2023 14:44	22.39	22.39	22.39	22.49	22.49	22.49
22/06/2023 15:14	22.50	22.50	22.50	22.62	22.62	22.62
22/06/2023 15:44	22.68	22.68	22.68	22.78	22.78	22.78
22/06/2023 16:14	22.83	22.83	22.83	22.96	22.96	22.96
22/06/2023 16:44	23.02	23.02	23.02	23.17	23.17	23.17
22/06/2023 17:14	23.23	23.23	23.23	23.42	23.42	23.42
22/06/2023 17:44	23.48	23.48	23.48	23.73	23.73	23.73
22/06/2023 18:14	23.75	23.75	23.75	24.07	24.07	24.07
22/06/2023 18:44	24.03	24.03	24.03	24.45	24.45	24.45
22/06/2023 19:14	24.33	24.33	24.33	24.84	24.84	24.84
22/06/2023 19:44	24.63	24.63	24.63	25.24	25.24	25.24
22/06/2023 20:14	24.94	24.94	24.94	25.65	25.65	25.65
22/06/2023 20:44	25.22	25.22	25.22	26.03	26.03	26.03
22/06/2023 21:14	25.46	25.46	25.46	26.36	26.36	26.36
22/06/2023 21:44	25.64	25.64	25.64	26.62	26.62	26.62
22/06/2023 22:14	25.80	25.80	25.80	26.81	26.81	26.81
22/06/2023 22:44	25.87	25.87	25.87	26.92	26.92	26.92
22/06/2023 23:14	25.94	25.94	25.94	26.98	26.98	26.98
22/06/2023 23:44	25.92	25.92	25.92	26.94	26.94	26.94

Tabela A.3.4 — Dia 22 de junho, parede norte: cálculo das médias entre os termopares de cada área de aplicação de tinta.

Data	média dos termopares 7 e 8	média dos termopares 9,10 e 11	média dos termopares 12 e 13
22/06/2023 00:14	24.25	23.83	23.74
22/06/2023 00:44	24.21	23.79	23.68
22/06/2023 01:14	24.12	23.73	23.59
22/06/2023 01:44	24.03	23.67	23.49
22/06/2023 02:14	23.91	23.57	23.37
22/06/2023 02:44	23.82	23.49	23.28
22/06/2023 03:14	23.67	23.37	23.15
22/06/2023 03:44	23.54	23.27	23.02
22/06/2023 04:14	23.38	23.14	22.87
22/06/2023 04:44	23.25	23.03	22.74
22/06/2023 05:14	23.07	22.88	22.58
22/06/2023 05:44	22.92	22.75	22.44
22/06/2023 06:14	22.76	22.61	22.29
22/06/2023 06:44	22.61	22.49	22.16
22/06/2023 07:14	22.46	22.35	22.01
22/06/2023 07:44	22.32	22.24	21.90
22/06/2023 08:14	22.20	22.14	21.80
22/06/2023 08:44	22.13	22.10	21.79
22/06/2023 09:14	22.04	22.05	21.78
22/06/2023 09:44	22.00	22.04	21.80
22/06/2023 10:14	21.96	22.00	21.82
22/06/2023 10:44	21.92	21.98	21.85
22/06/2023 11:14	21.93	21.98	21.90
22/06/2023 11:44	21.95	22.00	21.96
22/06/2023 12:14	21.99	22.03	22.04
22/06/2023 12:44	22.07	22.10	22.15
22/06/2023 13:14	22.15	22.16	22.27
22/06/2023 13:44	22.26	22.26	22.41
22/06/2023 14:14	22.39	22.36	22.55
22/06/2023 14:44	22.54	22.51	22.73
22/06/2023 15:14	22.71	22.65	22.91
22/06/2023 15:44	22.89	22.83	23.10
22/06/2023 16:14	23.09	23.00	23.29
22/06/2023 16:44	23.28	23.17	23.47
22/06/2023 17:14	23.49	23.35	23.67
22/06/2023 17:44	23.70	23.53	23.86
22/06/2023 18:14	23.93	23.72	24.06
22/06/2023 18:44	24.15	23.91	24.24
22/06/2023 19:14	24.37	24.10	24.42
22/06/2023 19:44	24.59	24.27	24.58
22/06/2023 20:14	24.80	24.44	24.73
22/06/2023 20:44	24.99	24.59	24.88
22/06/2023 21:14	25.17	24.72	24.99
22/06/2023 21:44	25.30	24.83	25.07
22/06/2023 22:14	25.43	24.92	25.14
22/06/2023 22:44	25.51	24.99	25.17
22/06/2023 23:14	25.58	25.05	25.19
22/06/2023 23:44	25.58	25.05	25.16

Tabela A.3.5 — Dia 22 de junho, parede norte: diferenças entre as médias dos termopares de cada área de aplicação de tinta.

Data	Δ (7 e 8) e (9,10 e 11)	Δ (7-8) e (12-13)	Δ (12 e 13) e (9,10 e 11)
22/06/2023 00:14	0.42	0.52	-0.10
22/06/2023 00:44	0.41	0.53	-0.12
22/06/2023 01:14	0.39	0.54	-0.15
22/06/2023 01:44	0.36	0.54	-0.18
22/06/2023 02:14	0.34	0.54	-0.21
22/06/2023 02:44	0.33	0.54	-0.21
22/06/2023 03:14	0.30	0.53	-0.23
22/06/2023 03:44	0.26	0.52	-0.26
22/06/2023 04:14	0.24	0.51	-0.27
22/06/2023 04:44	0.22	0.51	-0.30
22/06/2023 05:14	0.19	0.49	-0.30
22/06/2023 05:44	0.17	0.48	-0.31
22/06/2023 06:14	0.15	0.47	-0.33
22/06/2023 06:44	0.12	0.45	-0.34
22/06/2023 07:14	0.11	0.45	-0.34
22/06/2023 07:44	0.08	0.42	-0.34
22/06/2023 08:14	0.05	0.40	-0.34
22/06/2023 08:44	0.02	0.34	-0.31
22/06/2023 09:14	-0.01	0.27	-0.28
22/06/2023 09:44	-0.04	0.20	-0.24
22/06/2023 10:14	-0.05	0.14	-0.19
22/06/2023 10:44	-0.06	0.07	-0.13
22/06/2023 11:14	-0.05	0.04	-0.09
22/06/2023 11:44	-0.05	-0.01	-0.04
22/06/2023 12:14	-0.04	-0.05	0.01
22/06/2023 12:44	-0.04	-0.09	0.05
22/06/2023 13:14	-0.02	-0.12	0.11
22/06/2023 13:44	0.00	-0.15	0.14
22/06/2023 14:14	0.03	-0.16	0.19
22/06/2023 14:44	0.03	-0.19	0.22
22/06/2023 15:14	0.05	-0.20	0.25
22/06/2023 15:44	0.06	-0.21	0.27
22/06/2023 16:14	0.09	-0.20	0.29
22/06/2023 16:44	0.11	-0.19	0.30
22/06/2023 17:14	0.14	-0.18	0.32
22/06/2023 17:44	0.17	-0.16	0.32
22/06/2023 18:14	0.21	-0.13	0.33
22/06/2023 18:44	0.24	-0.09	0.32
22/06/2023 19:14	0.27	-0.04	0.31
22/06/2023 19:44	0.32	0.01	0.31
22/06/2023 20:14	0.36	0.07	0.29
22/06/2023 20:44	0.40	0.12	0.29
22/06/2023 21:14	0.44	0.17	0.27
22/06/2023 21:44	0.47	0.24	0.23
22/06/2023 22:14	0.50	0.29	0.21
22/06/2023 22:44	0.52	0.34	0.18
22/06/2023 23:14	0.53	0.39	0.14
22/06/2023 23:44	0.53	0.42	0.11

Tabela A.3.6 — Dia 22 de junho, parede norte: temperaturas dos termopares calibrados em relação aos termopares instalados na aérea de controle (9, 10 e 11).

