



ANDRÉ VENTURA FRANCISCO

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

A UTILIZAÇÃO DE TINTAS SELETIVAS COMO  
ESTRATÉGIA DE ARREFECIMENTO RADIATIVO  
EM EDIFÍCIOS: REVISÃO DA LITERATURA

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL –  
PERFIL DE CONSTRUÇÃO

Universidade NOVA de Lisboa  
Abril, 2025



# A UTILIZAÇÃO DE TINTAS SELETIVAS COMO ESTRATÉGIA DE ARREFECIMENTO RADIATIVO EM EDIFÍCIOS: REVISÃO DA LITERATURA

ANDRÉ VENTURA FRANCISCO

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Orientador:** Doutor Daniel Aelenei  
Professor Associado, Faculdade de Ciências  
e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa

**Júri:**

**Presidente:** Doutor Válder José da Guia Lúcio  
Professor Associado,  
Universidade NOVA de Lisboa

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

**Vogais:** Doutor Daniel Aelenei  
Professor Associado,  
Universidade NOVA de Lisboa

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL - PERFIL DE CONSTRUÇÃO

Universidade NOVA de Lisboa  
Abril, 2025

# A UTILIZAÇÃO DE TINTAS SELETIVAS COMO ESTRATÉGIA DE ARREFECIMENTO RADIATIVO EM EDIFÍCIOS: REVISÃO DA LITERATURA

Copyright © André Ventura Francisco, 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.

*À minha família*



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha profunda gratidão ao meu orientador, Professor Doutor Daniel Aelenei, pela confiança depositada em mim ao confiar-me a tarefa de desenvolver este trabalho. O seu apoio contínuo, a orientação experiente e os valiosos contributos ao longo de todo o processo foram fundamentais para o progresso desta dissertação e para o meu crescimento académico e pessoal.

Agradeço aos coordenadores das equipas de avaliação técnica da NOVA FCT dos programas "Apoio a Edifícios Mais Sustentáveis II", "Apoio a Edifícios Mais Sustentáveis 2023" e "Eficiência Energética em Edifícios da Administração Pública Central", nomeadamente ao Professor Doutor Daniel Aelenei, ao Professor Doutor João Gouveia, ao Professor Doutor Luís Baltazar, e ao Professor Doutor Pedro Pereira, pela oportunidade de participar nestes programas de grande impacto nacional. Estes programas permitiram-me compreender na prática como as soluções para tornar os edifícios mais sustentáveis são implementadas, proporcionando-me uma visão abrangente sobre os desafios e as estratégias para melhorar a eficiência energética e ambiental do parque edificado nacional.

Agradeço também ao meu colega Doutor Hugo Silva, Engenheiro Civil, com quem colaboro no Programa de Eficiência Energética da Administração Pública Central, pelo apoio fundamental, orientação e conselhos que, muitas vezes além do âmbito técnico, foram cruciais para o meu desenvolvimento profissional e pessoal, ajudando-me a superar desafios e a ganhar confiança na minha trajetória académica, pessoal e profissional.

Gostaria de agradecer aos docentes e funcionários da NOVA FCT, especialmente do Departamento de Engenharia Civil, pelo apoio ao longo do meu percurso académico.

Um agradecimento especial à minha namorada, Andreia Sario, e ao meu enteado, Simão Campaniço, pelo apoio incondicional, paciência e constante incentivo, que foram fundamentais para me manter focado, superar os desafios e alcançar este momento.

A minha eterna gratidão aos meus pais, João Francisco e Lisabeta Francisco, e aos meus irmãos, Adriana Francisco e Alexandre Francisco, pelo amor, apoio, confiança, força, paciência e fé incondicionais, que foram essenciais para o meu crescimento pessoal e académico, e sem os quais não teria chegado até aqui.

Aos meus colegas e amigos, Catarina Cordeiro, Evandro Ferreira, Gonçalo Silva, Inês Valente, Marco Quaresma, Miguel Marques e Salvador Menezes, agradeço pela amizade e pelo apoio. A vossa companhia tornou esta jornada mais leve e agradável.

Gostaria de recordar e agradecer ao meu bisavô, Albertino, que sempre me encorajou ao longo da minha vida, e, embora já não esteja entre nós, os seus ensinamentos e apoio continuam a ser uma fonte de inspiração para mim.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos restantes amigos e familiares pelo apoio, compreensão e encorajamento constantes, que foram fundamentais para que superasse os desafios e concluísse esta etapa da minha vida.

## RESUMO

O consumo excessivo de energia em edifícios tem impactos ambientais significativos, contribuindo para a emissão de gases com efeito de estufa e o aquecimento global. Neste contexto, a adoção de estratégias eficientes de gestão de energia e de tecnologias passivas é essencial. A utilização de tintas seletivas nas envolventes dos edifícios tem se mostrado uma tecnologia promissora no que respeita à redução da utilização de energia para climatização e melhorar o conforto interior dos edifícios devido à sua capacidade de limitar a absorção de energia solar e emitir radiação de onda longa na gama de comprimentos de onda dos infravermelhos, entre 8 – 13  $\mu\text{m}$ , denominada "janela atmosférica".

A presente dissertação apresenta uma revisão dos recentes avanços na aplicação de tintas seletivas como estratégia de arrefecimento passivo em edifícios. Estudos recentes mostram que diversas formulações permitem que estas tintas mantenham temperaturas superficiais inferiores à temperatura ambiente, mesmo sob exposição direta à radiação solar. A aplicação em edifícios contribui para uma redução significativa no consumo de energia para arrefecimento ambiente, sendo particularmente vantajosa em climas quentes e amenos, onde pode melhorar o conforto térmico ao longo de todo o ano e, em casos específicos, permite dispensar a utilização de sistemas de arrefecimento.

**Palavras chave:** Arrefecimento Radiativo; Tintas Seletivas; Edifícios; Revisão da Literatura



## ABSTRACT

Excessive energy consumption in buildings has significant environmental impacts, contributing to greenhouse gas emissions and global warming. In this context, adopting efficient energy management strategies and passive technologies is essential. The use of selective coatings on building envelopes has proven to be a promising technology in reducing energy use for climate control and improving indoor comfort due to their ability to limit solar energy absorption and emit long-wave radiation in the infrared wavelength range, between 8 – 13  $\mu m$ , known as the "atmospheric window." This dissertation provides a comprehensive review of recent advances in the development and application of selective paints as a passive cooling strategy for building envelopes. Research indicates that various formulations enable these coatings to achieve surface temperatures below ambient levels, even when exposed to direct solar radiation. Their integration in building significantly reduces energy demand for cooling purposes, offering substantial benefits in hot and temperate climates. Furthermore, selective paints can enhance thermal comfort throughout the year and, in specific cases, eliminate the reliance on mechanical cooling systems.

