



Rodrigo Eusébio Caires Botelho
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TINTAS TÉRMICAS EM EDIFÍCIOS

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL – PERFIL DE CONSTRUÇÃO

Universidade NOVA de Lisboa
Julho, 2024



AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TINTAS TÉRMICAS EM EDIFÍCIOS

Rodrigo Eusébio Caires Botelho

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

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

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

Júri:

Presidente: Válter José da Guia Lúcio,
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

Arguentes: Luís Gonçalo Correia Baltazar,
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

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

Avaliação da eficiência de tintas térmicas em edifícios

Copyright © Rodrigo Eusébio Caires Botelho, 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.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não teria sido possível sem o apoio e a orientação de muitas pessoas a quem estou profundamente grato, pois sem a colaboração e auxílio por parte destas ao longo de todo percurso da minha formação não seria possível.

Agradeço em primeiro lugar, ao orientador da presente dissertação o Doutor Luís Matias, investigador principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pelo seu incentivo, disponibilidade e partilha de conhecimentos. O seu apoio ao longo de todo este percurso foi fundamental para a realização deste trabalho.

À minha coorientadora, professora Doutora Paulina Faria, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa (FCT/UNL), desejo expressar os meus sinceros agradecimentos pelo seu acompanhamento dedicado, pela total disponibilidade e pelo apoio prestado na elaboração deste trabalho.

Quero agradecer, ao Técnico José Carlos Matos, por toda a assistência solicitada, no decurso da investigação experimental, ao Engenheiro João Parracha pela cedência e processamento dos dados da estação meteorológica e à Engenheira Rita Veloso e à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela realização do ensaio laboratorial de determinação da emitância dos provetes e disponibilização da metodologia utilizada na sua concretização.

Agradeço ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) por fornecer os recursos e o ambiente apropriado para a realização desta pesquisa.

Quero agradecer também ao Engenheiro Muhamad Assane (ex-aluno da FCT), por disponibilizar toda a informação técnica relativa às tintas em análise neste estudo, assim como os dados obtidos na avaliação das respetivas tintas durante o período de verão.

Não poderia deixar de agradecer à minha família, especialmente aos meus pais e irmão, pela força e por me apoiarem incondicionalmente em todos os momentos, pois sem eles nada disto teria sido possível.

Quero agradecer ainda à minha namorada, por ter caminhado ao meu lado, pela sua paciência, compreensão e apoio nos momentos mais difíceis.

RESUMO

Esta dissertação avalia, experimentalmente e por modelação numérica, a eficiência de sistemas de pintura com tintas térmicas em paredes da envolvente de edifícios.

As tintas em análise são comercializadas em Portugal e foram utilizadas para a formulação de sistemas de pintura com tintas térmicas e tintas convencionais. A avaliação das tintas inicia-se pela análise da refletância e emitância dos sistemas de pintura obtidos em ensaios laboratoriais. De seguida, procede-se à avaliação do desempenho térmico comparativo dos sistemas de pintura aplicados nas superfícies interiores das paredes norte e oeste de uma célula experimental localizada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, durante a estação de aquecimento. Por fim, considerando os dados experimentais obtidos anteriormente para a estação de arrefecimento e através do programa EnergyPlus, simula-se o desempenho térmico e energético das tintas térmicas aplicadas nas superfícies interiores das paredes de uma célula com dimensões semelhantes à célula experimental, considerando três soluções construtivas diferentes e localização em três zonas climáticas em Portugal.

Com a análise da refletância e emitância dos sistemas de pintura, verifica-se que as tintas térmicas com aplicação no exterior apresentam potencial para um melhor desempenho térmico dos edifícios e para a redução dos consumos energéticos na estação de arrefecimento. No entanto, não foi possível confirmar o melhor desempenho das tintas térmicas quando aplicadas no interior, por não terem as características ideais para o interior.

A análise conjunta dos resultados, obtidos em condições reais e por modulação numérica, confirma que as tintas térmicas aplicadas em superfícies interiores das paredes da envolvente apresentam potencial para melhorar o conforto térmico no interior dos edifícios. No entanto, a utilização de sistemas de climatização podem indiciar um aumento dos consumos energéticos na estação de aquecimento e de arrefecimento (sem considerar o impacto da temperatura média radiativa no conforto térmico no interior). Além disso, não se confirma o potencial anunciado pelos fabricantes das tintas térmicas para evitar condensações em superfícies interiores de edifícios.

Palavras chave: Pigmentos refletantes, radiação térmica, emitância, refletância.

ABSTRACT

This dissertation evaluates, experimentally and by numerical modeling, the efficiency of thermal paint systems on building envelope walls.

Paints under analysis are marketed in Portugal and were used to formulate paint systems including thermal paints and conventional paints. The assessment of the paints begins with an analysis of the reflectance and the emittance of the paint systems achieved with laboratory tests. The following is an assessment of the comparative thermal performance of the paint systems applied to the inside surfaces of the north and west walls of an experimental cell located at the National Laboratory of Civil Engineering, during heating station. At last, considering the experimental data achieved previously for the cooling station and using the Energy Plus program, the thermal and energy performance of the thermal paints applied to the inside wall's surfaces of a cell with similar dimensions of the experimental cell is simulated, attending to three different construction solutions and location in three climatic zones of Portugal.

Analysis of the reflectance and emittance of the paint systems shows that thermal paints applied outside have the potential to improve the thermal performance of buildings and reduce energy consumption in the cooling season. However, it was not possible to confirm the better performance of thermal paints when applied inside, as they do not have the ideal characteristics for inside application.

The joint analysis of the results, obtained under real conditions and by numerical modulation, confirms that thermal paints applied to the inside surfaces of building envelope walls have the potential to improve indoor thermal comfort in buildings. However, the use of air conditioning systems can lead to an increase of energy consumption in the heating and cooling season (without considering the impact of the mean radiative temperature on indoor thermal comfort). Furthermore, the potential announced by the manufacturers of thermal paints to prevent condensation on the inside surfaces of buildings has not been confirmed.

Keywords: Cool pigments, Thermal radiation, emittance, reflectance.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos e metodologia.....	2
1.3	Estrutura da dissertação.....	3
2	DESEMPENHO TÉRMICO DE TINTAS TÉRMICAS EM EDIFÍCIOS	5
2.1	Considerações iniciais.....	5
2.2	Mecanismos de transmissão de calor.....	6
2.3	Transmissão de calor por radiação.....	7
2.3.1	Radiação térmica	8
2.3.2	Radiação do corpo negro.....	10
2.3.3	Radiação de corpos reais.....	11
2.3.4	Características das superfícies	12
2.3.5	Trocas de calor por radiação.....	13
2.4	Composição de tintas térmicas.....	15
2.4.1	Tintas refletoras da radiação solar	16
2.4.2	Tintas refletoras da radiação infravermelha	16
2.5	Comportamento de tintas térmicas no exterior	18
2.6	Comportamento de tintas térmicas no interior	20
2.7	Durabilidade das características de tintas térmicas.....	23
2.8	Síntese.....	24
3	CAMPANHA EXPERIMENTAL	27
3.1	Contextualização da campanha experimental.....	27
3.2	Características das tintas.....	28
3.3	Avaliação laboratorial	30
3.3.1	Provetes.....	30

3.3.2	Avaliação da refletância	30
3.3.3	Avaliação da emitância.....	31
3.4	Avaliação em condições reais.....	32
3.4.1	Célula experimental	32
3.4.2	Disposição dos sistemas de pintura	34
3.4.3	Registo de dados.....	35
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	41
4.1	Considerações iniciais.....	41
4.2	Avaliação laboratorial	42
4.2.1	Refletância.....	42
4.2.2	Emitância.....	43
4.3	Avaliação em condições reais.....	44
4.3.1	Sem aquecimento.....	47
4.3.2	Com aquecimento.....	50
5	MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	57
5.1	Considerações iniciais.....	57
5.2	Zona climática.....	58
5.3	Soluções construtivas.....	59
5.4	Materiais utilizados.....	60
5.4.1	Características superficiais dos materiais	60
5.4.2	Características das tintas térmicas	61
5.5	Ambiente interior	62
5.5.1	Balanço térmico interno.....	62
5.5.2	Radiação de onda curta	63
5.6	Desempenho térmico das tintas térmicas.....	64
5.6.1	Descrição geral.....	64
5.6.2	Sem sistema de climatização	66
5.6.3	Com sistema de climatização.....	76
5.6.4	Consumos energéticos.....	78
5.7	Análise comparativa com os resultados <i>in situ</i>	81
6	CONCLUSÕES.....	83
6.1	Considerações finais.....	83
6.1.1	Avaliação das características de tintas térmicas	83
6.1.2	Desempenho de tintas térmicas no interior.....	85

6.1.3	Modelação numérica.....	86
6.1.4	Condicionantes do estudo.....	88
6.2	Desenvolvimentos futuros	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		89
ANEXOS		93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Espectro eletromagnético (Matias, 2001).....	8
Figura 2.2- Distribuição da radiância monocromática de um corpo negro (Matias, 2001).	10
Figura 2.3- Propagação da radiação nas superfícies (Henriques, 2011).....	12
Figura 2.4- Radiosidade (Henriques, 2011).....	13
Figura 2.5- Trocas de calor por radiação entre duas superfícies (Henriques, 2011).....	15
Figura 2.6- Comportamento do sistema de pintura de bicamada (Peng et al., 2023).....	17
Figura 2.7- Distribuição espectral da irradiância solar terrestre de acordo com a norma ASTM G173-03 (Cozza et al., 2015).....	18
Figura 2.8- Imagem termográfica de um painel de aço quente com tinta térmica (lado esquerdo) e tinta convencional (lado direito) (Hugo, 2000).....	21
Figura 2.9- Imagem termográfica de um aquecedor junto a uma parede com tinta térmica (lado direito) e tinta convencional (lado esquerdo) (Hugo, 2005).....	21
Figura 3.1- Espectrofotômetro HITACHI U-3300 (Assane, 2023).	31
Figura 3.2- Emissômetro portátil modelo AE1/RD1 (crédito Rita Veloso).....	31
Figura 3.3- Célula experimental.	32
Figura 3.4- Ladrilhos cerâmicos de cor branca e preta no exterior da parede oeste.....	33
Figura 3.5- Disposição dos sistemas de pintura no interior da parede oeste da célula experimental (Assane, 2023).....	34
Figura 3.6- Disposição dos sistemas de pintura no interior da parede norte da célula experimental (Assane, 2023).....	35
Figura 3.7- Posicionamento de termopares no interior da parede oeste (a) e norte (b).....	35
Figura 3.8- Prumo com os termopares 14, 15 e 16.	37
Figura 3.9- Data logger (a) e hygrolog (b).....	37
Figura 3.10- Aquecedor e termostato.	38
Figura 3.11- Recipiente com água no interior da célula experimental.	38
Figura 4.1- Temperatura das tintas BrT1, BrT2 e BrC na parede norte ao longo de um dia de janeiro de 2024.	45
Figura 4.2- Diferenças entre as tintas térmicas e a tinta convencional ao longo de um dia de janeiro de 2024.	46
Figura 4.3- Temperatura no exterior e temperatura das tintas BrT1, BrT2 e BrC na parede norte.....	46
Figura 4.4- Condições no ambiente exterior e interior (a) e temperatura superficial das tintas convencionais no interior (b).....	47

Figura 4.5- Temperatura exterior e interior da célula experimental sem aquecimento.....	48
Figura 4.6- Diferenças de temperatura superficial máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede norte.....	48
Figura 4.7- Diferenças de temperatura máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede oeste com ladrilhos brancos (a) e pretos (b) no exterior.....	49
Figura 4.8- Temperaturas exterior e interior da célula aquecida a 19°C.	51
Figura 4.9- Diferenças de temperatura máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede norte.....	52
Figura 4.10- Temperaturas exterior e interior da célula aquecida a 22°C.....	52
Figura 4.11- Diferenças de temperatura máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede norte da célula.....	53
Figura 4.12- Diferenças de temperatura máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede oeste com ladrilhos brancos (a) e pretos (b) no exterior da célula.	53
Figura 4.13- Temperaturas exterior e interior na célula aquecida a 24°C.....	54
Figura 4.14- Diferenças de temperatura máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede norte.....	55
Figura 4.15- Diferenças de temperatura máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede oeste com ladrilhos brancos (a) e pretos (b) no exterior da célula.	55
Figura 5.1- Célula considerada no programa EnergyPlus.....	57
Figura 5.2- Equilíbrio térmico interno (USDE, 2022a).....	63
Figura 5.3- Temperatura exterior e interior da célula sem aquecimento com as soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 em Lisboa.....	66
Figura 5.4- Diferença de temperatura superficial interior máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento em Lisboa.....	67
Figura 5.5- Diferenças máximas da temperatura do ar interior (a) e da temperatura média radiativa (b) entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento em Lisboa.	68
Figura 5.6- Temperatura exterior e interior da célula sem aquecimento com as soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento em Bragança.	69
Figura 5.7- Diferença de temperatura superficial interior máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento em Bragança.	70
Figura 5.8- Diferenças máximas da temperatura do ar interior (a) e da temperatura média radiativa (b) entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento em Bragança.....	70
Figura 5.9- Temperatura exterior e interior na célula sem arrefecimento nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 em Lisboa.....	72
Figura 5.10- Diferença de temperatura superficial interior máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de arrefecimento em Lisboa.....	73

Figura 5.11- Diferenças máximas de temperatura do ar interior (a) e da temperatura média radiativa (b) entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de arrefecimento em Lisboa.....	73
Figura 5.12- Temperatura exterior e interior na célula sem arrefecimento com as soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 em Faro.....	74
Figura 5.13- Diferença de temperatura superficial interior máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de arrefecimento em Faro.....	75
Figura 5.14- Diferenças máximas de temperatura do ar interior (a) e da temperatura média radiativa (b) entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de arrefecimento em Faro.....	75
Figura A.1- Diferença de temperatura superficial interior entre tintas térmicas e a tinta convencional na parede oeste com ladrilhos pretos no exterior com aquecimento de 24°C na célula no dia 26 de março de 2024 (zona da parede oeste com maior diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional).....	94
Figura A.2- Diferença de temperatura superficial interior entre tintas térmicas e a tinta convencional na parede norte com aquecimento de 24°C na célula no dia 26 de março de 2024.....	94
Figura A.3- Temperatura do solo ao longo do ano em Lisboa.....	95
Figura A.4- Horários da iluminação, ventilação e temperatura.	95
Figura A.5- Caracterização dos materiais das soluções construtivas.....	96
Figura A.6- Resistência térmica do espaço de ar (espessura de 2 cm e 5 cm).	96
Figura A.7- Soluções construtivas SC1, SC2 e SC3.....	96
Figura A.8- Características geométricas das paredes, pavimento e cobertura.....	97
Figura A.9- Iluminação considerada.....	97
Figura A.10- Renovação horária do ar considerada.....	98
Figura A.11- Controlo de temperatura do ar no interior da célula no intervalo de 19°C e 25°C na estação de aquecimento e arrefecimento.....	98
Figura A.12- Variáveis de saída para obter as temperaturas exterior, interior e média radiante na célula e os consumos energéticos na estação de arrefecimento e aquecimento.....	98
Figura A.13- Diferença de temperatura superficial interior entre as tintas térmicas e a tinta convencional na parede norte da solução construtivas SC2 sem aquecimento na célula em Lisboa (dia registado com a maior diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos cenários semelhantes aos avaliados em condições reais).	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Síntese de estudos de avaliação de tintas térmicas no exterior.....	20
Tabela 3.1- Amostra de tinta térmica fornecida pela Empresa 1 (Assane, 2023).....	28
Tabela 3.2- Amostras de tinta e primário térmico fornecida pela Empresa 2 (Assane, 2023)...	28
Tabela 3.3- Amostras de tintas e primários convencionais fornecidas pela Empresa 1 (Assane, 2023).....	28
Tabela 3.4- Principais características de tintas térmicas e convencionais (adaptado de Assane, 2023).....	29
Tabela 3.5- Identificação dos provetes e zona de aplicação (adaptado de Assane, 2023).....	30
Tabela 3.6- Identificação dos termopares consoante a zona da parede e o sistema de pintura.....	36
Tabela 4.1- Refletância na região do visível e infravermelho próximo dos sistemas de pintura analisados (Assane, 2023).....	42
Tabela 4.2- Emitância dos sistemas de pintura analisados (por provete, valor médio e respetivo desvio-padrão).....	43
Tabela 4.3- Diferenças máximas de temperatura entre tintas térmicas e convencional nas paredes norte e oeste, sem aquecimento no interior.....	49
Tabela 4.4- Temperaturas médias no interior aquecido da célula experimental.....	50
Tabela 4.5- Estratificação do ar no interior aquecido da célula experimental (valor médio e desvio-padrão) e humidade relativa.....	51
Tabela 4.6- Diferenças máximas de temperatura entre tintas térmicas e convencional nas paredes norte e oeste, com aquecimento no interior.....	56
Tabela 5.1- Zonas climáticas de Bragança, Lisboa e Faro.....	58
Tabela 5.2- Constituição da cobertura e das paredes das soluções construtivas SC1, SC2 e SC3.....	59
Tabela 5.3- Coeficientes de transmissão térmica das envolventes opacas nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3.....	59
Tabela 5.4- Absortância das tintas no visível, no espectro da radiação solar e no infravermelho médio.....	61
Tabela 5.5- Emitância e refletância na região do visível, no espectro da radiação solar e no infravermelho médio.....	62
Tabela 5.6- Iluminação no interior da célula.....	63
Tabela 5.7- Cenários em análise do desempenho térmico das tintas nas superfícies interiores das paredes.....	64

Tabela 5.8- Temperatura superficial interior máxima das paredes com tinta convencional na célula sem aquecimento com a solução construtiva SC1 em Lisboa.....	67
Tabela 5.9- Diferenças máximas da temperatura do ar, das paredes e média radiativa nas zonas climáticas de Lisboa e Bragança na estação de aquecimento.....	71
Tabela 5.10- Temperatura superficial interior máxima das paredes com tinta convencional na célula sem arrefecimento com a solução construtiva SC1 em Lisboa.....	72
Tabela 5.11- Diferenças máximas das temperaturas do ar, das paredes e média radiativa no verão em Lisboa e Faro.....	76
Tabela 5.12- Diferença de temperatura superficial interior e temperatura média radiativa entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento com sistema de climatização em Lisboa.....	77
Tabela 5.13- Diferença de temperatura superficial interior e temperatura média radiativa entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento com sistema de climatização em Bragança.....	77
Tabela 5.14- Diferença de temperatura superficial interior e temperatura média radiativa entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de arrefecimento com sistema de climatização em Lisboa.....	78
Tabela 5.15- Diferença de temperatura superficial interior e temperatura média radiativa entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de arrefecimento com sistema de climatização em Faro.....	78
Tabela 5.16 - Consumos energéticos em Lisboa considerando as temperaturas do ar interior de 19°C e 25°C na estação de aquecimento e arrefecimento.....	79
Tabela 5.17- Consumos energéticos em Bragança considerando as temperaturas do ar interior de 19°C e 25°C na estação de aquecimento e arrefecimento.....	79
Tabela 5.18- Consumos energéticos em Faro considerando as temperaturas do ar interior de 19°C e 25°C na estação de aquecimento e arrefecimento.....	80
Tabela A.1- Temperatura superficial interior dos sistemas de pintura na parede norte e oeste com aquecimento de 24°C na célula no dia 26 de março de 2024 (dia registado com a maior diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional).....	93
Tabela A.2- Diferenças máximas de temperatura interior, média radiativa e superficial interior entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 sem sistema de climatização nas zonas climáticas de Lisboa, Bragança e Faro.....	99
Tabela A.3- Diferenças máximas de temperatura média radiativa e superficial interior entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 com a temperatura do ar interior de 19°C e 25°C na estação de aquecimento e arrefecimento nas zonas climáticas de Lisboa, Bragança e Faro.....	100

ABREVIATURAS

Tintas e sistemas de pintura analisados

PrN	Primário convencional
PrT	Primário térmico
BrC	Tinta branca convencional
PrN+BrC	Primário convencional sob tinta branca convencional
PrT+BrC	Primário térmico sob tinta branca convencional
BrT1	Tinta branca térmica 1
PrN+BrT1	Primário convencional sob tinta branca térmica 1
PrT+BrT1	Primário térmico sob tinta branca térmica 1
BrT2	Tinta branca térmica 2
PrN+BrT2	Primário convencional sob tinta branca térmica 2
PrT+BrT2	Primário térmico sob tinta branca térmica 2
BrT3	Tinta branca térmica 3
PrT+BrT3	Primário térmico sob tinta branca térmica 3
BrTr1*	Tinta térmica 1
BrTr2*	Tinta térmica 2

*Abreviaturas das tintas térmicas consideradas no programa EnergyPlus.

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Na Europa, entre os setores de atividade económica, a indústria da construção tem um grande impacto. Neste setor, os edifícios apresentam a maior fração de consumo de energia com 40% das necessidades energéticas, com 27% dizendo respeito a edifícios residenciais e 13% a edifícios de serviço (DGEG, 2024a). Está previsto que os consumos energéticos dos edifícios vão ser responsáveis por aproximadamente 36% de todas as emissões de dióxido de carbono (CO₂) na União Europeia, até 2050 (CE, 2018). Perante esta realidade, foi realizada uma revisão da legislação referente ao desempenho energético dos edifícios, na Diretiva 2018/844 (CE, 2018), que alterou a Diretiva 2010/31/UE (CE, 2010) relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE (CE, 2012) sobre a eficiência energética. Esta nova Diretiva (CE, 2018), apresenta novas medidas, pretendendo atingir as metas da União Europeia a curto, a médio e a longo prazo. Pretende-se descarbonizar o parque imobiliário e desenvolver um sistema energético sustentável, seguro, competitivo e descarbonizado, promovendo a redução das emissões de gases com efeito de estufa que provocam o aquecimento global (CE, 2018).

Segundo Joudi et al. (2013), a importância de reduzir as necessidades energéticas dos edifícios e de desenvolver arquiteturas mais eficientes em termos energéticos, tem promovido a criação de novas soluções e escolhas inteligentes de materiais, sendo uma destas a otimização das características superficiais de revestimentos interiores e exteriores dos edifícios.

De acordo com Rossi et al. (2015), a otimização das características superficiais das envolventes exteriores dos edifícios representa um importante campo de investigação para a redução do efeito de ilha de calor em meio urbano. O aquecimento de uma superfície exposta à radiação solar pode ser reduzido, aumentando a refletância solar das envolventes exteriores dos edifícios. A solução apresentada pode ser obtida aplicando revestimentos designados como *cool materials*, que apresentam várias formas, sendo as tintas térmicas dos materiais que apresenta uma melhor relação custo-benefício (Gonçalves, 2014).

Segundo Dias et al. (2014), revestir as fachadas e coberturas com tintas térmicas permite controlar a “carga” térmica de um edifício, refletindo a radiação solar e emitindo o calor absorvido através da emissão de radiação infravermelha. Dessa forma, as tintas térmicas aplicadas no exterior podem contribuir passivamente para o conforto térmico dentro do edifício.

O efeito da aplicação de tintas térmicas pelo exterior, para controlo dos ganhos solares de edifícios, tem sido investigado em vários estudos (Shen et al., 2011, Guo et al., 2017 e Chaowanapanit et al., 2021). No entanto, o efeito da sua aplicação em revestimentos interiores é menos investigado, e menos ainda quando estes tipos de tintas são aplicados em simultâneo no exterior e interior (Joudi et al., 2013).

Como a transferência de calor de uma envolvente de um edifício depende da temperatura superficial interior e exterior e da resistência térmica do sistema que constitui a envolvente, a presença de um revestimento interior com uma superfície de alta refletividade térmica, permite uma diminuição do fluxo de calor, permitindo a redução das perdas de calor do edifício para o exterior (Joudi et al., 2011).

Com base nesta análise, parece que, para além do bom desempenho térmico das tintas térmicas aplicadas na envolvente exterior, quando aplicadas no interior estas tintas poderão apresentar potencial para a redução das perdas de calor. Esse potencial justifica a existência de tintas térmicas para aplicação no interior no mercado. No entanto, é necessário investigar e demonstrar experimentalmente as possíveis contribuições das tintas térmicas para a redução do consumo energético anual de um edifício, uma vez que os estudos existentes são poucos e não cobrem o clima português.

1.2 Objetivos e metodologia

Este estudo tem como objetivo a análise da eficiência das tintas térmicas aplicadas no interior e no exterior de paredes da envolvente de edifícios. Para tal, avalia-se o comportamento térmico das tintas térmicas em comparação com tintas convencionais, para aferir o potencial das tintas térmicas para um melhor conforto térmico no interior e para redução das necessidades energéticas dos edifícios.

Este estudo foi iniciado por Assane (2023) que efetuou uma análise de mercado sobre tintas térmicas, obteve algumas amostras e avaliou, na estação de arrefecimento, a eficiência dessas tintas térmicas comercializadas em Portugal. Aplicou sistemas de pintura com tintas térmicas e convencionais no revestimento interior das paredes oeste e norte de uma célula experimental (pequeno edifício) localizada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), e analisou a temperatura superficial através de termopares instalados nas paredes. Sistemas de pintura com tintas térmicas foram também aplicados no exterior da parede sul da mesma célula experimental, para avaliar o desempenho térmico através de termografia de infravermelhos.

Para apresentar um melhor comportamento térmico da envolvente, um revestimento interior, deve apresentar elevada refletância para a radiação infravermelha ou baixa emitância.

Em sistemas de pintura com tintas térmicas que apresentem elevada refletância e emitância, para propiciarem um contributo para o conforto térmico, o impacto da refletância deve ser predominante ao da emitância. Em alternativa as tintas térmicas devem apresentar um valor de emitância inferior às tintas convencionais.

Sistemas de pintura com tintas térmicas que apresentem elevada refletância, ao serem aplicados pelo exterior deverão refletir grande parte da radiação solar, levando a uma diminuição de ganhos solares no edifício. Na estação de arrefecimento, principalmente em zonas climáticas com ganhos solares mais elevados, isto pode levar a uma diminuição significativa das necessidades energéticas para arrefecimento do edifício. Por outro lado, na estação de aquecimento, pode levar a um aumento das necessidades energéticas para o aquecimento do edifício.

Face ao exposto, para verificar a eficiência das tintas térmicas, é necessário avaliar o comportamento térmico global anual, incluindo as estações de arrefecimento e de aquecimento. Desta forma, esta dissertação apresenta a avaliação de sistemas de pintura com tintas térmicas comercializadas no mercado português na estação de aquecimento seguindo a seguinte metodologia:

- Análise do estado dos conhecimentos, revisão dos métodos de medição e de avaliação do desempenho térmico dos sistemas de pintura com tintas térmicas.
- Realização de ensaios experimentais em laboratório para análise da emitância dos sistemas de pintura.
- Realização de ensaios experimentais in situ para medição da temperatura superficial interior através de termopares, nas paredes da célula que foram previamente pintadas com sistemas de tintas térmicas e tintas convencionais, em período de aquecimento durante 2024.
- Análise dos resultados obtidos nos ensaios experimentais, comparando o desempenho térmico com os sistemas com tintas convencionais e tintas térmicas no período de aquecimento referido, e comprando com os resultados obtidos no período de arrefecimento de 2023.
- Modelação numérica utilizando o programa EnergyPlus para avaliação e análise global.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, iniciando pelo primeiro capítulo, que contém uma introdução que apresenta o enquadramento do tema, os objetivos do estudo, a metodologia adotada e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo apresenta os conceitos teóricos necessários para a compreensão do comportamento das tintas térmicas, a análise de estudos que apresentam as vantagens no uso de tintas térmicas no desempenho térmico e energético em edifícios, as componentes das tintas térmicas com influência no comportamento térmico e maior durabilidade comparativamente às tintas convencionais e, por fim, a metodologia adotada para a respetiva avaliação.

No terceiro capítulo descreve-se o procedimento utilizado na campanha experimental realizada no período de arrefecimento em 2023 de outra dissertação (Assane, 2023) e, na presente dissertação, no período de aquecimento em 2024, apresentando os sistemas de pintura em estudo e os procedimentos realizados para a avaliação laboratorial e em condições reais nos dois períodos.

No quarto capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados da refletância e emitância dos sistemas pintura, obtidos nos ensaios laboratoriais, e do comportamento térmico obtidos com a respetiva aplicação nas superfícies interiores das paredes norte e oeste da célula experimental.

O quinto capítulo descreve a metodologia realizada para a avaliação, por modelação numérica, do desempenho térmico e energético obtido por simulação da aplicação das tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes de uma célula com dimensões semelhantes à célula experimental, com diferentes soluções construtivas nas paredes e em diferentes localizações. Discutem-se os resultados obtidos e apresenta uma análise comparativa com os resultados obtidos em condições reais na célula experimental na estação de arrefecimento e aquecimento.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões com uma síntese da análise das características das tintas térmicas com aplicação no interior e no exterior, e do desempenho das tintas obtidos em condições reais e por modelação numérica e, por fim, as condicionantes do estudo e os possíveis desenvolvimentos futuros.

Por último, apresentam-se as referências bibliográficas e os anexos com os resultados do cenário em que se verifica a maior influencia das tintas térmicas no interior da célula experimental, a modelação realizada no EnergyPlus e quadros síntese dos resultados obtidos no programa.

DESEMPENHO TÉRMICO DE TINTAS TÉRMICAS EM EDIFÍCIOS

2.1 Considerações iniciais

Em conformidade com os consumos energéticos ao nível europeu, em Portugal, no ano 2020 (parte do qual houve confinamento devido à pandemia COVID-19), o setor dos edifícios apresentou o maior consumo de energia com 32,9%, semelhante ao do setor dos transportes com 32,6% e ao da indústria transformadora com 28,8% (DGEG, 2024a). De forma a atingir as metas da união europeia, referentes ao desempenho energético dos edifícios, está integrado na legislação nacional o Decreto-Lei n.º 101-D/2020 (DR, 2020), com sua atual redação, através do Decreto-Lei n.º 102/2021 (DR, 2021a). Esta legislação estabelece os requisitos aplicáveis a edifícios para a melhoria do seu desempenho energético e regula o Sistema de Certificação Energética de Edifícios, transpondo a Diretiva 2018/844/EU (CE, 2018) e parcialmente a Diretiva 2019/944/EU (CE, 2019).

Na presente legislação, a Portaria n.º 138-I/2021 (DR, 2021b) regulamenta os requisitos mínimos de desempenho energético das envolventes dos edifícios, que vai depender do tipo de utilização do edifício. Este regulamento apresenta os valores máximos dos coeficientes de transmissão térmica para as envolventes exteriores opacas e envidraçadas. Tal permite diminuir as trocas de calor entre o exterior e o interior do edifício e, conseqüentemente, a diminuição das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento.

Na envolvente exterior opaca, é recorrente o uso de camadas de isolamento térmico em edifícios novos e em edifícios existentes que necessitam de reabilitação. Apesar de ser uma solução adequada em termos energéticos, a sua aplicação na reabilitação de um edifício pode levar a grandes alterações do seu aspeto arquitetónico. Essa é uma das "justificações" que levam ao aparecimento das tintas térmicas no mercado, como uma "solução alternativa" para reduzir um pouco o consumo de energia dos edifícios a reabilitar e ter um baixo impacto na aparência do edifício (Malz, 2020).

Com revestimentos com sistemas de pintura com tintas térmicas, a redução das trocas de calor é obtida pela melhoria das características superficiais das envolventes dos edifícios, devido às suas propriedades refletoras da radiação térmica e emissão de energia. A eficiência das tintas térmicas aplicadas pelo exterior ou no interior, vai depender se a radiação térmica com que se encontram em contacto é uma energia térmica benéfica ou prejudicial para atingir o conforto térmico no interior do edifício. Um sistema que pode ser benéfico na estação de arrefecimento pode ser prejudicial na estação de aquecimento, mas não pode ser alterado; daí a importância de se avaliar o balanço anual.

Desta forma, é necessário ter em atenção as condições climáticas do local e a interação das tintas com as soluções construtivas dos edifícios e do ambiente em que se encontra. Tal permite verificar a adequação da sua aplicação na zona climática pretendida e as possíveis contribuições para a redução dos consumos energéticos necessários (Gonçalves e Graça, 2004).

2.2 Mecanismos de transmissão de calor

A transmissão de calor entre dois ambientes, ocorre mediante a diferença de temperaturas entre eles, provocando um fluxo de calor com o sentido do ambiente com temperatura mais elevada para a mais baixa. A transmissão de calor pode efetuar-se de três formas distintas (Henriques, 2011):

- Condução - Transmissão de calor que ocorre em corpos sólidos ou fluidos que se encontram em contacto. Um material a uma dada temperatura apresenta um estado de agitação molecular, que aumenta com o aumento de temperatura. Entre dois materiais com temperaturas diferentes, esta agitação transmite-se do material com maior agitação para o com menor até atingir um estado de equilíbrio.
- Convecção - Transmissão de calor semelhante à condução, mas que ocorre só em fluidos. A variação de temperatura das moléculas provoca variações de densidade e alteração do seu posicionamento, provocando os movimentos típicos de convecção.
- Radiação - Transmissão de calor gerado pela energia emitida por todos os corpos com temperatura superior ao zero absoluto (0 K), por meio de ondas eletromagnéticas ou partículas.

As trocas de calor entre o ambiente interior do edifício e o exterior podem ser simplificadas, admitindo a transmissão de calor unidirecional em regime permanente, sendo apresentadas nas seguintes situações (Henriques, 2011):

- Trocas de calor entre o ambiente interior e os elementos construtivos, provenientes da radiação dos elementos do local e de processos convectivos.

O fluxo de calor (q) resultante dos processos de convecção e radiação, entre o ambiente interior e o elemento construtivo, pode ser dimensionado através da equação 2.1:

$$q = h_i \cdot (T_i - T_{Si}) \quad (2.1)$$

em que h_i é a condutância térmica superficial interior resultante da soma da condutância térmica superficial por convecção (h_c) e radiação (h_r), T_i a temperatura interior e T_{si} a temperatura superficial interior.

- Trocas de calor por condução no interior da solução construtiva.

O fluxo de calor resultante por condução pode ser obtido através da equação 2.2:

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

em que T_{si} a temperatura superficial interior e T_{se} a temperatura superficial exterior e R a soma da resistência térmica das várias camadas que constituem o elemento, que variam consoante a espessura (d) e condutibilidade térmica (λ) de cada camada, através da equação 2.3:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (2.3)$$

- Trocas de calor entre o ambiente exterior e os elementos construtivos, provenientes da radiação dos elementos do local e de processos convectivos.