Data	média dos termopares 7 e 8	média dos termopares 9,10 e 11	média dos termopares 12 e 13
22/06/2023 00:14	23.83	23.83	23.83
22/06/2023 00:44	23.79	23.79	23.79
22/06/2023 01:14	23.73	23.73	23.73
22/06/2023 01:44	23.67	23.67	23.67
22/06/2023 02:14	23.57	23.57	23.57
22/06/2023 02:44	23.49	23.49	23.49
22/06/2023 03:14	23.37	23.37	23.37
22/06/2023 03:44	23.27	23.27	23.27
22/06/2023 04:14	23.14	23.14	23.14
22/06/2023 04:44	23.03	23.03	23.03
22/06/2023 05:14	22.88	22.88	22.88
22/06/2023 05:44	22.75	22.75	22.75
22/06/2023 06:14	22.61	22.61	22.61
22/06/2023 06:44	22.49	22.49	22.49
22/06/2023 07:14	22.35	22.35	22.35
22/06/2023 07:44	22.24	22.24	22.24
22/06/2023 08:14	22.14	22.14	22.14
22/06/2023 08:44	22.10	22.10	22.10
22/06/2023 09:14	22.05	22.05	22.05
22/06/2023 09:44	22.04	22.04	22.04
22/06/2023 10:14	22.00	22.00	22.00
22/06/2023 10:44	21.98	21.98	21.98
22/06/2023 11:14	21.98	21.98	21.98
22/06/2023 11:44	22.00	22.00	22.00
22/06/2023 12:14	22.03	22.03	22.03
22/06/2023 12:44	22.10	22.10	22.10
22/06/2023 13:14	22.16	22.16	22.16
22/06/2023 13:44	22.26	22.26	22.26
22/06/2023 14:14	22.36	22.36	22.36
22/06/2023 14:44	22.51	22.51	22.51
22/06/2023 15:14	22.65	22.65	22.65
22/06/2023 15:44	22.83	22.83	22.83
22/06/2023 16:14	23.00	23.00	23.00
22/06/2023 16:44	23.17	23.17	23.17
22/06/2023 17:14	23.35	23.35	23.35
22/06/2023 17:44	23.53	23.53	23.53
22/06/2023 18:14	23.72	23.72	23.72
22/06/2023 18:44	23.91	23.91	23.91
22/06/2023 19:14	24.10	24.10	24.10
22/06/2023 19:44	24.27	24.27	24.27
22/06/2023 20:14	24.44	24.44	24.44
22/06/2023 20:44	24.59	24.59	24.59
22/06/2023 21:14	24.72	24.72	24.72
22/06/2023 21:44	24.83	24.83	24.83
22/06/2023 22:14	24.92	24.92	24.92
22/06/2023 22:44	24.99	24.99	24.99
22/06/2023 23:14	25.05	25.05	25.05
22/06/2023 23:44	25.05	25.05	25.05

Tabela A.4.2 — Dia 16 de julho, parede oeste: calibração dos termopares com os dados do dia de referência.

Parede poente			
diferenças verticais		diferenças verticais	
valores máximos		valores máximos	
0.89	0.59	1.08	0.82

Data	Δ (1-3)	Δ (2-3)	Δ (5-6)	Δ (4-6)
16/07/2023 00:06	0.52	0.37	0.81	0.41
16/07/2023 00:36	0.5	0.36	0.77	0.39
16/07/2023 01:06	0.49	0.36	0.75	0.39
16/07/2023 01:36	0.48	0.34	0.73	0.36
16/07/2023 02:06	0.44	0.32	0.69	0.34
16/07/2023 02:36	0.4	0.3	0.65	0.32
16/07/2023 03:06	0.37	0.26	0.61	0.3
16/07/2023 03:36	0.33	0.25	0.57	0.27
16/07/2023 04:06	0.3	0.21	0.53	0.24
16/07/2023 04:36	0.27	0.2	0.49	0.23
16/07/2023 05:06	0.24	0.17	0.45	0.2
16/07/2023 05:36	0.2	0.14	0.41	0.17
16/07/2023 06:06	0.16	0.12	0.36	0.14
16/07/2023 06:36	0.12	0.08	0.35	0.13
16/07/2023 07:06	0.09	0.06	0.31	0.1
16/07/2023 07:36	0.06	0.05	0.26	0.06
16/07/2023 08:06	0.03	0.02	0.21	0.02
16/07/2023 08:36	0	0	0.19	-0.01
16/07/2023 09:06	-0.01	-0.01	0.15	-0.04
16/07/2023 09:36	-0.03	-0.02	0.12	-0.05
16/07/2023 10:06	-0.03	-0.03	0.12	-0.05
16/07/2023 10:36	-0.02	-0.02	0.09	-0.05
16/07/2023 11:06	0.01	-0.02	0.07	-0.04
16/07/2023 11:36	0.03	0	0.09	0.01
16/07/2023 12:06	0.06	0.02	0.08	0.04
16/07/2023 12:36	0.08	0.03	0.09	0.07
16/07/2023 13:06	0.11	0.06	0.13	0.13
16/07/2023 13:36	0.15	0.08	0.15	0.19
16/07/2023 14:06	0.19	0.09	0.18	0.23
16/07/2023 14:36	0.23	0.13	0.22	0.3
16/07/2023 15:06	0.29	0.17	0.24	0.33
16/07/2023 15:36	0.32	0.18	0.27	0.37
16/07/2023 16:06	0.38	0.23	0.31	0.41
16/07/2023 16:36	0.42	0.25	0.35	0.46
16/07/2023 17:06	0.48	0.27	0.41	0.49
16/07/2023 17:36	0.51	0.29	0.43	0.5
16/07/2023 18:06	0.56	0.32	0.49	0.52
16/07/2023 18:36	0.6	0.35	0.54	0.53
16/07/2023 19:06	0.64	0.39	0.61	0.56
16/07/2023 19:36	0.69	0.41	0.7	0.6
16/07/2023 20:06	0.73	0.42	0.76	0.63
16/07/2023 20:36	0.77	0.47	0.85	0.68
16/07/2023 21:06	0.81	0.49	0.93	0.71
16/07/2023 21:36	0.85	0.53	0.99	0.74
16/07/2023 22:06	0.86	0.55	1.04	0.78
16/07/2023 22:36	0.89	0.58	1.07	0.81
16/07/2023 23:06	0.89	0.59	1.08	0.82
16/07/2023 23:36	0.87	0.59	1.06	0.81

Tabela A.4.3 — Dia 16 de julho, parede oeste: temperaturas superficiais após a calibração.