**Keywords:** Radiative cooling; Selective Paints; Buildings; Literature Review



# ÍNDICE

<b>1 . INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTO.....	1
1.2. DESAFIOS E OBJETIVOS.....	4
1.3. METODOLOGIA.....	5
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	9
<b>2 . ARREFECIMENTO PASSIVO .....</b>	<b>11</b>
2.1. ESTRATÉGIAS PASSIVAS PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS.....	11
2.2. NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO E POTENCIAL DE ARREFECIMENTO RADIATIVO .....	14
2.3. INTRODUÇÃO AO ARREFECIMENTO RADIATIVO .....	21
2.4. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DO ARREFECIMENTO RADIATIVO.....	25
2.4.1. <i>Balço energético</i> .....	25
2.4.1.1. Energia irradiada.....	26
2.4.1.2. Energia radiativa atmosférica absorvida.....	28
2.4.1.3. Energia solar absorvida.....	34
2.4.1.4. Energia intrínseca perdida por arrefecimento .....	35
2.4.1.5. Resumo do balanço energético .....	36
<b>3 . TINTAS COM PROPRIEDADES RADIATIVAS .....</b>	<b>37</b>
3.1. INTRODUÇÃO.....	37
3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS TINTAS SELETIVAS.....	38
3.2.1. <i>Principais resultados</i> .....	38
3.2.2. <i>Desafios na produção e implementação a larga escala</i> .....	45
3.2.2.1. Custo de fabrico .....	45
3.2.2.2. Impacto ambiental associado ao processo de fabrico e aplicação .....	48
3.2.2.3. Acumulação de sujidade ao longo do tempo de exposição às condições climáticas.....	49
3.2.2.4. A cor como requisito estético .....	50
3.2.2.5. Espessura do material aplicado na superfície a revestir .....	54
3.2.2.6. Durabilidade dos materiais .....	55
<b>4 . APLICAÇÃO DE TINTAS SELETIVAS EM EDIFÍCIOS.....</b>	<b>61</b>
4.1. INTRODUÇÃO.....	61
4.2. ESTUDOS NUMÉRICOS .....	62
4.3. ESTUDOS EXPERIMENTAIS .....	70
<b>5 . CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>83</b>
<b>A. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA COMPLEMENTAR.....</b>	<b>95</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - DIAGRAMA ILUSTRATIVO DO FENÓMENO DA ILHA URBANA DE CALOR. ADAPTADO DE (GREEN ROOF ORGANISATION (GRO), 2023) .....	2
FIGURA 1.2 - PROCESSO DE SELEÇÃO DA LITERATURA .....	8
FIGURA 2.1 - REPRESENTAÇÃO SOBRE A INCIDÊNCIA SOLAR EM EDIFÍCIOS DO HEMISFÉRIO NORTE NO VERÃO E NO INVERNO. ADAPTADO DE (GUIA CASA EFICIENTE, 2014).....	11
FIGURA 2.2 - REPRESENTAÇÃO SOBRE VENTILAÇÃO NATURAL. ADAPTADO DE (PROJETOU BLOG, 2021).....	12
FIGURA 2.3 - REPRESENTAÇÃO DO SOMBREAMENTO COM RECURSO A ÁRVORES DE FOLHA CADUCA. ADAPTADO DE (DICAS DE ARQUITETURA, 2018) .....	12
FIGURA 2.4 - REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO COM DUTOS SUBTERRÂNEOS DURANTE O VERÃO E INVERNO. ADAPTADO DE (GUIDE PERRIER, 2015).....	13
FIGURA 2.5 - ESTIMATIVA DAS NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO ("COOLING NEEDS") DE REFERÊNCIA NA EUROPA ( $kWh/m^2. ano$ ). (GUERRERO DELGADO, SÁNCHEZ RAMOS AND ÁLVAREZ DOMÍNGUEZ, 2020).....	14
FIGURA 2.6 - MAPAS CLIMÁTICOS MÉDIOS ANUAIS GLOBAIS BASEADOS NAS MÉDIAS MENSAIS NO PERÍODO 2015–2019. (A) TEMPERATURA AMBIENTE, °C. (B) ÁGUA PRECIPITÁVEL, $mm$ . (C) IRRADIAÇÃO SOLAR, $W/m^2$ . (D) FRAÇÃO DE COBERTURA DE NUVENS. (AILI, YIN AND YANG, 2021) .....	15
FIGURA 2.7 - MAPAS RADIATIVOS MÉDIOS ANUAIS GLOBAIS BASEADOS NA MODELAGEM. (A) A DENSIDADE DE POTÊNCIA DA RADIAÇÃO ASCENDENTE DE ONDAS LONGAS DE UMA SUPERFÍCIE RADIATIVA "PRETO IDEAL" OPERANDO À TEMPERATURA AMBIENTE. (B) A DENSIDADE DE POTÊNCIA DA RADIAÇÃO DE ONDAS LONGAS DESCENDENTE DA ATMOSFERA, INCLUINDO OS EFEITOS DA COBERTURA DE NUVENS. (C) A DENSIDADE DE POTÊNCIA DA RADIAÇÃO LÍQUIDA, CONSIDERANDO A RADIAÇÃO ASCENDENTE NA SUPERFÍCIE, RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA DESCENDENTE E UMA ABSORÇÃO SOLAR DE 5%. (AILI, YIN AND YANG, 2021) .....	16
FIGURA 2.8 - MAPAS GLOBAIS DO POTENCIAL DE ARREFECIMENTO RADIATIVO MÉDIO SAZONAL ( $W/m^2$ ). (A, B): O POTENCIAL MÉDIO DE ARREFECIMENTO RADIATIVO DURANTE O VERÃO E A SUA ANOMALIA, RESPETIVAMENTE. (C, D): O POTENCIAL MÉDIO DE ARREFECIMENTO RADIATIVO DURANTE O INVERNO E A SUA ANOMALIA, RESPETIVAMENTE. (AILI, YIN AND YANG, 2021) .....	16
FIGURA 2.9 - MAPAS DE POTÊNCIA DE ARREFECIMENTO RADIATIVO NOTURNO PARA AS DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO NA EUROPA (EM $W/m^2$ ). (VILÀ, MEDRANO AND CASTELL, 2023) .....	18
FIGURA 2.10 - MAPAS DO POTENCIAL ANUAL DE ENERGIA DE ARREFECIMENTO RADIATIVO NOTURNO PARA AS DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO NA EUROPA (EM $kWh/(m^2. ano)$ ). (VILÀ, MEDRANO AND CASTELL, 2023) .....	18
FIGURA 2.11 - MAPAS DE POTÊNCIA DE ARREFECIMENTO RADIATIVO DURANTE TODO O DIA PARA AS DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO NA EUROPA (EM $W/m^2$ ). (VILÀ, MEDRANO AND CASTELL, 2023).....	19
FIGURA 2.12 - MAPAS DO POTENCIAL ANUAL DE ENERGIA DE ARREFECIMENTO RADIATIVO DURANTE TODO O DIA PARA AS DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO NA EUROPA (EM $kWh/(m^2. ano)$ ). (VILÀ, MEDRANO AND CASTELL, 2023) .....	19