O fluxo de calor (q) resultante dos processos de convecção e radiação, entre o ambiente exterior e o elemento construtivo, pode ser dimensionado através da equação 2.4:

$$q = h_e \cdot (T_{se} - T_e) \quad (2.4)$$

em que h_e é a condutância térmica superficial exterior resultante da soma da condutância térmica superficial por convecção (h_c) e radiação (h_r), T_e a temperatura exterior e T_{se} a temperatura superficial exterior.

Designa-se coeficiente de transmissão térmica (U) de uma solução construtiva, o valor que caracteriza o seu comportamento térmico expresso em $W/m^2 \cdot ^\circ C$, obtido através da equação 2.5:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R + \frac{1}{h_e} \quad (2.5)$$

Desta forma, o fluxo de calor de calor pode ser obtido através da equação 2.6:

$$q = U \cdot (T_i - T_e) \quad (2.6)$$

Para o estudo das tintas térmicas, é predominante o estudo dos mecanismos de transmissão de calor por radiação, sendo apresentado no subcapítulo 2.3 com maior detalhe os conceitos relacionados com este tipo mecanismo.

2.3 Transmissão de calor por radiação

A transmissão de calor por radiação pode ser entendida através da teoria da radiação eletromagnética desenvolvida por Maxwell e pela teoria quântica de Planck. Na teoria da radiação eletromagnética considera-se que as partículas carregadas e aceleradas provocam ondas

eletromagnéticas que se propagam à velocidade da luz (Matias, 2001). Estas apresentam determinado comprimento de onda e frequência, que estão relacionados através da equação 2.7 (Henriques, 2011):

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.7)$$

Nesta equação, c é a velocidade da luz que no vácuo é igual a $2,988 \times 10^8 \text{ m/s}$, λ o comprimento de onda em metros (m) e f a frequência em hertz ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$).

No caso da teoria quântica de Planck, considera-se que a radiação é constituída por feixes de partículas denominadas por fótons, responsáveis por emitir quantidades de energia específicas (Matias, 2001). Relacionando as duas teorias, a energia de radiação eletromagnética (e) pode ser obtida através da equação 2.8 (Henriques, 2011):

$$e = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.8)$$

Nesta equação, h é a constante de Planck com valor de $6,625 \times 10^{-34} \text{ J.s}$, c a velocidade da luz, λ o comprimento de onda e f a frequência, e verifica-se que a energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda, ou seja, para radiações com comprimentos de onda pequeno apresenta energias elevadas.

2.3.1 Radiação térmica

A radiação pode assumir ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda muito diferentes, o que proporciona a emissão de quantidades diferentes de energia e a diferenças no seu comportamento (Modest, 1993). Dependendo do seu comportamento, as ondas eletromagnéticas são divididas em diferentes formas de radiação, que podem ser apresentadas no espectro da radiação eletromagnética presente na Figura 2.1 (Matias, 2001).

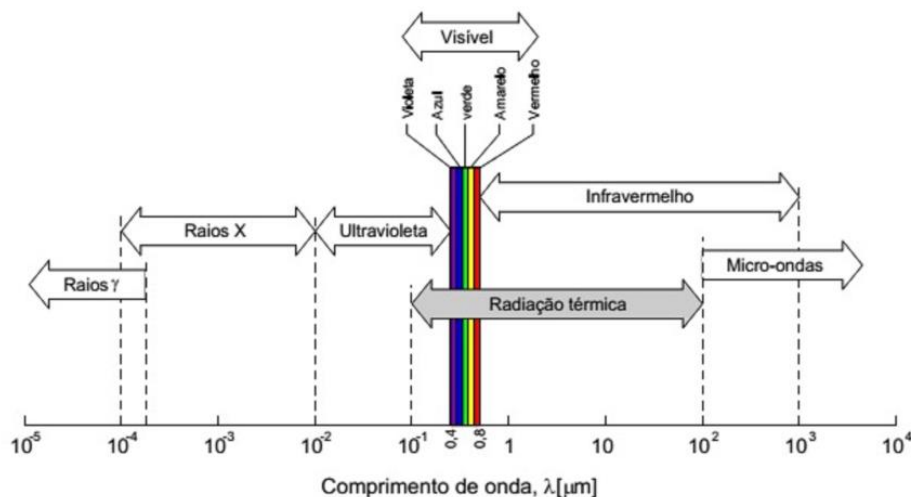


Figura 2.1- Espectro eletromagnético (Matias, 2001).

Entre todas as formas de radiação eletromagnética, a radiação térmica é a única relacionada com as transferências de calor, sendo importante para a análise do comportamento térmico dos edifícios (Modest, 1993). Como se pode observar no espectro eletromagnético, a radiação térmica incide numa gama de radiação com comprimentos de onda entre 0,1 e 100

μm , na qual estão incluídas a radiação ultravioleta (0,1 a 0,38 μm), a radiação visível (0,38 a 0,76 μm) e a radiação infravermelha (0,76 a 100 μm) (Henriques, 2011).

No caso das superfícies exteriores dos edifícios, a superfície está exposta à radiação solar, que corresponde à radiação eletromagnética emitida pelo sol com comprimentos de onda entre 0,1 e 2,5 μm . Neste intervalo, o espectro da radiação solar abrange a radiação do visível e uma parte da radiação ultravioleta e da radiação infravermelho (Prado e Ferreira, 2005).

A região da radiação ultravioleta presente na radiação solar, pode ser subdividida em três intervalos (Castro, 2002):

- ultravioleta A (0,315 a 0,38 μm);
- ultravioleta B (0,28 a 0,315 μm);
- ultravioleta C (0,1 a 0,28 μm).

Esta região apresenta aproximadamente 6 % do espectro solar que atinge a superfície terrestre, com comprimentos de onda compreendidos entre 0,29 e 0,38 μm , devido à restante região ser absorvida pela camada de ozono da atmosfera terrestre (Prado e Ferreira, 2005). Apesar da pequena proporção, a radiação ultravioleta é muito energética, o que pode provocar graves problemas nos seres vivos e no caso dos materiais, à sua descoloração e degradação (Castro, 2002).

A região da radiação visível, é a única radiação perceptível ao olho humano, causando a sensação de cores em que cada cor corresponde a um determinado intervalo de comprimento de onda (Prado e Ferreira, 2005). Denomina-se luz branca, a radiação que contém todos os comprimentos de onda na região do visível e que, consoante a sua intensidade transmitida, influencia diretamente o grau de iluminação de um ambiente (Castro, 2002).

Por último, a radiação infravermelha apresenta em toda a sua região comprimentos de onda entre 0,76 e 1000 μm , e pode ser subdividida em três intervalos (Maldague, 2001):

- infravermelho próximo (0,76 a 1,5 μm);
- infravermelho médio (1,5 a 20 μm);
- infravermelho extremo (20 a 1000 μm).

Na radiação solar, a região da radiação infravermelha apresenta comprimento de onda entre 0,76 e 2,5 μm , o que corresponde aproximadamente a metade do espectro solar (Prado e Ferreira, 2005). Assim, os seus principais efeitos de natureza térmica apresentam uma fonte calor com grande influência nas condições internas dos edifícios.

Como referido anteriormente, a eficiência das tintas térmicas irá depender dos sistemas de pintura em que são utilizadas perante a radiação térmica presente. No caso das tintas aplicadas pelo exterior, deve-se verificar o seu desempenho para a radiação infravermelho próximo e na radiação visível, visto que apresenta quase todo o espectro da radiação solar. No caso das tintas térmicas aplicadas no interior, o seu desempenho deve ser verificado para comprimentos de onda mais longos dentro da região da radiação infravermelho, devido a ser radiação térmica com grande influência no interior dos edifícios.

2.3.2 Radiação do corpo negro

Um corpo negro caracteriza-se por absorver toda a radiação térmica incidente na sua superfície, independentemente do ângulo de incidência e comprimento de onda. Em condições de equilíbrio, para toda a energia incidente absorvida, um corpo negro emite a mesma quantidade de energia, sendo assim um absorvedor e emissor perfeito (Henriques, 2011).

A energia emitida por um corpo não é uniforme em todos os comprimentos de onda, designando-se por radiância monocromática ou por poder emissivo monocromático, a energia emitida para um determinado comprimento de onda. No caso do corpo negro, define-se a radiância monocromática ($E_{n\lambda}$) através da equação 2.9 designada por distribuição de Planck (Matias, 2001):

$$E_{n\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot e^{(C_2/\lambda T) - 1}} \quad (2.9)$$

Nesta equação $C_1 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$, λ é o comprimento de onda em micrómetros (μm), $C_2 = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ e T é a temperatura superficial do corpo negro em Kelvin (K).

Na Figura 2.2 visualiza-se a distribuição da radiância monocromática de um corpo negro consoante a sua temperatura e comprimento de onda.

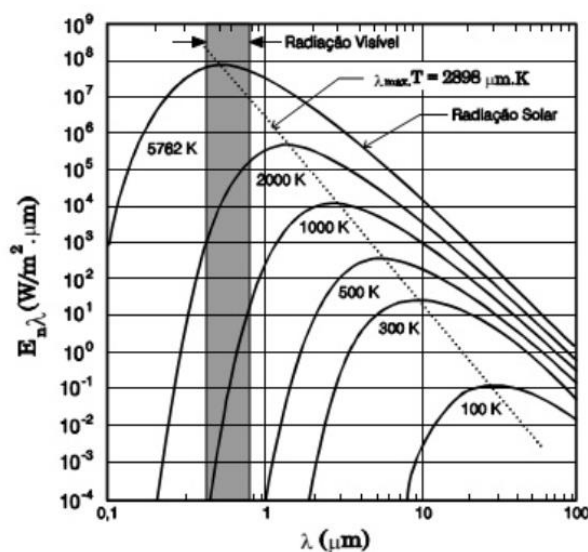


Figura 2.2- Distribuição da radiância monocromática de um corpo negro (Matias, 2001).

Analisando as curvas presentes na Figura 2.2, conclui-se que, ao aumentar a temperatura de uma superfície, maior será o total de energia emitida, e o valor máximo da radiância monocromática vai apresentar comprimento de onda menor. Ao interseccionar os valores máximos da radiância monocromática em função da sua temperatura, obtém-se uma reta cuja equação (2.10) é conhecida pela lei de Wien (Maldague, 2001):

$$\lambda_{max} = \frac{2897,7}{T} \quad (2.10)$$

Nesta equação λ_{max} é o comprimento de onda máximo em micrómetros (μm) e T a temperatura superficial do corpo em Kelvin (K).

Observando a curva do gráfico da Figura 2.2, que considera uma temperatura superficial do sol de $5762 K$, verifica-se que os valores máximos de radiância monocromática estão situados na região do visível e, recorrendo à equação 2.10 sabe-se que o valor máximo de radiância apresenta um comprimento de onda de $0,5 \mu m$. Tal justifica a radiação solar ser perceptível ao olho humano e a influência da radiação térmica na região do visível no exterior.

Analisando todos corpos que admitem uma temperatura superficial inferior a $500 K$, verifica-se que toda a radiância emitida está presente na região do infravermelho e que os valores máximos de radiância apresentam comprimento de onda superior a $5,8 \mu m$. Daí conclui-se que todos os corpos neste intervalo de temperaturas apresentam grande parte da sua radiação emitida na região do infravermelho médio.

Desta forma, pode-se confirmar a predominância da radiação no infravermelho médio no interior dos edifícios, visto que as temperaturas superficiais dos corpos aí presentes apresentam temperaturas neste intervalo. Por exemplo, um corpo humano que apresenta uma temperatura de cerca de $310 K$ ($37^\circ C$), tem a radiância monocromática máxima com comprimento de onda de $9,3 \mu m$ (Maldague, 2001).

Através da integração da lei de Plank para todos os comprimentos de onda ($0 \leq \lambda \leq \infty$), obtém-se a radiância total (E^0) de um corpo negro a determinada temperatura, que é expressa através da equação 2.11 conhecida por lei de Stefan-Boltzman (Maldague, 2001):

$$E^0 = \sigma \cdot T^4 \quad (2.11)$$

em que σ é a constante Stefan-Boltzman com valor de $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ e T a temperatura absoluta em Kelvin (K).

2.3.3 Radiação de corpos reais

No caso dos corpos reais, a radiância não é a mesma do que num corpo negro, mas uma parte deste. Para se quantificar a radiância de um corpo real recorre-se à emissividade (equação 2.12), também designada por emitância (ε), que acaba por ser a razão entre a energia realmente emitida por um corpo e a energia emitida por um corpo negro à mesma temperatura, direção e comprimento de onda (Maldague, 2001):

$$\varepsilon = \frac{E}{E^0} \quad (2.12)$$

Desta forma, a emitância acaba por se quantificar pela capacidade de uma superfície em emitir energia com valores entre 0 e 1. Aplicando a duas equações anteriores, obtém-se a radiância total de um corpo real (E) representada na equação 2.13 (Maldague, 2001):

$$E = \varepsilon \sigma \cdot T^4 \quad (2.13)$$

Nesta equação ε é a emitância, σ a constante Stefan-Boltzman com valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ e T a temperatura absoluta em Kelvin (K).

2.3.4 Características das superfícies

Como na realidade não existem corpos negros, quando a radiação térmica incide numa superfície de um corpo real, esta pode ter diferentes comportamentos que variam consoante as suas características superficiais. Ao incidir radiação térmica (G) numa superfície, partes desta radiação pode ser absorvida (αG), refletida (ρG) ou transmitida (τG) (Henriques, 2011), tal como esquematizado na Figura 2.3.

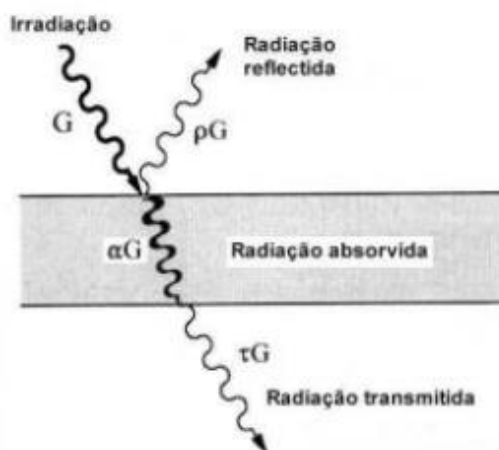


Figura 2.3- Propagação da radiação nas superfícies (Henriques, 2011).

Estabelecendo uma relação entre a radiação incidente e os parâmetros α , ρ e τ que são, respetivamente, as frações de radiação absorvida, refletida e transmitida, e considerando a lei de conservação de energia, obtém-se a equação 2.14 (Modest, 1993):

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.14)$$

Os parâmetros α , ρ e τ , também designados por absorptância, refletância e transmitância, são adimensionais com valores entre 0 e 1 e variam consoante a temperatura, o comprimento de onda e o ângulo de incidência da radiação térmica que atinge a superfície do corpo.

Muitos dos materiais utilizados na construção civil apresentam uma transmitância nula ($\tau = 0$) e são designados por opacos, o que permite reescrever a equação 2.14 na equação 2.15 (Modest, 1993):

$$\rho + \alpha = 1 \quad (2.15)$$

Considerando um corpo pequeno a determinada temperatura e absorptância, rodeado por uma envolvente que funciona como um corpo negro com a mesma temperatura, e estando o ambiente entre eles em equilíbrio térmico, é possível admitir que a quantidade de energia absorvida pelo corpo é igual à energia emitida (Henriques, 2011). Esta igualdade, designada

por lei de Kirchhoff, admite que para a mesma temperatura e comprimento de onda, o corpo tem absorvância (α) e emitância (ε) iguais, através da equação 2.16 (Henriques, 2011):

$$\alpha = \varepsilon \quad (2.16)$$

No entanto, essa lei só é aplicável ao corpo negro ou a um corpo sujeito à emissão de radiação de um corpo negro, ambos à mesma temperatura, o que não representa as condições correntes (Henriques, 2011). Contudo, o estudo da influência da radiação térmica numa superfície pode-se tornar complexa, considerando-se em muitos casos válida a lei Kirchhoff e que as características das superfícies não diferem com o ângulo de incidência (corpo difuso) e com o comprimento de onda (corpo cinzento) (Henriques, 2011).

2.3.5 Trocas de calor por radiação

No caso de um corpo real com superfície opaca, designa-se por radiosidade (J) a radiação total emitida pela sua superfície. A radiosidade é obtida pela soma de duas componentes, sendo estas a radiação emitida (εE^0) e a radiação refletida (ρG), de acordo com a Figura 2.4 (Henriques, 2011).

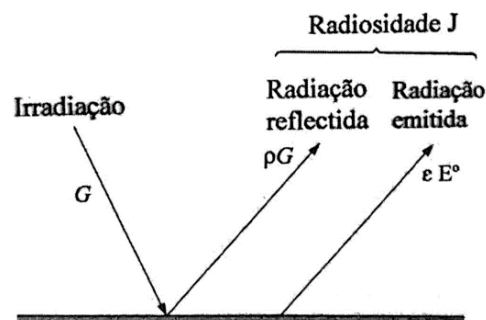


Figura 2.4- Radiosidade (Henriques, 2011).

Desta forma, a radiosidade é função da radiação emitida que varia consoante a temperatura e a emitância, e da radiação refletida que depende da refletância e da radiação incidente também designada por irradiação (G), podendo ser calculada através da equação 2.17 (Henriques, 2011):

$$J = \varepsilon E^0 + \rho G \quad (2.17)$$

Nesta equação ε é a emitância da superfície, E^0 a radiância total de um corpo negro, ρ a refletância da superfície e G a irradiação.

Admitindo o balanço energético de uma superfície opaca com área A , obtém-se a quantidade calor emitida (Q) pela superfície através da equação 2.18 (Henriques, 2011):

$$Q = A \cdot (J - G) \quad (2.18)$$

Verifica-se que, para uma radiosidade (J) superior à irradiação (G), tem-se um balanço energético positivo.

Considerando que a superfície opaca cumpre lei de Kirchhoff, e utilizando as duas equações anteriores, obtém-se a quantidade de calor através da equação 2.19 (Henriques, 2011):

$$Q = \frac{A \cdot \varepsilon}{1 - \varepsilon} (E^0 - J) \quad (2.19)$$

A equação pode ser simplificada para a equação 2.20 (Henriques, 2011):

$$Q = \frac{(E^0 - J)}{R} \quad (2.20)$$

em que R é a resistência superficial à radiação, sendo dada pela equação 2.21 (Henriques, 2011):

$$R = \frac{1 - \varepsilon}{A \cdot \varepsilon} \quad (2.21)$$

O conceito de trocas de calor por radiação surge por uma analogia com noções de eletricidade em que Q representa uma corrente elétrica, $E^0 - J$ uma diferença de potencial e R uma resistência elétrica (Matias, 2001).

As trocas de calor por radiação entre superfícies, variam consoante as suas características superficiais, temperatura e sua relação geométrica. Denominasse fator de forma (F_{ij}) de uma superfície, o parâmetro utilizado para quantificar a energia emitida de uma superfície i que atinge uma superfície j (Henriques, 2011). Considerando o balanço das trocas de calor por radiação entre as superfícies, a quantidade de calor de uma superfície para a outra pode ser representada através da equação 2.22 (Henriques, 2011):

$$Q_{ij} = F_{ij} \cdot A_i \cdot J_i - F_{ji} \cdot A_j \cdot J_j \quad (2.22)$$

em que A são as áreas de cada superfície, F os respectivos fatores de forma e J a radiosidade. Considerando a regra de reciprocidade ($F_{ij} \cdot A_i = F_{ji} \cdot A_j$) a equação anterior pode ser representada através da equação 2.23 (Henriques, 2011):

$$Q_{ij} = \frac{J_i - J_j}{R_{ij}} \quad (2.23)$$

em que R_{ij} é a resistência espacial à radiação, que representa a resistência térmica entre a radiosidade das duas superfícies, sendo dada através da equação 2.24 (Henriques, 2011):

$$R_{ij} = \frac{1}{A_i F_{ij}} \quad (2.24)$$

Considerando o balanço térmico entre duas superfícies paralelas com determinadas áreas A_i e A_j , temperaturas T_i e T_j e emitância ε_i e ε_j , a troca de calor por radiação pode ser dada pela equação 2.25 e expressa pela Figura 2.5 (Henriques, 2011):

$$Q = \frac{\sigma \cdot (T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1 - \varepsilon_i}{A_i \cdot \varepsilon_i} + \frac{1}{A_i \cdot F_{ij}} + \frac{1 - \varepsilon_j}{A_j \cdot \varepsilon_j}} \quad (2.25)$$

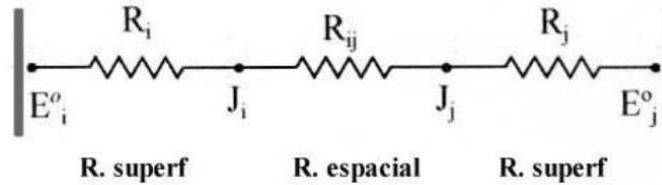


Figura 2.5- Trocas de calor por radiação entre duas superfícies (Henriques, 2011).

2.4 Composição de tintas térmicas

As tintas são dispersões coloidais constituídas por pigmentos, cargas, veículo volátil, veículo fixo e aditivos (Marques, 2019). Estas podem ser usadas apenas para decorar a superfície em que são aplicadas ou podem apresentar várias características como resistência mecânica ou química, que vai depender da quantidade de cada componente e do seu modo operatório (Marques, 2019).

Os pigmentos são insolúveis e podem ser orgânicos ou inorgânicos, obtidos através de substâncias naturais como produtos vegetais, animais ou terras coloridas, embora seja mais frequente o uso de pigmentos sintéticos. Esta componente confere cor e opacidade à película seca e ainda pode apresentar, juntamente com o veículo fixo, propriedades mecânicas, de controlo do brilho, anticorrosivas, resistência aos produtos químicos e resistência ao envelhecimento do revestimento (Dornelles, 2008).

As cargas são substâncias inorgânicas, que se apresentam agregadas e são insolúveis, fazendo parte do extrato sólido das tintas, o que permite aumentar o teor de sólidos e ainda influenciar outras características como o brilho e a viscosidade (Marques, 2019).

O veículo volátil pode ser um solvente ou diluente, tendo a finalidade de dissolução do veículo fixo ou a redução da viscosidade da tinta, de forma apresentar um bom nível de aplicabilidade (Dornelles, 2008).

O veículo fixo pode ser constituído por uma ou mais resinas, com origem natural ou sintética, e é a componente com maior influência nas características das tintas. Na tinta, age como ligante, responsável pela aglutinação dos pigmentos e das cargas, pela formação da película sólida da tinta e pela aderência ao substrato (Dornelles, 2008).

Por último, os aditivos são adicionados em pequenas quantidades nas tintas, inferiores a 5% na sua formulação e permitem controlar determinadas propriedades na tinta ou proporcionar-lhe características especiais, tais como atividade biocida, antiespumante e estabilizante de degradação por ultravioleta (Dornelles, 2008).

2.4.1 Tintas refletoras da radiação solar

Inicialmente as tintas térmicas começaram a ser desenvolvidas para serem aplicadas em coberturas e em fachadas no exterior, pretendendo-se que apresentem elevada refletância à radiação solar e elevada emitância da radiação infravermelha. Estas tintas, também designadas por *cool paints*, são desenvolvidas através da incorporação de cargas e/ou pigmentos refletantes (*cool pigments*).

Relativamente aos pigmentos, estes podem ser classificados das seguintes formas (Dias, 2008):

- pigmentos refletores de radiação do infravermelho próximo;
- pigmentos transparentes à radiação do infravermelho próximo e opacidade à luz, aplicados sobre um primário refletor.

Atualmente existem diversos pigmentos orgânicos e inorgânicos refletores de radiação no infravermelho próximo, sendo o mais frequente o uso de pigmentos inorgânicos no exterior devido a serem os menos suscetíveis à degradação provocada pela exposição à radiação solar. Os pigmentos inorgânicos podem ser classificados como pigmentos brancos, coloridos e pretos. Os mais utilizados são os pigmentos brancos, sendo comum o uso de dióxido de titânio (TiO_2), sulfeto de zinco (ZnS) e óxido de zinco (ZnO) (Santamouris e Yun, 2020).

Em relação às cargas utilizadas em tintas térmicas, estas são classificadas por terem baixa condutibilidade térmica, tais como as microesferas de vidro ocas e as microesferas de cerâmica ocas. Para além, das suas propriedades termicamente isolantes, podem apresentar outras características tais como elevada refletância na região do visível e no infravermelho (Marques, 2019). As microesferas de vidro apresentam boa resistência à radiação ultravioleta e elevada refletância no infravermelho, e as microesferas de cerâmica apresentam elevada refletância no infravermelho (Marques, 2019 e Dias, 2008).

De modo a proporcionar tintas térmicas com elevada refletância para a radiação solar e com maior durabilidade, é recorrente o uso simultâneo de microesferas e de pigmentos refletores. Cardinali et al. (2022) investigaram o efeito da adição de microesferas de vidro com granulometria diferente (diâmetro num intervalo entre 40 e 800 μm) na refletância de tintas refletantes brancas com refletância de 80,8%. Entre as tintas com microesferas de vidro, a com maior refletância foi a que apresentava microesferas de vidro com diâmetros entre 70 e 110 μm com refletância 79,7%. Comparando as duas tintas, verifica-se que o uso de microesferas de vidro (boa resistência à radiação ultravioleta) permite aumentar a durabilidade das tintas, mas diminui a refletância da tinta.

2.4.2 Tintas refletoras da radiação infravermelha

Devido à boa eficiência térmica das tintas térmicas no exterior, têm sido desenvolvidos estudos de tintas térmicas aplicadas nas superfícies interiores dos edifícios. Estas tintas também são constituídas por cargas e/ou pigmentos refletantes que conferem às tintas elevada

refletância no espectro visível e no infravermelho próximo. De forma a garantir a melhor eficiência térmica para as tintas térmicas no interior, estas devem apresentar elevada refletância no infravermelho médio e baixa emitância, como será demonstrado no subcapítulo 2.6.

Em geral, as tintas não metálicas apresentam uma elevada emitância, o que tem levado à formulação de tintas térmicas com flocos de alumínio que permite diminuir a emitância das tintas. No caso de estudo de Joudi et al. (2013), o uso de flocos de alumínio permitiu a redução da emitância das tintas térmicas de um valor de 0,9 para 0,25 e no estudo de Fantucci e Serra (2020) uma redução da emitância de 0,88 para 0,6.

Ribeiro (2013) também introduziu uma pasta de alumínio numa tinta branca convencional e num verniz, verificando uma diminuição da emitância na tinta de 0,9 para 0,72 e no verniz de 0,87 para 0,66. As diferenças foram obtidas quando 20% da massa da tinta e do verniz é constituída pela pasta de alumínio. Para uma maior quantidade em massa de pasta de alumínio a emitância diminuiu, mas de forma mais reduzida. De seguida, introduziu pigmentos coloridos nas tintas, verificando que estes pigmentos cobrem os pigmentos de alumínio, penalizando a eficiência das tintas em refletir radiação.

Contudo, apesar da introdução de flocos de alumínio permitir reduzir a emitância das tintas, no ponto de vista arquitetónico apresenta um acabamento nas paredes com aparência metálica, resultando numa limitação estética nas superfícies dos edifícios (Ibrahim et al., 2018).

Nesse sentido, Peng et al. (2023) desenvolveram dois grupos de tintas para formar sistemas de pintura bicamada, que podem ser aplicados no exterior ou no interior. A camada inferior foi constituída por uma tinta de elevada refletância para a radiação no visível e no infravermelho próximo e médio, com introdução de flocos de alumínio. As camadas superiores foram constituídas por tintas coloridas transparentes à radiação infravermelha que só refletem radiação no visível (Figura 2.6).

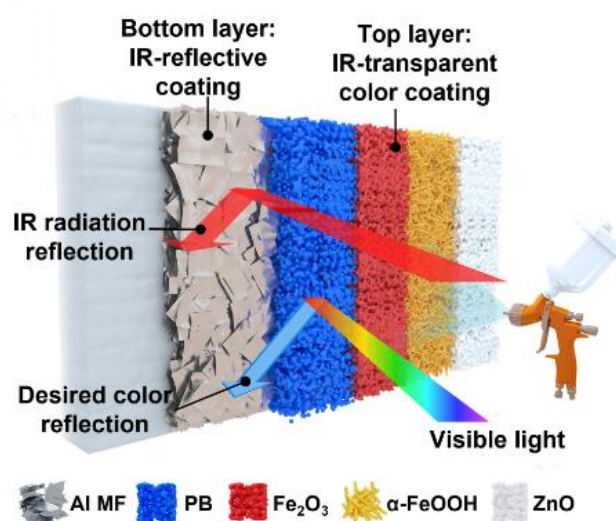


Figura 2.6- Comportamento do sistema de pintura de bicamada (Peng et al., 2023).

Desta forma, a camada inferior foi caracterizada por uma refletância de 0,85 e emitância de 0,15, evitando as trocas de calor por radiação térmica entre a superfície com o meio ambiente em que se encontra, através de uma menor absorção da radiação térmica proveniente do meio ambiente e uma menor libertação de calor por emissão de radiação no infravermelho médio (7 a 14 μm). A camada superior só refletia a radiação no visível no intervalo de comprimentos de onda da cor pretendida, permitindo um aspeto visual colorido com efeito estético semelhante às tintas convencionais (Peng et al., 2023).

2.5 Comportamento de tintas térmicas no exterior

Li et al. (2020) refere que as superfícies exteriores com tintas térmicas de elevada refletância solar e emitância podem reduzir significativamente a quantidade de calor absorvido pelo edifício, apresentando uma solução de arrefecimento passivo de elevado desempenho e de baixo custo.

Durante o dia, a elevada refletância reduz a absorção da radiação solar, enquanto à noite, a elevada emitância irradia o calor do edifício por radiação infravermelho. Tal resulta numa diminuição da temperatura das superfícies e das necessidades energéticas de arrefecimento (Xu et al., 2024).

De acordo com os valores tabelados na norma ASTM G173-03 (ASTM, 2020) a radiação infravermelha apresenta aproximadamente 52% da radiação solar (Figura 2.7). Desta forma, com o uso de tintas térmicas, a substituição dos pigmentos coloridos convencionais, que tendem a absorver a radiação no infravermelho próximo, por pigmentos refletantes que refletem esta radiação, permite o desenvolvimento de tintas que possuem cor semelhante, mas com maior refletância solar (Cozza et al., 2015).

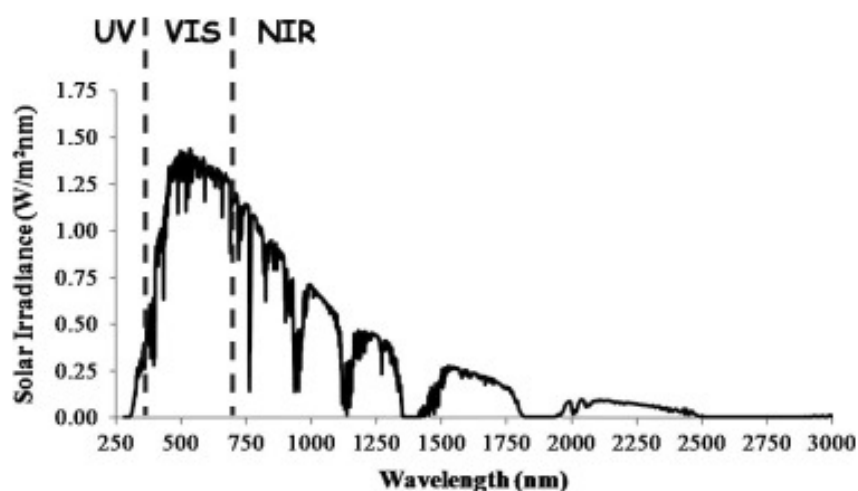


Figura 2.7- Distribuição espectral da irradiância solar terrestre de acordo com a norma ASTM G173-03 (Cozza et al., 2015).

No estudo de Cozza et al. (2015) a substituição de pigmentos convencionais por pigmentos refletantes em tintas pretas e cinza permitiu um aumento de 30% da refletância solar. Já no estudo de Shen et al. (2011) avaliou-se a temperatura superficial das paredes no exterior com uma tinta convencional e tintas térmicas de cor azul claro. Atingiu-se um aumento da refletância de 32% para 61%, e as superfícies das paredes apresentaram temperaturas mais baixas, com uma redução máxima na parede oeste que atingiu uma diferença de 19,9 °C.

Segundo Santamouris e Yun (2020), a diminuição da temperatura das superfícies contribui para mitigar o sobreaquecimento urbano, uma vez que a diminuição da diferença de temperatura da superfície e da temperatura ambiente, diminui a libertação de calor sensível na atmosfera.

Gonçalves (2014) aplicou tintas térmicas sobre uma solução de revestimento do tipo ETICS e verificou que o sistema de pintura permitiu baixar consideravelmente as temperaturas das superfícies, verificando a maior diferença de temperatura superficial entre uma tinta refletante e convencional de cor preta com um valor de 11°C. Concluiu que a diminuição da temperatura superficial obtida permitiu diminuir o risco da perda das propriedades isolantes do sistema ETICS, garantindo a durabilidade do sistema.

Em termos de consumos energéticos, a eficiência das tintas térmicas varia consoante as soluções construtivas do edifício e das condições climáticas do local em que se situa. Em regiões de clima quente as necessidades energéticas de arrefecimento podem diminuir consideravelmente; no entanto, em condições de poupança energética anual pode ser reduzido ou até penalizador.

A elevada refletância solar da superfície em condições de inverno diminui os ganhos térmicos do edifício, o que resulta num aumento das necessidades energéticas de aquecimento. No caso de um edifício numa região com condições de inverno rigorosas, o aumento de consumos energéticos para aquecimento pode ser muito elevado (Shi e Zhang, 2011).

Shi e Zhang (2011) mediram os consumos energéticos de um edifício alterando a refletância solar e a emitância das superfícies exteriores em vários climas, utilizando o programa de simulação EnergyPlus. Nos climas tropicais e subtropicais, a elevada refletância solar e elevada emitância são as mais favoráveis à poupança de energia dos edifícios; nos climas de planalto montanhoso e nos climas subárticos, são a baixa refletância solar e baixa emitância, e nos climas continentais temperados e marítimos temperados, a refletância média e a baixa emitância são benéficas. Concluiu-se que em climas muito quentes ou muito frios a refletância solar e emitância das superfícies exteriores apresentam potencial para a redução de consumos energéticos, enquanto em clima ameno tem um potencial limitado.