	1-BrT2	2-BrT1	3-BrC	4-BrT2	5-BrT1	6-BrC
Data	1- Δ (1-3)	2- Δ (2-3)	3	4- Δ (4-6)	5- Δ (5-6)	6
16/07/2023 00:06	27.8	27.79	28	29.03	28.9	28.83
16/07/2023 00:36	27.69	27.68	27.89	28.86	28.74	28.65
16/07/2023 01:06	27.55	27.53	27.73	28.65	28.52	28.46
16/07/2023 01:36	27.36	27.36	27.56	28.41	28.26	28.23
16/07/2023 02:06	27.21	27.18	27.38	28.15	28.02	28
16/07/2023 02:36	27	26.97	27.17	27.86	27.73	27.72
16/07/2023 03:06	26.78	26.78	26.94	27.56	27.42	27.43
16/07/2023 03:36	26.57	26.55	26.71	27.27	27.15	27.16
16/07/2023 04:06	26.37	26.36	26.49	26.99	26.87	26.9
16/07/2023 04:36	26.13	26.11	26.26	26.68	26.57	26.6
16/07/2023 05:06	25.89	25.88	26.02	26.39	26.28	26.32
16/07/2023 05:36	25.66	25.67	25.79	26.1	26	26.05
16/07/2023 06:06	25.47	25.46	25.6	25.85	25.76	25.81
16/07/2023 06:36	25.27	25.26	25.37	25.56	25.47	25.54
16/07/2023 07:06	25.04	25.04	25.17	25.3	25.23	25.3
16/07/2023 07:36	24.84	24.82	24.95	25.07	24.99	25.06
16/07/2023 08:06	24.66	24.67	24.79	24.85	24.8	24.86
16/07/2023 08:36	24.48	24.5	24.62	24.65	24.61	24.69
16/07/2023 09:06	24.28	24.3	24.42	24.45	24.43	24.52
16/07/2023 09:36	24.16	24.17	24.28	24.26	24.29	24.37
16/07/2023 10:06	24.01	24.03	24.15	24.1	24.14	24.24
16/07/2023 10:36	23.88	23.9	24.01	23.96	24.01	24.12
16/07/2023 11:06	23.77	23.83	23.93	23.86	23.95	24.03
16/07/2023 11:36	23.68	23.71	23.83	23.72	23.84	23.96
16/07/2023 12:06	23.62	23.67	23.81	23.66	23.8	23.91
16/07/2023 12:36	23.56	23.61	23.74	23.6	23.75	23.86
16/07/2023 13:06	23.53	23.58	23.73	23.53	23.7	23.85
16/07/2023 13:36	23.51	23.58	23.73	23.5	23.7	23.86
16/07/2023 14:06	23.5	23.59	23.74	23.49	23.69	23.87
16/07/2023 14:36	23.52	23.62	23.8	23.5	23.73	23.93
16/07/2023 15:06	23.53	23.64	23.84	23.54	23.78	23.98
16/07/2023 15:36	23.6	23.74	23.94	23.63	23.87	24.08
16/07/2023 16:06	23.67	23.79	24.04	23.73	23.96	24.2
16/07/2023 16:36	23.77	23.93	24.17	23.86	24.11	24.34
16/07/2023 17:06	23.86	24.05	24.31	24	24.24	24.52
16/07/2023 17:36	24	24.19	24.48	24.2	24.47	24.73
16/07/2023 18:06	24.18	24.4	24.7	24.45	24.73	25.02
16/07/2023 18:36	24.39	24.61	24.96	24.77	25.03	25.33
16/07/2023 19:06	24.64	24.84	25.23	25.1	25.37	25.69
16/07/2023 19:36	24.87	25.09	25.54	25.46	25.71	26.05
16/07/2023 20:06	25.16	25.4	25.84	25.85	26.11	26.44
16/07/2023 20:36	25.41	25.63	26.12	26.2	26.45	26.81
16/07/2023 21:06	25.64	25.87	26.37	26.54	26.76	27.12
16/07/2023 21:36	25.82	26.04	26.58	26.84	27.04	27.4
16/07/2023 22:06	25.99	26.18	26.73	27.06	27.26	27.59
16/07/2023 22:36	26.06	26.27	26.83	27.2	27.37	27.71
16/07/2023 23:06	26.09	26.3	26.87	27.25	27.41	27.75
16/07/2023 23:36	26.09	26.27	26.84	27.24	27.38	27.69

Tabela A.4.4 — Dia 16 de julho, parede oeste: diferenças entre áreas de aplicação de tinta.

Data	Δ BrT2 - BrC	Δ BrT1 - BrC	Δ BrT1 - BrC	Δ BrT2 - BrC
Data	Δ (1-3)	Δ (2-3)	Δ (5-6)	Δ (4-6)
16/07/2023 00:06	-0.2	-0.21	0.07	0.2
16/07/2023 00:36	-0.2	-0.21	0.09	0.21
16/07/2023 01:06	-0.18	-0.2	0.06	0.19
16/07/2023 01:36	-0.2	-0.2	0.03	0.18
16/07/2023 02:06	-0.17	-0.2	0.02	0.15
16/07/2023 02:36	-0.17	-0.2	0.01	0.14
16/07/2023 03:06	-0.16	-0.16	-0.01	0.13
16/07/2023 03:36	-0.14	-0.16	-0.01	0.11
16/07/2023 04:06	-0.12	-0.13	-0.03	0.09
16/07/2023 04:36	-0.13	-0.15	-0.03	0.08
16/07/2023 05:06	-0.13	-0.14	-0.04	0.07
16/07/2023 05:36	-0.13	-0.12	-0.05	0.05
16/07/2023 06:06	-0.13	-0.14	-0.05	0.04
16/07/2023 06:36	-0.1	-0.11	-0.07	0.02
16/07/2023 07:06	-0.13	-0.13	-0.07	0
16/07/2023 07:36	-0.11	-0.13	-0.07	0.01
16/07/2023 08:06	-0.13	-0.12	-0.06	-0.01
16/07/2023 08:36	-0.14	-0.12	-0.08	-0.04
16/07/2023 09:06	-0.14	-0.12	-0.09	-0.07
16/07/2023 09:36	-0.12	-0.11	-0.08	-0.11
16/07/2023 10:06	-0.14	-0.12	-0.1	-0.14
16/07/2023 10:36	-0.13	-0.11	-0.11	-0.16
16/07/2023 11:06	-0.16	-0.1	-0.08	-0.17
16/07/2023 11:36	-0.15	-0.12	-0.12	-0.24
16/07/2023 12:06	-0.19	-0.14	-0.11	-0.25
16/07/2023 12:36	-0.18	-0.13	-0.11	-0.26
16/07/2023 13:06	-0.2	-0.15	-0.15	-0.32
16/07/2023 13:36	-0.22	-0.15	-0.16	-0.36
16/07/2023 14:06	-0.24	-0.15	-0.18	-0.38
16/07/2023 14:36	-0.28	-0.18	-0.2	-0.43
16/07/2023 15:06	-0.31	-0.2	-0.2	-0.44
16/07/2023 15:36	-0.34	-0.2	-0.21	-0.45
16/07/2023 16:06	-0.37	-0.25	-0.24	-0.47
16/07/2023 16:36	-0.4	-0.24	-0.23	-0.48
16/07/2023 17:06	-0.45	-0.26	-0.28	-0.52
16/07/2023 17:36	-0.48	-0.29	-0.26	-0.53
16/07/2023 18:06	-0.52	-0.3	-0.29	-0.57
16/07/2023 18:36	-0.57	-0.35	-0.3	-0.56
16/07/2023 19:06	-0.59	-0.39	-0.32	-0.59
16/07/2023 19:36	-0.67	-0.45	-0.34	-0.59
16/07/2023 20:06	-0.68	-0.44	-0.33	-0.59
16/07/2023 20:36	-0.71	-0.49	-0.36	-0.61
16/07/2023 21:06	-0.73	-0.5	-0.36	-0.58
16/07/2023 21:36	-0.76	-0.54	-0.36	-0.56
16/07/2023 22:06	-0.74	-0.55	-0.33	-0.53
16/07/2023 22:36	-0.77	-0.56	-0.34	-0.51
16/07/2023 23:06	-0.78	-0.57	-0.34	-0.5
16/07/2023 23:36	-0.75	-0.57	-0.31	-0.45

Tabela A.4.5 — Dia 16 de julho, parede norte: cálculo das médias dos termopares de cada área de aplicação de tinta.