FIGURA 2.13 - MAPAS DE POTÊNCIA DE ARREFECIMENTO RADIATIVO MÉDIO NOTURNO (EM $W/m^2$ ) PARA: A) O CENÁRIO A1B; B) PARA O CENÁRIO A2 E C) PARA O CENÁRIO B1. (VILÀ, MEDRANOC AND CASTELL, 2023) .....	19
FIGURA 2.14 - MAPAS DE POTÊNCIA DE ARREFECIMENTO RADIATIVO MÉDIO DURANTE TODO O DIA (EM $W/m^2$ ) PARA: A) O CENÁRIO A1B; B) PARA O CENÁRIO A2 E C) PARA O CENÁRIO B1. (VILÀ, MEDRANO AND CASTELL, 2023).....	20
FIGURA 2.15 - BALANÇO ENERGÉTICO DO PLANETA TERRA. (MENDE, 2017) .....	21
FIGURA 2.16 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO. (CSI, 2023) .....	21
FIGURA 2.17 - PERFIS DE ABSORÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS DOS PRINCIPAIS GASES QUE CONSTITUEM A ATMOSFERA TERRESTRE. (STEPHENS, 1992).....	22
FIGURA 2.18 - ESPECTRO DE RADIAÇÃO SOLAR COM REPRESENTAÇÃO DA CURVA FORA DA ATMOSFERA, DA CURVA AO NÍVEL DO SOLO E INDICAÇÃO DAS MOLÉCULAS QUE ABSORVEM ENERGIA NOS COMPRIMENTOS DE ONDA CONSIDERADOS. (STEPHENS, 1992) .....	23
FIGURA 2.19 - PERFIL DE TRANSMITÂNCIA E ABSORÇÃO DA ATMOSFERA NOS COMPRIMENTOS DE ONDA 5 - 30 MM. (HOSSAIN AND GU, 2016).....	23
FIGURA 2.20 - <i>YAKHCHALS</i> - "POÇO DE GELO". (ANDREWS, 2017).....	24
FIGURA 2.21 - BALANÇO ENERGÉTICO DE UMA SUPERFÍCIE EXPOSTA ÀS CONDIÇÕES AMBIENTAIS EXTERIORES. (B. ZHAO, HU, AO, CHEN, <i>ET AL.</i> , 2019).....	26
FIGURA 2.22 - PERFIL ESPECTRAL DE ABSORÇÃO/EMISSIVIDADE DE DIFERENTES RADIADORES, COM O ESPECTRO SOLAR AM 1,5 E A IDENTIFICAÇÃO DA JANELA ATMOSFÉRICA. (B. ZHAO, HU, AO, CHEN, <i>ET AL.</i> , 2019) .....	27
FIGURA 2.23 - ESPECTRO SOLAR. ADAPTADO DE (LIM, 2020) .....	34
FIGURA 3.1 - PERFIL DE ABSORÇÃO/EMISSIVIDADE DA TINTA À BASE DE $CaCO_3$ EM COMPARAÇÃO COM UMA TINTA COMERCIAL. (LI <i>ET AL.</i> , 2020) .....	39
FIGURA 3.2 - SUPERFÍCIE PINTADAS COM AS DIFERENTES TINTAS, EM FORMA DE "P". A) MOSTRA A CAPTURA COM UMA CÂMARA NORMAL E C) MOSTRA UMA CAPTAÇÃO COM UMA CÂMARA TÉRMICA. (LI <i>ET AL.</i> , 2020).....	40
FIGURA 3.3 - TEMPERATURA DA AMOSTRA DURANTE OS TESTES DE CAMPO. (LI <i>ET AL.</i> , 2020).....	40
FIGURA 3.4 - TEMPERATURA DA AMOSTRA DURANTE OS TESTES DE CAMPO. (X. LI <i>ET AL.</i> , 2021) .....	40
FIGURA 3.5 - PERFIS DE ABSORÇÃO/EMISSIVIDADE DA TINTA DESENVOLVIDA PELOS AUTORES ("RC PAINT") E DE UMA TINTA À BASE DE DIÓXIDO DE TITÂNIO ("CW PAINT"). (CHAE <i>ET AL.</i> , 2021) .....	41
FIGURA 3.6 - EM A), DUAS PEQUENAS CASAS REVESTIDAS COM DUAS TINTAS DE COMPOSIÇÕES DIFERENTE. EM B), UMA IMAGEM TERMOGRÁFICA DAS DUAS CASAS PINTADAS, SOB RADIAÇÃO SOLAR. (CHAE <i>ET AL.</i> , 2021).....	41
FIGURA 3.7 - PERFIL DE TEMPERATURAS DO INTERIOR DAS DUAS CASAS MINIATURA E DA TEMPERATURA EXTERIOR. (CHAE <i>ET AL.</i> , 2021).....	42
FIGURA 3.8 - PODER LÍQUIDO DE ARREFECIMENTO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE. (CHAE <i>ET AL.</i> , 2021) .....	42
FIGURA 3.9 - TEMPERATURA DE ARREFECIMENTO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE. (CHAE <i>ET AL.</i> , 2021).....	43
FIGURA 3.10 - TEMPERATURA DE ARREFECIMENTO EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE NÃO RADIATIVO. (CHAE <i>ET AL.</i> , 2021).....	43
FIGURA 3.11 - PODER LÍQUIDO DE ARREFECIMENTO EM FUNÇÃO DO FLUXO SOLAR. (CHAE <i>ET AL.</i> , 2021) .....	44
FIGURA 3.12 - TEMPERATURA DE ARREFECIMENTO EM FUNÇÃO DO FLUXO SOLAR. (CHAE <i>ET AL.</i> , 2021).....	44
FIGURA 3.13 - PERFIS DE REFLETIVIDADE DAS TINTAS PRODUZIDAS PELOS AUTORES. "BGB" REPRESENTA A TINTA COM BOLAS DE VIDRO PARTIDAS E "GB" REPRESENTA A TINTA COM BOLAS DE VIDRO INTEIRAS. "SOLAR SPECTRUM" REPRESENTA O ESPECTRO SOLAR. (YU <i>ET AL.</i> , 2022) .....	47