No caso dos sistemas construtivos das envolventes exteriores, a resistência térmica das envolventes varia a influência das tintas térmicas, tendo um efeito mais substancial em sistemas com menor resistência térmica, ou seja, com menos isolamento térmico. No estudo de Souza et al. (2024), avaliou-se por análise numérica a redução da temperatura superficial de um sistema de isolamento térmico exterior com acabamento de elevada refletância em diferentes zonas climáticas em Portugal. Concluiu-se que um equilíbrio entre a resistência térmica

e a refletância é fundamental para alcançar temperaturas superficiais mais baixas e consequentemente uma redução das necessidades energéticas de arrefecimento.

Na Tabela 2.1 apresenta-se uma síntese de estudos ainda não mencionados os devidos métodos de avaliação e os resultados obtidos com aplicação de tintas térmicas no exterior.

Tabela 2.1- Síntese de estudos de avaliação de tintas térmicas no exterior.

Referências	Avaliação	Resultados
Shen et al. (2011)	Medição da temperatura superficial interior e exterior em dois edifícios idênticos em Xangai, com aplicação de tinta refletante num edifício e outro com tinta convencional. Avaliação dos consumos energéticos nos dois edifícios, para manter uma temperatura do ar interior a 24°C num dia típico de verão e inverno.	Dependendo da estação e orientação, as temperaturas superficiais no exterior e no interior podem ser reduzidas em até 20 °C e 4,7 °C. No edifício com tintas refletantes ocorreu uma redução dos consumos energéticos no dia de verão com valor de 2,62 kWh e no dia do inverno um aumento de 2,55 kWh.
Dias et al. (2014)	Avaliação da temperatura superficial interior do telhado e da fachada e dos consumos energéticos de edifícios em Portugal, com tintas convencionais ou tintas térmicas aplicadas no exterior, utilizando o programa de simulação ESP-r.	No verão, o aumento da refletância solar do telhado e da fachada de 50% para 92%, diminui a temperatura superficial interior entre 2,0 °C e 4,7 °C na construção sem isolamento térmico, e entre 1,2 °C e 3,0 °C na construção com isolamento térmico. Com as tintas térmicas as necessidades energéticas de arrefecimento são praticamente nulas, mas as necessidades energéticas de aquecimento aumentaram 30%.
Guo et al. (2017)	Medição da temperatura superficial no interior de paredes a sul de dois quartos construídos na cobertura de um edifício na Universidade de Nanchang, com o uso de tinta térmica ou tinta convencional.	No verão, a temperatura superficial interior da sala com tinta térmica estava com temperaturas mais baixas com um valor máximo de 4,32 °C
Chaowanapanit et al. (2021)	Medição das temperaturas superficiais exteriores e interiores e consumos energéticos de duas casas idênticas localizadas na Tailândia, aplicando com tinta térmica no exterior e a outra com tinta convencional. Avaliação dos consumos energéticos no programa EnergyPlus para efeitos comparativos.	A tinta térmica permitiu temperaturas superficiais no exterior e no interior mais baixas no máximo em 8,1°C e 4,3°C e poupanças energéticas de 31,2%. No EnergyPlus, o uso de tintas térmicas permite poupanças energéticas de 32,7%.

2.6 Comportamento de tintas térmicas no interior

As tintas térmicas de baixa emitância e elevada refletância no infravermelho médio apresentam dois mecanismos que proporcionam a redução dos consumos energéticos dos edifícios (Zhang et al., 2022).

No cenário de verão, os revestimentos de baixa emitância reduzem as transferências de calor das superfícies interiores para os ambientes interiores, o que permite uma diminuição das necessidades energéticas de arrefecimento. Observando a Figura 2.8, esta apresenta um painel de aço a uma temperatura de 125°F ($\cong 51,7^\circ\text{C}$) pintado com tinta térmica no lado esquerdo e tinta convencional no lado direito. Verifica-se que a aplicação de tinta térmica na superfície permitiu uma diminuição da radiosidade da parede, o que permite uma menor libertação de calor por radiação para o ambiente (Hugo, 2000).

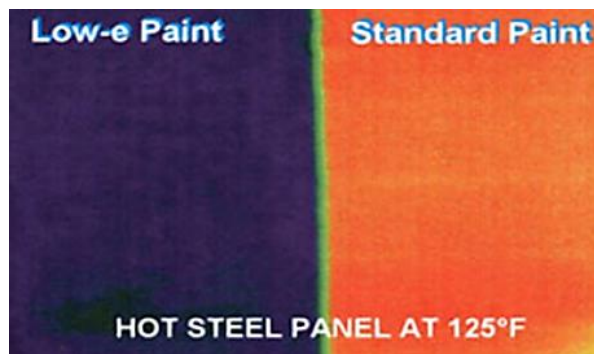


Figura 2.8- Imagem termográfica de um painel de aço quente com tinta térmica (lado esquerdo) e tinta convencional (lado direito) (Hugo, 2000).

No cenário de inverno, as superfícies refletantes de infravermelho médio absorvem menos radiação proveniente de equipamentos, dos ocupantes e das superfícies interiores, diminuindo as perdas de calor por radiação no ambiente interior. Desta forma, as tintas térmicas permitem diminuir as necessidades energéticas de aquecimento. Na Figura 2.9, o lado direito da parede atrás do aquecedor é pintado com uma tinta térmica, que reflete parte do calor de volta para a sala, ocorrendo menos perdas de calor pela parede por condução (Hugo, 2005).

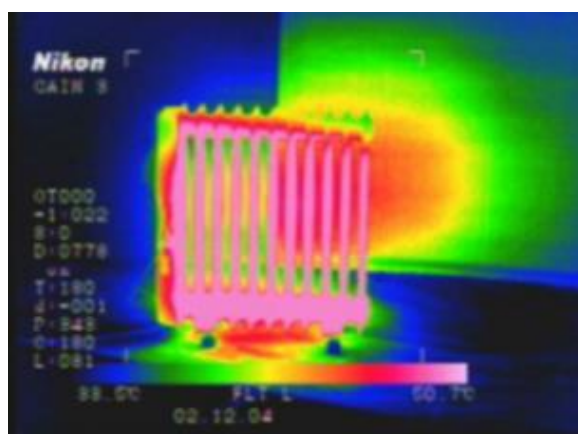


Figura 2.9- Imagem termográfica de um aquecedor junto a uma parede com tinta térmica (lado direito) e tinta convencional (lado esquerdo) (Hugo, 2005).

As câmaras termográficas medem a radiosidade da parede no infravermelho médio, ou seja, no caso de superfícies refletantes da radiação no infravermelho médio e baixa emitância,

o vermelho que se apresenta nas imagens termográficas não é devido à temperatura da superfície ser muito mais elevada, mas pela maior radiação refletida pela parede.

Buckmaster e Abramson (2015), através de simulações de dinâmica de fluidos computacional (CFD), examinaram os efeitos de elevada e baixa emitância da superfície interior de uma sala, considerando a sala com infiltrações de ar ou estanque. A poupança energética mais elevada apresentou um valor de 20% e ocorreu quando as infiltrações e as perdas de ar condicionado foram consideradas e as superfícies tinham baixa emitância.

Sharkawi e Baharun (2016) mediram a temperatura superficial e do ar no interior de duas salas idênticas localizadas na Malásia, com a aplicação de tinta térmica nas superfícies interiores numa sala e a outra com tinta convencional. As tintas térmicas permitiram uma redução da temperatura do ar no interior em cerca de 1,9°C e uma redução da temperatura superficial em todas as paredes, com a maior redução na parede oeste com um valor de 2,8°C.

Simpson et al. (2019) mediram, através de um emissómetro a emitância de seis tintas térmicas com aditivos e cargas isolantes. A tinta térmica com aerogel e microesferas de vidro dispersas num polímero elastomérico foi a que apresentou maior espessura e menor emitância, com valor de 0,76, enquanto as restantes tintas térmicas apresentaram valores entre 0,86 e 0,89. Também investigaram o desempenho térmico de tintas térmicas e compararam com revestimentos interiores convencionais, chegando à conclusão que o aumento da resistência térmica das tintas térmicas numa parede de alvenaria sem isolamento foi entre 0,6 e 1,8%. Por simulação numérica investigaram os consumos energéticos em edifícios com revestimentos com as diferentes tintas térmicas com determinada espessura, emissividade e resistência térmica, chegando a poupanças energéticas entre 0,4% e 2,9%.

Malz et al. (2020) investigaram as possíveis economias de energia de um quarto com tintas térmicas aplicadas no interior utilizando o programa de simulação COMSOL Multiphysics. Os resultados mostraram que a tinta de parede refletiva infravermelha pode diminuir os consumos energéticos entre 18% e 22%. Concluíram que a combinação do isolamento interior com tintas refletivas nas paredes pode promover poupanças energéticas e o aumento do conforto no interior.

Joudi et al. (2013) investigaram os consumos energéticos em três células (pequenos edifícios) na Suécia com uma das células com tinta térmica nas superfícies interiores, a segunda com tinta térmica nas superfícies interiores e exteriores e a terceira com tinta convencional em ambas as superfícies. Através de um programa de simulação também investigaram os consumos energéticos para comparação com os dados experimentais e avaliaram em diferentes zonas climáticas, cargas internas e ventilação. Concluíram que os revestimentos refletores no interior contribuíram a poupanças energéticas de aquecimento, mas podem não contribuir para o arrefecimento quando se considera uma carga interna mais elevada. O interior refletor foi uma boa solução para climas mais frios e o exterior refletor foi melhor para climas mais quentes; a combinação de interior e exterior refletores resultou no melhor desempenho térmico para os climas mais amenos.

Peng et al. (2023) avaliaram os consumos energéticos de um apartamento em diferentes zonas climáticas nos Estados Unidos com aplicação de tintas térmicas no interior e exterior das paredes. A avaliação foi feita através do programa de simulação EnergyPlus, e concluíram que para as diferentes zonas climáticas, o uso de tintas térmicas no interior e exterior permitiu poupanças energéticas até 7,4%.

2.7 Durabilidade das características de tintas térmicas

Para a avaliação da durabilidade de revestimentos de fachada é necessário investigar como os mecanismos de degradação, acionados por agentes atmosféricos, contribuem para a deterioração em termos visuais e em nível de desempenho higrotérmico e mecânico (Naia, 2019).

Ao longo do tempo, os efeitos de envelhecimento como a exposição à radiação UV, variações de temperatura, chuva e humidade relativa, e os efeitos de sujidade, assim como o crescimento microbiológico e deposição de aerossóis atmosféricos, provocam alterações na cor e a diminuição da refletância das tintas (Castellani et al., 2024).

Desta forma, têm sido desenvolvidos estudos para avaliar como as características das tintas se alteram ao longo do tempo quando expostas no exterior. Têm também sido formulados sistemas de pintura com adição de cargas ou camadas protetoras, de modo a aumentar a resistência dos sistemas de pintura aos agentes atmosféricos.

No estudo de Ramos et al. (2020), avaliou-se a degradação natural da cor de acabamentos pretos e vermelhos com ou sem pigmentos refletantes em sistemas ETICS durante dois anos. Com a exposição das amostras no exterior, ocorreu uma alteração da cor de todas amostras, mas insuficiente para ser perceptível pelo olho humano. As amostras com pigmentos refletantes apresentaram uma menor degradação, concluindo-se que o uso de pigmentos refletantes promoveu a durabilidade e o desempenho térmico sem interferir nas características estéticas.

Naia (2019) avaliou a refletância solar, a cor e a temperatura superficial de sistemas de isolamento térmico pelo exterior com sistemas de pintura expostos no exterior num período de 3 anos. Os sistemas de pintura utilizados foram de cor preta e branca e são constituídos por um primário sob uma camada de tinta com ou sem pigmentos refletantes. Conclui-se que os sistemas de pintura com pigmentos refletantes (TiO_2) apresentaram uma menor diferença de cor e refletância, e foram os que apresentaram temperaturas superficiais mais baixas.

Giuseppe et al. (2023) investigaram o desempenho de tintas refletantes constituídas por microesferas de vidro após os sistemas de pintura estarem expostos ao ar livre no verão em Itália. As tintas foram aplicadas em substratos com diferentes rugosidades e verificou-se que, tanto nas tintas convencionais como nas tintas refletantes a refletância diminuiu, mas com maiores diferenças nas tintas convencionais. Nas tintas refletantes o substrato com menor rugosidade apresentou a maior redução da refletância, com um valor de 14%.

No estudo de Castellani et al. (2024), investigou-se como interfere a refletância em sete amostras de tintas refletantes com a adição de uma camada protetora. Inicialmente, foram adicionadas as microesferas esferas de vidro nas tintas refletantes para aumentar a durabilidade das tintas e avaliar a interferência na refletância das tintas (Cardinali et al., 2022). No entanto, devido aos agentes atmosféricos e da sujidade, algumas esferas de vidro podem se desprender da tinta. Desta forma, foi avaliada a refletância das tintas com uma camada de um acabamento protetor transparente à base de água com polímeros acrílicos. Verificou-se que o uso da camada protetora permitiu um ligeiro aumento da refletância da tinta com microesferas de vidro, de um valor de 76% para 77,6%.

2.8 Síntese

Pela revisão da literatura, confirma-se a predominância do estudo de tintas térmicas aplicadas no exterior e das possíveis contribuições para um melhor desempenho térmico dos edifícios. As tintas térmicas pelo exterior podem apresentar poupanças nos consumos energéticos dos edifícios, que variam consoante os ganhos solares presentes na zona climática e da resistência térmica das soluções construtivas do edifício. Para além das possíveis poupanças energéticas, as tintas térmicas apresentam as seguintes vantagens resultantes da redução da temperatura superficial das paredes no exterior:

- redução do efeito ilha de calor urbano;
- proteção de sistemas de isolamento térmico pelo exterior;
- possibilidade do uso de tintas com cores escuras no exterior;
- maior durabilidade da cor e da refletância das tintas.

Relativamente à sua aplicação no interior, e de acordo com a literatura, as tintas térmicas comportam-se como uma superfície isolante à radiação, reduzindo as perdas por radiação no ambiente interior. A eficiência das tintas térmicas no interior, varia com a resistência térmica das soluções construtivas do edifício, da zona climática, da carga térmica interna e da ventilação no interior.

No interior as tintas têm apresentado melhor desempenho térmico para climas frios e com maior ventilação e contribuído para a poupança energética de aquecimento, mas podem não contribuir para poupanças energéticas de arrefecimento para cargas internas mais elevadas.

Consoante a transmissão de radiação das superfícies podem provocar ou evitar problemas de condensações superficiais. As tintas térmicas de elevada emitância e refletância, apresentam uma menor temperatura superficial em comparação com as tintas convencionais, o que promove a ocorrência de condensações superficiais no interior.

Para a avaliação do comportamento das tintas térmicas, numa primeira fase são realizados provetes para ensaio laboratoriais, em que são determinadas a emitância e a refletância das tintas. Numa segunda fase, são realizados ensaios *in situ* e/ou programas de simulação para avaliação do desempenho térmico das tintas térmicas e possíveis poupanças energéticas.

Os ensaios *in situ* são efetuados através da aplicação das tintas térmicas e convencionais em células experimentais ou em compartimentos idênticos de um edifício. Utilizando-se câmaras termográficas, termopares e fluxímetros para a avaliação da temperatura superficial no interior e exterior e o fluxo de calor existente nos elementos construtivos.

Nos programas de simulação, são avaliados a aplicação das tintas térmicas em condições semelhantes em que foram aplicadas nos ensaios *in situ*, o que permite a comparação dos resultados dos dois ensaios. Os programas de simulação são correntes para a avaliação dos consumos energéticos de edifícios, sendo o programa EnergyPlus o mais utilizando.

CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 Contextualização da campanha experimental

Tal como referido no capítulo 1, a campanha experimental efetuada na presente dissertação baseia-se na continuação do estudo de Assane (2023), relativamente ao estudo da eficiência de tintas térmicas em aplicação nas superfícies interiores e exteriores de paredes da envolvente de edifícios.

Assane (2023) realizou uma análise de mercado sobre tintas térmicas e convencionais para aplicação no interior e no exterior de edifícios, comercializadas em Portugal. Foram obtidas, através de duas empresas, amostras de tintas térmicas e convencionais e primários térmicos e convencionais, sendo estes os materiais utilizados para a formulação de sistemas de pinturas em estudo.

No presente capítulo, apresenta-se a descrição dos sistemas de pintura e métodos de ensaios experimentais realizados no LNEC para avaliar o desempenho das tintas térmicas na estação de arrefecimento (Assane, 2023). De seguida, apresenta-se a continuação da avaliação do desempenho das tintas térmicas na estação de aquecimento, realizada na presente dissertação.

Na estação de arrefecimento foi realizada a avaliação experimental numa célula experimental (pequeno edifício) localizada no LNEC, com a aplicação de sistemas de pintura com tintas térmicas e convencionais no revestimento interior das paredes oeste e norte, e analisou-se a temperatura superficial através de termopares instalados nas paredes. Os sistemas de pintura com tintas térmicas foram também aplicados no exterior da mesma célula experimental e avaliado o seu desempenho térmico através de termografia de infravermelhos. Também foi realizado um procedimento laboratorial para a obter a refletância de diferentes sistemas de pintura (Assane, 2023).

Na campanha experimental desenvolvida na estação de aquecimento, também foi analisada a temperatura superficial dos revestimentos interiores das paredes da célula

experimental através dos referidos termopares. Foi também realizado um ensaio laboratorial para caracterizar a emitância dos sistemas de pintura.

A análise das temperaturas superficiais dos revestimentos interiores foi efetuada considerando o ambiente interior sem aquecimento e com aquecimento, nesse caso definindo uma temperatura constante no ambiente interior.

No ensaio laboratorial para quantificar a refletância de sistemas de pintura de tintas térmicas e convencionais, os respetivos sistemas foram aplicados em provetes de membrana de betume-polímero para suporte no equipamento de medição (Assane, 2023). Através de ensaio de espectrofotometria foi determinada a refletância dos provetes. Estes mesmos provetes foram também utilizados na realização de outro ensaio laboratorial para quantificar a emitância de cada sistema de pintura através do uso de um emissómetro.

3.2 Características das tintas

Como já foi referido, Assane (2023) obteve amostras de tinta térmicas e primário térmico através de duas empresas, sendo apresentadas na Tabela 3.1, Tabela 3.2 as principais características das amostras analisadas neste estudo. As empresas neste documento, tal como no estudo anterior, são denominadas por Empresa 1 e Empresa 2, e seguem as mesmas nomenclaturas das amostras de tintas utilizadas anteriormente.

Tabela 3.1- Amostra de tinta térmica fornecida pela Empresa 1 (Assane, 2023).

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

Tabela 3.2- Amostras de tinta e primário térmico fornecidas pela Empresa 2 (Assane, 2023).

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

Para uma análise comparativa do desempenho térmico dos sistemas de pintura com tintas térmicas, estes são comparados com o desempenho de sistemas de pintura com tinta e primário convencional fornecidos pela Empresa 1 apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Amostras de tintas e primários convencionais fornecidas pela Empresa 1 (Assane, 2023).

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

Para a avaliação das características das tintas térmicas e tintas convencionais, analisou-se as fichas técnicas fornecidas pelos fabricantes das respectivas tintas, desenvolvendo uma análise comparativa entre as tintas térmicas e convencionais com base na informação das respectivas fichas técnicas. A Tabela 3.4 apresenta a análise efetuada com as principais características das tintas (Assane, 2023).

Tabela 3.4- Principais características de tintas térmicas e convencionais (adaptado de Assane, 2023).

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%	Isolamento térmico. Reduz os gastos energéticos, reduzindo os custos com a climatização. Retarda a propagação do frio no interior dos materiais. Reduz o fenómeno de Ilha de Calor Urbano.
Tinta térmica 2 (BrT2)	Interior.	Airless. Rolo. Trincha. 3 m ² /l em duas demãos.	ND	ND	Classe A+. Redução de custos. Isolamento térmico. Eliminação de pontes térmicas. Redução da perda de calor a partir do interior para fora.
Tinta térmica 3 (BrT3)	Exterior	Pincel. Rolo. Spray. 2,5 m ² /l em duas demãos	ND	ND	Redução da perda de calor a partir do interior para fora. Redução de custos. Isolamento térmico. Eliminação de pontes térmicas.

ND - Não definido na ficha técnica

Pela análise das fichas técnicas, as tintas térmicas apresentam, em comum, a referência a vantagens em termos de redução dos consumos energéticos e aumento de isolamento térmico das paredes. A tinta térmica 1 (BrT1) é a única caracterizada pela refletância e emitância com valores de 0,9 e 0,85, respetivamente.

Relativamente, às tintas comercializadas pela empresa 2 (BrT2, BrT3 e PrT), o documento apresenta a indicação da sua constituição com microesferas cerâmicas e a tinta térmica BrT1, comercializada pela empresa 1, apenas indica que é constituída por microesferas

encapsuladoras de ar. Como já foi referido no capítulo anterior, as microesferas cerâmicas são um dos componentes utilizadas frequentemente em tintas térmicas por serem caracterizadas por baixa condutibilidade térmica e elevada refletância no infravermelho.

3.3 Avaliação laboratorial

3.3.1 Provetes

Para a concretização dos ensaios laboratoriais, foram efetuados onze provetes com dimensões $0,10\text{ m} \times 0,10\text{ m}$, através do corte de um rolo de membrana de betume-polímero produzido para sistemas de impermeabilização (Assane, 2023). Nestes provetes foram aplicadas as tintas térmicas e a tinta convencional, sem aplicação de primário e com várias combinações entre o primário térmico e convencional com as respetivas tintas térmicas e convencional (Assane, 2023).

Para a identificação dos sistemas de pintura utilizados nos provetes, utiliza-se a seguinte notação PrX+BrTY, em que PrX representa os primários que pode ser térmico PrT ou convencional PrN, e BrTY representa as tintas térmicas que podem ser a 1, 2 ou 3 (BrT1, BrT2 ou BrT3). Na Tabela 3.5 apresenta-se a descrição dos provetes e a sua respetiva zona de aplicação (Assane, 2023).

Tabela 3.5- Identificação dos provetes e zona de aplicação (adaptado de Assane, 2023).

Provetes	Descrição	Aplicação
PrN	Primário Convencional	Interior/Exterior
PrT	Primário Térmico	Interior/Exterior
BrC	Tinta Branca Convencional	Interior/Exterior
PrN + BrC	Primário Convencional + Tinta Branca Convencional	Interior/Exterior
PrT + BrC	Primário Térmico + Tinta Branca Convencional	Interior/Exterior
BrT1	Tinta Branca Térmica 1	Interior/Exterior
PrN+ BrT1	Primário Convencional + Tinta Branca Térmica 1	Interior/Exterior
BrT2	Tinta Branca Térmica 2	Interior
PrT + BrT2	Primário Térmico + Tinta Branca Térmica 2	Interior
BrT3	Tinta Branca Térmica 3	Exterior
PrT + BrT3	Primário Térmico + Tinta Branca Térmica 3	Exterior

3.3.2 Avaliação da refletância

Para determinar a refletância dos sistemas de pintura dos provetes foi utilizado o espectrofotómetro HITACHI U-3300 (Figura 3.1) do Núcleo de Materiais Orgânicos (NMO) do Departamento de Materiais do LNEC (Assane, 2023). Este ensaio permitiu determinar a refletância total dos provetes nas regiões de parte ultravioleta (UV), do visível (VIS) e do infravermelho próximo (NIR) de acordo com a norma ASTM E 903-12 (ASTM, 2012).



Figura 3.1- Espectrofotômetro HITACHI U-3300 (Assane, 2023).

Com o uso do espectrofotômetro, foi possível analisar a refletância dos provetes para a radiação com comprimento de onda entre 190 nm e 1100 nm . No entanto, apenas se considerou a análise da refletância no intervalo 300 nm e 900 nm , de modo a evitar a presença de ruído excessivo que se apresentava no comprimento de onda inferior a 300 nm e superior a 900 nm (Assane, 2023).

3.3.3 Avaliação da emitância

Para determinar a emitância dos sistemas de pintura, os provetes foram enviados para a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). O ensaio foi realizado utilizando um emissômetro comercial portátil modelo AE1/RD1 da *Devices and Services* (Figura 3.2). Este ensaio permite determinar a emitância de superfícies planas e os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM C1371-15 (ASTM, 2022).

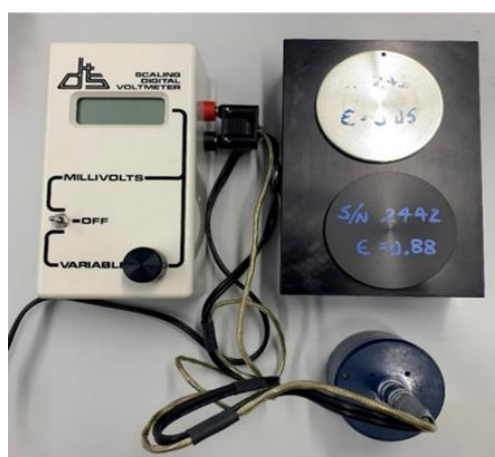


Figura 3.2- Emissômetro portátil modelo AE1/RD1 (crédito Rita Veloso).

Este equipamento apresenta um processo fácil de utilização e com rapidez na obtenção de valores (após um aquecimento inicial de trinta minutos, os valores de emitância podem ser obtidos a cada minuto e meio) (Devices and Services, 2024).

Para a correta medição de diferentes superfícies das amostras, existe quatro adaptadores que podem ser utilizados (AD1, AD3, ADP e Adaptador personalizado), disponíveis para medição de amostras de pequena área e adaptadores personalizados para amostras com geometrias de superfícies irregulares (Devices and Services, 2024).

O ensaio resulta num emissor quente e dois detetores térmicos do tipo termopilha. Os dois detetores apresentam emitâncias conhecidas, apresentando-se um coberto com um revestimento preto com uma emitância de 0,88, e o outro coberto com um revestimento refletante com emitância de 0,05.

Antes de dar início ao ensaio é necessário calibrar o equipamento, sendo utilizado duas amostras circulares com emitância idêntica aos detetores térmicos (Figura 3.2). O procedimento de calibração realizou-se novamente antes da medição de cada provete avaliado.

O emissor foi aquecido com temperatura conhecida, de modo a ter uma diferença de temperatura adequada entre o detetor e a superfície. Através das termopilhas, mediu-se a diferença de temperatura entre as zonas de alta e baixa emitância.

3.4 Avaliação em condições reais

3.4.1 Célula experimental

A avaliação em condições reais de utilização decorreu numa célula experimental localizada no campus do LNEC (Figura 3.3). A célula experimental foi construída no âmbito da realização da tese de doutoramento desenvolvida por Pina dos Santos (1993) que construiu três células com as mesmas características geométricas e construtivas, com exceção do espaço intermédio das paredes duplas, preenchidos com diferentes soluções de isolamento térmico granular.



Figura 3.3- Célula experimental.

As células experimentais apresentam dimensões externas de $3,68\text{ m} \times 3,68\text{ m}$ e um pé-direito de $2,45\text{ m}$. As principais características geométricas e construtivas da célula

experimental original, que posteriormente foi estudada nesta dissertação são as seguintes (Pina dos Santos, 1993):

- Paredes exteriores: paredes duplas com panos de alvenaria simples de tijolo cerâmico $30\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 11\text{ cm}$, assentes a 1/2 vez ($e = 0,11\text{ m}$); espaço de ar entre panos de $0,05\text{ m}$ preenchido com regranulado de cortiça expandida e com revestimento exterior e interior constituído por argamassas com espessura de $0,015\text{ m}$.
- Cobertura: cobertura inclinada de duas águas, constituída por chapas metálicas nervuradas, pintadas na cor da telha cerâmica. Assentes por madres de madeira e sobre um desvão fracamente ventilado com altura máxima de $0,66\text{ m}$; esteira constituída por vigotas prefabricadas de betão, blocos de cofragem cerâmicos e camada de betão complementar, apresentando uma espessura total da laje de $0,15\text{ m}$.
- Pavimento: pavimento térreo constituído por massame de betão simples com espessura de $0,10\text{ m}$.

Contudo, devido ao desenvolvimento de outros trabalhos na célula experimental, têm sido efetuadas alterações na solução construtiva das paredes. No desenvolvimento do trabalho de Assane (2023), através de janelas translúcidas presentes no pano interior, foi removido o regranulado de cortiça expandida que se apresentava na caixa de ar da parede norte e oeste e, posteriormente, foram fechadas essas janelas com placas de poliestireno expandido moldado (EPS). Esta alteração foi feita para que, na avaliação do desempenho das tintas térmicas no interior, os resultados obtidos apresentassem a influência das tintas térmicas em paredes com menor resistência térmica.

No desenvolvimento do trabalho de Lourenço (2016), aplicou-se ladrilhos cerâmicos de cor branca e preta na parede oeste (Figura 3.4), com o intuito de avaliar o comportamento térmico das duas soluções quanto à deteção de anomalias.



Figura 3.4- Ladrilhos cerâmicos de cor branca e preta no exterior da parede oeste.

3.4.2 Disposição dos sistemas de pintura

Para a realização do ensaio experimental, os sistemas de pintura em estudo foram aplicados nas paredes interiores com orientação a oeste e a norte (Assane, 2023). Tendo em conta a disposição dos ladrilhos cerâmicos no exterior da parede oeste, foram aplicados os sistemas de pintura em três áreas horizontais (Figura 3.5). Desta forma, cada sistema de pintura foi avaliado com a influência térmica de ladrilhos cerâmicos brancos e ladrilhos cerâmicos pretos.

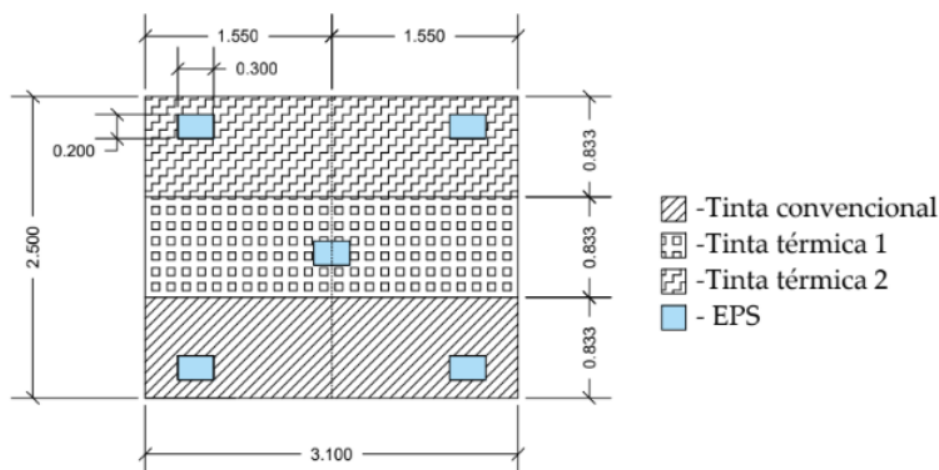


Figura 3.5- Disposição dos sistemas de pintura no interior da parede oeste da célula experimental (Assane, 2023).

Observando a Figura 3.5, verifica-se que na parede oeste foram aplicados três sistemas de pintura sendo estes: a tinta térmica 1 sobre primário convencional (PrN+BrT1), a tinta térmica 2 sobre primário térmico (PrT+BrT2) e a tinta convencional sobre primário convencional (PrN+BrC). Para além da disposição dos sistemas de pintura com as duas tintas e primários, pode-se visualizar a delimitação vertical a meio, que divide as zonas no exterior com ladrilhos brancos (lado esquerdo) e com ladrilhos pretos (lado direito) e as "janelas" com placas de poliestireno expandido, anteriormente utilizadas para a remoção do material isolante presente na caixa de ar das paredes (Assane, 2023).

Na parede norte, os sistemas de pintura foram aplicados em áreas verticais, visto que, toda a parede se apresenta com o mesmo revestimento no exterior (Figura 3.6). Esta parede contém uma janela situada no centro da parede, que foi fechada através da colocação de um bloco de betão com dimensões de $0,84\text{ m} \times 0,9\text{ m}$ e no seu contorno, foram aplicadas placas de poliestireno expandido com espessura de 4 cm (Assane, 2023).

Como representado na Figura 3.6, a parede norte, apresenta, no interior, três áreas verticais com os seguintes sistemas de pintura: tinta térmica 1 sobre primário térmico (PrT+BrT1), tinta térmica 2 sobre primário convencional (PrN+BrT2) e tinta convencional sobre primário convencional (PrN+BrC).

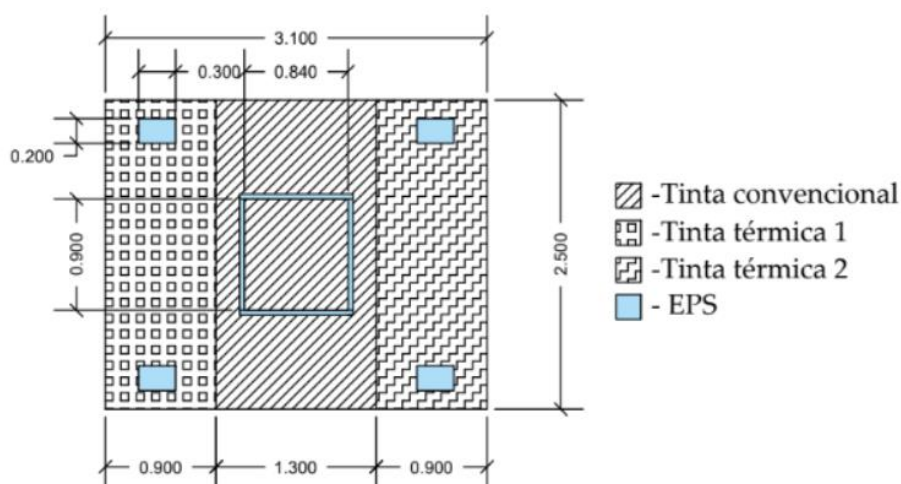


Figura 3.6- Disposição dos sistemas de pintura no interior da parede norte da célula experimental (Assane, 2023).

3.4.3 Registo de dados

Para avaliar o comportamento térmico dos sistemas de tintas térmicas, foi necessário monitorizar a temperatura superficial no interior em todos os sistemas de pintura e as condições higrotérmicas no exterior e no interior da célula experimental.

Para a medição da temperatura superficial, foram colocados termopares do tipo T (cobre-constantan) na superfície das paredes norte e oeste, entre o substrato e os sistemas de pintura (Assane, 2023). De modo a medir a temperatura superficial de todos os sistemas de pintura em estudo, foram utilizados 6 termopares na parede oeste e 7 termopares na parede norte, posicionados da forma representada na Figura 3.7.



Figura 3.7- Posicionamento de termopares no interior da parede oeste (a) e norte (b).