Data	Painél BrT1	Painél BrC	Painél BrT2
	TMédia 7 e 8	TMédia 9,10 e 11	TMédia 12 e 13
16/07/2023 00:06	27.27	26.71	26.57
16/07/2023 00:36	27.17	26.63	26.45
16/07/2023 01:06	27.06	26.55	26.34
16/07/2023 01:36	26.91	26.43	26.18
16/07/2023 02:06	26.76	26.32	26.04
16/07/2023 02:36	26.58	26.16	25.86
16/07/2023 03:06	26.38	26.00	25.66
16/07/2023 03:36	26.17	25.84	25.47
16/07/2023 04:06	25.98	25.68	25.30
16/07/2023 04:36	25.76	25.49	25.09
16/07/2023 05:06	25.55	25.31	24.89
16/07/2023 05:36	25.33	25.12	24.68
16/07/2023 06:06	25.14	24.96	24.51
16/07/2023 06:36	24.93	24.77	24.31
16/07/2023 07:06	24.72	24.60	24.13
16/07/2023 07:36	24.52	24.43	23.95
16/07/2023 08:06	24.35	24.28	23.80
16/07/2023 08:36	24.18	24.14	23.68
16/07/2023 09:06	24.01	24.00	23.59
16/07/2023 09:36	23.89	23.92	23.55
16/07/2023 10:06	23.78	23.83	23.50
16/07/2023 10:36	23.67	23.74	23.46
16/07/2023 11:06	23.62	23.71	23.46
16/07/2023 11:36	23.57	23.65	23.46
16/07/2023 12:06	23.57	23.65	23.51
16/07/2023 12:36	23.55	23.63	23.53
16/07/2023 13:06	23.57	23.64	23.59
16/07/2023 13:36	23.61	23.67	23.65
16/07/2023 14:06	23.66	23.70	23.73
16/07/2023 14:36	23.75	23.77	23.84
16/07/2023 15:06	23.82	23.83	23.94
16/07/2023 15:36	23.95	23.92	24.07
16/07/2023 16:06	24.05	24.02	24.19
16/07/2023 16:36	24.19	24.14	24.32
16/07/2023 17:06	24.31	24.23	24.43
16/07/2023 17:36	24.46	24.34	24.54
16/07/2023 18:06	24.63	24.47	24.68
16/07/2023 18:36	24.78	24.59	24.80
16/07/2023 19:06	24.97	24.72	24.92
16/07/2023 19:36	25.14	24.85	25.03
16/07/2023 20:06	25.32	24.98	25.14
16/07/2023 20:36	25.48	25.09	25.23
16/07/2023 21:06	25.64	25.18	25.31
16/07/2023 21:36	25.76	25.25	25.36
16/07/2023 22:06	25.87	25.32	25.41
16/07/2023 22:36	25.94	25.37	25.42
16/07/2023 23:06	25.96	25.39	25.39
16/07/2023 23:36	25.96	25.38	25.34

Tabela A.4.6 — Dia 16 de julho, parede norte: calibração dos termopares com os dados do dia de referência

Data	Δ (BrT1) - (BrC)	Δ (BrT1) - (BrT2)	Δ (BrT2) - (BrC)
	Δ (7-8) - (9,10 e 11)	Δ (7-8) - (12-13)	Δ (12-13) - (9, 10 e 11)
16/07/2023 00:06	0.42	0.52	-0.10
16/07/2023 00:36	0.41	0.53	-0.12
16/07/2023 01:06	0.39	0.54	-0.15
16/07/2023 01:36	0.36	0.54	-0.18
16/07/2023 02:06	0.34	0.54	-0.21
16/07/2023 02:36	0.33	0.54	-0.21
16/07/2023 03:06	0.30	0.53	-0.23
16/07/2023 03:36	0.26	0.52	-0.26
16/07/2023 04:06	0.24	0.51	-0.27
16/07/2023 04:36	0.22	0.51	-0.30
16/07/2023 05:06	0.19	0.49	-0.30
16/07/2023 05:36	0.17	0.48	-0.31
16/07/2023 06:06	0.15	0.47	-0.33
16/07/2023 06:36	0.12	0.45	-0.34
16/07/2023 07:06	0.11	0.45	-0.34
16/07/2023 07:36	0.08	0.42	-0.34
16/07/2023 08:06	0.05	0.40	-0.34
16/07/2023 08:36	0.02	0.34	-0.31
16/07/2023 09:06	-0.01	0.27	-0.28
16/07/2023 09:36	-0.04	0.20	-0.24
16/07/2023 10:06	-0.05	0.14	-0.19
16/07/2023 10:36	-0.06	0.07	-0.13
16/07/2023 11:06	-0.05	0.04	-0.09
16/07/2023 11:36	-0.05	-0.01	-0.04
16/07/2023 12:06	-0.04	-0.05	0.01
16/07/2023 12:36	-0.04	-0.09	0.05
16/07/2023 13:06	-0.02	-0.12	0.11
16/07/2023 13:36	0.00	-0.15	0.14
16/07/2023 14:06	0.03	-0.16	0.19
16/07/2023 14:36	0.03	-0.19	0.22
16/07/2023 15:06	0.05	-0.20	0.25
16/07/2023 15:36	0.06	-0.21	0.27
16/07/2023 16:06	0.09	-0.20	0.29
16/07/2023 16:36	0.11	-0.19	0.30
16/07/2023 17:06	0.14	-0.18	0.32
16/07/2023 17:36	0.17	-0.16	0.32
16/07/2023 18:06	0.21	-0.13	0.33
16/07/2023 18:36	0.24	-0.09	0.32
16/07/2023 19:06	0.27	-0.04	0.31
16/07/2023 19:36	0.32	0.01	0.31
16/07/2023 20:06	0.36	0.07	0.29
16/07/2023 20:36	0.40	0.12	0.29
16/07/2023 21:06	0.44	0.17	0.27
16/07/2023 21:36	0.47	0.24	0.23
16/07/2023 22:06	0.50	0.29	0.21
16/07/2023 22:36	0.52	0.34	0.18
16/07/2023 23:06	0.53	0.39	0.14
16/07/2023 23:36	0.53	0.42	0.11

Tabela A.4.7 — Dia 16 de julho, parede norte: temperaturas superficiais após a calibração