FIGURA 3.14 - PERFIS DE EMISSIVIDADE DAS TINTAS PRODUZIDAS PELOS AUTORES. "BGB" REPRESENTA A TINTA COM BOLAS DE VIDRO PARTIDAS E "GB" REPRESENTA A TINTA COM BOLAS DE VIDRO INTEIRAS. "COOLING POTENCIAL" REFERE O POTENCIAL DE ARREFECIMENTO ATRAVÉS DA JANELA ATMOSFÉRICA. (YU <i>ET AL.</i> , 2022) .....	47
FIGURA 3.15 - PERFIS DE TEMPERATURA (EM CIMA) E PERFIS DE DIFERENÇA DE TEMPERATURA EM RELAÇÃO À AMBIENTE (EM BAIXO), AMBOS PARA A DURAÇÃO DO TESTE DE CAMPO DE 24 HORAS, PARA AS DUAS TINTAS TESTADAS E PARA A TINTA BGB COBERTA COM UM FILME DE POLIETILENO NANOPOROSO. (YU <i>ET AL.</i> , 2022) .....	48
FIGURA 3.16 - ESPECTRO DE RADIAÇÃO SOLAR AO NÍVEL DO MAR PARA RADIÂNCIA SOLAR EM AIR MASS 1.5. ADAPTADO DE (POCKETT, 2010; 'ASTM G173-03', 2017) .....	50
FIGURA 3.17 - ESQUEMA ILUSTRANDO A INTERAÇÃO ENTRE A LUZ SOLAR E A RADIAÇÃO TÉRMICA COM A SOLUÇÃO BICAMADA. (Y. CHEN <i>ET AL.</i> , 2020) .....	51
FIGURA 3.18 - ESQUEMA QUE ILUSTRA A INTERAÇÃO DA LUZ SOLAR COM REVESTIMENTOS MONOCAMADA (A) E BICAMADA (B), RESPETIVAMENTE. (Y. CHEN <i>ET AL.</i> , 2020) .....	52
FIGURA 3.19 - ILUSTRAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO REVESTIMENTO PRODUZIDO POR WANG <i>ET AL.</i> (2022). (WANG <i>ET AL.</i> , 2022) .....	53
FIGURA 3.20 - COR DA AMOSTRA COM O COMPOSTO BETA E ALFA, RESPETIVAMENTE. (ZHAI, FAN AND LI, 2022) .....	53
FIGURA 3.21 - PERCENTAGEM DE REFLEXÃO DA LUZ SOLAR DA TINTA COM BOLAS DE VIDRO PARTIDAS PARA DIFERENTES ESPESURAS DE TINTA APLICADA EM UMA SUPERFÍCIE. (YU <i>ET AL.</i> , 2022) .....	54
FIGURA 3.22 - RESULTADOS DOS TESTES DE CAMPO. (FELICELLI <i>ET AL.</i> , 2022) .....	55
FIGURA 4.1 - REPRESENTAÇÃO DOS EDIFÍCIOS CONSIDERADOS PELOS AUTORES: RESIDENCIAL UNIFAMILIAR (SF); RESIDENCIAL MULTIFAMILIAR (MF); COMÉRCIO ( <i>RETAIL</i> ). (BANIASSADI, SAILOR AND BAN-WEISS, 2019) .....	62
FIGURA 4.2 - BENEFÍCIOS ENERGÉTICOS DE ARREFECIMENTO PARA (A) EDIFÍCIO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR, (B) EDIFÍCIO RESIDENCIAL MULTIFAMILIAR E (C) COMÉRCIO. (BANIASSADI, SAILOR AND BAN-WEISS, 2019) .....	63
FIGURA 4.3 - PENALIZAÇÃO ENERGÉTICA DE AQUECIMENTO PARA (A) EDIFÍCIO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR, (B) EDIFÍCIO RESIDENCIAL MULTIFAMILIAR E (C) COMÉRCIO. (BANIASSADI, SAILOR AND BAN-WEISS, 2019) .....	63
FIGURA 4.4 - POUPANÇA LÍQUIDA NO CONSUMO ENERGÉTICO DE HVAC PARA (A) EDIFÍCIO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR, (B) EDIFÍCIO RESIDENCIAL MULTIFAMILIAR E (C) COMÉRCIO. ADAPTADO DE (BANIASSADI, SAILOR AND BAN-WEISS, 2019) .....	64
FIGURA 4.5 - MODELO 3D DO EDIFÍCIO SIMULADO PELOS AUTORES. (YU AND CHEN, 2021) .....	65
FIGURA 4.6 - CONSUMO DE ELETRICIDADE PARA ARREFECIMENTO AMBIENTE COM (A AZUL) E SEM (A CINZENTO) TINTA DE ARREFECIMENTO RADIATIVO PARA O CENTRO COMERCIAL EM SHENZHEN. (YU <i>ET AL.</i> , 2022) .....	66
FIGURA 4.7 - MODELO DO EDIFÍCIO COMERCIAL ADOTADO PARA O ESTUDO DE CASO. (BU <i>ET AL.</i> , 2022) .....	67
FIGURA 4.8 - CARGAS DE ARREFECIMENTO ANUAIS POR DIA DOS DOIS TIPOS DE SUPERFÍCIES NAS DIFERENTES ZONAS CLIMÁTICAS. (BU <i>ET AL.</i> , 2022) .....	68
FIGURA 4.9 - CARGA DE ARREFECIMENTO ANUAL E POUPANÇA DE ENERGIA EM DIFERENTES ZONAS CLIMÁTICAS. (BU <i>ET AL.</i> , 2022) .....	69
FIGURA 5.1 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES ANUAIS E ACUMULADO SOBRE ARREFECIMENTO RADIATIVO .....	95
FIGURA 5.2 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES ANUAIS E ACUMULADO SOBRE ARREFECIMENTO RADIATIVO EM EDIFÍCIOS. ....	96
FIGURA 5.3 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES ANUAIS SOBRE TINTAS PARA ARREFECIMENTO RADIATIVO, COM DISTINÇÃO ENTRE TINTAS SELETIVAS E TINTAS REFLETANTES. ....	97
FIGURA 5.4 - EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE TINTAS PARA ARREFECIMENTO RADIATIVO, COM DISTINÇÃO ENTRE TINTAS SELETIVAS E TINTAS REFLETANTES. ....	97

FIGURA 5.5 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES ANUAIS SOBRE A APLICAÇÃO EM EDIFÍCIOS DE TINTAS PARA ARREFECIMENTO RADIATIVO, COM DISTINÇÃO ENTRE TINTAS SELETIVAS E TINTAS REFLETANTES. ....	98
FIGURA 5.6 - EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO EM EDIFÍCIOS DE TINTAS PARA ARREFECIMENTO RADIATIVO, COM DISTINÇÃO ENTRE TINTAS SELETIVAS E TINTAS REFLETANTES. ....	98
FIGURA 5.7 - PRINCIPAIS PAÍSES A PUBLICAR SOBRE ARREFECIMENTO RADIOATIVO. (DOMINICK MSELLE <i>ET AL.</i> , 2024)	100
FIGURA 5.8 - PRINCIPAIS PAÍSES A PATENTEAR MATERIAIS DE ARREFECIMENTO RADIOATIVO. (DOMINICK MSELLE <i>ET AL.</i> , 2024).....	100
FIGURA 5.9 - AFILIAÇÕES COM MAIOR CONTRIBUTO DE PUBLICAÇÕES. (DOMINICK MSELLE <i>ET AL.</i> , 2024).....	101
FIGURA 5.10 - ÁREAS DE ESTUDO DO ARREFECIMENTO RADIATIVO. (DOMINICK MSELLE <i>ET AL.</i> , 2024) .....	102

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 - RESUMO DAS CORRELAÇÕES DA EMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA DO CÉU DO PONTO DE VISTA SD – DD. ADAPTADO DE (B. ZHAO, HU, AO, CHEN, <i>ET AL.</i> , 2019).....	29
TABELA 2.2 - RESUMO DAS CORRELAÇÕES DA EMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA DO CÉU DO PONTO DE VISTA SI – DI. ADAPTADO DE (B. ZHAO, HU, AO, CHEN, <i>ET AL.</i> , 2019).....	31
TABELA 2.3 - RESUMO DAS FÓRMULAS EMPÍRICAS UTILIZADAS PELOS DIVERSOS AUTORES PARA CALCULAR O VALOR DE <i>hconv</i> .....	35
TABELA 3.1 - SÍNTESE DAS PUBLICAÇÕES ANALISADAS SOBRE A FORMULAÇÃO E TESTES DE TINTAS SELETIVAS: MATERIAIS UTILIZADOS, ÍNDICES DE REFLEXÃO SOLAR, EMISSIVIDADE NA JANELA ATMOSFÉRICA E PRINCIPAIS RESULTADOS OBSERVADOS .....	57
TABELA 4.1 - CIDADES E RESPECTIVA ZONA CLIMÁTICA ABORDADAS NO ESTUDO DE BANIASSADI, SAILOR AND BAN-WEISS (2019) .....	62
TABELA 4.2 - ZONAS CLIMÁTICAS SIMULADAS E COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DAS ENVOLVENTES DO EDIFÍCIO. ADAPTADO DE (BU <i>ET AL.</i> , 2022). .....	67
TABELA 4.3 - SÍNTESE DOS ESTUDOS SOBRE A APLICAÇÃO DE TINTAS SELETIVAS EM EDIFÍCIOS: MÉTODOS UTILIZADOS, TIPO DE EDIFICAÇÃO E INTERVENÇÕES REALIZADAS, LOCALIZAÇÃO E PRINCIPAIS RESULTADOS REPORTADOS .....	72
TABELA 5.1 - RANKING DOS AUTORES COM MAIS PUBLICAÇÕES NO TEMA <i>RADIATIVE COOLING</i> . ADAPTADO DE (DOMINICK MSELLE <i>ET AL.</i> , 2024) .....	101