O posicionamento dos termopares pretendeu permitir avaliar todos os sistemas das tintas, nas paredes norte e oeste, tendo em conta que a parede oeste apresenta uma maior

exposição solar, o que permite apresentar maiores ganhos solares nesta parede, ou seja, uma maior transmissão de calor para a sua superfície interior (Assane, 2023).

Na parede oeste, devido à colocação de ladrilhos cerâmicos pretos e brancos, os ganhos solares na parede são diferentes, visto que superfícies escuras apresentam uma maior absorção de radiação solar face às claras. Na parede norte, devido à presença do bloco de betão no centro da parede, a resistência térmica da parede nesta zona é diferente, tendo sido verificado a sua influência pelos dados obtidos neste estudo (Tabela 3.6).

Tabela 3.6- Identificação dos termopares consoante a zona da parede e o sistema de pintura.

Parede		Sistema de pintura	Termopares
Norte	No meio	PrT+BrT1	7
		PrN+BrT2	12
		PrN+BrC	9 e 11
	Em baixo	PrT+BrT1	8
		PrN+BrT2	13
		PrN+BrC	10
Oeste	Ladrilhos Brancos	PrN+BrT1	2
		PrT+BrT2	1
		PrN+BrC	3
	Ladrilhos pretos	PrN+BrT1	5
		PrT+BrT2	4
		PrN+BrC	6

Antes da aplicação dos sistemas de pintura das paredes pelo interior, foi avaliada, durante três dias, a evolução das diferenças de temperatura entre os termopares situados em zonas equivalentes da parede em estudo. Desta forma, foi realizada uma calibração expedita dos termopares utilizando a diferença entre os termopares da mesma zona da parede obtidas no dia 22 de junho de 2023 (Assane, 2023).

Para além de se observarem zonas das paredes com comportamento térmico diferente, durante a realização deste estudo verificou-se que, ao aquecer a célula experimental, o ar no interior apresentava uma estratificação, com um aumento de temperatura à medida que se aproximava do teto.

Para quantificar esta estratificação do ar na vertical foram colocados três termopares identificados por termopar 14, 15 e 16, em três alturas diferentes próximas dos treze termopares anteriormente referidos (Figura 3.8). O prumo onde foram fixados os termopares, foi colocado perto da parede oeste e, depois, da parede norte, não se tendo verificado alterações da estratificação do ar nos dois locais.

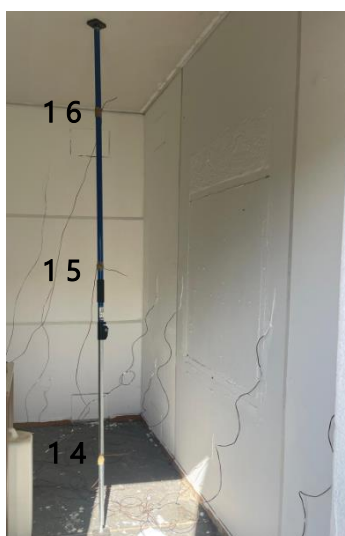


Figura 3.8- Prumo com os termopares 14, 15 e 16.

Com base nas restrições anteriormente referidas, os três sistemas pintura utilizados em cada uma das paredes foram avaliados, tendo em consideração o fluxo de calor e a temperatura do ar a que se apresenta o termopar.

Posteriormente, efetuou-se uma análise comparativa entre os dados obtidos da temperatura superficial dos dois sistemas de pintura com tintas térmicas com o sistema de pintura com tinta convencional, o que permitiu avaliar o desempenho térmico respetivo.

Para a aquisição das medições dos termopares, utilizou-se um *data logger*, que permite registar os valores da temperatura superficial em cada intervalo de 10 minutos, e apresentar os valores médios a cada intervalo de 30 minutos. Para a medição da temperatura e a humidade relativa do ar no interior, recorreu-se a um *hygrolog*, que registou os dados a cada intervalo de 15 minutos (Figura 3.9).



Figura 3.9- Data logger (a) e hygrolog (b).

Com recurso a este sistema de aquisição de dados, foi possível monitorizar o comportamento higrotérmico no interior da célula, e avaliar as variações ao longo do tempo.

De forma a avaliar o desempenho dos sistemas de pintura para diferentes condições ambientais interior, foram utilizados um aquecedor e um termostato para manter a temperatura interior desejada (Figura 3.10).



Figura 3.10- Aquecedor e termostato.

Durante a avaliação do desempenho térmico das tintas com aquecimento, foram introduzidos quatro recipientes com água no interior da célula experimental (Figura 3.11). A colocação dos referidos recipientes teve como objetivo aumentar a humidade relativa no interior, com o intuito de avaliar o comportamento das tintas térmicas em condições ambientais caracterizadas por uma elevada concentração de vapor de água, frequente em espaços pouco aquecidos e com elevada ocupação. Assim sendo, foi analisada ao longo dos dias em estudo, a variação da humidade relativa no interior e visualizou-se a possível ocorrência de condensações superficiais nas paredes interiores nos diferentes sistemas de pintura em estudo.



Figura 3.11- Recipiente com água no interior da célula experimental.

Para se conseguir avaliar como as condições climáticas no local podem interferir no comportamento higrotérmico no interior da célula experimental, recorreu-se a uma estação meteorológica localizada no campus do LNEC, que monitorizou a temperatura, a humidade relativa e a radiação solar no ambiente exterior. Desta forma, foi possível analisar como varia a temperatura superficial dos diferentes sistemas de pintura, consoante a variação da temperatura ao longo do dia no ambiente exterior e interior.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Considerações iniciais

De acordo com o exposto no capítulo anterior, a caracterização e a avaliação do desempenho térmico das tintas térmicas e das tintas convencionais aplicadas no interior e no exterior, foram realizadas através de ensaios laboratoriais e *in situ* em condições quase reais de utilização, numa célula experimental. No presente capítulo, apresentam-se os resultados e a sua respetiva análise, iniciando pela caracterização da refletância e emitância dos sistemas de pintura obtidos em laboratório e, de seguida, a avaliação do desempenho térmico dos sistemas de pintura aplicados no interior da célula experimental.

Na avaliação em condições reais, devido às variações de fluxos de calor que atravessam as paredes da célula experimental, foi efetuada uma análise individual dos resultados obtidos em zonas específicas da parede. Não foram considerados os resultados da temperatura superficial no meio da parede norte, devido à sua diferente constituição (bloco de betão). Assim, serão apresentados os resultados, individualmente, nas seguintes zonas no interior das paredes:

- parede norte em baixo;
- parede oeste com ladrilhos brancos no exterior;
- parede oeste com ladrilhos pretos no exterior.

No interior da célula experimental, foram impostas diferentes condições ambientais interiores para as quais se avaliou o desempenho térmico das soluções, nomeadamente: sem aquecimento no interior e depois aquecendo a uma temperatura constante. Desta forma, o presente capítulo apresenta individualmente os resultados e a respetiva análise nas três zonas das paredes norte e oeste para as diferentes condições referidas.

A avaliação do potencial de tintas térmicas em superfícies interiores realizou-se através da comparação do desempenho térmico e respetivas características das tintas térmicas com as tintas convencionais. Tal permite relacionar os resultados obtidos no ensaio laboratorial com

os obtidos em condições reais, tendo assim um vasto conjunto de resultados resultantes da avaliação experimental das tintas em estudo.

4.2 Avaliação laboratorial

4.2.1 Refletância

Com o uso do espectrofotómetro, obteve-se a refletância dos provetes para a radiação com comprimento de onda no intervalo entre 400 nm e 900 nm (Assane, 2023). Com base nestes valores, foi calculada 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, foi obtida recorrendo à média aritmética dos valores de refletância no intervalo de comprimento de onda desta região espectral (Assane, 2023). Através do procedimento normativo detalhado na ASTM E 903-12 (ASTM, 2012), a refletância total pode ser obtida pela equação 4.1:

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

em que ρ_{total} representa a refletância total e $\rho(\lambda_i)$ a refletância em determinado comprimento de onda λ_i .

Aplicando a equação, obtiveram-se os valores da refletância total na região do visível (400-780 nm) e a refletância total na região do infravermelho próximo (780-900 nm) apresentados na Tabela 4.1 (Assane, 2023).

Tabela 4.1- Refletância na região do visível e infravermelho próximo dos sistemas de pintura analisados (Assane, 2023).

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

Da análise dos valores apresentados na Tabela 4.1, verifica-se que os sistemas de pintura com tintas térmicas apresentam uma refletância superior em comparação com os sistemas

com tinta convencional. Comparando as duas regiões espectrais, pode-se admitir que a refletância na região do infravermelho apresenta valores ligeiramente superiores aos valores obtidos na região do visível para todos os sistemas de pintura. Por fim, tanto o primário térmico como o primário convencional apresentam uma refletância baixa nas duas regiões espectrais.

A análise da refletância na região do visível e na região do infravermelho próximo, permite justificar o desempenho térmico das tintas térmicas no exterior, visto que quase toda a radiação solar se encontra compreendido nestes intervalos de comprimento de onda. Para avaliar o desempenho térmico das tintas térmicas no interior seria necessário obter os valores de refletância para comprimentos de onda na região do infravermelho médio, o que não foi possível medir neste ensaio laboratorial. No entanto, como as tintas térmicas apresentam elevada refletância no infravermelho próximo, admite-se a possibilidade de também apresentarem elevada refletância no infravermelho médio.

4.2.2 Emitância

Como já foi referido no capítulo 3, o ensaio para determinar a emitância dos provetes foi realizado utilizando um emissómetro, que permite determinar a emitância de superfícies planas de acordo com a norma ASTM C1371-15 (ASTM, 2022).

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da emitância obtidos nas três medições e respetivo valor médio e desvio-padrão para cada provete.

Tabela 4.2- Emitância dos sistemas de pintura analisados (por provete, valor médio e respetivo desvio-padrão).

Provetes	Emitância				
	1	2	3	Média	DP
PrN	0,86	0,84	0,88	0,860	0,016
PrT	0,87	0,89	0,90	0,887	0,012
BrC	0,87	0,89	0,86	0,873	0,012
PrN+BrC	0,87	0,87	0,85	0,863	0,009
PrT+BrC	0,86	0,87	0,85	0,860	0,008
BrT1	0,90	0,89	0,87	0,887	0,012
PrN+BrT1	0,90	0,87	0,88	0,883	0,012
BrT2	0,91	0,89	0,90	0,900	0,008
PrT+BrT2	0,92	0,90	0,90	0,907	0,009
BrT3	0,93	0,90	0,91	0,913	0,012
PrT+BrT3	0,90	0,89	0,90	0,897	0,005

Analisando os valores da Tabela 4.2, conclui-se que os sistemas com tintas térmicas apresentam valores de emitância ligeiramente superiores em comparação com os valores obtidos nos sistemas com tinta convencional. Relativamente aos primários, verifica-se que o primário térmico tem uma emitância ligeiramente superior à obtida pelo primário convencional.

Como já referido no capítulo anterior, para melhorar o desempenho térmico de edifícios através das características superficiais das paredes, as superfícies exteriores devem apresentar elevada emitância e as superfícies interiores devem apresentar baixa emitância. As tintas térmicas com aplicação no exterior (BrT1 e BrT3) apresentam uma emitância superior à tinta convencional, ou seja, a aplicação das tintas térmicas permite melhorar o desempenho térmico da envolvente na estação de arrefecimento, visto que permite uma maior transmissão de calor da superfície para o ambiente exterior; também devido à maior reflexão, menor quantidade de calor será absorvida.

No caso das tintas térmicas com aplicação no interior (BrT1 e BrT2), como apresentam uma emitância ligeiramente superior à tinta convencional, o seu uso pode afetar ligeiramente o desempenho térmico da envolvente, visto que, para valores superiores da emitância nas superfícies interiores, devem apresentar temperaturas superficiais mais baixas. Para temperaturas interiores mais reduzidas podem aumentar o risco de ocorrer condensações na superfície.

Contudo, como os valores de emitância obtidos nos sistemas de pintura com tintas térmicas não apresentam diferenças significativas em comparação com os sistemas com tinta convencional, considera-se para todos os sistemas estudados, à semelhança dos materiais correntes, um valor de emitância próximo a 0,9. Desta forma, a emitância dos sistemas com tinta térmica estudados, aparenta ser um parâmetro com pouca influência na alteração do comportamento térmico das superfícies das paredes.

4.3 Avaliação em condições reais

O procedimento para a análise do comportamento térmico dos sistemas de pintura na estação de aquecimento foi realizado considerando diferentes condições ambientais criadas (cenários) na célula experimental. Este procedimento iniciou-se com condições ambientais sem aquecimento no interior e, de seguida, aquecendo a célula a uma temperatura constante.

Foram aplicadas diferentes temperaturas no interior aproximadamente constantes entre 19°C e 24°C. Desta forma, foi possível analisar o comportamento das tintas térmicas no interior para cargas térmicas internas diferentes, resultantes da temperatura interior e das trocas de calor por radiação térmica proveniente do aquecedor e das superfícies interiores da célula experimental.

Para entender o comportamento térmico das tintas, foram relacionados os resultados da temperatura superficial dos sistemas de pintura com tintas térmicas e convencional, para as diferentes condições ambientais, interior e exterior, da célula experimental.

Em geral, na estação de aquecimento, as tintas apresentam um comportamento térmico semelhante para os diferentes cenários avaliados. Desta forma, inicialmente será apresentada a análise efetuada para a compreensão do comportamento térmico dos sistemas de pintura com as tintas térmicas e com as tintas convencionais ao longo de um dia típico da estação de aquecimento.

De seguida, apresenta-se, em cada cenário considerado (com ou sem aquecimento), as diferenças máximas de temperatura verificadas entre as tintas térmicas e a tinta convencional, em três dias consecutivos para as três zonas das paredes consideradas (parede norte e parede oeste, nas zonas de ladrilhos brancos e pretos).

Da análise da evolução da temperatura superficial das tintas térmicas e das tintas convencionais ao longo de um dia, verificou-se que as tintas térmicas BrT1 e BrT2 apresentam temperaturas inferiores à tinta convencional BrC (Figura 4.1).

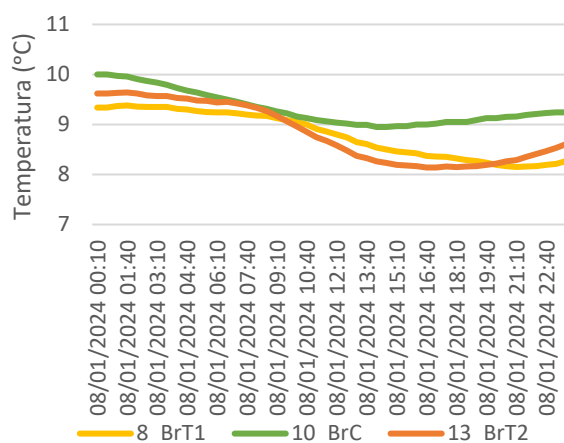


Figura 4.1- Temperatura das tintas BrT1, BrT2 e BrC na parede norte ao longo de um dia de janeiro de 2024.

No caso do exemplo do dia 8 de janeiro de 2024 na parede norte, pode-se visualizar, através do gráfico da Figura 4.1, a variação da temperatura dos sistemas de pintura com tintas térmicas e com tinta convencional, em que se verifica que, ao longo do dia, as tintas térmicas BrT1 e BrT2 apresentam temperaturas sempre inferiores à tinta convencional BrC.

Analisando a evolução da diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional, verifica-se que a maior diferença observada, entre os diferentes tipos de tintas, se apresenta ao final do dia e a menor diferença durante a manhã. Este comportamento é semelhante para os diferentes cenários analisados neste estudo, constatando-se que as maiores diferenças de temperatura, entre as tintas térmicas e a tinta convencional, se apresentam por volta das 20 h e as 24 h e as menores diferenças entre as 8 h e as 12 h (Figura 4.2). A amplitude das diferenças, mínimas e máximas, vão depender das condições ambientais consideradas.

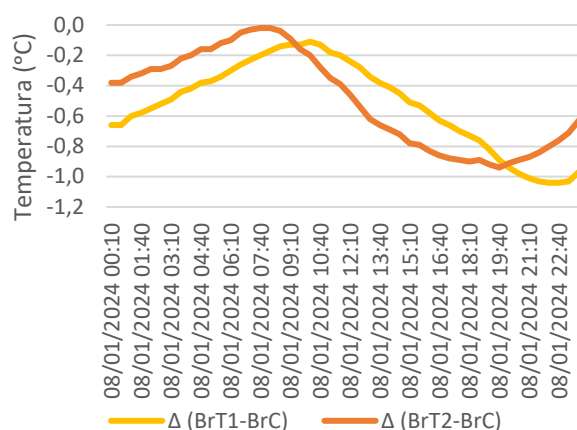


Figura 4.2- Diferenças entre as tintas térmicas e a tinta convencional ao longo de um dia de janeiro de 2024.

Para explicar este comportamento, analisando a evolução diária da temperatura exterior e da temperatura superficial interior das tintas, verifica-se que, devido a inércia térmica das paredes da célula experimental, a propagação de calor da superfície exterior para a interior apresenta um desfasamento temporal.

No exemplo dos resultados obtidos nos dias 7 e 8 de janeiro de 2024 na parede norte (Figura 4.3), pode-se confirmar este fenómeno através da visualização do valor máximo da temperatura exterior que decorre à tarde pelas 16h com valor de 15,9°C, e pelas temperaturas máximas das tintas atingidas por volta das 23 - 24 h, com valor máximo de 10°C na tinta convencional.

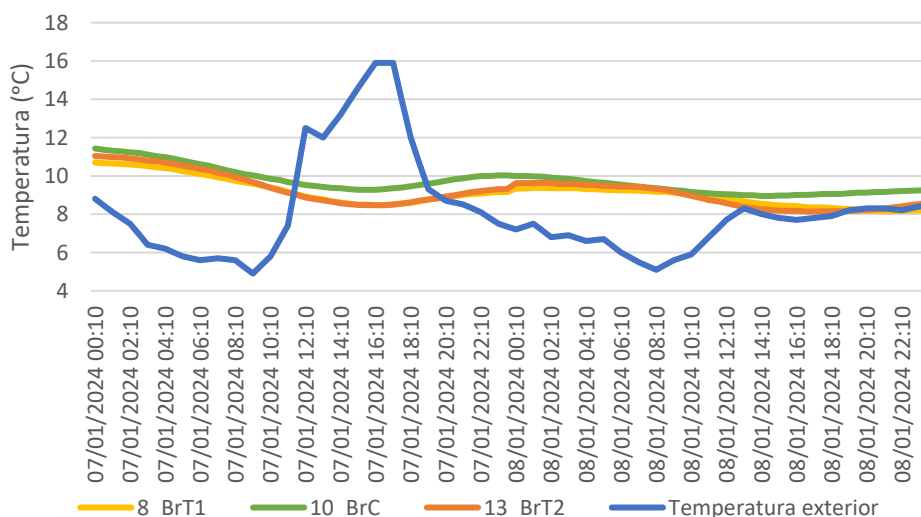


Figura 4.3- Temperatura no exterior e temperatura das tintas BrT1, BrT2 e BrC na parede norte.

Tendo em conta a influência da inércia térmica das paredes, para relacionar as condições ambientais no exterior e no interior com as diferenças máximas de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional, considerou-se a média da temperatura do ar interior e a média da temperatura do ar exterior entre as 12 h e as 21 h. Desta forma, observando as diferenças de temperatura interior e exterior, foi possível relacionar com as diferenças máximas

de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional obtidas para os diferentes dias. Esta relação é apresentada nos seguintes subcapítulos para todos cenários avaliados.

Comparando as diferenças de temperatura das tintas térmicas com a convencional da parede oeste e norte, conclui-se que a parede oeste apresenta maiores diferenças de temperatura, o que é justificado pelo maior fluxo de calor presente na parede oeste.

Seguindo o exemplo dos resultados obtidos no dia 16 e 17 de fevereiro, pode-se confirmar que a parede oeste apresenta uma maior influência das condições do ambiente exterior (Figura 4.4).

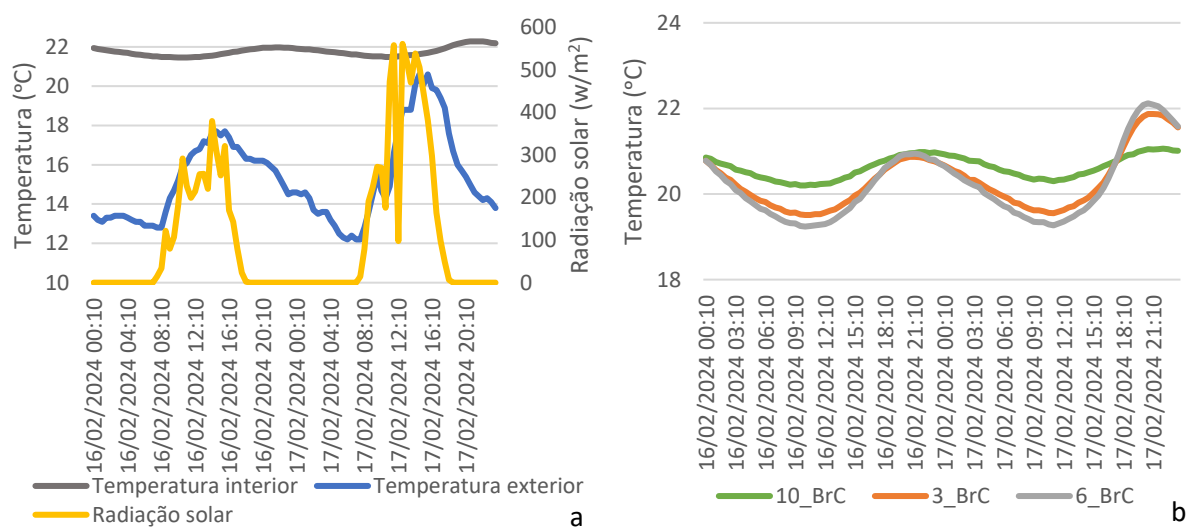


Figura 4.4- Condições no ambiente exterior e interior (a) e temperatura superficial das tintas convencionais no interior (b).

Comparando os dias 16 e 17 de fevereiro, verifica-se que a temperatura do ar exterior e a radiação solar apresentam valores mais baixos no dia 16. Comparando as temperaturas superficiais das tintas convencionais nas paredes norte e oeste, as tintas da parede oeste (3_BrC 6_BrC) apresentam temperaturas mais baixas. No caso do dia 17 de fevereiro, que apresenta uma maior temperatura no exterior e radiação solar mais elevada, as tintas convencionais pelas 18 h na parede oeste apresentam temperaturas superiores à tinta convencional da parede norte (10_BrC).

Comparando as tintas convencionais na parede oeste com ladrilhos brancos no exterior (3_BrC) e com ladrilhos pretos no exterior (6_BrC), pode-se visualizar que na tinta 6_BrC foram registadas temperaturas máximas mais elevadas e mínimas mais baixas, pelo facto da superfície dos ladrilhos pretos apresentar uma maior emitância e absorvância (cor escura).

4.3.1 Sem aquecimento

Durante o período de 12 dias (3 de janeiro a 14 de janeiro de 2024), foi avaliado o desempenho térmico dos sistemas de tinta admitindo um regime livre, sem aquecimento artificial da célula. Nestes dias, as temperaturas no exterior mais baixas foram observadas entre os dias 7 e 9 de janeiro, tendo sido registado um valor mínimo de cerca de 4,4°C (Figura 4.5).

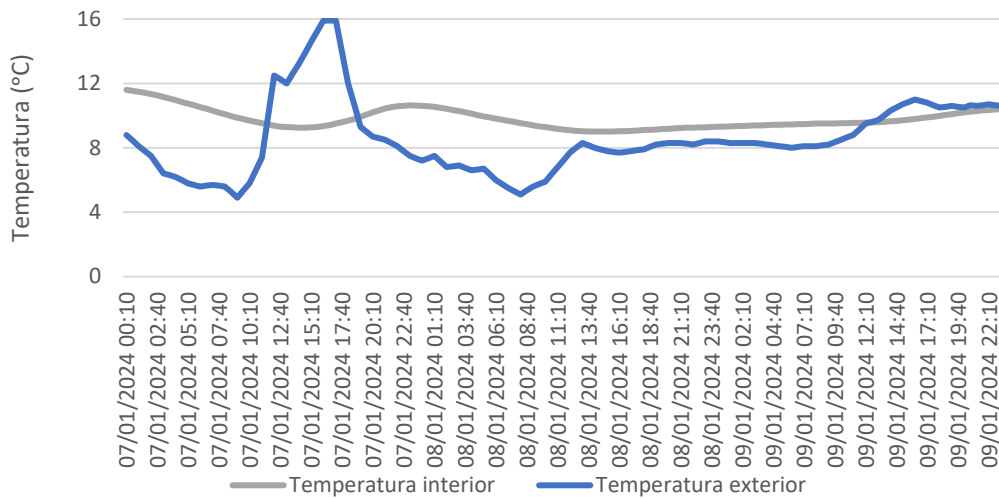


Figura 4.5- Temperatura exterior e interior da célula experimental sem aquecimento.

Como foi referido anteriormente, relacionou-se a diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional com a diferença de temperatura do ar interior e exterior. Os valores de temperatura do ar considerados foram o valor médio das temperaturas registadas entre as 12 h e as 21 h.

Na parede norte, a maior diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional foi visualizada no dia 8 de janeiro de 2024, tendo as tintas térmicas valores das temperaturas inferiores à convencional em cerca de 1°C, para uma diferença de temperatura interior e exterior média de cerca de 1,1°C (Figura 4.6).

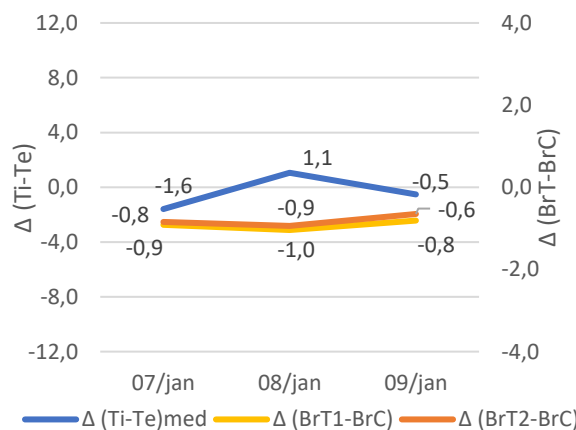


Figura 4.6- Diferenças de temperatura superficial máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede norte.

Na parede oeste, as maiores diferenças de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional também foram registadas no dia 8 de janeiro com valores superiores aos observados na parede norte, de 1,4°C na zona da parede com ladrilhos brancos no exterior e de 1,3°C na área com ladrilhos pretos no exterior (Figura 4.7).

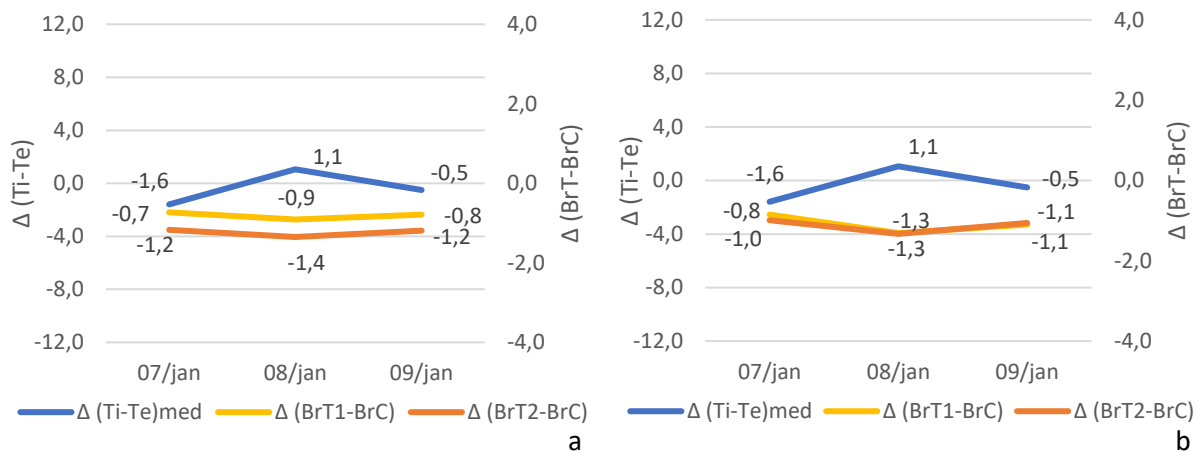


Figura 4.7- Diferenças de temperatura máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede oeste com ladrilhos brancos (a) e pretos (b) no exterior.

Da análise dos gráficos da Figura 4.6 e Figura 4.7 e da tabela síntese (Tabela 4.3), confirma-se que as diferenças de temperatura entre as tintas térmicas e a convencional são mais elevadas na parede oeste quando comparadas com as registadas na parede norte, pelo facto de a parede oeste estar sujeita a maiores fluxos de calor. No entanto, como a diferença de temperatura do ar interior e exterior é de apenas 1,1°C, o fluxo de calor que atravessa as duas paredes é reduzido, o que justifica as diferenças máximas entre as tintas térmicas e a tinta convencional apresentarem valores semelhantes nas duas paredes.

Tabela 4.3- Diferenças máximas de temperatura entre tintas térmicas e convencional nas paredes norte e oeste, sem aquecimento no interior.

Parede	$\Delta (Ti-Te)_{max}$	$\Delta T (BrT1-BrC)_{max}$	$\Delta T (BrT2-BrC)_{max}$
Norte	1,1	-1	-0,9
Oeste (ladrilhos brancos no exterior)		-0,9	-1,4
Oeste (ladrilhos pretos no exterior)		-1,3	-1,3

Comparando as diferenças máximas das tintas nas duas zonas da parede oeste, verifica-se que ambas apresentam valores semelhantes apesar da diferença de cor dos ladrilhos, devido à fraca incidência de radiação solar na superfície exterior.

Analisando os resultados obtidos entre as duas tintas térmicas nas duas paredes, verifica-se que a tinta térmica BrT1 apresenta uma diferença de temperatura superior na parede norte, enquanto a tinta BrT2 evidencia uma diferença de temperatura superior na parede oeste. Este resultado justifica-se devido à influência do primário térmico, visto que na parede norte

apenas a tinta térmica BrT1 está pintada sobre o primário térmico, enquanto na parede norte apenas a tinta BrT2 está pintado sobre o mesmo primário.

Estima-se que, se o fluxo de calor for mais elevado, ou por a maior irradiação da parede oeste, ou por existir um maior gradiente de temperatura entre o interior e o exterior da célula (com aquecimento da célula), as diferenças de temperatura entre tintas térmicas e a convencional, em geral, sejam mais significativas.

4.3.2 Com aquecimento

A avaliação do desempenho térmico das tintas com aquecimento no interior da célula foi realizada entre os dias 15 de janeiro e 7 de abril de 2024. Durante estes dias, foram definidas temperaturas aproximadamente constantes para o aquecimento da célula experimental (Tabela 4.4).

Tabela 4.4- Temperaturas médias no interior aquecido da célula experimental.

Dia	Temperatura interior (°C)
15/01 - 14/02/2024	19
15/02 - 12/03/2024	22
13/03 - 07/04/2024	24

Da análise dos resultados obtidos no primeiro período referido na Tabela 4.4 (15 de janeiro a 14 de fevereiro de 2024), verificou-se a existência de uma incompatibilidade dos resultados obtidos entre a parede oeste e a parede norte. Este facto ocorre porque os sistemas de pintura na parede oeste estão expostos em áreas horizontais, assim como pela existência de uma estratificação do ar no interior. Assim, cada sistema de tinta estava exposto a uma temperatura do ar interior ligeiramente diferente. Deste modo, os resultados obtidos na parede oeste não serão apresentados neste intervalo de dias.

Como já foi referido anteriormente, foram instalados três termopares nas três alturas diferentes em que se apresentam os termopares nas paredes, sendo possível monitorizar ao longo do tempo como varia temperatura do ar com a altura. Desta forma, foram calibrados os resultados obtidos das temperaturas das tintas na parede oeste, aplicando ao longo do dia a diferença entre os termopares 14 (em baixo), 15(a meio) e 16(no topo).

Para uma temperatura no interior de 22°C e 24°C, nos três dias em análise em cada estado do ambiente interior, a estratificação do ar e valores máximos de humidade relativa no interior apresentam os valores da Tabela 4.5.

Tabela 4.5- Estratificação do ar no interior aquecido da célula experimental (valor médio e desvio-padrão) e humidade relativa.

Dia	Estratificação do ar (°C)				Humidade relativa (%)
	Meio-Baixo		Topo-Baixo		
	Média	DP	Média	DP	
24/02 - 26/02/2024	2,28	0,24	2,88	0,30	66
25/03 - 27/03/2024	2,08	0,23	3,14	0,38	58

Com a análise dos resultados da Tabela 4.5, confirma-se que, para um aumento da temperatura interior de 22°C para 24°C, ocorre um ligeiro aumento da estratificação do ar e uma diminuição dos valores máximos de humidade relativa no interior.

Da análise dos resultados da humidade relativa no interior da célula experimental, verifica-se que a aplicação de recipientes com água no interior não permitiu um grande aumento da humidade relativa no interior. Este comportamento justifica-se pelo aumento da temperatura no interior, que permite a diminuição da humidade relativa e pela falta de vaporização da água nos recipientes.

Temperatura interior a 19°C

Entre os dias 15 de janeiro e 14 de fevereiro de 2024, foi avaliado o desempenho térmico dos sistemas de pintura com as diferentes tintas admitindo uma temperatura média no interior de 19°C. Nestes dias, as temperaturas no exterior, mais baixas, foram visualizadas entre os dias 20 e 22 de janeiro, com um valor mínimo de 5,3°C (Figura 4.8).

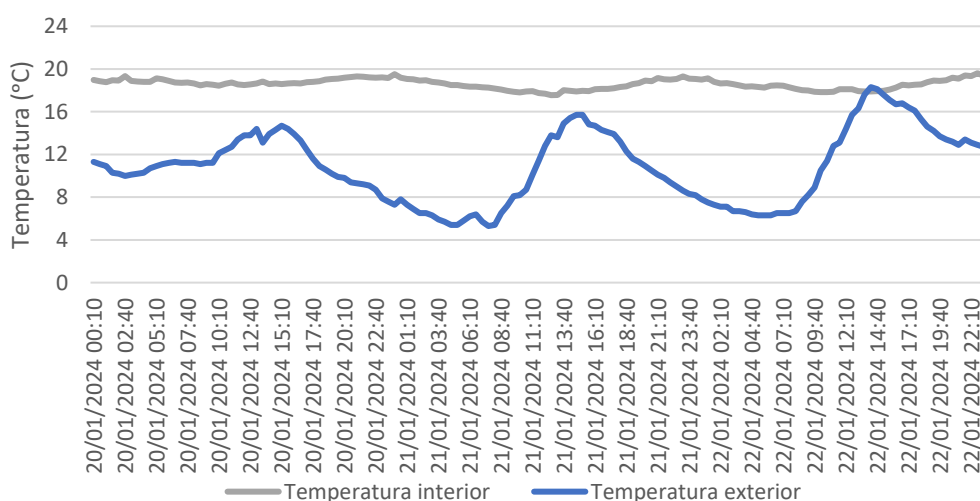


Figura 4.8- Temperaturas exterior e interior da célula aquecida a 19°C.