Data	(7 e 8) BrT1	(9, 10 e 11) BrC	(12 e 13) BrT2
	BrT1 - Δ (BrT1 - BrC)	BrC	BrT2 - Δ (BrT2 - BrC)
16/07/2023 00:06	26.85	26.71	26.66
16/07/2023 00:36	26.76	26.63	26.57
16/07/2023 01:06	26.67	26.55	26.48
16/07/2023 01:36	26.54	26.43	26.36
16/07/2023 02:06	26.42	26.32	26.25
16/07/2023 02:36	26.25	26.16	26.07
16/07/2023 03:06	26.08	26.00	25.89
16/07/2023 03:36	25.90	25.84	25.73
16/07/2023 04:06	25.74	25.68	25.57
16/07/2023 04:36	25.55	25.49	25.39
16/07/2023 05:06	25.36	25.31	25.19
16/07/2023 05:36	25.16	25.12	24.99
16/07/2023 06:06	25.00	24.96	24.83
16/07/2023 06:36	24.81	24.77	24.64
16/07/2023 07:06	24.62	24.60	24.47
16/07/2023 07:36	24.44	24.43	24.29
16/07/2023 08:06	24.30	24.28	24.15
16/07/2023 08:36	24.16	24.14	23.99
16/07/2023 09:06	24.02	24.00	23.87
16/07/2023 09:36	23.93	23.92	23.79
16/07/2023 10:06	23.82	23.83	23.69
16/07/2023 10:36	23.73	23.74	23.59
16/07/2023 11:06	23.67	23.71	23.55
16/07/2023 11:36	23.62	23.65	23.50
16/07/2023 12:06	23.61	23.65	23.50
16/07/2023 12:36	23.59	23.63	23.48
16/07/2023 13:06	23.58	23.64	23.49
16/07/2023 13:36	23.61	23.67	23.51
16/07/2023 14:06	23.63	23.70	23.54
16/07/2023 14:36	23.72	23.77	23.62
16/07/2023 15:06	23.77	23.83	23.68
16/07/2023 15:36	23.88	23.92	23.79
16/07/2023 16:06	23.96	24.02	23.90
16/07/2023 16:36	24.08	24.14	24.01
16/07/2023 17:06	24.17	24.23	24.11
16/07/2023 17:36	24.29	24.34	24.22
16/07/2023 18:06	24.42	24.47	24.34
16/07/2023 18:36	24.54	24.59	24.47
16/07/2023 19:06	24.70	24.72	24.61
16/07/2023 19:36	24.83	24.85	24.72
16/07/2023 20:06	24.97	24.98	24.85
16/07/2023 20:36	25.08	25.09	24.94
16/07/2023 21:06	25.20	25.18	25.04
16/07/2023 21:36	25.29	25.25	25.13
16/07/2023 22:06	25.36	25.32	25.19
16/07/2023 22:36	25.42	25.37	25.24
16/07/2023 23:06	25.43	25.39	25.25
16/07/2023 23:36	25.43	25.38	25.23

Tabela A.4.8 — Dia 16 de julho, parede norte: diferenças entre as áreas de aplicação de tinta.

Data	Δ BrT1 - BrC	Δ BrT2 - BrC	Δ BrT1 - BrT2
16/07/2023 00:06	0.14	-0.05	0.18
16/07/2023 00:36	0.12	-0.07	0.19
16/07/2023 01:06	0.11	-0.07	0.18
16/07/2023 01:36	0.11	-0.07	0.19
16/07/2023 02:06	0.09	-0.08	0.17
16/07/2023 02:36	0.08	-0.09	0.18
16/07/2023 03:06	0.07	-0.11	0.19
16/07/2023 03:36	0.07	-0.11	0.18
16/07/2023 04:06	0.06	-0.11	0.17
16/07/2023 04:36	0.05	-0.11	0.16
16/07/2023 05:06	0.04	-0.13	0.17
16/07/2023 05:36	0.04	-0.13	0.17
16/07/2023 06:06	0.04	-0.13	0.16
16/07/2023 06:36	0.04	-0.13	0.17
16/07/2023 07:06	0.02	-0.13	0.15
16/07/2023 07:36	0.02	-0.14	0.15
16/07/2023 08:06	0.02	-0.13	0.15
16/07/2023 08:36	0.02	-0.14	0.16
16/07/2023 09:06	0.02	-0.13	0.15
16/07/2023 09:36	0.01	-0.14	0.14
16/07/2023 10:06	0.00	-0.14	0.13
16/07/2023 10:36	-0.01	-0.15	0.13
16/07/2023 11:06	-0.04	-0.16	0.12
16/07/2023 11:36	-0.04	-0.15	0.11
16/07/2023 12:06	-0.04	-0.15	0.10
16/07/2023 12:36	-0.04	-0.15	0.11
16/07/2023 13:06	-0.06	-0.15	0.09
16/07/2023 13:36	-0.06	-0.16	0.10
16/07/2023 14:06	-0.07	-0.16	0.09
16/07/2023 14:36	-0.05	-0.15	0.10
16/07/2023 15:06	-0.06	-0.15	0.09
16/07/2023 15:36	-0.04	-0.13	0.09
16/07/2023 16:06	-0.06	-0.12	0.06
16/07/2023 16:36	-0.06	-0.13	0.07
16/07/2023 17:06	-0.06	-0.13	0.06
16/07/2023 17:36	-0.05	-0.12	0.08
16/07/2023 18:06	-0.05	-0.12	0.07
16/07/2023 18:36	-0.05	-0.12	0.07
16/07/2023 19:06	-0.02	-0.11	0.09
16/07/2023 19:36	-0.02	-0.13	0.11
16/07/2023 20:06	-0.01	-0.13	0.12
16/07/2023 20:36	-0.01	-0.15	0.14
16/07/2023 21:06	0.02	-0.14	0.16
16/07/2023 21:36	0.04	-0.13	0.16
16/07/2023 22:06	0.04	-0.13	0.17
16/07/2023 22:36	0.04	-0.13	0.17
16/07/2023 23:06	0.04	-0.14	0.18
16/07/2023 23:36	0.05	-0.15	0.20

A.5 Dias adicionais da análise do desempenho térmico das tintas no interior

Dia 3 de julho, com céu limpo e temperatura baixa.

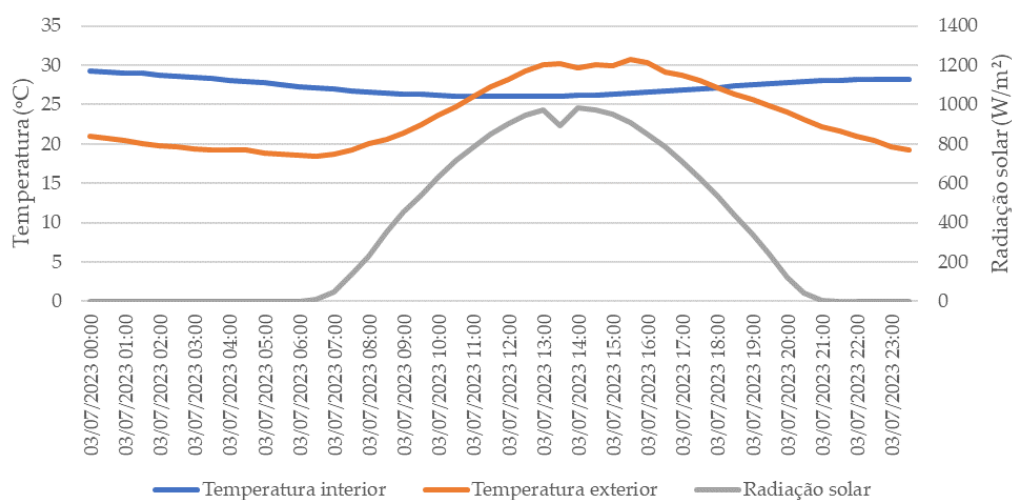


Figura A.5.1 — Dia 3 de julho: condições climáticas.