## SIMBOLOGIA

<u>Símbolo</u>	<u>Descrição</u>	<u>Valor e/ou Unidade</u>
$A_r$	Área do radiador	$m^2$
$c$	Velocidade da luz	$2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$
$e_a$	Pressão de vapor de água	$mb$
$E_s$	Potência de radiação emitida pelo céu	$W/m^2$
$F(T_r)$	Potência irradiada total a partir de um corpo à temperatura $T_r$	$W/m^2$
$G$ ou $G_s$	Irradiância solar global ou direta	$W/m^2$
$h$	Constante de Planck	$6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
$h_c$ e $h_{conv}$	Condutância térmica superficial por convecção	$W/m^2.K$
$h_{cond}$	Coefficiente de condutibilidade de calor no interior de um material	$W/m^2.K$
$I_b(\lambda, T_{amb})$	Intensidade espectral da radiação de um corpo negro à temperatura ambiente	$W/m^2.sr.\mu m$
$I_b(\lambda, T_r)$	Intensidade espectral da radiação de um corpo negro à temperatura $T_r$	$W/m^2.sr.\mu m$
$I_b(\lambda, T_{s-eff})$	Intensidade espectral da radiação de um corpo negro à temperatura efetiva do céu $T_{s-eff}$	$W/m^2.sr.\mu m$
$I_s(\lambda, \theta, T)$	Intensidade espectral da radiação atmosférica	$W/m^2.sr.\mu m$
$k_B$	Constante de Boltzman	$1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
$q_{atm}$ e $q_{sky}$	Energia radiativa atmosférica absorvida	$W/m^2$

<u>Símbolo</u>	<u>Descrição</u>	<u>Valor e/ou Unidade</u>
$q_{cool}, P_{net}$ e $q_{net}$	Poder líquido de arrefecimento radiativo	$W/m^2$
$q_{loss}$	Energia intrínseca perdida por arrefecimento	$W/m^2$
$q_{rad}$	Energia irradiada	$W/m^2$
$q_{sun}$	Energia solar absorvida	$W/m^2$
$R(\lambda)$	Reflexão espectral	
$R_{solar}$	Reflexão solar	
$T$	Temperatura	$^{\circ}C$ ou $K$
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$ ou $K$
$T_c$	Temperatura crítica	$^{\circ}C$
$T_{dp}$	Temperatura do ponto de orvalho	$^{\circ}C$ ou $K$
$T_{in}$	Temperatura interior	$^{\circ}C$ ou $K$
$T_r$	Temperatura do radiador	$^{\circ}C$ ou $K$
$T_{s-eff}$	Temperatura efetiva do céu	$^{\circ}C$ ou $K$
$T_{sky}$	Temperatura do céu	$^{\circ}C$ ou $K$
$t$	Tempo	horas
$U$	Coefficiente de transmissão térmica de elementos opacos	$W/m^2 \cdot K$
$u_a$	Velocidade do vento	$m/s$
$w$	Quantidade de vapor de água precipitável	$cm$
$\alpha$	Coefficiente de absorção	
$a_r(\lambda, \theta)$	Absortividade espectral do radiador	
$a_r(\lambda, \theta_{sun})$	Absortividade espectral do radiador voltado para o Sol em um ângulo fixo $\theta_{sun}$	
$\Delta T$	Diferença de temperatura ou temperatura de arrefecimento	$^{\circ}C$ ou $K$
$\varepsilon$	Coefficiente de emissividade	

<u>Símbolo</u>	<u>Descrição</u>	<u>Valor e/ou Unidade</u>
$\varepsilon(\lambda, \theta)$	Emissividade espectral	
$\varepsilon_{\text{céu-limpo}}$	Emissividade do céu em condições de céu claro	
$\varepsilon_r(\lambda, \theta)$	Emissividade direcional espectral do radiador	
$\varepsilon_r(\lambda, \theta, \varphi, T_r)$	Emissividade direcional espectral do radiador à temperatura da superfície $T_r$	
$\varepsilon_s$	Emissividade atmosférica total	
$\varepsilon_s(\lambda)$	Emissividade espectral do céu	
$\varepsilon_s(0)$	Emissividade zenital média da atmosfera	
$\varepsilon_s(\lambda, \theta)$	Emissividade direcional espectral da atmosfera	
$\varepsilon_s(\lambda, 0)$	Emissividade da atmosfera na direção vertical	
$\varepsilon_{s\text{-eff}}$	Emissividade atmosférica efetiva	
$\varepsilon_{sky}$	Emissividade na janela atmosférica	
$\theta$	Ângulo zenital	<i>graus ou radianos</i>
$\lambda$	Comprimento de onda	<i>m ou nm ou <math>\mu\text{m}</math></i>
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$
$\tau$	Transmitância	
$\tau_{\text{médio}}$	Transmitância média da atmosfera	
$\tau_s(\lambda, 0)$	Transmitância da atmosfera na direção vertical	
$\varphi$	Ângulo azimutal	<i>graus ou radianos</i>



## FÓRMULAS QUÍMICAS

<u>Fórmula Química</u>	<u>Nome do Composto</u>
$Al_2O_3$	Óxido de Alumínio
$BaSO_4$	Sulfato de Bário
$Bi_2O_2$	Material obtido do Carbonato De Oxibismuto
$Bi_2O_2CO_3$	Carbonato de Oxibismuto
$CaCO_3$	Carbonato de Cálcio
$CH_4$	Metano
$CO$	Monóxido de Carbono
$CO_2$	Dióxido de Carbono
$H_2O$	Água
$hBN$	Nitreto de Boro Hexagonal
$HOO$	Radical Hidroperoxilo
$Mg_{11}(HPO_3)_8(OH)_6$	Fosfito de Magnésio
$N_2O$	Óxido Nitroso
$O_3$	Ozono
$Si_xN_x, Si_xO_x, SiO_xN_x$	Compostos à Base de Silício
$SiO_2$	Dióxido de Sílica
$TiO_2$	Dióxido de Titânio
$Y_2O_3$	Óxido Ítrico



## ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

<u>Abreviatura</u>	<u>Descrição</u>
ADENE	Agência para a Energia
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ASHRAE	Sociedade Americana de Aquecimento, Arrefecimento e Ar Condicionado
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
BGB	Tinta com bolas de vidro partidas
CW Paint	Tinta à base de dióxido de titânio
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos
DPHA	Polímero Hexa Acrilato de Dipentaeritritol
EPBD	Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios
EUA	Estados Unidos da América
GB	Tinta com bolas de vidro inteiras
GRO	Organização de Coberturas Verdes
HVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
IEA	Agência Internacional de Energia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISO	Organização Internacional de Padronização
IUC's	Ilhas Urbanas de Calor
LWR	Radiação de Ondas Longas