Na parede norte, a maior diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional foi observada no dia 20 de janeiro de 2024, com a tinta térmica BrT1 a registar um valor máximo de 1,1°C para uma diferença de temperatura interior e exterior média de 6,7°C (Figura 4.9).

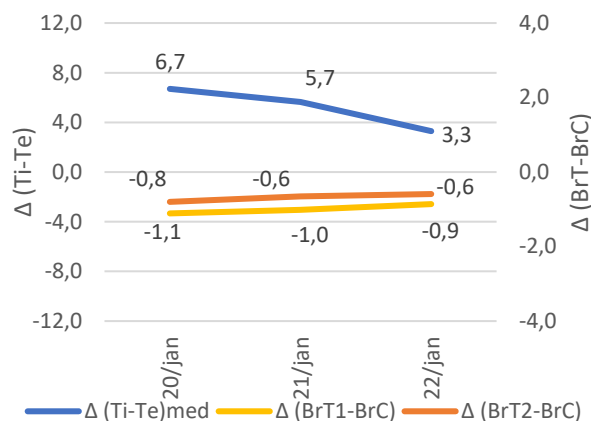


Figura 4.9- Diferenças de temperatura máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede norte.

Da análise dos resultados do gráfico da Figura 4.9, pode-se ver que, para um aumento da diferença de temperatura interior e exterior de 3,3°C para 6,7°C, corresponde um acréscimo máximo de 0,25°C na diferença de temperatura entre as tintas térmicas e convencional. Comparando com os resultados obtidos no ambiente interior sem aquecimento na parede norte (Figura 4.6), a diferença entre tintas térmicas e convencionais apresentam valores aproximados.

Temperatura interior a 22°C

Entre os dias 15 de fevereiro e 12 de março de 2024, foi avaliado o desempenho térmico dos sistemas com tintas admitindo uma temperatura média no interior de 22°C. Nestes dias, as temperaturas no exterior mais baixas foram visualizadas entre os dias 24 e 26 de fevereiro, com um valor mínimo de 10,3°C (Figura 4.10).

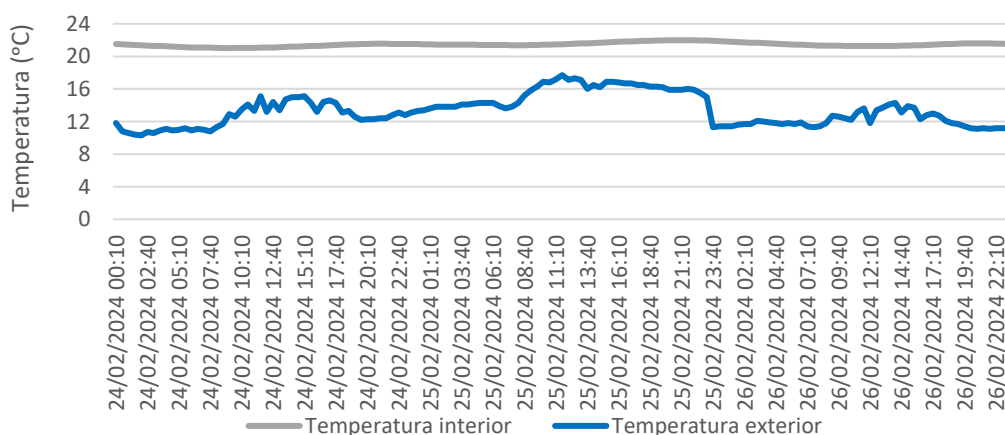


Figura 4.10- Temperaturas exterior e interior da célula aquecida a 22°C.

Na parede norte, a maior diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional foi visualizada no dia 26 de fevereiro de 2024, com a tinta térmica BrT1 com valor

máximo de 1,3°C e com uma diferença de temperatura interior e exterior média de 9,6°C (Figura 4.11).

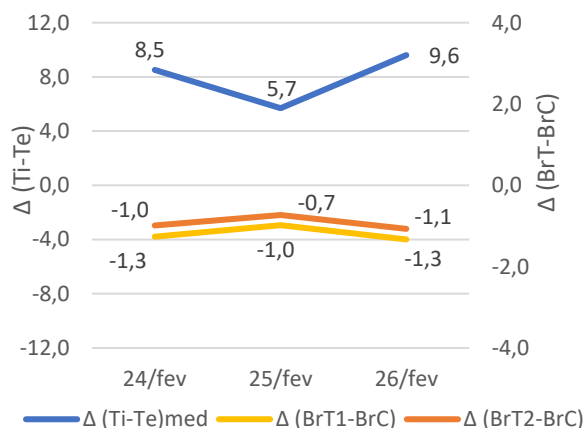


Figura 4.11- Diferenças de temperatura máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede norte da célula.

Na parede oeste, as maiores diferenças de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional também foram visualizadas no dia 26 de fevereiro com valor máximo de 2,6°C na zona da parede com ladrilhos brancos no exterior e 2,9°C com ladrilhos pretos no exterior (Figura 4.12).

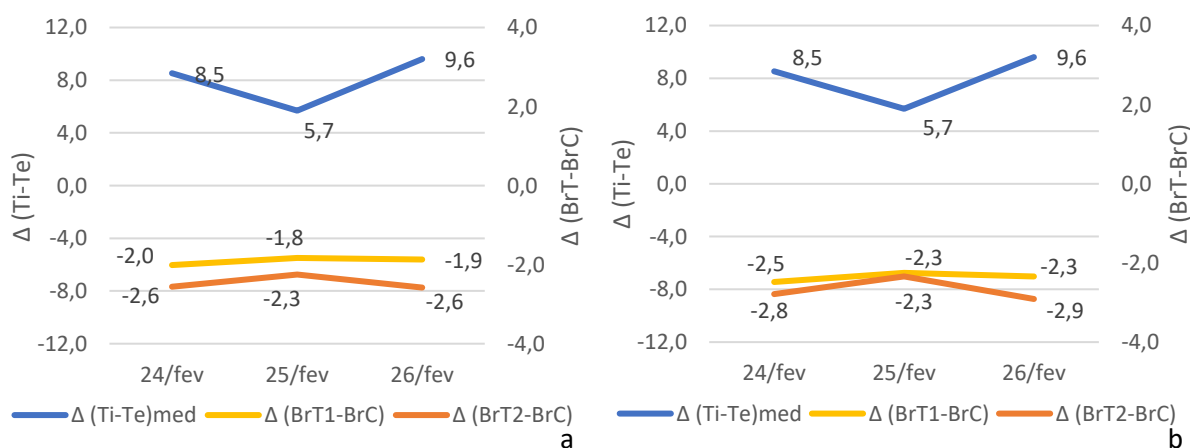


Figura 4.12- Diferenças de temperatura máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede oeste com ladrilhos brancos (a) e pretos (b) no exterior da célula.

Com a análise dos gráficos da Figura 4.11 e da Figura 4.12, confirma-se que as diferenças entre as tintas térmicas e a convencional são superiores na parede oeste comparativamente à parede norte. Visualizado as diferenças de temperatura entre a tinta térmica BrTr2 e a tinta convencional na parede norte e oeste no dia 26 de fevereiro, verifica-se que, com uma diferença de temperatura interior e exterior de 9,6 °C, tem-se a tinta térmica com uma temperatura inferior à convencional na parede norte em 1,1°C, enquanto na parede oeste tem-se um valor

máximo de 2,9°C. Desta forma, confirma-se que, para uma maior diferença de temperatura interior e exterior, o fluxo de calor na parede oeste é superior ao da parede norte.

Comparando as diferenças máximas das tintas nas duas zonas da parede oeste, verifica-se que, devido a incidência de radiação solar na superfície exterior, as diferenças são superiores na zona da parede oeste com ladrilhos pretos. Como visualizado nos resultados obtidos no ambiente interior sem aquecimento, devido à influência do primário térmico, a tinta térmica BrT1 apresenta uma diferença de temperatura superior na parede norte, enquanto a tinta BrT2 tem uma diferença de temperatura superior na parede oeste.

Temperatura interior a 24°C

Entre os dias 13 de março e 7 de abril de 2024, foi avaliado o desempenho térmico dos sistemas com tintas admitindo uma temperatura média no interior de 24°C. Nestes dias, as temperaturas no exterior mais baixas foram visualizadas entre os dias 25 e 27 de março, com um valor mínimo de 6,2°C (Figura 4.13).

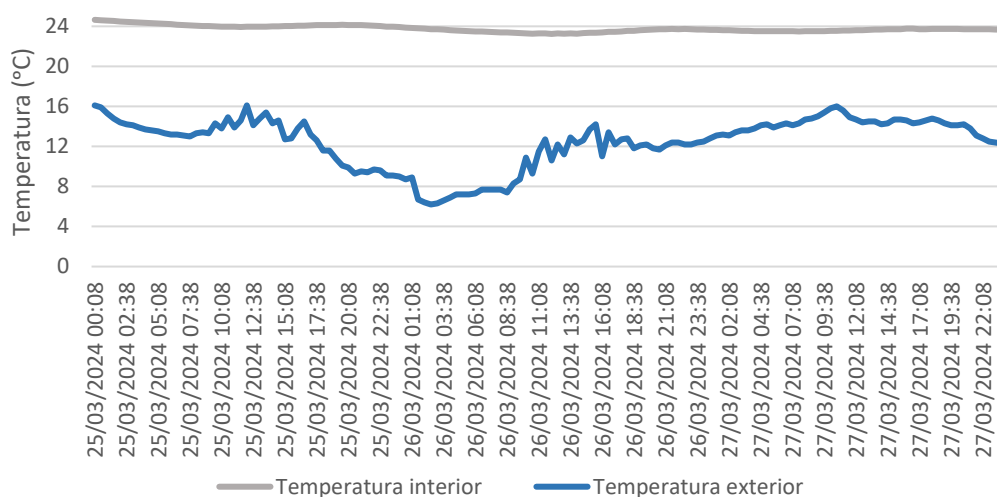


Figura 4.13- Temperaturas exterior e interior na célula aquecida a 24°C.

Na parede norte, a maior diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional apresenta o mesmo valor nos três dias com a tinta térmica BrT1 com um valor máximo em 1,4°C e com uma diferença de temperatura interior e exterior média de 11,7°C (Figura 4.14)

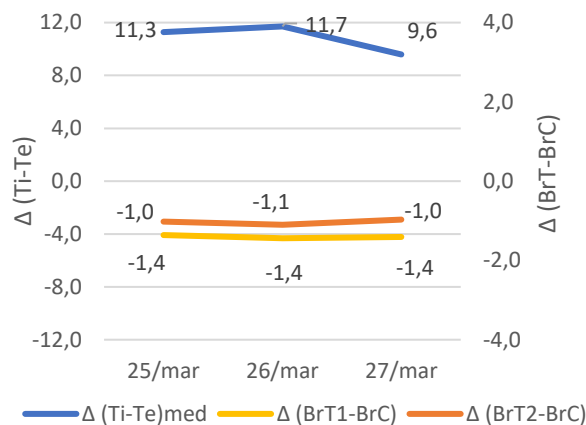


Figura 4.14- Diferenças de temperatura máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede norte.

Na parede oeste, as maiores diferenças de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional foram visualizadas no dia 26 de março de 2024 com valor máximo de 3,3°C na zona da parede com ladrilhos brancos no exterior e 3,6°C com ladrilhos pretos no exterior (Figura 4.15).

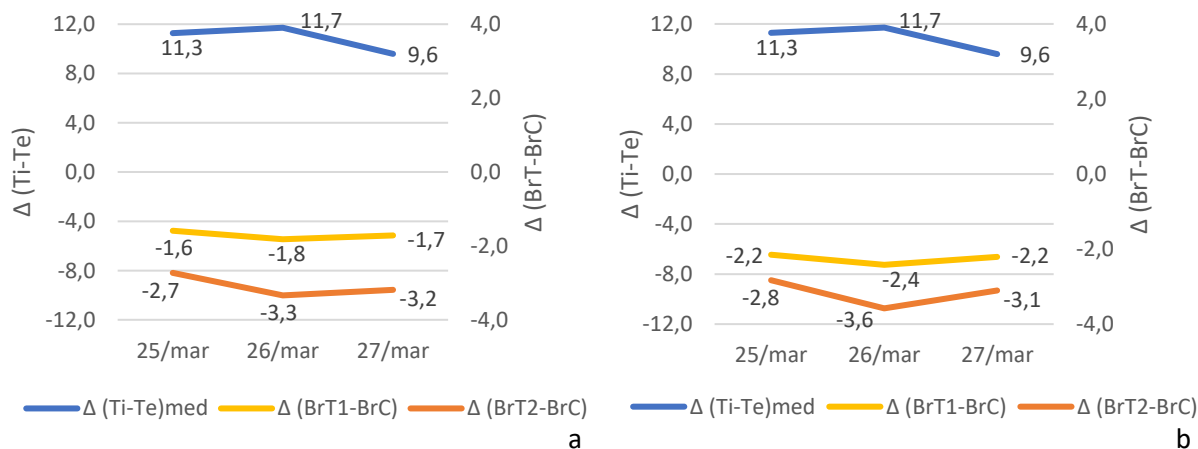


Figura 4.15- Diferenças de temperatura máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos períodos das 20 h às 24 h, na parede oeste com ladrilhos brancos (a) e pretos (b) no exterior da célula.

Com a análise dos gráficos da Figura 4.14 e da Figura 4.15, confirma-se que as diferenças entre as tintas térmicas e a convencional são superiores na parede oeste comparativamente à parede norte. Visualizado as diferenças de temperatura entre a tinta térmica BrTr2 e a tinta convencional na parede norte e oeste no dia 26 de março, verifica-se que, para uma diferença de temperatura interior e exterior de 11,7°C, tem-se a tinta térmica com uma temperatura inferior à convencional na parede norte em 1,1°C, enquanto na parede oeste tem-se um valor máximo de 3,6°C. Desta forma, como visualizado nos resultados obtidos com condicionamento interior a outras temperaturas estudadas, para uma maior diferença de temperatura interior e exterior, o fluxo de calor na parede oeste é superior ao da parede norte.

Comparando as diferenças máximas das tintas nas duas zonas da parede oeste, também se verifica a influência da radiação solar na superfície exterior, visto que as diferenças são superiores na zona da parede oeste com ladrilhos pretos. Existe também influência do primário térmico, visto que a tinta térmica BrT1 apresenta uma diferença de temperatura superior na parede norte, enquanto a tinta BrT2 tem uma diferença de temperatura superior na parede oeste.

Contudo, para todos os cenários com aquecimento no interior da célula, as tintas térmicas apresentam o mesmo comportamento térmico. Com o aumento da diferença de temperatura interior versus a do exterior, a diferença entre as tintas térmicas e a convencional aumenta.

De seguida, apresenta-se a tabela síntese (Tabela 4.6), com as diferenças máximas de temperaturas entre as tintas térmicas e a convencional, para todos os cenários com aquecimento no interior da célula.

Tabela 4.6- Diferenças máximas de temperatura entre tintas térmicas e convencional nas paredes norte e oeste, com aquecimento no interior.

Parede	Temperatura interior	$\Delta (T_i - T_e)$ max	ΔT (BrT1-BrC) max	ΔT (BrT2-BrC) max
Norte	19	6,7	-1,1	-0,8
	22	9,6	-1,3	-1
	24	11,7	-1,4	-1,1
Oeste (ladrilhos brancos no exterior)	22	9,6	-1,9	-2,6
	24	11,7	-1,8	-3,3
Oeste (ladrilhos pretos no exterior)	22	9,6	-2,3	-2,9
	24	11,7	-2,4	-3,6

MODELAÇÃO NUMÉRICA

5.1 Considerações iniciais

O programa de software EnergyPlus é um programa de simulação/modelação energética de edifícios, amplamente utilizado por diversos profissionais para estudar o comportamento térmico dos edifícios e modelar consumos energéticos para aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação e outros fluxos de energia (EnergyPlus, 2024). Deste modo, recorreu-se ao EnergyPlus para avaliar o desempenho térmico dos sistemas de pintura com tintas térmicas e tintas convencionais aplicados nas superfícies interiores de edifícios, e os possíveis consumos energéticos para arrefecimento e aquecimento.

Com a análise dos estudos apresentados no capítulo 2, conclui-se que o potencial das tintas térmicas nas superfícies interiores varia de acordo com as seguintes condições existentes ou impostas ao edifício:

- resistência térmica das envolventes exteriores;
- zona climática;
- carga térmica interna;
- ventilação.

Desta forma, para comparar com os resultados obtidos na campanha experimental e avaliar o potencial das tintas térmicas em diferentes condições ambientais, foi modelada uma célula semelhante à célula experimental, com dimensões externas de $3,68\text{ m} \times 3,68\text{ m}$ e uma altura de $2,65\text{ m}$ (Figura 5.1). Consideraram-se aplicadas três soluções construtivas diferentes na envolvente e a sua localização em três zonas climáticas distintas em Portugal.

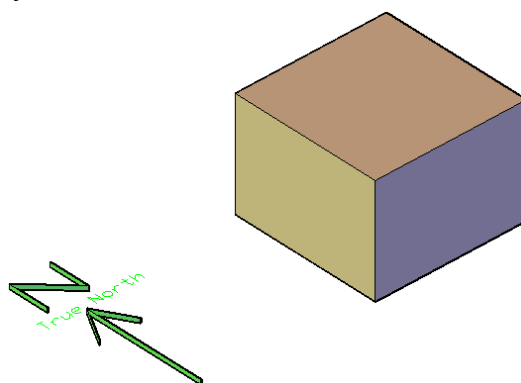


Figura 5.1- Célula considerada no programa EnergyPlus.

No interior da célula foram aplicadas diferentes condições ambientais para as quais se avaliou o desempenho térmico das soluções. Para uma análise comparativa com os resultados obtidos em condições reais, foram admitidas as mesmas condições ambientais no interior avaliadas na campanha experimental, mas admitiu-se uma renovação horária do ar no interior de 0,6. A análise do desempenho térmico das tintas inicia-se pelos cenários em que se admite a temperatura no interior em regime livre (sem aquecimento e sem arrefecimento artificial da célula). De seguida realiza-se a modelação de um sistema de climatização fictício, em que foram definidas temperaturas constantes na estação de arrefecimento e de aquecimento e quantificado os consumos energéticos nas duas estações.

5.2 Zona climática

As tecnologias construtivas dos edifícios devem ser adaptadas e caracterizados de acordo com a zona climática em que se localizam, nas estações de arrefecimento (verão) e de aquecimento (inverno). Portugal está dividido em três zonas de inverno (I1, I2 e I3) e de verão (V1, V2 e V3). Desta forma, permite-se que os edifícios se adaptem e apresentem um melhor desempenho térmico para as condições climáticas mais desfavoráveis locais, para que, para edifícios de habitação, resulte num melhor conforto térmico no interior e numa redução no consumo energético global ao longo do ano, para aquecimento e para arrefecimento (DGEG, 2024b).

Para avaliar o desempenho térmico das tintas térmicas nas diferentes zonas climáticas, utilizaram-se, no programa EnergyPlus os ficheiros climáticos de Bragança, Lisboa e Faro. Estes ficheiros estão disponibilizados no website do programa (EnergyPlus, 2024), e são caracterizados nas zonas climáticas no verão e no inverno como apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Zonas climáticas de Bragança, Lisboa e Faro.

Zona climática	Verão	Inverno
Bragança	V2	I3
Lisboa	V2	I1
Faro	V3	I1

As escolhas das localizações e respetivas zonas climáticas foram feitas para avaliar o desempenho das tintas térmicas nos locais com condições climatéricas no inverno e no verão mais adversas. Deste modo, escolheu-se a zona de Bragança que apresenta uma zona climática no inverno com temperaturas mais baixas (I3), e Faro que no verão apresenta uma zona climática com temperaturas mais elevadas (V3). Por fim, escolheu-se a zona climática de Lisboa para comparar com os resultados obtidos na campanha experimental e avaliar em condições climáticas intermédias.

5.3 Soluções construtivas

De acordo com outros estudos, o desempenho das tintas térmicas varia de acordo com a resistência térmica das envolventes. Deste modo, foram consideradas três soluções construtivas com diferentes coeficientes de transmissão térmica nas paredes e na cobertura.

Para as zonas climáticas no verão e no inverno em que os edifícios estão localizados, a Portaria n.º 138-I/2021 (DR, 2021b) regulamenta os requisitos mínimos de desempenho energético das envolventes dos edifícios. Consoante a zona climática de inverno, este regulamento apresenta os valores máximos dos coeficientes de transmissão térmica para as envolventes opacas dos edifícios.

Desta forma, as soluções construtivas admitidas têm como objetivo avaliar o desempenho térmico das tintas térmicas em superfícies interiores das paredes nas soluções construtivas com elevados coeficientes de transmissão térmica (SC1), com valores semelhantes aos da célula experimental (SC2), e com os valores máximos do regulamento para a zona climática de inverno I1 (SC3).

As soluções construtivas consideradas são detalhadas na Tabela 5.2 (do exterior para o interior) e os respetivos coeficientes de transmissão térmica são apresentados Tabela 5.3

Tabela 5.2- Constituição da cobertura e das paredes das soluções construtivas SC1, SC2 e SC3.

Soluções construtivas	SC1	SC2	SC3
Cobertura*	Camada de forma de betão leve (5cm) Laje maciça de betão armado (15 cm) Reboco (1,5 cm)	Placa de XPS (2 cm) Camada de forma de betão leve (5cm) Laje maciça de betão armado (15 cm) Reboco (1,5 cm)	Placa de XPS (8 cm) Camada de forma de betão leve (5cm) Laje maciça de betão armado (15 cm) Reboco (1,5 cm)
Paredes	Reboco (1,5 cm) Alvenaria (11 cm) Reboco (1,5 cm)	Reboco (1,5 cm) Alvenaria (11 cm) Espaço entre panos (5 cm) Alvenaria (11 cm) Reboco (1,5 cm)	Reboco (1,5 cm) Alvenaria (11 cm) Espaço de ar (2 cm) Placa de XPS (5 cm) Alvenaria (11 cm) Reboco (1,5 cm)

* Não considerando camadas de espessura reduzida, com pouco impacto no cálculo dos coeficientes de transmissão térmica, como é o caso das camadas constituindo o sistema de impermeabilização.

Tabela 5.3- Coeficientes de transmissão térmica das envolventes opacas nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3.

Soluções construtivas	Coeficiente de transmissão térmica ($W/m^2\text{°C}$)	
	Cobertura	Paredes
SC1	3,5	2,3
SC2	1,2	1,1
SC3	0,4	0,5

Quanto maior for o coeficiente de transmissão térmica das envolventes opacas, maior será a influência das tintas térmicas nos edifícios (capítulo 2). Portanto, na escolha da solução construtiva SC1, admitiram-se coeficientes de transmissão térmica elevados, com o intuito de analisar uma maior influência das tintas térmicas.

A solução SC2 permite comparar com os resultados da campanha experimental e avaliar o desempenho das tintas térmicas em edifícios que não cumprem a regulamentação relativa à eficiência energética (anteriores a 1990, sem isolamento térmico). A solução SC3 avalia o desempenho das tintas em edifícios que cumprem a regulamentação atual.

No pavimento de todas as soluções, tal como definido na solução da célula experimental, considerou-se apenas uma camada de betão com espessura de 10 cm, apresentando um coeficiente de transmissão térmica de $4,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$. A temperatura do solo em contato com o pavimento, foi obtida através do programa auxiliar Slab que determina a temperatura do solo prevista em cada mês através do ficheiro climático do local. Neste programa, não foi possível determinar as temperaturas do solo através dos ficheiros climáticos de Bragança e Faro, tendo assim admitido os mesmos resultados obtidos no ficheiro climático de Lisboa. Da análise de outras soluções de pavimento na célula com coeficientes de transmissão térmica mais baixos, não se verifica o mesmo comportamento térmico das tintas obtidos na célula em condições reais. Logo admitiu-se a mesma solução de pavimento da célula experimental de forma a conseguir comparar os resultados.

5.4 Materiais utilizados

Para introduzir as respetivas soluções construtivas no programa, foram aplicados os materiais constituintes das soluções construtivas, através de especificação do nome e as seguintes características: rugosidade, espessura, condutibilidade térmica, massa volúmica, calor específico e absorvância de radiação térmica em determinados intervalos de comprimento de onda. No espaço de ar livre entre as paredes duplas, apenas a resistência térmica foi caracterizada.

A caracterização destas componentes, foi efetuada através da análise do ITE 50 (Pina dos Santos e Matias, 2006), que fornece a condutibilidade térmica e massa volúmica dos materiais e a resistência térmica do espaço de ar. Além disso, este manual inclui soluções de coberturas e paredes com seus respetivos coeficientes de transmissão térmica, o que permitiu comparar com os resultados obtidos no programa para as soluções construtivas admitidas.

5.4.1 Características superficiais dos materiais

Como já referido anteriormente, para caracterizar as superfícies dos materiais, introduz-se a sua rugosidade e a absorvância da radiação térmica. Relativamente à absorvância dos

materiais, o programa define três intervalos de comprimento de onda, com os seguintes parâmetros (USDE, 2022b):

- absorptância no visível (0,37 a 0,78 μm);
- absorptância no espectro da radiação solar (0,3 a 2,54 μm);
- absorptância no infravermelho médio (>2,5 μm).

A absorptância na região do visível e no espectro da radiação solar quantifica a radiação térmica absorvida pela superfície nos intervalos de comprimento de onda apresentados. Como estes parâmetros variam entre 0 e 1 e, no caso das superfícies opacas, a soma da absorptância e da refletância é igual a 1, ao admitir um valor da absorptância é possível determinar a refletância das superfícies.

A absorptância no infravermelho médio quantifica a radiação térmica no infravermelho que é absorvida pela superfície, permitindo quantificar as trocas de calor por radiação entre superfícies no exterior e no interior. No programa, este parâmetro assume um valor igual à emitância térmica, ou seja, os materiais obedecem à lei de Kirchhoff ($\alpha = \varepsilon$) e apresentam um valor padrão de 0,9 (USDE, 2022b)

5.4.2 Características das tintas térmicas

As tintas térmicas analisadas na campanha experimental são caracterizadas com valores elevados de emitância e refletância no infravermelho médio. Da análise de outros estudos com tintas térmicas no interior, concluiu-se que as tintas com melhor desempenho térmico no interior são caracterizadas por elevada refletância no infravermelho médio e baixa emitância. Portanto, para avaliar o comportamento das tintas térmicas através do programa, optou-se por considerar valores reduzidos de absorptância térmica no infravermelho médio, ou seja, superfícies caracterizadas por elevada refletância no infravermelho médio e baixa emitância.

Para avaliar o desempenho das tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes dos edifícios, consideraram-se três superfícies com características diferentes: duas das superfícies com as características superficiais de tintas térmicas e outra com as características de uma tinta convencional (BrC), como ilustrado na Tabela 5.4. Como as características superficiais das tintas térmicas não são idênticas às tintas térmicas obtidas na campanha experimental (BrT1 e BrT2), a nomenclatura das tintas térmicas consideradas no programa (BrTr1 e BrTr2), apresenta uma pequena diferença.

Tabela 5.4- Absortância das tintas no visível, no espectro da radiação solar e no infravermelho médio.

Tinta	Absortância (%)		
	Visível (0,37 a 0,78 μm)	Radiação solar (0,3 a 2,54 μm)	Infravermelho médio (>2,5 μm)
BrC	20	20	90
BrTr1	20	20	20
BrTr2	20	20	40

Como pode ser observado na Tabela 5.4, considerou-se a absorptância idêntica nas três tintas na região do visível e no espectro da radiação solar, e uma absorptância diferente no infravermelho médio. Desta forma, as diferenças no desempenho térmico das tintas no interior são provocadas apenas pela influência da absorptância das tintas no infravermelho médio. Com estes valores, o programa utiliza os valores de refletância e emitância apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5- Emitância e refletância na região do visível, no espectro da radiação solar e no infravermelho médio.

Tinta	Refletância (%)			Emitância (%)
	Visível (0,37 a 0,78 μm)	Radiação solar (0,3 a 2,54 μm)	Infravermelho médio (>2,5 μm)	
BrC	80	80	10	90
BrTr1	80	80	80	20
BrTr2	80	80	60	40

Desta forma, o programa considera as superfícies com elevada refletância no infravermelho médio, com a tinta térmica BrTr1 com uma refletância de 80% e a tinta térmica BrTr2 com um valor de 60%. Além disso, as superfícies apresentam baixa emitância, com a tinta BrTr1 tendo um valor de 20% e a tinta BrTr2 com valor de 40%. Para efeitos comparativos, foi analisado o desempenho térmico de uma superfície com uma emitância de 90% e refletância de 10%, características semelhantes às das tintas convencionais e dos materiais usuais nas envolturas opacas dos edifícios. Contudo, avaliou-se o desempenho térmico das superfícies à medida que a refletância no infravermelho médio aumenta e a emitância diminui.

5.5 Ambiente interior

5.5.1 Balanço térmico interno

No programa, no método de balanço térmico, é importante garantir a definição correta do balanço térmico interno entre as superfícies interiores da zona. O balanço térmico é geralmente modelado por quatro componentes de transferência de calor (Figura 5.2): condução através das soluções construtivas, convecção com o ar da zona, radiação de ondas curtas e radiação de ondas longas (USDE, 2022a).

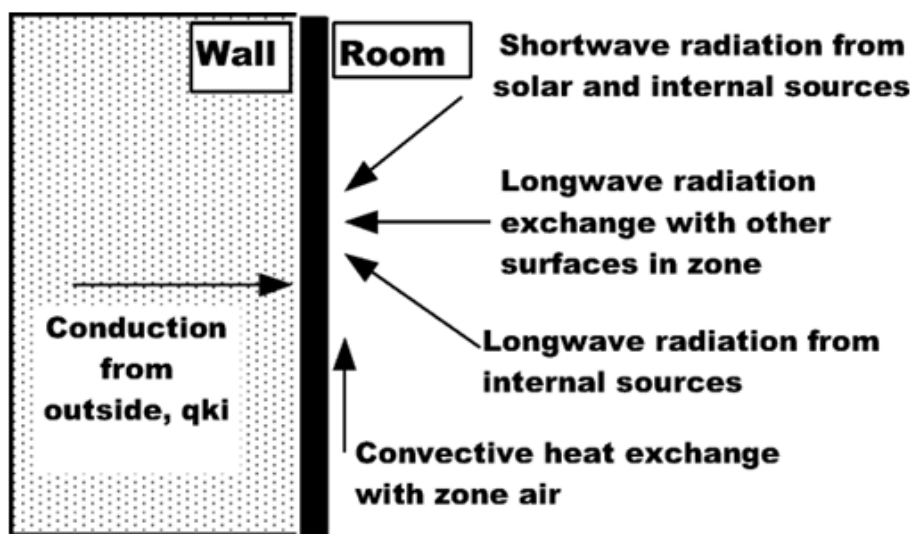


Figura 5.2- Equilíbrio térmico interno (USDE, 2022a).

A radiação de ondas curtas no interior provém da radiação solar que entra pelas envolventes exteriores através das janelas e da emissão de fontes internas, como as luzes artificiais. No caso da radiação de ondas longas, é obtida através da emissão de radiação no infravermelho médio proveniente das superfícies interiores, equipamentos e dos ocupantes.

O EnergyPlus admite que o ar interior é transparente à radiação térmica, ou seja, não interfere na transferência de radiação no infravermelho médio entre as superfícies interiores. Este modelo considera-se razoável, uma vez que no interior a concentração de vapor de água no ar é baixa e as distâncias entre superfícies são geralmente curtas ou médias (USDE, 2022a).

5.5.2 Radiação de onda curta

Como já referido anteriormente, a radiação de onda curta está presente no interior dos edifícios devido à iluminação no interior e à radiação solar que entra pelos envidraçados. Para evitar a influência da radiação solar nas superfícies interiores da célula, tal como na célula experimental, todas as envolventes exteriores são opacas.

Relativamente à iluminação, foi estabelecida uma percentagem de iluminação ao longo do dia e do ano, conforme apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6- Iluminação no interior da célula.

Dias	Iluminação (%)	
	0h-18h	18h-24h
1 de janeiro até 30 de abril	5	70
1 de maio até 30 de setembro	5	50
1 de outubro até 31 de dezembro	5	70

Considerou-se que a iluminação admite uma potencia média 5 W/m² por área do edifício, com uma fração de retorno do ar igual a 0, uma fração radiante de 42% e uma fração no visível de 18%. Como a absorvância na região do visível é a mesma para todas as tintas, a fração no visível da iluminação tem o mesmo impacto em todas as soluções.

5.6 Desempenho térmico das tintas térmicas

5.6.1 Descrição geral

Inicialmente, analisou-se o desempenho das superfícies interiores com as características das tintas térmicas e da tinta convencional, sem sistema de climatização no interior da célula. Como o desempenho térmico nas tintas varia de acordo com as condições climáticas em que a célula está exposta, tal como referido anteriormente, foram consideradas as zonas climáticas de Lisboa, Bragança e Faro.

Na zona climática de Lisboa, apresenta-se a análise do desempenho nas tintas obtidos na estação de aquecimento e arrefecimento. De seguida, apresenta-se a análise do desempenho das tintas com a célula localizada em Bragança na estação de aquecimento, e com a célula em Faro na estação de arrefecimento. Desta forma, foi avaliado o desempenho térmico das tintas térmicas e da tinta convencional para as três soluções construtivas e para as três zonas climáticas, conforme os cenários apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7- Cenários em análise do desempenho térmico das tintas nas superfícies interiores das paredes.

Cenário	Tinta	Solução construtiva	Zona climática
1	BrC	SC1, SC2 e SC3	Lisboa (nas duas estações)
	BrTr2		
	BrTr1		
2	BrC	SC1, SC2 e SC3	Bragança (na estação de aquecimento)
	BrTr2		
	BrTr1		
3	BrC	SC1, SC2 e SC3	Faro (na estação de arrefecimento)
	BrTr2		
	BrTr1		

Nos edifícios de habitação, para calcular as necessidades energéticas para arrefecimento e aquecimento, considera-se uma temperatura interior de 18°C na estação de aquecimento e de 25°C na estação de arrefecimento (DGEG, 2024b).