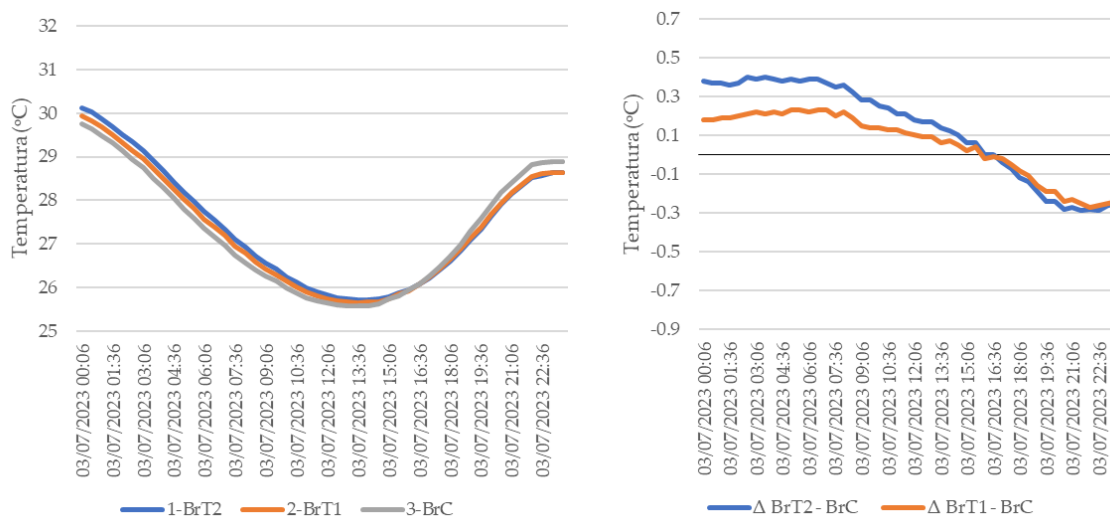


Figura A.5.2 — Dia 3 de julho: parede interior oeste (área revestida por ladrilho branco exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).

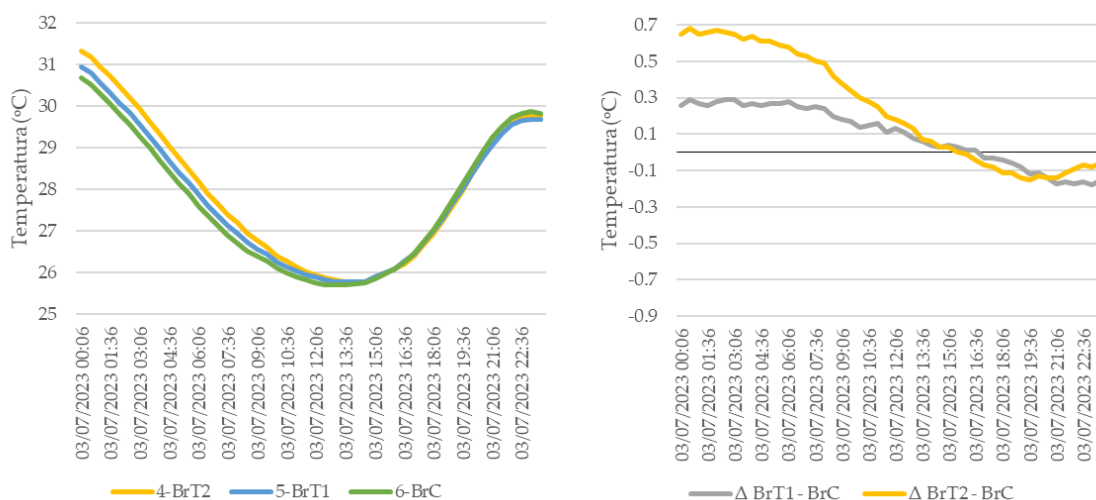


Figura A.5.3 — Dia 13 de julho: parede interior oeste (área revestida por ladrilho preto no exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).

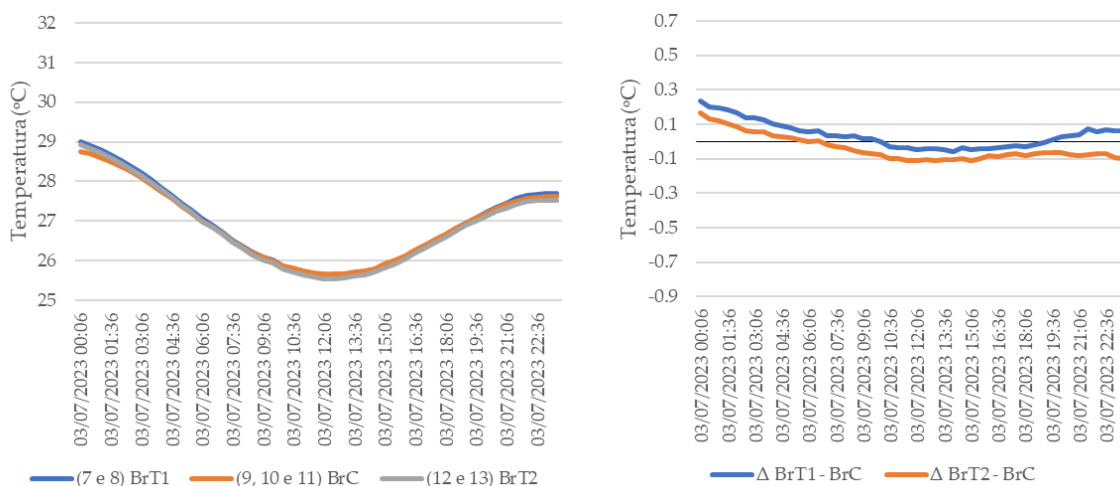


Figura A.5.4 — Dia 13 de julho: parede interior norte: temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).

Dia 6 de agosto, com céu limpo e temperatura alta

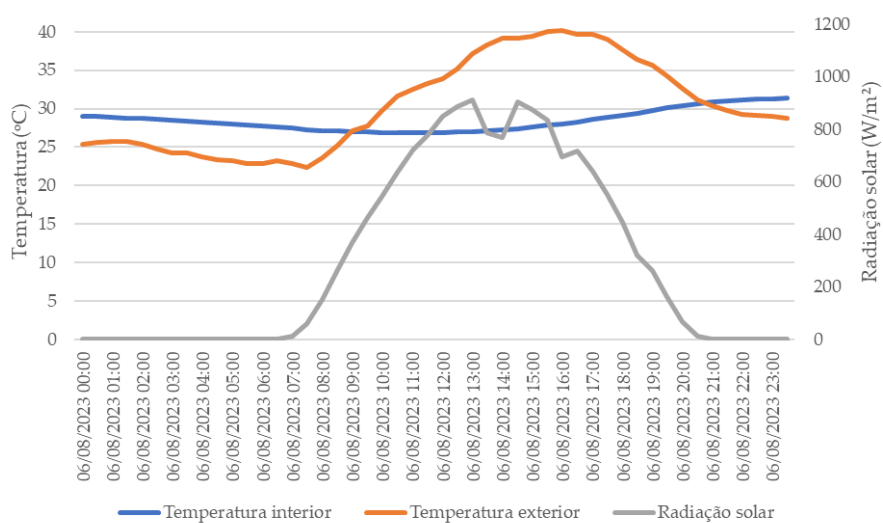


Figura A.5.5 — Dia 6 de agosto: condições climáticas.