<u>Abreviatura</u>	<u>Descrição</u>
MIR	Infravermelho Médio
NanoPE	Filme de polietileno nanoporoso
NIR	Infravermelho Próximo
NSWIR	Near-Short Wave Infrared
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PVC	Policloreto de Vinila
PVF	Polifluoretileno
RC Paint	Tinta seletiva
RNC2050	Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050
SD-DD	Dependente do Espectro e da Direção
SD-DI	Dependente do Espectro e Independente da Direção
SI-DI	Independente de Espectro e Direção
TMY3	Ano Meteorológico Típico 3
TPX	Polimetilpenteno
TSR	Refletância Solar Total
UE	União Europeia
UV	Ultravioleta
VIS	Visível
VOCs	Compostos Orgânicos Voláteis

# INTRODUÇÃO

O presente capítulo explora a relevância e justifica a escolha do tema desta dissertação, destacando a sua importância no contexto atual. Identificam-se os principais problemas a serem abordados e definem-se os objetivos que orientam a investigação. Adicionalmente, descreve-se a abordagem metodológica adotada e apresenta-se a estrutura do documento, oferecendo uma visão geral das temáticas abordadas nos capítulos subsequentes.

## 1.1. Contexto

Nas últimas décadas, a exploração intensiva dos recursos naturais, associada à falta de preocupações ambientais, gerou consequências graves, como alterações climáticas e fenómenos atmosféricos extremos que podem comprometer a saúde e o bem-estar das populações. Estes problemas representam alguns dos maiores desafios da atualidade, exigindo soluções inovadoras e sustentáveis para mitigar os seus impactos.

O setor da construção ocupa um papel central neste contexto, sendo responsável por cerca de 40% do consumo energético global, com os sistemas de climatização a representarem 65% desse consumo (Chen and Lu, 2020; Mandal *et al.*, 2020; Jiang, Fan and Wang, 2023), demonstrando que o conforto térmico no interior dos edifícios é, ainda, a principal razão para o seu elevado consumo energético (González-Torres *et al.*, 2022). Esta procura por conforto térmico tem impulsionado a instalação descontrolada de sistemas de climatização, estimando-se que mais de 13 novos dispositivos de arrefecimento sejam colocados por segundo a nível mundial (WorldBank, 2021). Segundo a Agência Internacional de Energia, estas tecnologias convencionais são responsáveis por mais de 10% das emissões globais de gases com efeito de estufa (IEA, 2020).

Além disso, o crescimento económico global tem intensificado as emissões de carbono, agravando os efeitos das alterações climáticas e aumentando a frequência e duração de ondas de calor extremas (Gallego-Schmid *et al.*, 2020). Este ciclo vicioso, em que as emissões agravam as alterações climáticas e, por sua vez, aumentam a necessidade de soluções de arrefecimento, gera ainda mais emissões, criando uma dinâmica insustentável.

Guerrero Delgado, Sánchez Ramos and Álvarez Domínguez (2020) destacaram que devido ao aumento esperado das temperaturas globais, a procura mundial de energia para arrefecimento no sector residencial aumentará até 34% em 2050 e 61% em 2100 (Santamouris, 2016), e que este crescimento será particularmente elevado na região mediterrânica (Asimakopoulos *et al.*, 2012).

A urbanização acelerada agrava este panorama, com as previsões a apontarem que mais de 6 mil milhões de pessoas habitarão em áreas urbanas até 2050 (Rydin *et al.*, 2012). Este crescimento urbano e a expansão das infraestruturas associadas poderão aumentar o consumo energético, degradar a qualidade do ar e prejudicar a saúde pública (Nie *et al.*, 2020).

Por outro lado, a falta de sistemas de climatização em edifícios mais antigos também representa um risco significativo. Durante a onda de calor recorde no verão de 2019, milhares de mortes foram atribuídas à ausência de ar condicionado em edifícios europeus (Keller, 2019). Em 2023, estima-se que mais de 47.000 pessoas morreram devido a temperaturas extremas na Europa, segundo um estudo publicado na revista *Nature Medicine* (Gallo *et al.*, 2024). Este número coloca 2023 como o segundo ano mais mortal desde 2015, atrás apenas de 2022. Os países do sul da Europa, como Grécia, Itália e Espanha, foram os mais afetados, com taxas de mortalidade particularmente elevadas entre pessoas com mais de 80 anos. Os dados evidenciam a necessidade urgente da adoção de estratégias mais eficientes e sustentáveis para garantir conforto térmico.

A conjugação do aumento da procura por conforto térmico, da urbanização acelerada e das crescentes necessidades de arrefecimento intensifica os desafios relacionados à eficiência energética e às emissões de carbono (Vettorazzi *et al.*, 2024). No setor da construção, medidas como o reforço do isolamento térmico têm sido amplamente promovidas para reduzir as transferências de calor entre o interior e o exterior dos edifícios. Essa estratégia tem-se mostrado particularmente eficaz no inverno, ao minimizar a perda de calor e melhorar o desempenho energético das construções, contudo, no verão, esta abordagem pode ter efeitos adversos, especialmente em edifícios com alta densidade de equipamentos e ocupantes, como escritórios e edifícios de serviços, nos quais, o isolamento térmico pode contribuir para o chamado "sobreaquecimento", dificultando a dissipação do calor acumulado no interior dos edifícios. A combinação entre a retenção de calor pelo isolamento térmico e a elevada geração de calor interno tem intensificado a dependência de sistemas de arrefecimento ativo, que, muitas vezes operam continuamente, resultando num consumo elevado de energia elétrica e num aumento da pegada de carbono associada aos edifícios.

Nas áreas urbanas, estas dinâmicas contribuem para a intensificação do fenómeno das Ilhas Urbanas de Calor (IUC's), que se caracteriza por se verificarem temperaturas significativamente superiores nas cidades em comparação com as zonas rurais circundantes (Figura 1.1).

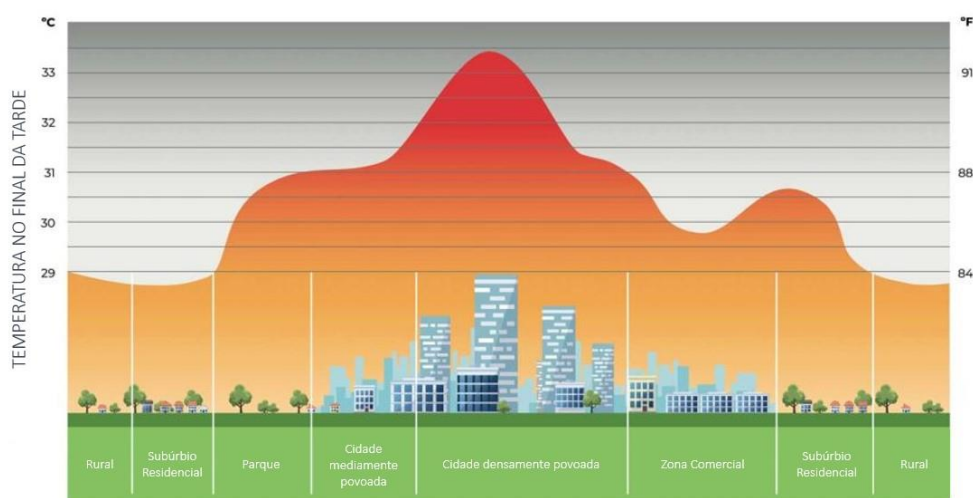


Figura 1.1 - Diagrama ilustrativo do fenómeno da ilha urbana de calor. Adaptado de (Green Roof Organisation (GRO), 2023)

As IUC's resultam da combinação de fatores como o uso de revestimentos escuros, a geração de calor devido às atividades humanas, a elevada densidade populacional e de edificações, a escassez de zonas verdes, a baixa renovação do ar causada pela geometria urbana, bem como a utilização de sistemas de climatização (Felicelli *et al.*, 2022) e de sistemas solares fotovoltaicos e térmicos (Gentle, Aguilar and Smith, 2011).