Para avaliar o desempenho das superfícies interiores com as características das tintas térmicas e com tinta convencional e comparar os resultados obtidos na campanha experimental, admitiu-se uma temperatura interior de 19°C na estação de aquecimento e de 25°C na estação de arrefecimento nos cenários anteriormente referidos.

Para este efeito, procedeu-se à modelação de um sistema de climatização fictício, que permitiu admitir uma temperatura constante no interior da célula. Este equipamento foi configurado com os limites de temperatura máxima e mínima ao longo do ano no interior, permitindo assim, manter as temperaturas pretendidas na estação de aquecimento e arrefecimento nos cenários analisados. Além disso, o sistema de climatização quantifica os consumos energéticos para aquecimento e arrefecimento, de modo a atingir os limites de temperatura considerados nas duas estações.

O desempenho térmico das tintas térmicas e da tinta convencional foi realizada através da análise das temperaturas superficiais no interior das paredes, da temperatura média radiativa da zona e da temperatura interior.

Tal como realizado na campanha experimental, foi analisada a evolução da diferença de temperatura superficial interior entre as tintas térmicas e a tinta convencional, de forma a verificar que nas tintas térmicas apresentam-se temperaturas superficiais mais baixas na estação de aquecimento e temperaturas superficiais mais altas na estação de arrefecimento.

A temperatura interior e a temperatura média radiativa da zona são dois parâmetros importantes para um melhor conforto térmico dos ocupantes no interior (Malz et al. 2020). Tal como mencionado anteriormente, foi avaliado o desempenho térmico das tintas com e sem sistema de climatização na célula, o que permitiu avaliar o respetivo comportamento com temperatura variável no interior e com temperatura constante no interior nas duas estações.

A temperatura média radiativa da zona quantifica-se através da medição da temperatura de um corpo no centro do espaço devido à radiosidade das superfícies interiores. Como as tintas térmicas são caracterizadas por terem baixa emitância e elevada refletância no infravermelho médio, tal provoca alterações na radiosidade das superfícies interiores da célula. Portanto, pretende-se verificar que no inverno, uma maior refletância das paredes resulta num aumento da temperatura média radiativa da zona, enquanto no verão uma menor emitância provoca uma diminuição da temperatura média radiativa.

Desta forma, apresenta-se a diferença dos parâmetros de temperatura mencionados entre as tintas térmicas e a tinta convencional, de modo a avaliar o desempenho térmico nas tintas e os benefícios em termos de conforto térmico no interior da célula. De seguida, apresenta-se o impacto das tintas térmicas nos consumos energéticos da célula.

Para cada cenário em análise, as tintas são avaliadas num intervalo de três dias, sendo estes os dias que apresentam as temperaturas mais baixas registadas no exterior na estação de aquecimento e as temperaturas mais elevadas na estação de arrefecimento.

5.6.2 Sem sistema de climatização

Estação de aquecimento

Na zona climática de Lisboa, na estação de aquecimento, foi avaliado o desempenho térmico das tintas nas superfícies interiores das paredes entre os dias 30 de janeiro e 1 de fevereiro. Nestes dias foram observadas as temperaturas no exterior mais baixas, tendo sido registado um valor mínimo de cerca de 4,2 °C (Figura 5.3).

Com a análise das temperaturas do ar interior em regime livre nas três soluções construtivas consideradas na célula com as superfícies interiores das paredes com tinta convencional, verifica-se que, com a solução construtiva com um menor coeficiente de transmissão térmica nas envolventes (SC3), as temperaturas do ar interior são mais elevadas, enquanto com a solução com maior coeficiente de transmissão térmico (SC1) as temperaturas do ar interior são mais baixas (Figura 5.3). Este comportamento é idêntico nas temperaturas superficiais interiores das paredes da célula, com a solução construtiva SC3 com temperaturas superficiais mais elevadas e a solução SC1 com temperaturas superficiais mais baixas.

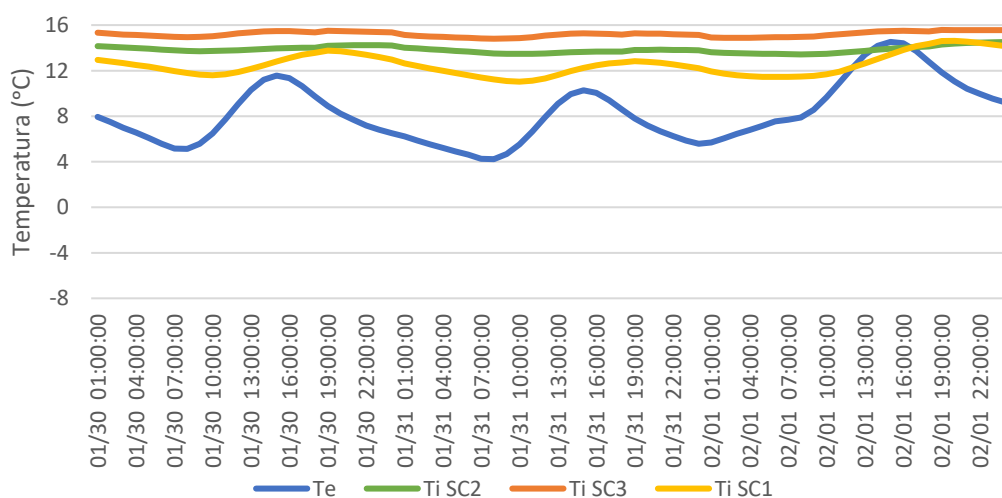


Figura 5.3- Temperatura exterior e interior da célula sem aquecimento com as soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 em Lisboa.

Comparando a temperatura superficial interior das quatro paredes, verifica-se que a parede sul apresenta temperaturas ligeiramente mais elevadas e a parede norte com temperaturas ligeiramente mais baixas. Este comportamento justifica-se pelas diferentes exposições das paredes à radiação solar. No caso do exemplo da solução construtiva SC1 com as superfícies interiores das paredes com a tinta convencional, obtém-se a temperatura superficial interior máxima das paredes apresentadas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8- Temperatura superficial interior máxima das paredes com tinta convencional na célula sem aquecimento com a solução construtiva SC1 em Lisboa.

Paredes	Tsi max
sul	14,4
este	14,0
norte	13,9
oeste	14,1

Como a parede norte apresenta temperaturas superficiais mais baixas, as diferenças máximas de temperatura superficial interior das paredes entre as superfícies interiores com tintas térmicas e com tinta convencional ocorrem nesta parede.

Nas três soluções construtivas, as superfícies interiores das paredes com tintas térmicas apresentam temperaturas inferiores comparativamente às temperaturas superficiais interiores das paredes com tinta convencional. Aplicando a diferença de temperatura superficial interior das paredes (ΔT_{si}) entre as superfícies interiores com as tintas térmicas e com a tinta convencional, são obtidas as diferenças máximas na parede norte para as três soluções construtivas apresentadas na Figura 5.4.

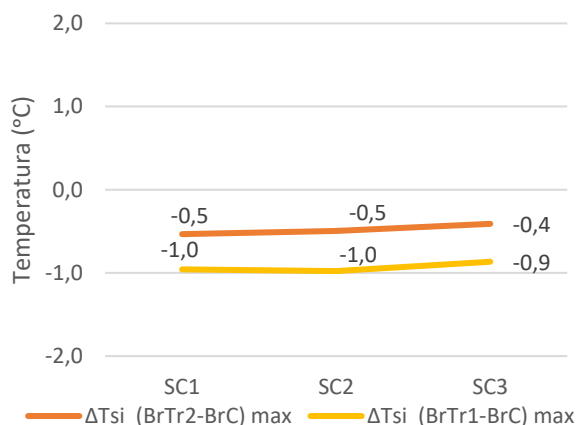


Figura 5.4- Diferença de temperatura superficial interior máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento em Lisboa.

Da análise da Figura 5.4, confirma-se que as superfícies interiores das paredes com tintas térmicas apresentam temperaturas superficiais mais baixas comparativamente às superfícies interiores com tinta convencional e que a diferença máxima entre as tintas tem um valor de cerca de 1°C com a tinta térmica BrTr1 nas soluções construtivas SC1 e SC2. Este comportamento justifica-se devido à elevada refletância das tintas térmicas no infravermelho médio, o que provoca uma menor absorção de radiação térmica proveniente das outras superfícies interiores e da iluminação que, por sua vez, leva à diminuição da temperatura das paredes.

Para relacionar o impacto das superfícies interiores das paredes com tintas térmicas e com tinta convencional com as condições ambientais interiores, foram analisadas as diferenças

de temperatura do ar interior (ΔT_i) e as diferenças de temperatura média radiativa (ΔT_{mr}) entre as soluções com tintas térmicas e com tinta convencional nas superfícies interiores das paredes. Conclui-se que, na estação de aquecimento, as tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes provocam uma ligeira diminuição da temperatura do ar interior e um aumento da temperatura média radiativa comparativamente às superfícies interiores das paredes com tinta convencional (Figura 5.5).

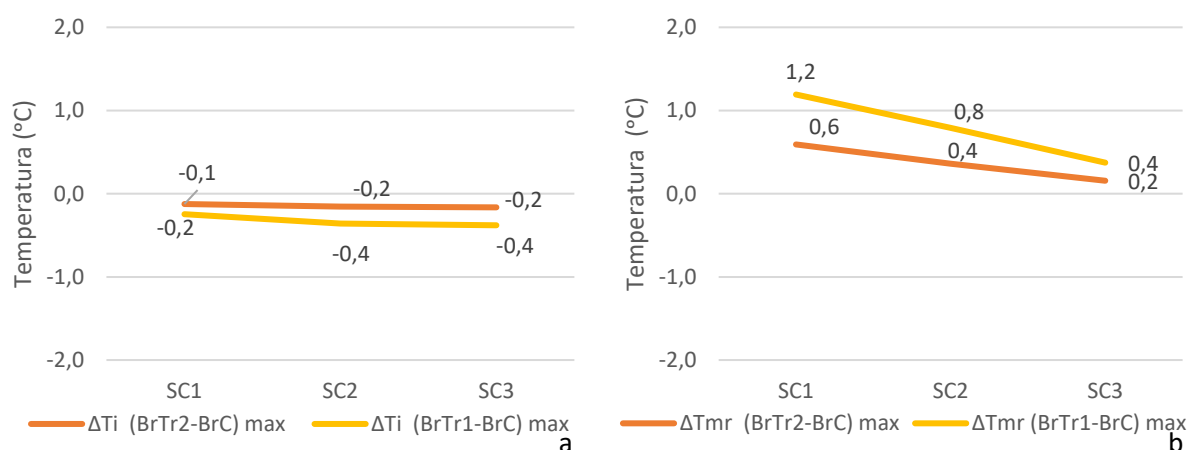


Figura 5.5- Diferenças máximas da temperatura do ar interior (a) e da temperatura média radiativa (b) entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento em Lisboa.

Da análise da Figura 5.5a, confirma-se que as tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes provocam uma ligeira diminuição das temperaturas do ar interior com um valor máximo de cerca de 0,4°C. Este comportamento justifica-se devido às superfícies interiores das paredes com tintas térmicas estarem mais frias, o que provoca maiores trocas de calor por convecção entre as superfícies interiores das paredes com o ar interior.

Analisando a Figura 5.5b, verifica-se que as superfícies interiores das paredes com tintas térmicas apresentam uma temperatura média radiativa mais elevada, com uma diferença máxima entre as tintas em cerca de 1,2°C com a tinta térmica BrTr1 na solução construtiva SC1. Este comportamento justifica-se devido às elevadas perdas por condução nas paredes da solução SC1, que resulta em superfícies interiores com temperaturas baixas. Como as paredes estão mais frias, emitem pouca radiação tanto com tintas térmicas como com tinta convencional. No entanto, as tintas térmicas apresentam elevada refletância no infravermelho médio o que permite aumentar a radiosidade das paredes e consequentemente, a temperatura média radiativa.

Comparando os resultados dos gráficos da Figura 5.5, verifica-se que a diminuição do coeficiente de transmissão térmica das envolventes da célula provoca uma menor influência das tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes devido às maiores temperaturas superficiais interiores das paredes. No entanto, nas soluções construtivas SC1 e SC2 com tintas térmicas, o aumento da temperatura média radiativa é superior à diminuição da temperatura

do ar interior, ou seja, em termos de conforto térmico dos ocupantes na estação de aquecimento em Lisboa, é benéfico o uso das tintas térmicas nestas soluções.

Para avaliar o desempenho das tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes com temperaturas exteriores mais baixas, analisou-se a célula na zona climática de Bragança no inverno. Entre os dias 19 e 21 de janeiro, foram observadas as temperaturas no exterior mais baixas, tendo sido registado um valor mínimo de cerca de $-5,7^{\circ}\text{C}$ (Figura 5.6).

Tal como observado na zona climática de Lisboa com temperatura do ar interior em regime livre, da análise das três soluções construtivas com as superfícies interiores das paredes com tinta convencional, verifica-se que, na solução com menor coeficiente de transmissão térmica (SC3), as temperaturas do ar interior são mais elevadas, enquanto na solução com maior coeficiente de transmissão térmica (SC1), as temperaturas do ar são mais baixas (Figura 5.6).

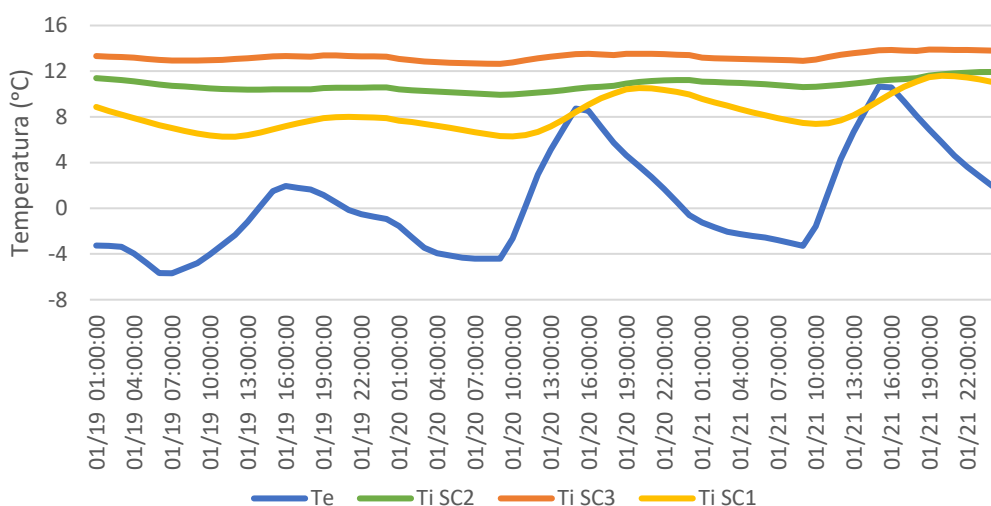


Figura 5.6- Temperatura exterior e interior da célula sem aquecimento com as soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento em Bragança.

Nas três soluções construtivas, as superfícies interiores das paredes com tintas térmicas apresentam temperaturas superficiais mais baixas comparativamente às superfícies interiores com tinta convencional. Aplicando a diferença de temperatura superficial interior entre as superfícies interiores das paredes com as tintas térmicas e com a tinta convencional, observam-se as diferenças de temperatura superficial interior máximas na parede sul para as três soluções construtivas apresentadas na Figura 5.7.

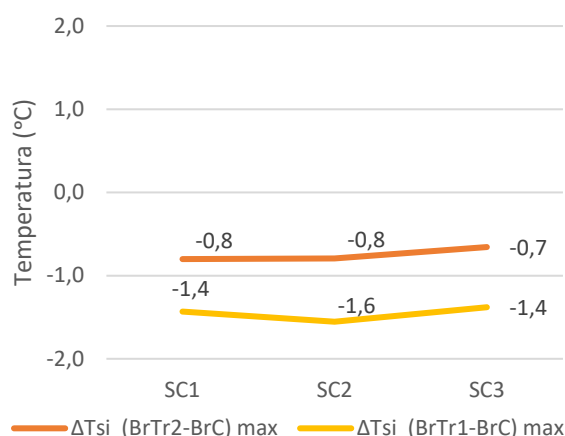


Figura 5.7- Diferença de temperatura superficial interior máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento em Bragança.

Da análise da Figura 5.7, verifica-se que as tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes apresentam temperaturas mais baixas nas três soluções construtivas, com uma diferença máxima entre as tintas de cerca de 1,6°C com a tinta térmica BrTr1 na solução construtiva SC2.

Comparando as temperaturas do ar interior e média radiativa com as superfícies interiores das paredes com tinta térmica e com tinta convencional, verifica-se que as tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes provocam uma diminuição da temperatura do ar interior e um aumento da temperatura média radiativa comparativamente às superfícies interiores das paredes com tinta convencional (Figura 5.8).

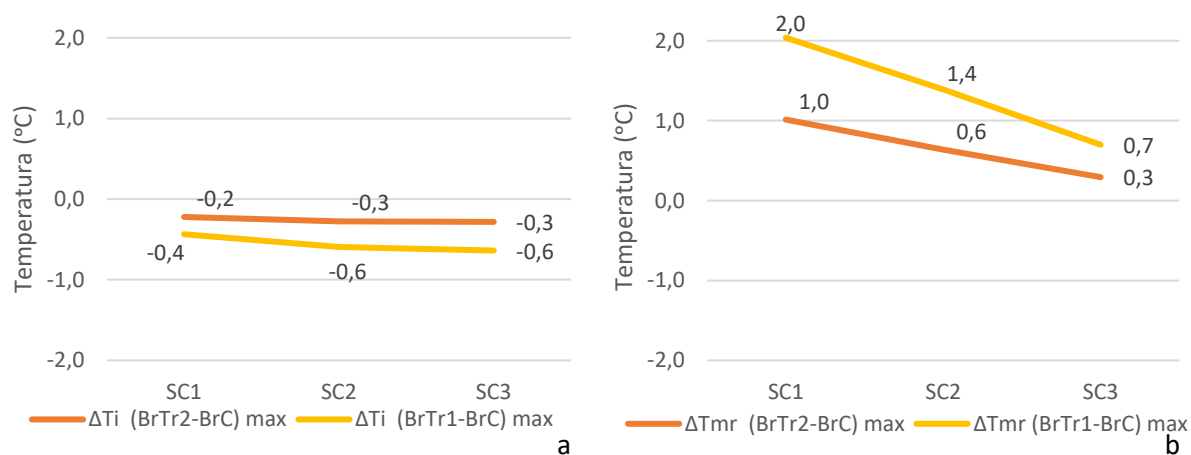


Figura 5.8- Diferenças máximas da temperatura do ar interior (a) e da temperatura média radiativa (b) entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento em Bragança.

Da análise da Figura 5.8a, confirma-se que as superfícies interiores das paredes com tintas térmicas provocam uma diminuição da temperatura do ar interior com a maior diferença de temperatura do ar com valor em cerca de 0,6°C com a tinta térmica BrTr1 nas soluções construtivas SC2 e SC3.

Com a análise da Figura 5.8b, verifica-se que as superfícies interiores das paredes com tintas térmicas provocam um aumento da temperatura média radiativa, com valor máximo de cerca de 2°C com a tinta térmica BrTr1 na solução construtiva SC1. Este comportamento também ocorre na zona climática de Lisboa, mas na zona climática de Bragança apresenta maiores diferenças das temperaturas média radiativa entre as tintas térmicas e a convencional.

Comparando os resultados da Figura 5.8, verifica-se que nas soluções construtivas SC1 e SC2, com tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes, o aumento da temperatura média radiativa é superior à diminuição da temperatura do ar interior, ou seja, em termos de conforto térmico dos ocupantes na estação de aquecimento em Bragança é benéfico o uso de tintas térmicas nestas soluções.

Em geral, comparando o desempenho térmico das tintas térmicas com a tinta convencional nas superfícies interiores das paredes nas três soluções construtivas, observa-se que, com o aumento do coeficiente de transmissão térmico nas envolventes obtém-se maiores diferenças de temperatura entre as superfícies interiores com tintas térmicas e com tinta convencional. Esses resultados confirmam a maior influência das tintas térmicas para envolventes com baixa resistência térmica.

No entanto, se as perdas por condução forem muito elevadas e os ganhos internos na superfície interior das paredes forem reduzidos, a influência das tintas térmicas nas paredes pode ser menor. Tal justifica a solução construtiva SC2 apresentar uma maior diferença de temperatura superficial interior entre as tintas do que a solução construtiva SC1 nas duas zonas climáticas analisadas.

Comparando com os resultados obtidos na zona climática de Lisboa, verifica-se que as diferenças máximas dos parâmetros de temperatura analisados são superiores na zona climática de Bragança (Tabela 5.9). Esse comportamento justifica-se devido às temperaturas no exterior mais baixas em Bragança, o que aumenta o fluxo de calor nas paredes, resultando em uma maior influência das tintas térmicas.

Tabela 5.9- Diferenças máximas da temperatura do ar, das paredes e média radiativa nas zonas climáticas de Lisboa e Bragança na estação de aquecimento.

Zona climática	ΔT_i (BrTr-BrC) max	ΔT_{mr} (BrTr-BrC) max	ΔT_{si} (BrTr-BrC) max
Lisboa	-0,4	1,2	-1
Bragança	-0,6	2	-1,6

Estação de arrefecimento

Na zona climática de Lisboa, a avaliação do desempenho térmico das tintas nas superfícies interiores das paredes na estação de arrefecimento, foi realizada entre os dias 28 e 30 de agosto. Nestes dias, foram observadas as temperaturas no exterior mais altas no verão, tendo sido registado um valor máximo de cerca de 35,9 °C (Figura 5.9).

Com a análise das temperaturas do ar interior em regime livre nas três soluções construtivas consideradas na célula com as superfícies interiores das paredes com tinta convencional, verifica-se que, na solução construtiva com um menor coeficiente de transmissão térmica nas envolventes (SC3), as temperaturas do ar interior são mais baixas, enquanto na solução com maior coeficiente de transmissão térmico (SC1), as temperaturas do ar são mais elevadas (Figura 5.9). Este comportamento é idêntico nas temperaturas superficiais interiores das paredes da célula, com a solução construtiva SC3 com temperaturas superficiais mais baixas e a solução SC1 com temperaturas superficiais mais altas.

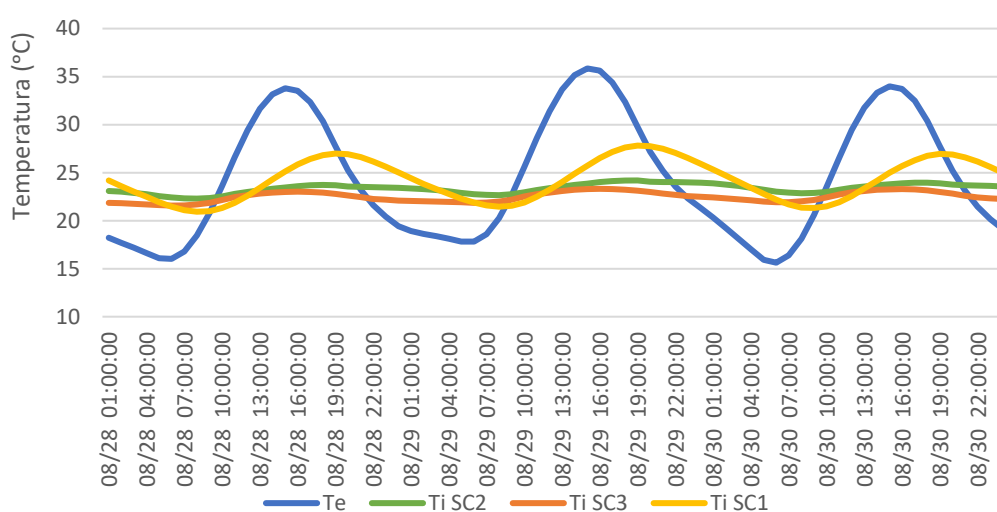


Figura 5.9- Temperatura exterior e interior na célula sem arrefecimento nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 em Lisboa.

Comparando a temperatura superficial interior das quatro paredes, verifica-se que a parede sul e oeste, são as paredes que apresentam temperaturas ligeiramente mais elevadas e a parede norte com temperaturas ligeiramente mais baixas. No caso do exemplo da solução construtiva SC1 com as superfícies interiores das paredes com a tinta convencional, obtém-se a temperatura superficial interior máxima das paredes apresentadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10- Temperatura superficial interior máxima das paredes com tinta convencional na célula sem arrefecimento com a solução construtiva SC1 em Lisboa.

Parede	Tsi max
sul	29,2
este	29,0
norte	28,9
oeste	29,3

Nas três soluções construtivas, as superfícies interiores das paredes com tintas térmicas apresentam temperaturas mais altas do que as superfícies das paredes com tinta convencional. Aplicando a diferença de temperatura superficial interior das paredes com as tintas térmicas e

com a tinta convencional, são obtidas as diferenças máximas para as três soluções construtivas apresentadas no gráfico Figura 5.10.

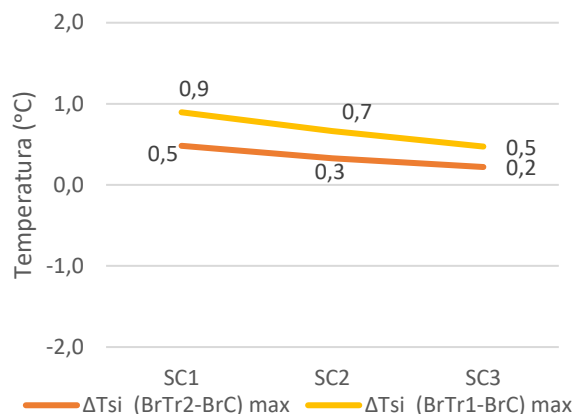


Figura 5.10- Diferença de temperatura superficial interior máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de arrefecimento em Lisboa.

Com a análise do gráfico da Figura 5.10, confirma-se que as superfícies interiores das paredes com tintas térmicas apresentam temperaturas mais altas, com uma diferença máxima entre as tintas de cerca 0,9°C na solução construtiva SC1. Este comportamento justifica-se devido à baixa emitância das tintas térmicas, que provoca uma menor perda de calor por radiação para o ar interior e conseqüentemente, o aumentando da temperatura da parede.

Da análise das diferenças de temperatura do ar interior e das diferenças de temperatura média radiativa entre as soluções construtivas com superfícies interiores das paredes com as tintas térmicas e com a tinta convencional, conclui-se que o uso de tintas térmicas provoca um ligeiro aumento da temperatura do ar interior e a diminuição da temperatura média radiativa (Figura 5.11).

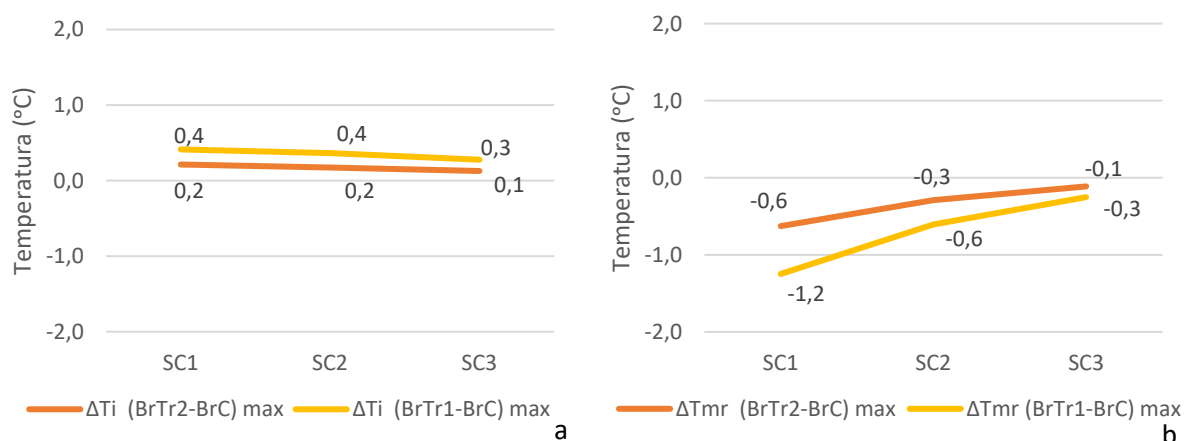


Figura 5.11- Diferenças máximas de temperatura do ar interior (a) e da temperatura média radiativa (b) entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de arrefecimento em Lisboa.

Com a análise da Figura 5.11a, confirma-se que as tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes provocam um ligeiro aumento das temperaturas do ar interior nas três soluções construtivas, com uma diferença máxima de cerca de 0,4 °C com a tinta térmica BrTr1 nas soluções construtivas SC1 e SC2. Como a temperatura superficial das paredes com tintas térmicas apresentam valores de temperatura superiores, ocorre uma maior transmissão de calor por convecção da superfície para o ambiente interior, provocando um maior aumento da temperatura do ar.

Da análise da Figura 5.11b, confirma-se que as superfícies interiores das paredes com tintas térmicas provocam a diminuição da temperatura média radiativa nas três soluções construtivas, com uma diferença máxima em cerca de 1,2 °C com a tinta térmica BrTr1 na solução construtiva SC1. Como as tintas térmicas apresentam baixa emitância, vai ocorrer uma menor transmissão de calor por radiação para o ambiente interior, de que resulta a temperatura média radiativa ser mais baixa.

Comparando os gráficos da Figura 5.11, verifica-se que nas soluções construtivas SC1 e SC2 com tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes, a diminuição da temperatura média radiativa é superior ao aumento da temperatura do ar, sendo assim benéfico para o conforto térmico dos ocupantes na estação de arrefecimento em Lisboa.

Na zona climática de Faro, foi avaliado o desempenho térmico das tintas sem arrefecimento entre os dias 23 e 25 de julho. Nestes dias, foram registadas as temperaturas no exterior mais altas no verão, tendo sido registado um valor máximo de cerca de 37 °C (Figura 5.12).

Nas três soluções construtivas consideradas nas envolventes da célula, com as superfícies interiores com tinta convencional, também se confirma que a solução com um menor coeficiente de transmissão térmica (SC3) apresenta uma temperatura média do ar interior mais baixa e a solução com maior coeficiente de transmissão térmica (SC1) tem uma temperatura média do ar mais elevada (Figura 5.12).

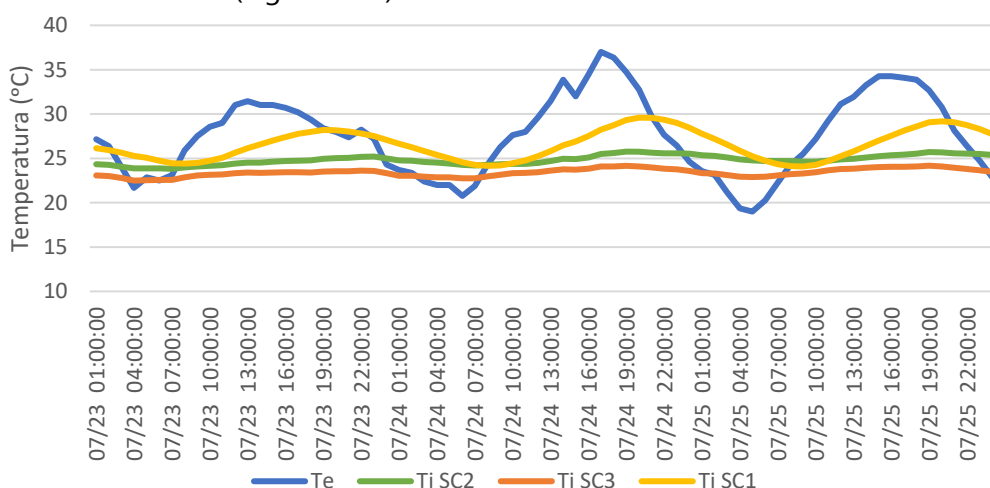


Figura 5.12- Temperatura exterior e interior na célula sem arrefecimento com as soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 em Faro.

As temperaturas superficiais interiores das paredes com tintas térmicas também são mais elevadas do que as superfícies interiores das paredes com tinta convencional, com a maior diferença entre as tintas em cerca de 1,2°C na solução construtiva SC1 com a tinta térmica BrTr1 (Figura 5.13).

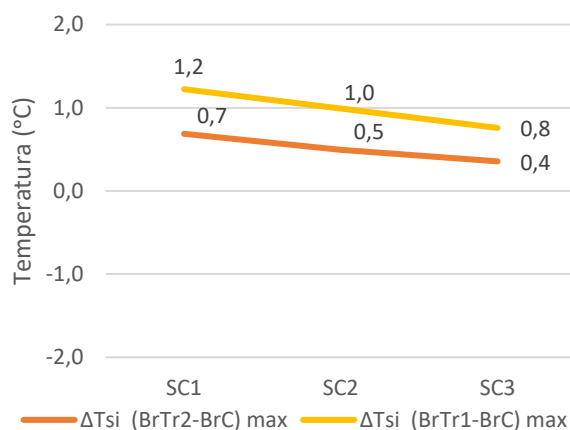


Figura 5.13- Diferença de temperatura superficial interior máxima entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de arrefecimento em Faro.

Da análise da temperatura do ar interior e da temperatura média radiativa das soluções construtivas com superfícies interiores das paredes com as tintas térmicas e com a convencional, conclui-se que as tintas térmicas nas soluções construtivas em Faro também provocam um aumento da temperatura do ar interior e uma diminuição da temperatura média radiativa (Figura 5.14).

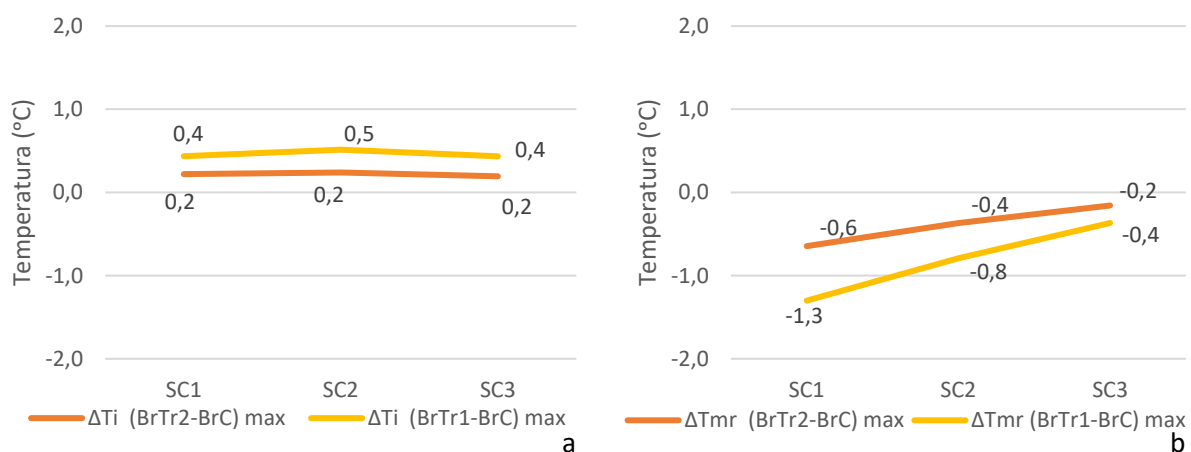


Figura 5.14- Diferenças máximas de temperatura do ar interior (a) e da temperatura média radiativa (b) entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de arrefecimento em Faro.