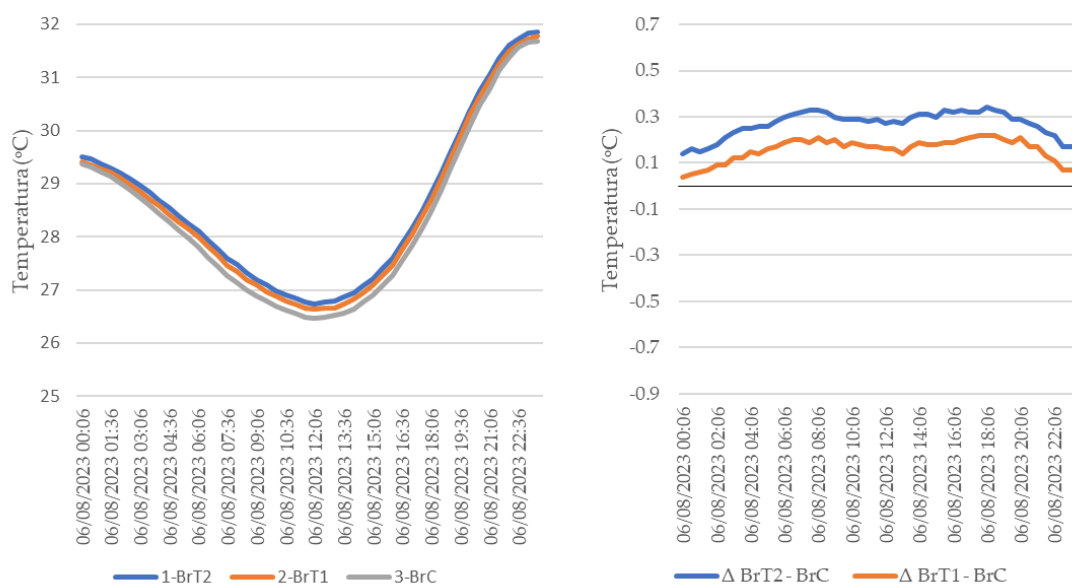


Figura A.5.6 — Dia 6 de agosto: parede interior oeste (área revestida por ladrilho branco exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).

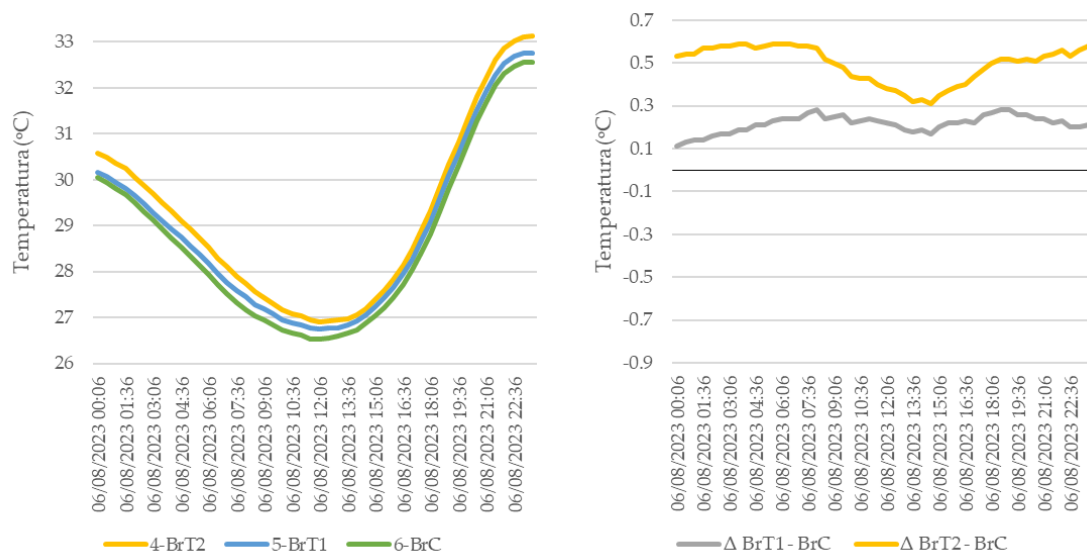


Figura A.5.7 — Dia 6 de agosto: parede interior oeste (área revestida por ladrilho preto no exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).

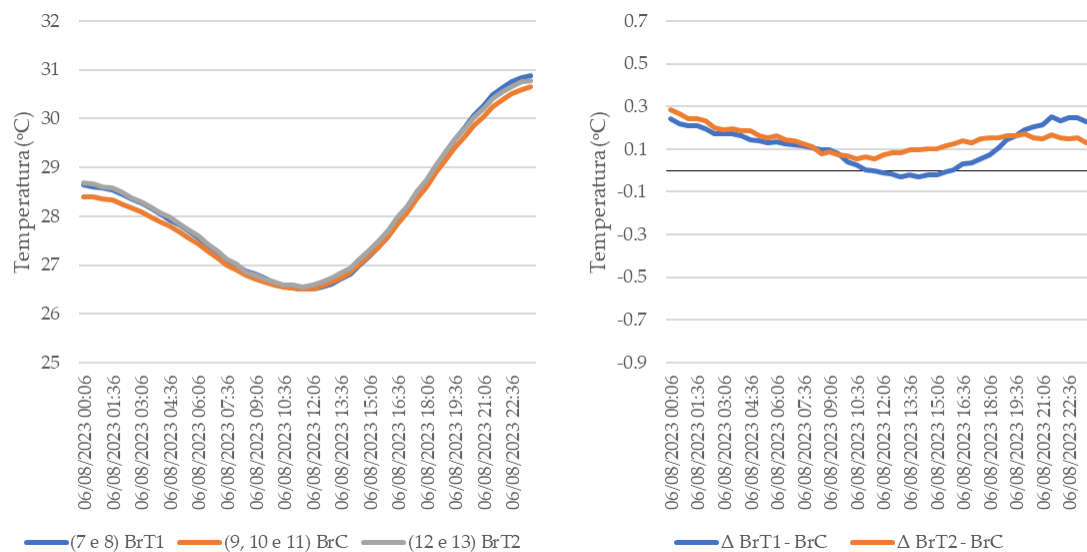


Figura A.5.8 — Dia 6 de agosto: parede interior norte: temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).

Dia 27 de julho, com céu nublado

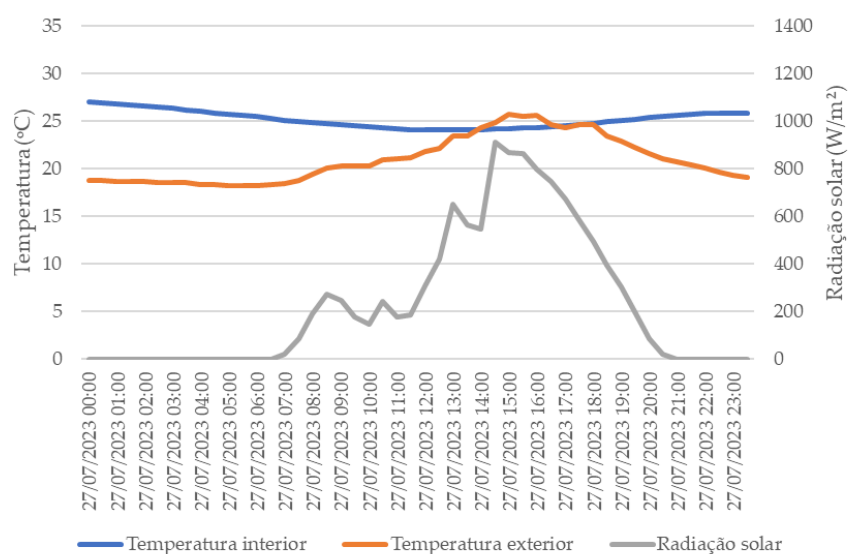


Figura A.5.9 — Dia 27 de julho: condições climáticas.