O stress térmico, intensificado pelas IUC's, tem sérias implicações na saúde pública, sendo reconhecido pela Organização Mundial de Saúde como uma emergência médica associada a uma elevada taxa de mortalidade, aumento do risco de acidentes e agravamento de diversas condições de saúde, como as doenças cardiovasculares, diabetes, problemas de saúde mental, asma e até a propagação de doenças infecciosas (Organização Mundial de Saúde, 2024).

Face a estes desafios, várias organizações têm adotado medidas para mitigar as alterações climáticas e promover a sustentabilidade ambiental. A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, das Nações Unidas, estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para alcançar um equilíbrio sustentável entre os aspetos económico, social e ambiental (Nações Unidas, 2022). No setor da construção, destacam-se os seguintes ODS:

– ODS 6 - Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos. Este objetivo visa melhorar a qualidade da água, aumentar a eficiência do seu uso e integrar práticas de gestão hídrica sustentável no planeamento urbano e na construção, promovendo simultaneamente a redução do consumo e a eficiência energética.

– ODS 9 - Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação. O foco está na modernização de infraestruturas e na adoção de tecnologias que assegurem a sustentabilidade das operações no setor da construção.

– ODS 11 - Tornar as cidades e comunidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis. Este objetivo pretende reduzir o impacto ambiental adverso das cidades, com especial ênfase na melhoria da qualidade do ar, na gestão de resíduos e no desenvolvimento de espaços urbanos que promovam a qualidade de vida e práticas sustentáveis.

– ODS 13 – Adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos. Este objetivo inclui o fortalecimento da resiliência das comunidades e a integração de políticas climáticas nas estratégias nacionais e locais.

A União Europeia, por sua vez, estabeleceu o Pacto Ecológico Europeu, com o objetivo de ser o primeiro continente com impacto neutro no clima até 2050 (Comissão Europeia, 2021). Este pacto define metas para mitigar as alterações climáticas e promover a sustentabilidade ambiental, incluindo:

– Reduzir em pelo menos 55% as emissões líquidas de gases com efeito de estufa até 2030, em comparação com os níveis de 1990.

– Plantar 3 mil milhões de árvores adicionais até 2030, aumentando a capacidade de absorção de carbono e melhorando os ecossistemas urbanos.

A Diretiva 2024/1275 da União Europeia sobre o desempenho energético dos edifícios - EPBD (Energy Performance of Buildings Directive), complementa estas metas, sendo uma peça-chave para alcançar os objetivos climáticos no setor da construção. Esta diretiva estabelece um conjunto de medidas específicas para melhorar o desempenho energético dos edifícios e contribuir para a neutralidade climática até 2050. Entre as principais medidas destacam-se (União Europeia, 2024):

– Exigir que os novos edifícios públicos apresentem emissões zero a partir de 2028 e que todos os novos edifícios cumpram este critério a partir de 2030;

– Reforçar progressivamente as normas de eficiência energética para os edifícios existentes, incentivando a renovação e a modernização do parque imobiliário;

– Promover o uso de fontes de energia renovável em edifícios, como painéis solares, sistemas de biomassa e outras tecnologias sustentáveis;

– Implementar a certificação energética, garantindo que todos os edifícios possuam um registo claro do seu desempenho energético.

A atual Diretiva 2024/1275 da União Europeia sobre o desempenho energético dos edifícios (EPBD) ainda não foi refletida em contexto nacional, mas encontra-se em processo de transposição. Para tal, foi criado um grupo de trabalho coordenado pela ADENE – Agência para a Energia, que tem como objetivo adaptar as metas e medidas da diretiva ao contexto português (Diário da República, 2024).

A versão anterior desta diretiva foi refletida em Portugal no Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050). O parque construído em território português apresenta diversas necessidades de renovação, sendo que uma das principais está relacionada com a reabilitação energética. Atualmente, 35% das construções existentes têm mais de 50 anos e 75% são energeticamente ineficientes. Além disso, estima-se que 85% a 95% dos edifícios atuais continuarão a existir em 2050, o que evidencia a necessidade de intervenções significativas para melhorar o desempenho energético das infraestruturas existentes (Oliveira *et al.*, 2024). As metas do RNC2050 incluem reduzir o consumo de energia nos edifícios, melhorar a sua eficiência energética e promover a utilização de materiais sustentáveis (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019).

No entanto, apesar de todos os esforços para limitar o aumento do aquecimento global em 2°C, em 2023 as emissões de carbono atingiram níveis máximos, mantendo uma preocupante tendência de crescimento (Friedlingstein *et al.*, 2023). Neste contexto, as estratégias de arrefecimento passivo emergem como uma solução viável para reduzir o consumo energético e promover a neutralidade carbónica. Estas técnicas permitem alcançar conforto térmico sem o uso de energia, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e destacando-se como uma ferramenta essencial para combater as alterações climáticas (He *et al.*, 2022).

## 1.2. Desafios e objetivos

A implementação eficaz de soluções de arrefecimento passivo exige uma compreensão aprofundada do seu estado da arte, abrangendo as propriedades dos materiais, os avanços tecnológicos, as suas limitações e o impacto da sua utilização. Entre as diversas soluções disponíveis, as tintas para arrefecimento radiativo destacam-se como uma alternativa promissora às tecnologias convencionais de climatização.

Atualmente, os principais desafios associados a esta tecnologia podem ser sintetizados em duas vertentes principais:

– Falta de síntese do conhecimento existente: O crescente número de publicações científicas sobre tintas de arrefecimento radiativo encontra-se disperso, dificultando a obtenção

de uma visão integrada e coerente sobre o estado da arte. Esta dispersão limita a identificação dos avanços científicos e impede uma avaliação consolidada do progresso na área.

– Questões técnicas: Persistem dúvidas em relação à eficácia de diferentes formulações de tintas sob condições climáticas variadas, à durabilidade dos materiais em ambientes reais de aplicação e à adaptação destas soluções a diferentes tipos de edifícios, soluções construtivas e zonas climáticas.

Estas lacunas evidenciam a necessidade de uma revisão abrangente e sistemática da literatura, que permita consolidar o conhecimento atual, identificar áreas pouco exploradas e destacar oportunidades para o desenvolvimento futuro desta tecnologia.