Com a análise da Figura 5.14a, confirma-se que a temperatura do ar interior aumenta nas três soluções construtivas com tintas térmicas nas superfícies interiores paredes, com a

maior diferença de temperatura do ar em cerca de 0,5 °C, com a tinta térmica BrTr1 na solução construtiva SC2.

Da análise da Figura 5.14b, verifica-se que a temperatura média radiativa é mais baixa nas três soluções construtivas com tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes e a maior diferença da temperatura média radiativa de cerca de 1,3 °C ocorre com a tinta térmica BrTr1 na solução construtiva SC1.

As diferenças máximas obtidas nas duas zonas climáticas são semelhantes, o que se justifica por ambas apresentarem elevadas temperaturas do ar interior e exterior e uma diferença reduzida entre as temperaturas entre os dois ambientes (Tabela 5.11).

Tabela 5.11- Diferenças máximas das temperaturas do ar, das paredes e média radiativa no verão em Lisboa e Faro.

Zona climática	ΔT_i (BrTr-BrC) max	ΔT_{mr} (BrTr-BrC) max	ΔT_{si} (BrTr-BrC) max
Lisboa	0,4	-1,2	0,9
Faro	0,5	-1,3	1,2

Tal como na zona climática de Lisboa, confirma-se que nas soluções construtivas SC1 e SC2 com tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes, a diminuição da temperatura média radiativa é maior do que o aumento da temperatura do ar interior, o que em termos de conforto térmico mostra benefício do uso de tintas térmicas nestas soluções.

5.6.3 Com sistema de climatização

Estação de aquecimento

Com a temperatura do ar interior constante de 19°C na estação de aquecimento, o comportamento térmico das tintas é semelhante ao visualizado na célula com temperatura do ar interior em regime livre.

Analisando a temperatura média radiativa e a temperatura superficial interior das paredes, com as tintas térmicas e com a tinta convencional aplicadas nas superfícies interiores dessas paredes, também se verifica que, com as tintas térmicas nas paredes, a temperatura média radiativa aumenta e a temperatura superficial interior das paredes diminui.

Com a análise das diferenças de temperatura média radiativa e temperatura superficial interior das paredes, observam-se os valores máximos apresentados na Tabela 5.12 na zona climática de Lisboa e na Tabela 5.13 na zona climática de Bragança.

Tabela 5.12- Diferença de temperatura superficial interior e temperatura média radiativa entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento com sistema de climatização em Lisboa.

Solução construtiva	ΔT_{mr} (BrTr2-BrC) max	ΔT_{mr} (BrTr1-BrC) max	ΔT_{si} (BrTr2-BrC) max	ΔT_{si} (BrTr1-BrC) max
SC1	0,4	0,8	-0,3	-0,5
SC2	0,2	0,5	-0,2	-0,4
SC3	0,1	0,2	-0,1	-0,2

As diferenças máximas de temperatura média radiativa e temperatura superficial interior das paredes em Lisboa, apresentam-se na solução SC1 com aplicação da tinta térmica BrTr1 nas superfícies interiores das paredes, com valor de cerca de 0,8°C e 0,5°C. Comparando com os valores obtidos na zona climática de Lisboa sem aquecimento na célula, as diferenças são menores com aquecimento.

Tabela 5.13- Diferença de temperatura superficial interior e temperatura média radiativa entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de aquecimento com sistema de climatização em Bragança.

Solução construtiva	ΔT_{mr} (BrTr2-BrC) max	ΔT_{mr} (BrTr1-BrC) max	ΔT_{si} (BrTr2-BrC) max	ΔT_{si} (BrTr1-BrC) max
SC1	0,7	1,3	-0,4	-0,7
SC2	0,4	0,9	-0,3	-0,6
SC3	0,2	0,4	-0,2	-0,4

O mesmo ocorre na zona climática de Bragança: as diferenças de temperatura média radiativa e temperatura superficial interior nas paredes são menores com aquecimento no interior, com valores máximos de cerca de 1,3°C e 0,7°C apresentados na solução SC1 com aplicação da tinta térmica BrTr1.

Estação de arrefecimento

Na estação de arrefecimento, com uma temperatura constante de 25°C no interior da célula, o comportamento térmico das tintas é semelhante ao visualizado na célula com a temperatura interior em regime livre.

Aplicando as diferenças de temperatura média radiativa e temperatura superficial interior das paredes entre as superfícies interiores das paredes com as tintas térmicas e com a tinta convencional, obteve-se os seguintes valores apresentados na Tabela 5.14 para a zona climática de Lisboa e na Tabela 5.15 para a zona climática de Faro.

Tabela 5.14- Diferença de temperatura superficial interior e temperatura média radiativa entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de arrefecimento com sistema de climatização em Lisboa.

Solução construtiva	ΔT_{mr} (BrTr2-BrC) max	ΔT_{mr} (BrTr1-BrC) max	ΔT_{si} (BrTr2-BrC) max	ΔT_{si} (BrTr1-BrC) max
SC1	-0,6	-1,1	0,4	0,7
SC2	-0,3	-0,6	0,3	0,7
SC3	-0,1	-0,2	0,2	0,5

Da análise da Tabela 5.14, verifica-se que as tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes nas três soluções construtivas, provocam a diminuição da temperatura média radiativa com valor máximo de cerca de 1,1°C, e aumentam a temperatura superficial interior das paredes com valor máximo de cerca de 0,7°C. Comparando com os valores obtidos em Lisboa sem aquecimento na célula, as diferenças máximas são menores com arrefecimento no interior da célula.

Tabela 5.15- Diferença de temperatura superficial interior e temperatura média radiativa entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 na estação de arrefecimento com sistema de climatização em Faro.

Solução construtiva	ΔT_{mr} (BrTr2-BrC) max	ΔT_{mr} (BrTr1-BrC) max	ΔT_{si} (BrTr2-BrC) max	ΔT_{si} (BrTr1-BrC) max
SC1	-0,6	-1,1	0,5	0,9
SC2	-0,3	-0,6	0,3	0,5
SC3	-0,2	-0,4	0,4	0,8

Da análise da Tabela 5.15, verifica-se que as tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes nas três soluções construtivas também provocam a diminuição da temperatura média radiativa, com valor máximo de cerca de 1,1°C, e aumentam a temperatura superficial interior das paredes com valor máximo de cerca de 0,9°C. Comparando com os valores obtidos em Lisboa com temperatura do ar interior na célula em regime livre, as diferenças máximas são menores com arrefecimento no interior da célula.

5.6.4 Consumos energéticos

Para avaliar o desempenho energético das tintas aplicadas nas superfícies interiores das paredes, foram analisados os consumos energéticos por área de pavimento nas duas estações e o balanço energético anual para as três soluções construtivas nas três zonas climáticas avaliadas. Os cenários em análise apresentam os consumos energéticos na estação de aquecimento para atingir uma temperatura do ar interior constante de 19°C e na estação de arrefecimento uma temperatura do ar interior constante de 25°C.

Na zona climática de Lisboa, as tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes provocam um aumento energético anual semelhante nas três soluções construtivas, com um valor máximo de 5,4% com a tinta térmica BrTr1 nas soluções SC2 e SC3. No entanto, os consumos energéticos de arrefecimento são praticamente nulos (Tabela 5.16).

Tabela 5.16 - Consumos energéticos em Lisboa considerando as temperaturas do ar interior de 19°C e 25°C na estação de aquecimento e arrefecimento.

Solução construtiva	Tinta	Consumos energéticos (kWh/m ²)		Aumento energético anual (%)
		Aquecimento	Arrefecimento	
SC1	BrC	122,6	2,6	-
	BrTr2	125,1	2,9	2,3
	BrTr1	127,4	3,2	4,3
SC2	BrC	70,0	0,0	-
	BrTr2	71,9	0,0	2,7
	BrTr1	73,8	0,0	5,4
SC3	BrC	39,2	0,0	-
	BrTr2	40,2	0,0	2,5
	BrTr1	41,3	0,0	5,4

Na zona climática de Bragança, o maior aumento energético apresenta-se com a tinta térmica BrTr1 na solução construtiva SC3, com um valor em cerca de 7,1%. Comparando as três soluções construtivas, conclui-se que, para coeficientes de transmissão térmica mais baixos nas envolventes as tintas térmicas são mais penalizadoras (Tabela 5.17).

Tabela 5.17- Consumos energéticos em Bragança considerando as temperaturas do ar interior de 19°C e 25°C na estação de aquecimento e arrefecimento.

Solução construtiva	Tinta	Consumos energéticos (kWh/m ²)		Aumento energético anual (%)
		Aquecimento	Arrefecimento	
SC1	BrC	274,9	4,3	-
	BrTr2	280,6	4,7	2,2
	BrTr1	285,8	5,0	4,2
SC2	BrC	148,9	0,1	-
	BrTr2	153,5	0,2	3,1
	BrTr1	158,1	0,3	6,3
SC3	BrC	76,3	0,0	-
	BrTr2	78,9	0,0	3,3
	BrTr1	81,7	0,0	7,1

Na zona climática de Faro, o maior aumento energético apresenta-se com a tinta térmica BrTr1 na solução SC2, com um valor de cerca de 9,8% (Tabela 5.18). Comparando com os

outros cenários, é a solução construtiva com as tintas térmicas no interior com maior aumento energético.

Tabela 5.18- Consumos energéticos em Faro considerando as temperaturas do ar interior de 19°C e 25°C na estação de aquecimento e arrefecimento.

Solução construtiva	Tinta	Consumos energéticos (kWh/m ²)		Aumento energético anual (%)
		Aquecimento	Arrefecimento	
SC1	BrC	85,6	5,2	-
	BrTr2	87,4	5,7	2,5
	BrTr1	88,9	6,2	4,8
SC2	BrC	40,3	1,6	-
	BrTr2	42,1	1,8	4,8
	BrTr1	44,0	2,0	9,8
SC3	BrC	29,1	0,0	-
	BrTr2	29,7	0,0	2,0
	BrTr1	30,4	0,0	4,4

A penalização das tintas térmicas nos consumos energéticos ocorre devido às tintas térmicas apresentarem temperaturas mais baixas na estação de aquecimento e temperaturas mais elevadas na estação de arrefecimento. Como o ar no interior no EnergyPlus é considerado transparente à radiação térmica, a diferença de temperatura no interior apenas ocorre por trocas de calor por convecção entre a superfície e o ar interior. Deste modo, com as tintas térmicas, ao provocarem temperaturas superficiais interiores nas paredes mais frias no inverno, ocorre uma maior diminuição da temperatura no interior; em situação de verão, ao apresentarem temperaturas superficiais mais elevadas, ocorre um aumento da temperatura no interior, que é prejudicial.

No entanto, o consumo energético apenas considera a energia necessária para manter temperaturas constantes nas duas estações, não apresentando em que cenários é melhor o conforto térmico no interior para os ocupantes, para qual a temperatura radiante é fundamental.

Como se verifica nos cenários com as soluções construtivas SC1 e SC2, apesar da ligeira diminuição de temperatura no interior no inverno e do pequeno aumento da temperatura no interior no verão com as tintas térmicas nas paredes, estas permitem um aumento superior da temperatura média radiativa no inverno e uma maior diminuição da temperatura média radiativa no verão. A temperatura média radiativa, ao ser mais elevada no inverno, faz com que os ocupantes estejam expostos a uma maior incidência da radiação térmica, o que permite um melhor conforto térmico. Em situação de verão, com uma menor temperatura média radiativa, ocorre uma menor incidência da radiação térmica, o que também permite um melhor conforto térmico.

Contudo, existe a possibilidade de reduzir os consumos energéticos nas duas estações, visto que, a alteração da temperatura média radiativa nas duas estações pode permitir aos ocupantes no interior sentirem o mesmo conforto térmico com um menor aquecimento e menor arrefecimento da temperatura do ar interior. Tal possibilitará alargar a gama de temperaturas de conforto para além dos 19-25°C.

5.7 Análise comparativa com os resultados *in situ*

Por impossibilidade da modelação exata das tintas térmicas da campanha experimental, caracterizadas por elevada refletância no infravermelho médio e elevada emitância, admitiu-se no programa que as tintas térmicas apresentam elevada refletância no infravermelho e baixa emitância. Apesar das diferenças da emitância das tintas, o comportamento térmico das tintas na estação de aquecimento e arrefecimento são semelhantes.

Para comparação dos resultados obtidos na campanha experimental, recorre-se aos resultados obtidos no programa, considerando a célula localizada na zona climática de Lisboa com a solução construtiva SC2, visto que, esta solução apresenta coeficientes de transmissão térmica semelhantes aos da célula experimental.

Na estação de aquecimento, com e sem aquecimento, as tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes apresentam temperaturas mais baixas. Comparando os resultados obtidos sem aquecimento no interior, ambos apresentam a diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a convencional na parede norte, com valor máximo de 1°C. Com aquecimento, com temperatura do ar interior constante de 19°C, a diferença de temperatura entre as tintas na parede norte, foi de 0,5 °C no programa e de 1,1°C na campanha experimental.

No programa, a diferença máxima de temperatura nas paredes entre as tintas térmicas e a convencional foi registada na parede norte, enquanto na campanha experimental, observou-se na parede oeste. Em ambos os casos estas são as paredes que apresentam temperaturas mais baixas.

O comportamento das tintas térmicas nas paredes é diferente quando ocorre aquecimento no interior. Enquanto as diferenças de temperatura superficial das paredes, com tintas térmicas ou convencional, aumentam com aquecimento no interior na campanha experimental, no programa, as diferenças diminuem. Este comportamento justifica-se devido à elevada emitância das tintas térmicas utilizadas na campanha experimental.

Da análise dos resultados obtidos no verão na célula experimental sem arrefecimento no interior, verificou-se que o uso de tintas térmicas nas paredes, pode apresentar temperaturas mais elevadas ou mais baixas em comparação com as tintas convencionais. Para o dia analisado com temperaturas mais elevadas, as tintas térmicas apresentam temperaturas mais elevadas com diferença máxima de temperatura entre as tintas com valor de 0,7°C. No programa, com tintas térmicas nas paredes, as temperaturas superficiais das paredes são mais elevadas, com uma diferença máxima entre as tintas com valor de 0,9°C.

CONCLUSÕES

6.1 Considerações finais

A presente dissertação teve o propósito de avaliar o desempenho térmico de tintas térmicas quando aplicadas em sistemas de pintura em edifícios e os seus contributos para a redução dos consumos energéticos anuais, incluindo as estações de arrefecimento e de aquecimento. Este estudo apresenta a continuação de estudo que avaliou o desempenho térmico de tintas térmicas comparativamente a tintas convencionais aplicadas no interior e no exterior de paredes na estação de arrefecimento, através da aplicação de sistemas de pintura numa célula experimental no LNEC e de um ensaio laboratorial para caracterizar a refletância dos respetivos sistemas de pintura.

Na presente dissertação, avaliou-se o desempenho térmico dos mesmos sistemas de pintura aplicados no interior da célula experimental, mas agora na estação de aquecimento, de modo a avaliar o comportamento térmico dos respetivos sistemas de pintura no inverno e avaliar o seu comportamento ao longo do ano. Para complementar as características superficiais das tintas, realizou-se o ensaio laboratorial para obter a emitância das tintas analisadas. Para comparar com os resultados obtidos na campanha experimental e avaliar os consumos energéticos em diferentes zonas climáticas de inverno e de verão em Portugal, utilizou-se o programa de simulação/modelação energética EnergyPlus para três cidades (Bragança, Lisboa e Faro), modelando uma célula com dimensões semelhantes à experimental e considerando a mesma solução construtiva para o pavimento, mas três diferentes soluções para as paredes e a cobertura da envolvente exterior.

Desta forma, realizou-se uma análise comparativa dos resultados obtidos, o que permitiu comprovar os resultados experimentais e obter uma avaliação mais abrangente do potencial das tintas térmicas no interior de edifícios.

6.1.1 Avaliação das características de tintas térmicas

Com as avaliações laboratoriais, foi possível avaliar o desempenho térmico das tintas térmicas através da análise comparativa das suas características com as das tintas convencionais. Os ensaios laboratoriais efetuados permitiram quantificar a refletância dos sistemas de pintura através de um espectrofotómetro, e a emitância através de um emissómetro.

O comportamento das tintas térmicas varia consoante a radiação térmica presente no ambiente em que se encontra exposto às tintas. No caso de tintas térmicas aplicadas no exterior, para reduzir as necessidades energéticas de arrefecimento, as superfícies exteriores devem apresentar elevada emitância no infravermelho e elevada refletância no espectro da radiação solar. No caso das tintas térmicas aplicadas no interior, para reduzir as necessidades de arrefecimento e aquecimento (considerando o conforto térmico no interior), as superfícies devem apresentar baixa emitância e elevada refletância no infravermelho médio.

Tintas térmicas no exterior

Com a análise dos sistemas de pinturas com aplicação no exterior, confirma-se que as tintas térmicas, comparativamente à tinta convencional, apresentam uma refletância superior na região do visível e no infravermelho próximo, com o sistema de pintura PrN+BrT1, constituído por primário convencional sob uma das tintas térmicas brancas, com a maior refletância nas duas regiões espectrais. Comparando com a refletância do sistema de pintura PrN+BrC, com o mesmo primário sob tinta convencional, o sistema anterior de pintura com tinta térmica apresenta uma refletância superior de 9,4% na região do visível e de 11,9% no infravermelho próximo. Analisando a emitância dos sistemas de pintura, as tintas térmicas apresentam um valor ligeiramente superior às tintas convencionais, com uma diferença máxima de 5% entre a tinta térmica BrT3 e o sistema de pintura PrN+BrC.

Com esta análise, confirma-se que as tintas térmicas aplicadas nas superfícies exteriores das envolventes apresentam características benéficas para um melhor desempenho térmico dos edifícios, visto que, as analisadas apresentam uma maior refletância no espectro da radiação solar e emitância no infravermelho. Desta forma, para além das possíveis poupanças energéticas na estação de arrefecimento, o uso das tintas térmicas em estudo pode provocar uma redução da temperatura superficial no exterior, contribuindo por exemplo para aumentar a durabilidade dos sistemas de isolamento térmico no exterior do tipo ETICS, garantir uma maior durabilidade da cor e da refletância da tinta e reduzir o efeito de ilha de calor.

Tintas térmicas no interior

Da análise das características dos sistemas de pintura em estudo com aplicação no interior, a emitância das tintas térmicas é ligeiramente mais elevada comparativamente à tinta convencional, com uma diferença máxima de 5% entre os sistemas de pinturas PrT+BrT2, com primário térmico sob tinta térmica, e PrN+BrC.

Com a análise da refletância dos sistemas de pintura, verifica-se que as tintas térmicas apresentam uma refletância superior na região do visível e no infravermelho próximo, sendo o mesmo sistema de pintura PrN+BrT1 o que apresenta uma maior refletância nas duas regiões espectrais.

No entanto, para avaliar o desempenho térmico das tintas no interior, deve-se analisar a refletância para os comprimentos de onda no infravermelho médio, o que não foi possível obter na análise laboratorial.

Assim, não se consegue concluir que as tintas térmicas em estudo apresentem características benéficas para um melhor desempenho térmico nos edifícios, com base no estudo das características óticas. Para contribuírem para uma redução dos consumos energéticos na estação de arrefecimento, as tintas térmicas devem ter uma baixa emissividade quando aplicadas nas superfícies interiores, visto que tal permite reduzir a transmissão de calor por radiação da superfície interior para o ambiente interior.

Contudo, se as tintas térmicas apresentarem elevada refletância no infravermelho médio, é possível reduzir os consumos energéticos na estação de aquecimento (considerando o conforto térmico no interior), visto que tal permite refletir a radiação térmica proveniente de equipamentos, dos ocupantes e das superfícies interiores, ocorrendo uma menor perda dos ganhos internos.

6.1.2 Desempenho de tintas térmicas no interior

Com a avaliação em condições reais, foi possível avaliar o desempenho térmico das tintas térmicas aplicadas no interior, através de uma análise comparativa do comportamento térmico com o da tinta convencional e tendo em consideração as características dos sistemas de pintura obtidos nos ensaios laboratoriais.

A avaliação em condições reais foi realizada através da medição da temperatura superficial de sistemas de pintura aplicados no interior da parede norte e oeste de uma célula experimental no LNEC na estação de aquecimento.

A análise do comportamento térmico dos sistemas de pintura foi realizada com condições ambientais no interior diferentes, considerando um ambiente interior sem aquecimento e com aquecimento e avaliado nas zonas das paredes norte e oeste com fluxos de calor diferentes.

Para as diferentes condições no ambiente interior, os sistemas de pintura com tintas térmicas apresentam temperaturas superficiais mais baixas comparativamente às temperaturas superficiais com tinta convencional. As maiores diferenças de temperatura entre as tintas térmicas e a convencional foram visualizadas na parede oeste (ladrilhos pretos no exterior) com valor máximo em cerca de 3,6°C quando se considera uma temperatura constante de 24°C no interior (temperatura mais elevada em análise).

A parede oeste, com ladrilhos pretos no exterior, apresenta uma maior influência às condições climáticas no exterior, seguida da zona da parede oeste com ladrilhos brancos no exterior, e por fim a parede norte. Comparando as maiores diferenças de temperatura entre os sistemas de pintura com tintas térmicas e tinta convencional para um aquecimento de 24°C, enquanto na parede oeste com ladrilhos pretos no exterior apresenta uma diferença máxima de 3,6°C, a zona da parede oeste com ladrilhos brancos no exterior tem uma diferença de 3,3°C e a parede norte tem apenas de 1,4°C.

Os sistemas de pintura com tinta térmica e primário térmico, apresentam as maiores diferenças de temperatura em cada zona das paredes consideradas; no caso da parede norte

são obtidas com o sistema de pintura PrT+BrT1 e na parede oeste com sistema de pintura PrT+BrT2.

Desta forma, através da análise dos resultados obtidos na avaliação em condições reais, e tendo em conta as características dos sistemas de pintura e os trabalhos analisados no capítulo 2, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- Na estação de arrefecimento, as tintas térmicas no interior com elevada refletância no infravermelho médio, absorvem menos radiação térmica proveniente do ambiente interior apresentando assim, uma temperatura superficial no interior mais baixa comparativamente com a temperatura superficial com tinta convencional.
- Quanto maior for a temperatura do ar interior, maior será a diferença de temperatura resultante dos diferentes sistemas (tintas térmicas e convencionais).
- Quanto maior for o fluxo de calor através das paredes, maior será a influência das tintas térmicas no interior.
- As tintas térmicas de elevada emitância e elevada refletância no infravermelho médio podem promover a ocorrência de condensações superficiais no interior.
- O uso de primário térmico aumenta a refletância no infravermelho nos sistemas de pintura com tinta térmica.

Os sistemas de pintura com tintas térmicas em estudo apresentam potencial para um melhor conforto térmico na estação de aquecimento, visto que essas tintas devem apresentar elevada refletância no infravermelho médio. No entanto, as superfícies com tintas térmicas apresentam temperaturas mais baixas, o que pode promover a ocorrência de condensações superficiais. No entanto, estas podem ser controladas através do aumento da resistência térmica das paredes, de modo a encontrar a melhor relação entre essa resistência e as tintas térmicas no interior.

6.1.3 Modelação numérica

Através da modelação de um pequeno edifício no programa EnergyPlus, com dimensões semelhantes à célula experimental, avaliou-se o desempenho térmico e energético das tintas térmicas e da tinta convencional quando aplicadas nas superfícies interiores das paredes na célula. Para uma análise comparativa com os resultados obtidos em condições reais, foram admitidas condições ambientais semelhantes no interior avaliadas na campanha experimental, admitindo o interior em regime livre e com sistema de climatização com temperatura constante de 19°C na estação de aquecimento e 25 °C na estação de arrefecimento. De seguida, quantificaram-se os consumos energéticos do sistema de climatização com as temperaturas definidas nas duas estações. Admitiu-se que a célula se localizava nas zonas climáticas de Lisboa, Bragança e Faro e que as envolventes apresentam três soluções construtivas com coeficientes de transmissão térmica diferentes. As tintas térmicas foram consideradas com elevada refletância no infravermelho médio e baixa emitância.

Na estação de aquecimento, com a aplicação de tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes, as temperaturas do ar e das superfícies interiores dessas paredes são mais baixas com diferenças máximas entre tintas térmicas e convencional em cerca de 0,6°C no ar e de 1,6°C nas paredes. As diferenças máximas de temperatura entre as tintas observam-se quando se considera a célula em regime livre na zona climática de Bragança, sendo esta zona caracterizada por temperaturas exteriores mais baixas. Também nesta zona climática, a temperatura média radiativa é maior com tintas térmicas nas paredes e apresenta uma diferença máxima da temperatura média radiativa entre as tintas térmicas e a convencional, de cerca de 2°C.

Na estação de arrefecimento, com a aplicação de tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes, as temperaturas do ar e dessas superfícies são mais altas e com diferenças máximas entre tintas térmicas e convencional de cerca de 0,5°C no ar e de 1,2°C nas paredes. As diferenças máximas de temperatura entre as tintas observam-se quando se considera a célula em regime livre na zona climática de Faro, sendo esta a zona com temperaturas exteriores mais altas. Também nesta zona, a temperatura média radiativa é menor com tintas térmicas nas paredes e apresenta a diferença máxima da temperatura média radiativa entre as tintas térmicas e a convencional, com cerca de 2°C.

Com a avaliação dos consumos energéticos em todos os cenários analisados, verifica-se que as tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes provocam uma penalização nos consumos energéticos na estação de arrefecimento e na estação de aquecimento. O cenário mais penalizador observa-se com a tinta térmica BrTr1 nas superfícies interiores das paredes na solução construtiva SC2, com um valor em cerca de 9,8%.

No entanto, como as tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes permitem que a temperatura média radiativa aumente no inverno e diminua no verão, estas promovem um melhor conforto térmico nas duas estações, logo existe a possibilidade de alargar as temperaturas de conforto nas duas estações para além dos 19-25°C sem provocar um menor conforto térmico para os ocupantes. Esta possibilidade verifica-se nas soluções construtivas SC1 e SC2, ou seja, para envolventes exteriores que apresentam elevado coeficiente de transmissão térmica.

Contudo, para além das conclusões admitidas na avaliação das tintas térmicas no interior em condições reais, através da análise dos resultados obtidos na modelação numérica pode-se tirar as seguintes conclusões:

- As tintas térmicas aplicadas no interior podem provocar um ligeiro aumento dos consumos energéticos considerando manter as temperaturas de 19°C e 25°C no interior definidas nas duas estações.
- As tintas térmicas no interior podem promover um melhor conforto térmico em edifícios com elevado coeficiente de transmissão térmica nas envolventes exteriores.
- Para zonas climáticas com condições ambientais mais rigorosas a influência das tintas térmicas no interior é maior.

6.1.4 Condicionantes do estudo

Apesar da vasta análise do desempenho térmico das tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes, o estudo apresenta algumas limitações na avaliação das respetivas tintas. Na avaliação em condições reais, os sistemas de pintura analisados não apresentam baixa emitância, ou seja, não têm as melhores características para otimizar o desempenho de tintas térmicas para aplicação no interior. Por outro lado, os sistemas de pintura apenas foram aplicados nas superfícies interiores das paredes norte e oeste da célula experimental e o ambiente interior é influenciado pelos diferentes sistemas de pintura existentes. Assim, não foi possível avaliar a variação da temperatura do ar no interior com as superfícies interiores com apenas sistemas de pintura com tintas térmicas ou com tintas convencionais.

Na avaliação do desempenho das tintas nas superfícies interiores das paredes, através da modelação numérica, a análise das tintas foi realizada para um pequeno edifício que não apresenta as características geométricas típicas de um edifício unifamiliar. Para além disso, da análise dos consumos energéticos efetuada nas estações de aquecimento e de arrefecimento para todos os cenários em análise, verifica-se que os consumos energéticos na estação de arrefecimento são baixos ou nulos, com um valor máximo de 6,2 kWh/m² e apresentam, para este cenário, apenas 6,5% dos consumos anuais. Quer dizer que, a aplicação de tintas térmicas nas superfícies exteriores, permitia diminuir os consumos energéticos na estação de arrefecimento, mas provocaria um ligeiro aumento dos consumos energéticos na estação de aquecimento, com valores já elevados.

Salienta-se ainda, que não foi possível simular da forma mais adequada o efeito da temperatura radiante, fundamental para a obtenção das condições de conforto térmico e que certamente afetaria a quantificação dos consumos energéticos.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Com base nos resultados obtidos na presente dissertação, para alargar a análise do desempenho térmico e energético das tintas térmicas no interior de edifícios sugere-se o desenvolvimento dos seguintes estudos:

- Analisar, em condições reais, o desempenho térmico e energético das tintas térmicas aplicadas em todas as superfícies interiores das paredes.
- Analisar o desempenho térmico e energético das tintas térmicas aplicadas em todas as superfícies interiores das paredes de uma fração de edifício multifamiliar ou de edifício unifamiliar, através de modelação numérica.
- Analisar por modelação numérica, os consumos energéticos de um edifício, considerando o efeito da temperatura média radiativa num espaço interior com a aplicação de tintas térmicas nas superfícies interiores das paredes.
- Analisar o desempenho térmico e as características superficiais de sistemas de pintura com primário refletante e tinta transparente no infravermelho médio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assane, M. (2023). Avaliação da eficiência de tintas térmicas em período de arrefecimento em edifícios. Dissertação de Mestrado, Universidade NOVA de Lisboa.
- ASTM (2003). ASTM G 173-03. Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface.
- ASTM (2012). ASTM E 903-12. Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres.
- ASTM (2022). ASTM C1371-15. Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers.
- Buckmaster, D., Abramson, A. (2015). The effects of interior emissivity and room layout on forced air space conditioning power usage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 216-228. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.059>
- Cardinali, M., Giuseppe, A., Castellani, B., Filipponi, M., Nicolini, A., Rossi, F. (2022). An investigation towards the optimum design of retro-reflective materials as building envelopes for the enhancement of optical performance. *Construction and Building Materials*, 358, 129466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129466>
- Castellani, B., Giuseppe, A. D., Pazzaglia, A., Nicolini, A., Rossi, F. (2024). The effect of a protective layer on the optical behavior of retro-reflective paintings for building envelopes. *Heliyon*, 10(1), e23956. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23956>
- Castro, A. (2002). Análise da refletância de cores de tintas através da técnica espectrofotométrica. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.
- Comunidade Europeia (CE) (2010). Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de maio de 2010. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 153.
- CE (2012). Diretiva 2012/27/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de outubro de 2012. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 315.
- CE (2018). Diretiva 2018/844/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 156.
- CE (2019). Diretiva 2019/944/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de junho de 2019. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 158.
- 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>
- Cozza, E. S., Alloisio, M., Comite, A., Tanna, G. D., Vicini, S. (2015). NIR-reflecting properties of new paints for energy-efficient buildings. *Solar Energy*, 116, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.004>
- Devices and Services (2024). <https://www.devicesandservices.com/prod03.htm> (acedido a 09-maio-2024).

- Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) (2024a). <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/eficiencia-energetica/sistema-de-certificacao-energetica-dos-edificios/diretiva-do-desempenho-energetico-dos-edificios/> (acedido a 19-janeiro-2024).
- DGEG (2024b). Manual SCE - Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios. Direção Geral de Energia e Geologia, ADENE.
- 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.
- Diário da República (DR) (2020). Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 de dezembro de 2020. Diário da República n.º 237/2020, 1º Suplemento, Série I de 2020-12-07.
- DR (2021a). Decreto-Lei n.º 102/2021, de 19 de novembro. Diário da República n.º 225/2021, Série I de 2021-11-19.
- DR (2021b). Portaria n.º 138-I/2021, de 1 de julho. Diário da República n.º 126/2021, 2º Suplemento, Série I de 2021-07-01.
- EnergyPlus (2024). <https://energyplus.net/> (acedido a 4-junho-2024).
- Fantucci, S., Serra, V. (2020). Experimental assessment of the effects of low-emissivity paints as interior radiation control coatings. *Applied sciences*, 10(3), 842. <https://doi.org/10.3390/app10030842>
- Giuseppe, A. D., Cardinali, M., Castellani, B., Filipponi, M., Nicolini, A., Rossi, F. (2023). The impact of outdoor aging and soiling on the optic features of glass beads retro-reflective coatings. *Solar Energy*, 258, 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.056>
- Gonçalves, L. (2014). Avaliação do desempenho térmico de tintas reflectantes em fachadas por análise termográfica. Dissertação de Mestrado, Universidade NOVA de Lisboa.
- Gonçalves, H., Graça, J. (2004). Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal. (Manual Técnico). Lisboa: Direção Geral de Geologia e Energia.
- 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.proeng.2017.10.416>
- Henriques, A. (2011). Comportamento higrotérmico de edifícios. Versão 11.5. Universidade NOVA de Lisboa.
- Hugo, G. (2000). Effects of low emissive interior wall paints on energy savings and thermal comfort in hot climates. IPS-innovative products & systems. http://ips-innovations.com/low_emissive_paints_effects_ref.htm (acedido a 23-fevereiro-2024).
- Hugo, G. (2005). New paints and coatings with specific properties in the near and the far infrared. IPS-innovative products & systems. http://ips-innovations.com/new_paints_ref.htm (acedido a 23-fevereiro-2024).