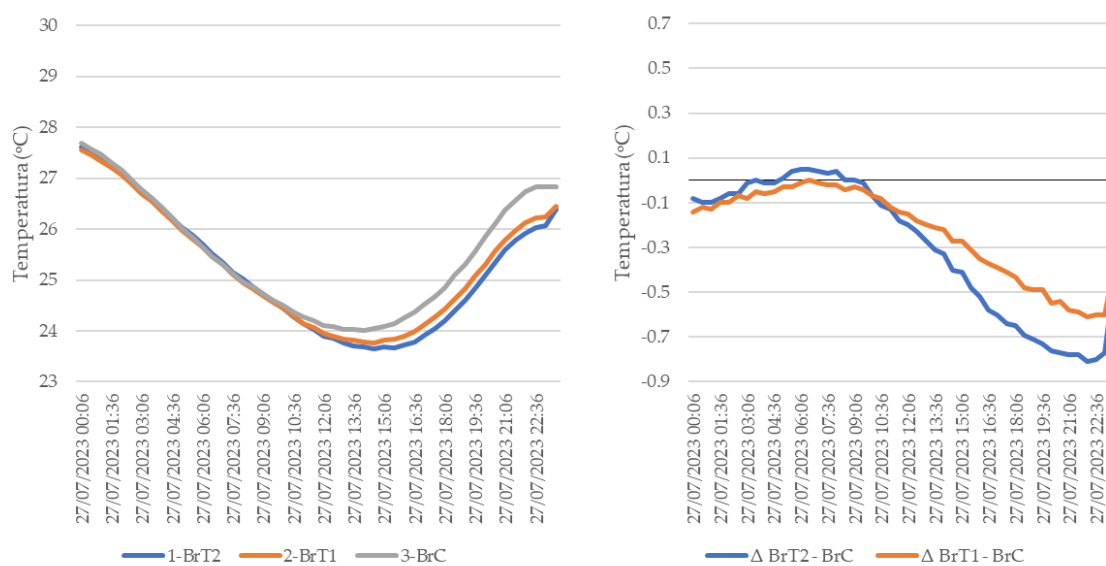


Figura A.5.10 — Dia 27 de julho: parede interior oeste (área revestida por ladrilho branco no exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).

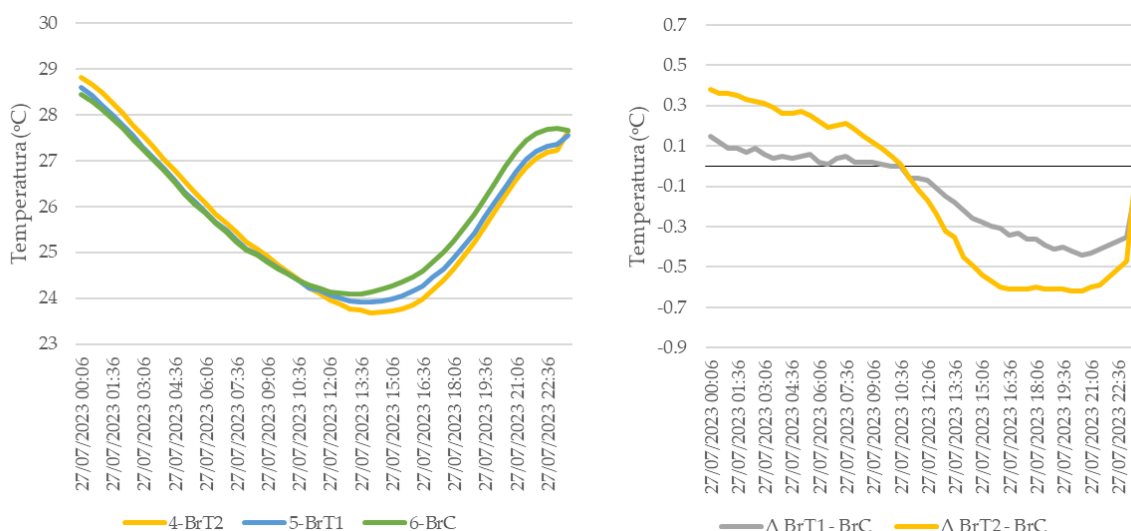


Figura A.5.11 — Dia 27 de julho: parede interior oeste (área revestida por ladrilho preto no exterior): temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).

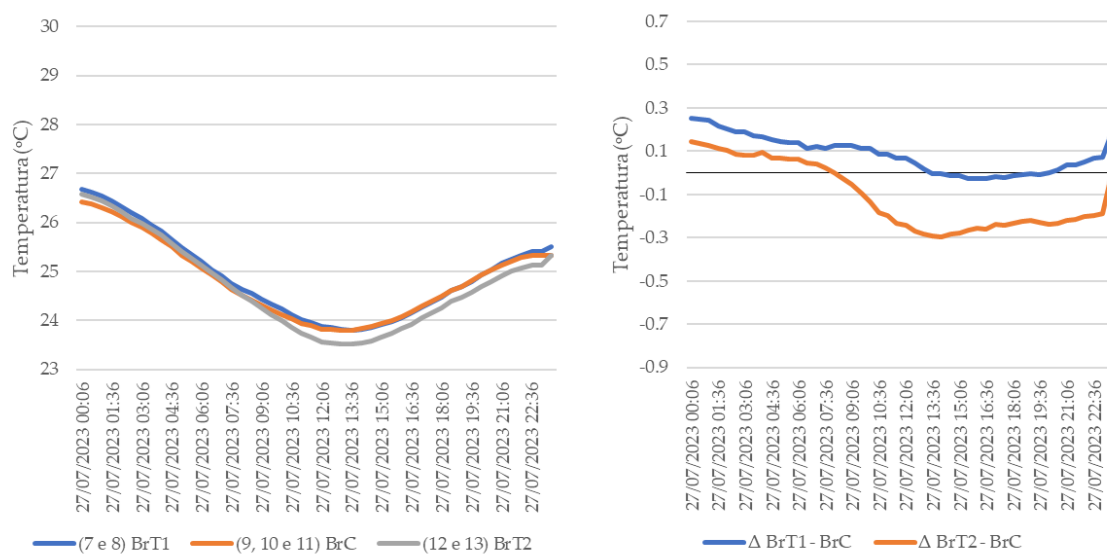


Figura A.5.12 — Dia 27 de julho: parede interior norte: temperatura superficial interior (esquerda), diferença de temperatura entre as tintas térmicas face a tinta convencional (direita).



(2023) MUHAMAD CHIRAZE ASSANE AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TINTAS TÉRMICAS EM PERÍODO DE ARREFECIMENTO EM EDIFÍCIOS