- 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.jobbe.2018.04.008>
- Joudi, A., Svedung, H., Cehlin, M., Rönnelid, M. (2011). Highly reflective coatings for interior and exterior steel cladding and the energy efficiency of buildings. *Applied Energy*, 88(12), 4655-4666. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.002>
- 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>
- Li, X., Povos, J., Huang, Z., Zhaol, Z., Qiu, J., Ruan, X. (2020). Full Daytime Sub-ambient Radiative Cooling in Commercial-like Paints with High Figure of Merit. *Cell Reports Physical Science*, 1(10), 100221. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100221>
- Lourenço, T. (2016). Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography. MSc dissertation, Universidade NOVA de Lisboa.
- Maldague, X. (2001). Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. John Wiley and Sons, Inc.
- Malz, S., Krenkel, W., Steffens, O. (2020). Infrared reflective wall paint in buildings: Energy saving potentials and thermal comfort. *Energy and Buildings*, 224, 110212. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110212>
- Marques, A. (2019). Tintas termicamente isolantes para interior e exterior. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto.
- Matias, L. (2001). Avaliação do desempenho térmico de protecções reflectantes aplicadas em coberturas inclinadas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa.
- Modest, M. (1993). Radiative heat transfer. McGraw-Hill, Inc.
- Naia, R. (2019). Durabilidade de revestimentos com características termo-refletantes. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto.
- Peng, Y., Lai, J. C., Xiao, X., Jin, W., Zhou, J., Yang, Y., Gao, X., Thang, J., Fan, L., Fan, S., Bao, Z., Cui, Y. (2023). Colorful low-emissivity paints for space heating and cooling energy savings. *PNAS*, 120(34). <https://doi.org/10.1073/pnas.2300856120>
- 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, LNEC.
- Pina dos Santos, C. A., Matias, L. (2006). Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. LNEC, ITE 50.
- Prado, A., Ferreira, 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>

- Ramos, N., Souza, A., Maia, J., Almeida, R. (2020). Colour degradation of façade coatings - the effect of nanopigments incorporation. *E3S Web of Conferences*, 172. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/202017224004>
- Ribeiro, S. (2013). Formulação de tintas de interior para redução de consumo energético. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- Rossi, F., Castellani, B., Presciutti, A., Morini, E., Filipponi, M., Nicolini, A., Santamouris, M. (2015). Retroreflective façades for urban heat island mitigation: Experimental investigation and energy evaluations. *Applied Energy*, 145, 8-20. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.129>
- Santamouris, M., Yun, G. Y. (2020). Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island. *Renewable Energy*, 161, 792-807. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.109>
- Sharkawi, N., Baharun, A. (2016). Effect of different types of paint to residential building. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 7(2), 68-74. <http://dx.doi.org/10.33736/jcest.306.2016>
- Shen, H., Tan, H., Tzempelikos, A. (2011). The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption-An experimental study. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 573-580. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.024>
- Shi, Z., Zhang, X. (2011). Analyzing the effect of the longwave emissivity and solar reflectance of building envelopes on energy-saving in buildings in various climates. *Solar Energy*, 85(1). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.11.009>
- 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>
- Souza, A., Colen, I., Ramos, N. (2024). Improving energy efficiency in Portuguese buildings: Retrofitting façades with high reflectance finishing coat. *Procedia Structural Integrity*, 55, 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.019>
- USDE (2022a). EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation Engineering Reference. U.S. Department of Energy.
- USDE (2022b). EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation Input Output Reference. U.S. Department of Energy.
- Xu, F., Zhang, J., Gao, Z. (2024). A case study of the effect of building surface cool and super cool materials on residential neighbourhood energy consumption in Nanjing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, Part A, 114027. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114027>
- Zhang, S., Niu, D., Zhang, L. (2022). Mean radiant temperature calculated based on radiant heat dissipation of human body addressing effect of emissivity of inner surfaces of envelope. *Solar Energy*, 1, 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.09.034>

Resultados da campanha experimental

Tabela A.1- Temperatura superficial interior dos sistemas de pintura na parede norte e oeste com aquecimento de 24°C na célula no dia 26 de março de 2024 (dia registado com a maior diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional).

Data	Parede oeste						Parede norte		
	Ladrilhos bancos no exterior			Ladrilhos pretos no exterior			Em baixo		
	1_BrTr2	2_BrTr1	3_BrC	4_BrTr2	5_BrTr1	6_BrC	8_BrTr1	10_BrC	13_BrTr2
26/03/2024 00:08	19,45	20,28	21,73	19,32	19,76	21,73	21,30	22,42	21,79
26/03/2024 00:38	19,41	20,47	21,65	19,24	19,9	21,64	21,23	22,38	21,74
26/03/2024 01:08	19,69	20,33	21,52	19,51	19,79	21,45	21,17	22,30	21,70
26/03/2024 01:38	19,23	20,23	21,45	19,03	19,63	21,38	21,14	22,24	21,65
26/03/2024 02:08	19,03	19,88	21,36	18,78	19,27	21,29	21,12	22,19	21,63
26/03/2024 02:38	19,2	20,1	21,26	18,9	19,44	21,11	21,04	22,12	21,55
26/03/2024 03:08	18,92	19,78	21,19	18,6	19,1	21,05	21,06	22,06	21,52
26/03/2024 03:38	19,3	20,04	21,05	18,9	19,35	20,87	20,96	21,96	21,50
26/03/2024 04:08	18,61	19,48	20,98	18,23	18,77	20,83	20,98	21,92	21,45
26/03/2024 04:38	18,96	19,74	20,93	18,5	19	20,74	20,91	21,88	21,44
26/03/2024 05:08	18,99	19,64	20,8	18,52	18,94	20,58	20,83	21,79	21,38
26/03/2024 05:38	18,59	19,6	20,77	18,11	18,84	20,57	20,85	21,77	21,34
26/03/2024 06:08	18,51	19,22	20,68	18	18,49	20,48	20,83	21,68	21,32
26/03/2024 06:38	18,9	19,68	20,62	18,33	18,86	20,34	20,74	21,63	21,32
26/03/2024 07:08	18,42	19,37	20,56	17,85	18,58	20,33	20,75	21,61	21,28
26/03/2024 07:38	18,88	19,49	20,5	18,28	18,73	20,21	20,69	21,56	21,25
26/03/2024 08:08	18,5	19,25	20,45	17,93	18,47	20,19	20,72	21,51	21,19
26/03/2024 08:38	18,38	19,15	20,38	17,81	18,34	20,11	20,68	21,44	21,12
26/03/2024 09:08	18,48	19,34	20,34	17,9	18,55	20,05	20,65	21,43	21,08
26/03/2024 09:38	18,35	19,18	20,32	17,76	18,43	20,01	20,65	21,40	21,05
26/03/2024 10:08	18,82	19,43	20,24	18,24	18,69	19,9	20,54	21,33	20,95
26/03/2024 10:38	18,02	19,09	20,3	17,46	18,37	20	20,60	21,34	20,92
26/03/2024 11:08	18,27	19,31	20,28	17,71	18,6	19,97	20,53	21,34	20,86
26/03/2024 11:38	18,58	19,25	20,24	18,05	18,6	19,91	20,47	21,28	20,81
26/03/2024 12:08	17,99	19,04	20,29	17,45	18,4	19,94	20,46	21,31	20,76
26/03/2024 12:38	18,99	19,67	20,26	18,39	19,07	19,93	20,40	21,30	20,70
26/03/2024 13:08	18,71	19,39	20,29	18,15	18,82	19,95	20,42	21,29	20,66
26/03/2024 13:38	17,99	18,89	20,37	17,47	18,33	20,07	20,48	21,32	20,66
26/03/2024 14:08	18,64	19,56	20,37	18,12	19,01	20,08	20,39	21,35	20,64
26/03/2024 14:38	18,45	19,29	20,4	17,96	18,77	20,12	20,44	21,33	20,61
26/03/2024 15:08	18,8	19,58	20,47	18,32	19,13	20,2	20,44	21,39	20,64
26/03/2024 15:38	17,95	19,19	20,58	17,53	18,71	20,35	20,56	21,44	20,66
26/03/2024 16:08	18,67	19,73	20,61	18,21	19,29	20,43	20,51	21,50	20,67
26/03/2024 16:38	18,53	19,47	20,67	18,16	19,05	20,51	20,53	21,50	20,66
26/03/2024 17:08	17,96	19,42	20,82	17,67	18,99	20,7	20,61	21,58	20,67
26/03/2024 17:38	18,68	19,89	20,92	18,36	19,49	20,84	20,60	21,62	20,71
26/03/2024 18:08	18,93	19,91	21	18,75	19,59	20,99	20,57	21,64	20,71
26/03/2024 18:38	18,32	19,59	21,13	18,21	19,31	21,2	20,64	21,70	20,70
26/03/2024 19:08	19,21	20,26	21,23	19,11	20,02	21,31	20,57	21,73	20,74
26/03/2024 19:38	18,88	19,9	21,34	18,88	19,67	21,49	20,56	21,72	20,71
26/03/2024 20:08	18,65	20,01	21,44	18,72	19,77	21,65	20,57	21,78	20,74
26/03/2024 20:38	19,2	20,28	21,46	19,23	20,01	21,67	20,46	21,77	20,71
26/03/2024 21:08	18,17	19,74	21,51	18,26	19,41	21,77	20,50	21,79	20,69
26/03/2024 21:38	19,06	20,2	21,46	19,07	19,91	21,7	20,40	21,78	20,73
26/03/2024 22:08	18,13	19,73	21,46	18,15	19,36	21,73	20,41	21,79	20,74
26/03/2024 22:38	18,93	20,06	21,41	18,9	19,65	21,61	20,35	21,79	20,79
26/03/2024 23:08	18,28	19,58	21,4	18,23	19,15	21,57	20,39	21,78	20,81
26/03/2024 23:38	18,94	19,97	21,28	18,8	19,53	21,41	20,31	21,73	20,81

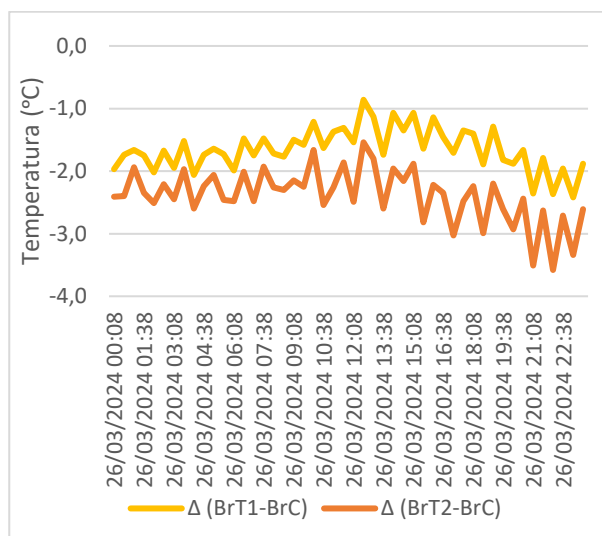


Figura A.1- Diferença de temperatura superficial interior entre tintas térmicas e a tinta convencional na parede oeste com ladrilhos pretos no exterior com aquecimento de 24°C na célula no dia 26 de março de 2024 (zona da parede oeste com maior diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional)

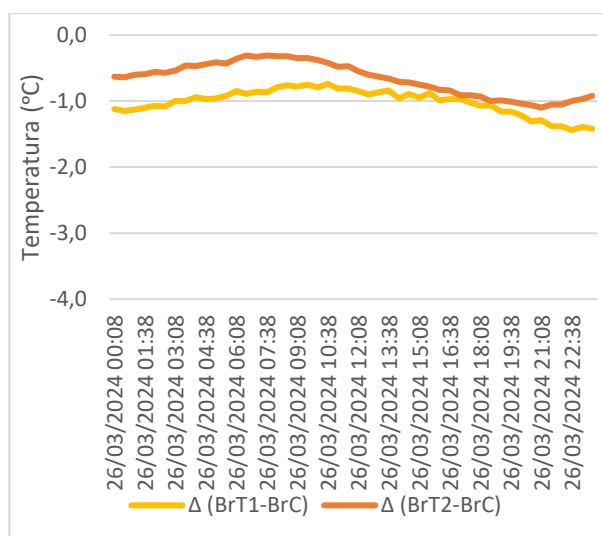


Figura A.2- Diferença de temperatura superficial interior entre tintas térmicas e a tinta convencional na parede norte com aquecimento de 24°C na célula no dia 26 de março de 2024.

Modelação no EnergyPlus

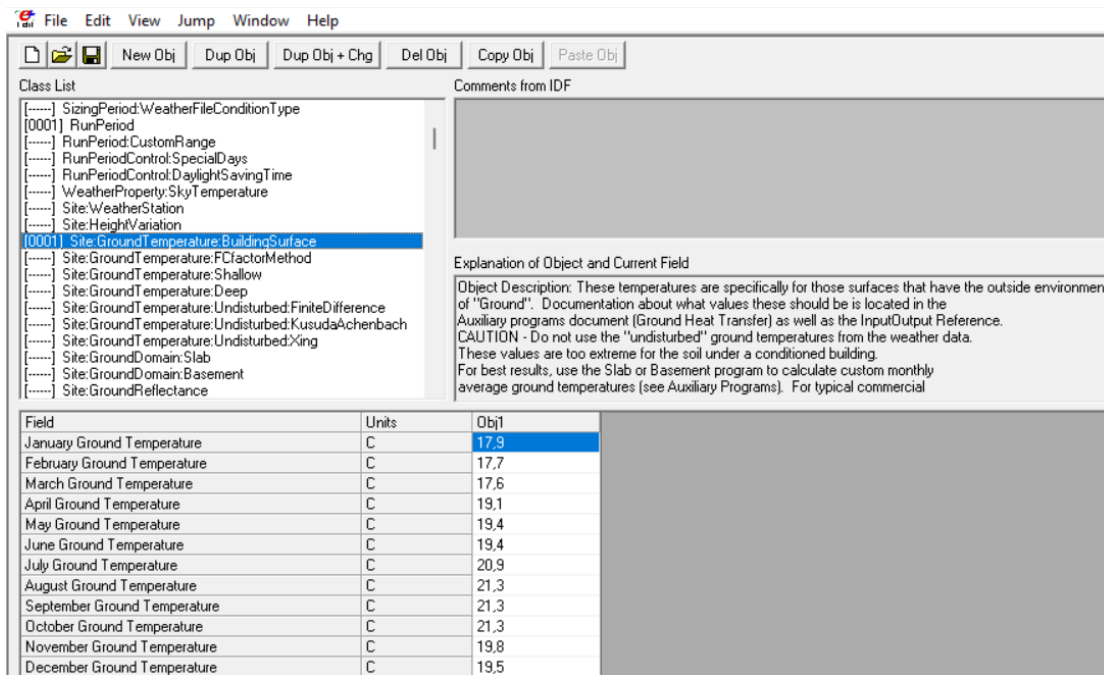


Figura A.3- Temperatura do solo ao longo do ano em Lisboa.

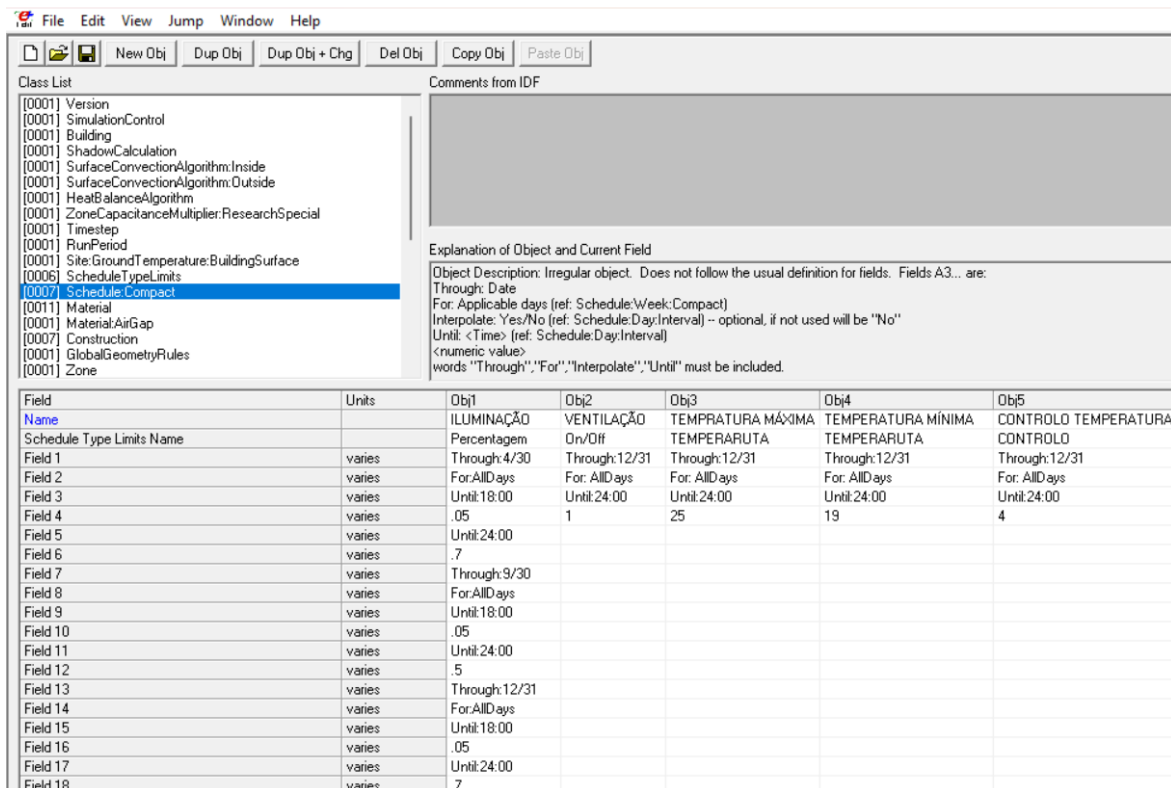


Figura A.4- Horários da iluminação, ventilação e temperatura.

Class List: Surface Construction Elements, [0011] Material, Material.NoMass, Material.InfraredTransparent, [0001] Material.AirGap, Material.Roo/Vegetation, Window.Material.SimpleGlazingSystem, Window.Material.Glazing, Window.Material.GlazingGroup.ThermoChromic, Window.Material.Glazing.RefractorExtinctionMethod, Window.Material.Gas, Window.Gap.SupportPillar, Window.Gap.DeflectionState, Window.Material.GasMixture, Window.Material.Gap, Window.Material.Shade, Window.Material.ComplexShade

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field
Object Description: Regular materials described with full set of thermal properties

Field Description:
ID: N7
Default: 0
Range: 0 <= X <= 1

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10
Name		Alvenaria (11cm)	Betão(15cm)	Reboco BrC (1.5cm)	Reboco BrT1 (1.5cm)	Reboco BrT2 (1.5cm)	Camada de forma (5cm)	XPS (8cm)	XPS(5cm)	XPS(2cm)	Betão (10cm)
Roughness		Rough	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough
Thickness	m	0,11	0,15	0,015	0,015	0,015	0,05	0,08	0,05	0,02	0,1
Conductivity	W/m-K	0,41	2	1,3	1,3	1,3	0,85	0,037	0,037	0,037	2
Density	kg/m3	1200	2300	1800	1800	1800	1500	35	35	35	2300
Specific Heat	J/kg-K	837	880	1000	1000	1000	800	1550	1550	1550	880
Thermal Absorptance		0,9	0,9	0,9	0,2	0,4	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Solar Absorptance				0,2	0,2	0,2					
Visible Absorptance				0,2	0,2	0,2					

Figura A.5- Caracterização dos materiais das soluções construtivas.

Class List: Surface Construction Elements, [0011] Material, Material.NoMass, Material.InfraredTransparent, [0001] Material.AirGap, Material.Roo/Vegetation, Window.Material.SimpleGlazingSystem, Window.Material.Glazing, Window.Material.GlazingGroup.ThermoChromic, Window.Material.Glazing.RefractorExtinctionMethod, Window.Material.Gas, Window.Gap.SupportPillar, Window.Gap.DeflectionState, Window.Material.GasMixture, Window.Material.Gap, Window.Material.Shade, Window.Material.ComplexShade

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field
Object Description: Air Space in Opaque Construction

Field Description:
ID: A1
Enter a alphanumeric value
This field is required.

Field	Units	Obj1
Name		Espaço de Ar
Thermal Resistance	m2-K/W	0,18

Figura A.6- Resistência térmica do espaço de ar (espessura de 2 cm e 5 cm).

Class List: MaterialProperty.HeatAndMoistureTransfer.Suction, MaterialProperty.HeatAndMoistureTransfer.Redistribution, MaterialProperty.HeatAndMoistureTransfer.Diffusion, MaterialProperty.HeatAndMoistureTransfer.ThermalConductivity, MaterialProperty.GlazingSpectralData, [0007] Construction, Construction.FactorUndergroundWall, Construction.FactorGroundFloor, Construction.InternalSource, WindowThermalModel.Params, Construction.ComplexFenestrationState, Construction.WindowEquivalentLayer, Construction.WindowDataFile

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field
Object Description: Start with outside layer and work your way to the inside layer
Up to 10 layers total, 8 for windows
Enter the material name for each layer

Field Description:
ID: A11
Select from list of objects

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		Paredes SC2	Cobertura SC2	Paredes SC3	Cobertura SC3	Paredes SC1	Cobertura SC1	Pavimento
Outside Layer		Reboco BrC (1.5cm)	XPS(2cm)	Reboco BrC (1.5cm)	XPS (8cm)	Reboco BrC (1.5cm)	Camada de forma (5cm)	Betão (10cm)
Layer 2		Alvenaria (11cm)	Camada de forma (5cm)	Alvenaria (11cm)	Camada de forma (5cm)	Alvenaria (11cm)	Betão(15cm)	
Layer 3		Espaço de Ar	Betão(15cm)	Espaço de Ar	Betão(15cm)	Reboco BrT1 (1.5cm)	Reboco BrC (1.5cm)	
Layer 4		Alvenaria (11cm)	Reboco BrC (1.5cm)	Alvenaria (11cm)	XPS(5cm)	Reboco BrC (1.5cm)		
Layer 5		Reboco BrC (1.5cm)		Alvenaria (11cm)				
Layer 6				Reboco BrT1 (1.5cm)				
Layer 7								
Layer 8								
Layer 9								
Layer 10								

Figura A.7- Soluções construtivas SC1, SC2 e SC3.

Class List

- MaterialProperty:GlazingSpectralData
- Construction
- Construction:CfactorUndergroundWall
- Construction:CfactorGroundFloor
- Construction:InternalSource
- WindowThermalModelParams
- Construction:ComplexFenestrationState
- Construction:WindowEquivalentLayer
- Construction:WindowDataFile

Thermal Zones and Surfaces

- GlobalGeometryRules
- GeometryTransform
- Zone
- ZoneList
- ZoneGroup
- BuildingSurface:Detailed**

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Allows for detailed entry of building heat transfer surfaces. Does not include subsurfaces such as windows or doors.

Field Description:
ID: N17
No default value available

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Parede Sul	Parede Este	Parede Norte	Parede Oeste	Cobertura	Pavimento
Surface Type		Wall	Wall	Wall	Wall	Floor	Floor
Construction Name		Paredes SC2	Paredes SC2	Paredes SC2	Paredes SC2	Cobertura SC2	Pavimento
Zone Name		ZONA FA	ZONA FA	ZONA FA	ZONA FA	ZONA FA	ZONA FA
Outside Boundary Condition		Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Ground
Outside Boundary Condition Object							
Sun Exposure		SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	NoSun
Wind Exposure		WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	NoWind
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	0	3,68	3,68	0	3,68	0
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	0	3,68	3,68	0	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	0	0	0	2,65	0
Vertex 2 X-coordinate	m	3,68	3,68	0	0	3,68	0
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	3,68	3,68	0	3,68	3,68
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	2,65	0
Vertex 3 X-coordinate	m	3,68	3,68	0	0	0	3,68
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	3,68	3,68	0	3,68	3,68
Vertex 3 Z-coordinate	m	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	0
Vertex 4 X-coordinate	m	0	3,68	3,68	0	0	3,68
Vertex 4 Y-coordinate	m	0	0	3,68	3,68	0	0
Vertex 4 Z-coordinate	m	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	0

Figura A.8- Características geométricas das paredes, pavimento e cobertura.

Class List

- Internal Gains
- People
- ComfortViewFactorAngles
- Lights**
- ElectricEquipment
- GasEquipment
- HotWaterEquipment
- SteamEquipment
- OtherEquipment
- ElectricEquipment:ITE:AirCooled
- ZoneBaseboard:OutdoorTemperatureControlled
- SwimmingPool:Indoor
- ZoneContaminantSourceAndSink:CarbonDioxide
- ZoneContaminantSourceAndSink:Generic:Constant
- SurfaceContaminantSourceAndSink:Generic:PressureDriver
- ZoneContaminantSourceAndSink:Generic:CutoffModel

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Sets internal gains for lights in the zone. If you use a ZoneList in the Zone or ZoneList name field then this definition applies to all the zones in the ZoneList.

Field Description:
ID: A1
Enter a alphanumeric value

Field	Units	Obj1
Name		Iluminação
Zone or ZoneList Name		Zona FA
Schedule Name		ILUMINAÇÃO
Design Level Calculation Method		Watts/Area
Lighting Level	W	
Watts per Zone Floor Area	W/m2	5
Watts per Person	W/person	
Return Air Fraction		0
Fraction Radiant		0,42
Fraction Visible		0,18

Figura A.9- Iluminação considerada.

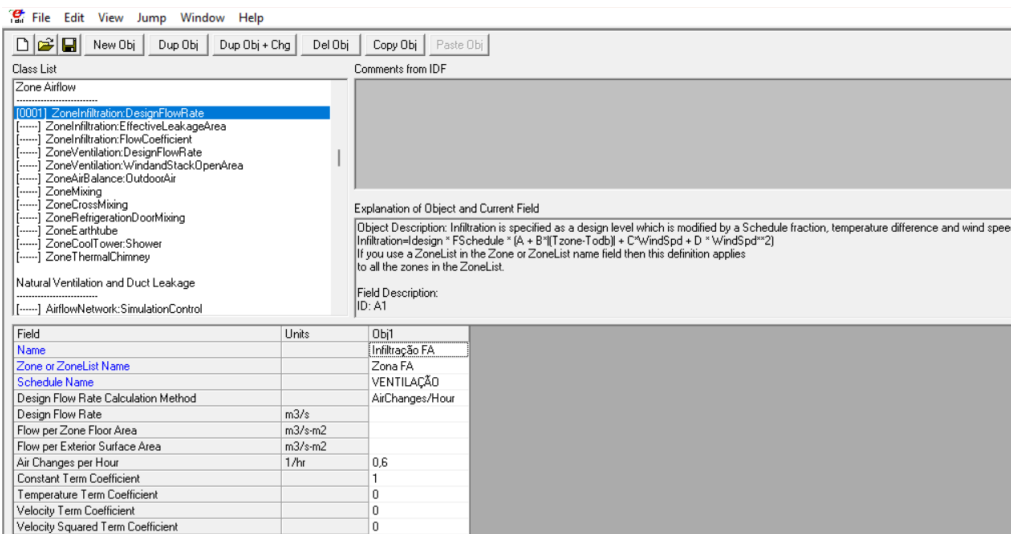


Figura A.10- Renovação horária do ar considerada.



Figura A.11- Controlo de temperatura do ar no interior da célula no intervalo de 19°C e 25°C na estação de aquecimento e arrefecimento.

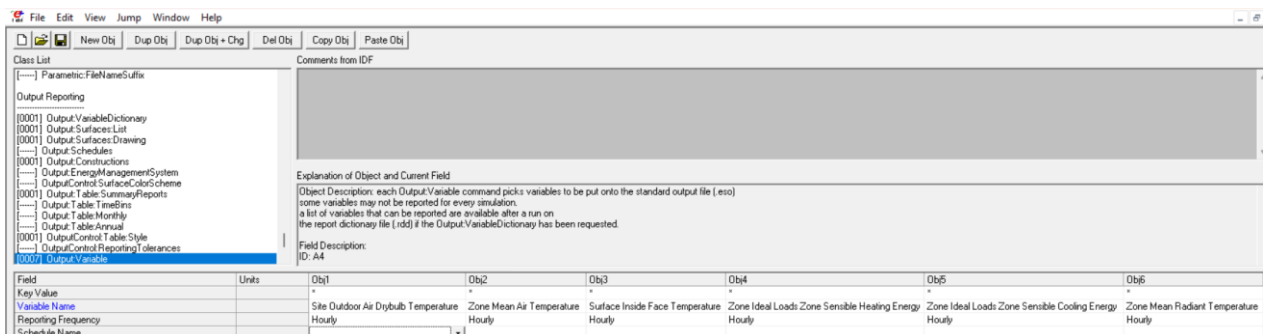


Figura A.12- Variáveis de saída para obter as temperaturas exterior, interior e média radiante na célula e os consumos energéticos na estação de arrefecimento e aquecimento.

Resultados no EnergyPlus

Tabela A.2- Diferenças máximas de temperatura interior, média radiativa e superficial interior entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 sem sistema de climatização nas zonas climáticas de Lisboa, Bragança e Faro.

Simulação	Solução construtiva	Tinta	Zona climática	ΔT_i (BrTr-BrC) max		ΔT_{mr} (BrTr-BrC) max		ΔT_{si} (BrTr-BrC) max	
				Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
1	SC1	BrC	Lisboa	-	-	-	-	-	-
2		BrTr2		-0,1	0,2	0,6	-0,6	-0,5	0,5
3		BrTr1		-0,2	0,4	1,2	-1,2	-1,0	0,9
4	SC2	BrC	Lisboa	-	-	-	-	-	-
5		BrTr2		-0,2	0,2	0,4	-0,3	-0,5	0,3
6		BrTr1		-0,4	0,4	0,8	-0,6	-1,0	0,7
7	SC3	BrC	Lisboa	-	-	-	-	-	-
8		BrTr2		-0,2	0,1	0,2	-0,1	-0,4	0,2
9		BrTr1		-0,4	0,3	0,4	-0,3	-0,9	0,5
10	SC1	BrC	Bragança	-	-	-	-	-	-
11		BrTr2		-0,2	0,2	1,0	-0,7	-0,8	0,6
12		BrTr1		-0,4	0,5	2,0	-1,3	-1,4	1,1
13	SC2	BrC	Bragança	-	-	-	-	-	-
14		BrTr2		-0,3	0,2	0,6	-0,4	-0,8	0,5
15		BrTr1		-0,6	0,5	1,4	-0,8	-1,6	1,0
16	SC3	BrC	Bragança	-	-	-	-	-	-
17		BrTr2		-0,3	0,2	0,3	-0,2	-0,7	0,3
18		BrTr1		-0,6	0,3	0,7	-0,4	-1,4	0,7
19	SC1	BrC	Faro	-	-	-	-	-	-
20		BrTr2		-0,1	0,2	0,6	-0,6	-0,5	0,7
21		BrTr1		-0,3	0,4	1,2	-1,3	-0,9	1,2
22	SC2	BrC	Faro	-	-	-	-	-	-
23		BrTr2		-0,2	0,2	0,4	-0,4	-0,5	0,5
24		BrTr1		-0,4	0,5	0,8	-0,8	-1,0	1,0
25	SC3	BrC	Faro	-	-	-	-	-	-
26		BrTr2		-0,1	0,2	0,2	-0,2	-0,4	0,4
27		BrTr1		-0,3	0,4	0,4	-0,4	-0,8	0,8

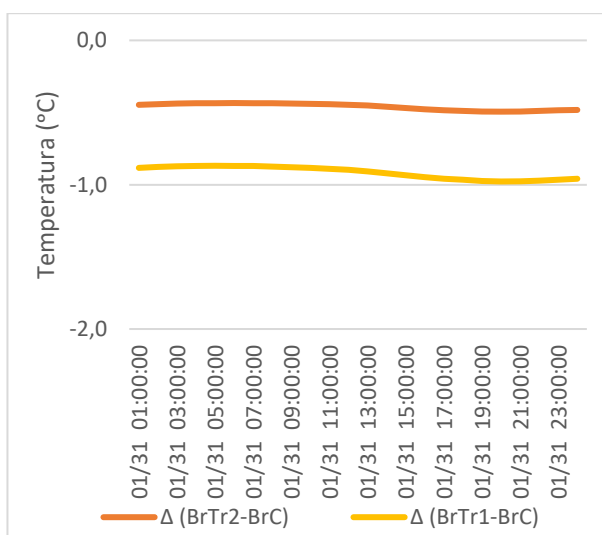


Figura A.13- Diferença de temperatura superficial interior entre as tintas térmicas e a tinta convencional na parede norte da solução construtiva SC2 sem aquecimento na célula em Lisboa (dia registado com a maior diferença de temperatura entre as tintas térmicas e a tinta convencional nos cenários semelhantes aos avaliados em condições reais).

Tabela A.3- Diferenças máximas de temperatura média radiativa e superficial interior entre as tintas térmicas e a tinta convencional nas soluções construtivas SC1, SC2 e SC3 com a temperatura do ar interior de 19°C e 25°C na estação de aquecimento e arrefecimento nas zonas climáticas de Lisboa, Bragança e Faro.

Simulação	Solução construtiva	Tinta	Zona climática	ΔT_{mr} (BrTr-BrC) max		ΔT_{si} (BrTr-BrC) max	
				Inverno	Verão	Inverno	Verão
28	SC1	BrC	Lisboa	-	-	-	-
29		BrTr2		0,4	-0,6	-0,3	0,4
30		BrTr1		0,8	-1,1	-0,5	0,7
31	SC2	BrC	Lisboa	-	-	-	-
32		BrTr2		0,2	-0,3	-0,2	0,3
33		BrTr1		0,5	-0,6	-0,4	0,7
34	SC3	BrC	Lisboa	-	-	-	-
35		BrTr2		0,1	-0,1	-0,1	0,2
36		BrTr1		0,2	-0,2	-0,2	0,5
37	SC1	BrC	Bragança	-	-	-	-
38		BrTr2		0,7	-0,6	-0,4	0,4
39		BrTr1		1,3	-1,1	-0,7	0,8
40	SC2	BrC	Bragança	-	-	-	-
41		BrTr2		0,4	-0,4	-0,3	0,4
42		BrTr1		0,9	-0,8	-0,6	0,8
43	SC3	BrC	Bragança	-	-	-	-
44		BrTr2		0,2	-0,2	-0,2	0,3
45		BrTr1		0,4	-0,4	-0,4	0,7
46	SC1	BrC	Faro	-	-	-	-
47		BrTr2		0,4	-0,6	-0,3	0,5
48		BrTr1		0,8	-1,1	-0,5	0,9
49	SC2	BrC	Faro	-	-	-	-
50		BrTr2		0,3	-0,3	-0,3	0,3
51		BrTr1		0,6	-0,6	-0,5	0,5
52	SC3	BrC	Faro	-	-	-	-
53		BrTr2		0,1	-0,2	-0,1	0,4
54		BrTr1		0,2	-0,4	-0,2	0,8



2024

RODRIGO BOTELHO

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TINTAS TÉRMICAS EM EDIFÍCIOS