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma revisão crítica e detalhada da literatura sobre tintas para arrefecimento radiativo, avaliando o seu potencial como solução passiva para o arrefecimento de edifícios. Pretende-se fornecer uma base sólida para investigações futuras e para a aplicação prática desta tecnologia. De forma mais detalhada, os objetivos específicos são:

- Analisar os estudos mais relevantes sobre o desenvolvimento e a aplicação de tintas seletivas, com foco no seu impacto na eficiência energética dos edifícios;
- Sistematizar os resultados obtidos, destacando as limitações identificadas e as estratégias adotadas para superá-las;
- Identificar lacunas na investigação atual;
- Propor trabalhos futuros na área.

### 1.3. Metodologia

O processo de seleção das publicações científicas que sustentaram a revisão da literatura foi conduzido de forma sistemática, com o objetivo de identificar os principais avanços, limitações e potenciais futuros desta tecnologia no domínio da engenharia civil. Para organizar a análise da literatura de maneira clara e objetiva, foi adotada uma abordagem em duas fases: a primeira concentrou-se nas publicações relacionadas com o desenvolvimento das tintas, enquanto a segunda abordou os estudos focados no impacto da aplicação destes materiais em edifícios.

Processo:

#### 1. Palavras-Chave Utilizadas

A identificação da literatura iniciou-se com a definição de palavras-chave adequadas para cada fase:

- a. Para a análise do desenvolvimento de materiais, selecionaram-se os termos "radiative cooling" e "paint".
- b. Para analisar o impacto das tintas em edifícios, foi adicionada a palavra "buildings" para refinar os resultados e identificar estudos mais direcionados para o setor da construção.

A pesquisa abrangeu publicações disponíveis até ao final dezembro de 2023, garantindo uma revisão atualizada do estado da arte.

## 2. Bases de Dados Consultadas

Com as palavras-chave definidas, as pesquisas foram realizadas nas seguintes bases de dados:

- a. Web of Science (*Web of Science*) e ScienceDirect (*ScienceDirect*), reconhecidas pela qualidade e abrangência das publicações indexadas, constituíram as fontes primárias;
- b. Google Scholar (*Google Scholar*), utilizado como uma ferramenta complementar para identificar publicações menos acessíveis ou não indexadas nas bases principais.

## 3. Critérios de Inclusão

Foram incluídos na análise os artigos que cumpriram os seguintes critérios:

- a. Estudos diretamente relacionados com o tema, que abordam diretamente a formulação de tintas ou a sua aplicação para arrefecimento radiativo;
- b. Publicações em revistas indexadas e reconhecidas na área de engenharia e ciências dos materiais;
- c. Artigos publicados em inglês.

Não foram aplicados limites temporais.

## 4. Critérios de Exclusão

Foram excluídos:

- a. Artigos cujo foco principal não fosse diretamente relacionado ao arrefecimento radiativo.
- b. Estudos duplicados entre as bases de dados.

## 5. Processo de Triagem

Com as palavras-chave definidas, as pesquisas realizadas nas bases de dados ScienceDirect e Web of Science, seguidas as seguintes etapas:

- a. ScienceDirect:
  - i. "Radiative cooling" - 8105 resultados.
  - ii. "Radiative cooling" & "Paint" - 823 resultados.
  - iii. "Radiative cooling" & "Paint" & "Buildings" - 597 resultados.
- b. Web of Science:
  - iv. "Radiative cooling"- 14306 resultados.
  - v. "Radiative cooling" & "Paint"- 190 resultados.
  - vi. "Radiative cooling" & "Paint" & "Buildings" - 77 resultados.

Nas pesquisas realizadas, utilizou-se o conector "&" para combinar as palavras-chave.

É de salientar que algumas referências incluídas na dissertação foram identificadas a partir de citações cruzadas em artigos analisados, complementando a pesquisa sistemática e contribuindo para a identificação de estudos relevantes e interligados no campo da investigação.

## 6. Seleção final das publicações

Após a pesquisa inicial, realizada com base nas palavras-chave definidas, foram identificados cerca de 800 resultados. Deste total, iniciou-se o processo de triagem, conforme descrito de seguida.

Numa primeira fase, a análise focou-se na leitura dos títulos dos artigos, reduzindo o conjunto inicial para aproximadamente 180 publicações, sendo 110 relacionadas à formulação de tintas e 70 ao impacto das tintas em edifícios. Esta triagem inicial permitiu concentrar a análise em publicações que aparentavam estar alinhadas com os objetivos da dissertação.

Na segunda fase, a leitura dos resumos refinou ainda mais a seleção, resultando em 141 artigos considerados relevantes para uma análise integral. Desses, 88 abordavam a formulação de tintas e 53 focavam-se no impacto das tintas seletivas em edifícios.

Por fim, a leitura integral desses textos revelou que as tintas de arrefecimento radiativo podem ser separadas em duas categorias: as tintas refletantes e as tintas seletivas, cujas características e distinções serão explicadas detalhadamente ao longo desta dissertação. A maioria das publicações estava relacionada com tintas refletantes, totalizando 66 artigos sobre formulação e 43 sobre o impacto em edifícios. Em contraste, as tintas seletivas estavam representadas por apenas 22 publicações focadas na formulação e 10 no impacto em edifícios. Este conjunto foi composto por:

- 18 publicações dedicadas à formulação de tintas seletivas;
- 6 publicações focadas no impacto das tintas seletivas em edifícios;
- 4 publicações que abrangiam simultaneamente a formulação de tintas seletivas e o seu impacto em edifícios.

A predominância de artigos sobre tintas refletantes sublinhou a necessidade de aprofundar a investigação sobre tintas seletivas, dado que estas últimas, embora promissoras, são ainda pouco exploradas na literatura científica. Esta constatação reforça a relevância deste trabalho para sintetizar o conhecimento existente e identificar lacunas para o desenvolvimento futuro das tintas seletivas no âmbito do arrefecimento radiativo.

Além da pesquisa sistemática descrita, foram incluídos artigos de revisão que forneceram uma visão abrangente e contextualizada sobre a temática. Para identificar estes artigos, utilizou-se o conjunto de palavras-chave "review", "radiative cooling" e "buildings", nas bases de dados anteriormente consultadas (Web of Science, ScienceDirect). A seleção seguiu critérios semelhantes aos aplicados na pesquisa principal, com particular ênfase na relevância temática, no ano de publicação, privilegiando-se os artigos mais recentes (posteriores a 2018), dada a sua maior probabilidade de sintetizarem avanços tecnológicos e científicos atualizados.

No processo de triagem, foram inicialmente identificados 46 artigos com base na leitura dos títulos. No entanto, após a leitura integral destes textos, constatou-se que a maioria apresentava revisões abrangentes sobre diversas categorias de materiais e sistemas de arrefecimento radiativo, sem incluir uma análise detalhada ou focada exclusivamente nas tintas seletivas, evidenciando-se uma lacuna na literatura. Entre os 46 artigos avaliados, apenas 7 foram considerados relevantes para a presente dissertação, pois forneceram informações úteis para contextualizar a aplicação de tintas seletivas no âmbito do arrefecimento radiativo. Estes artigos complementaram a análise sistemática, ajudando a identificar lacunas e tendências na investigação atual.

## Fluxograma

A Figura 1.2 ilustra de forma resumida o processo de seleção das publicações, destacando as etapas sequenciais de triagem:

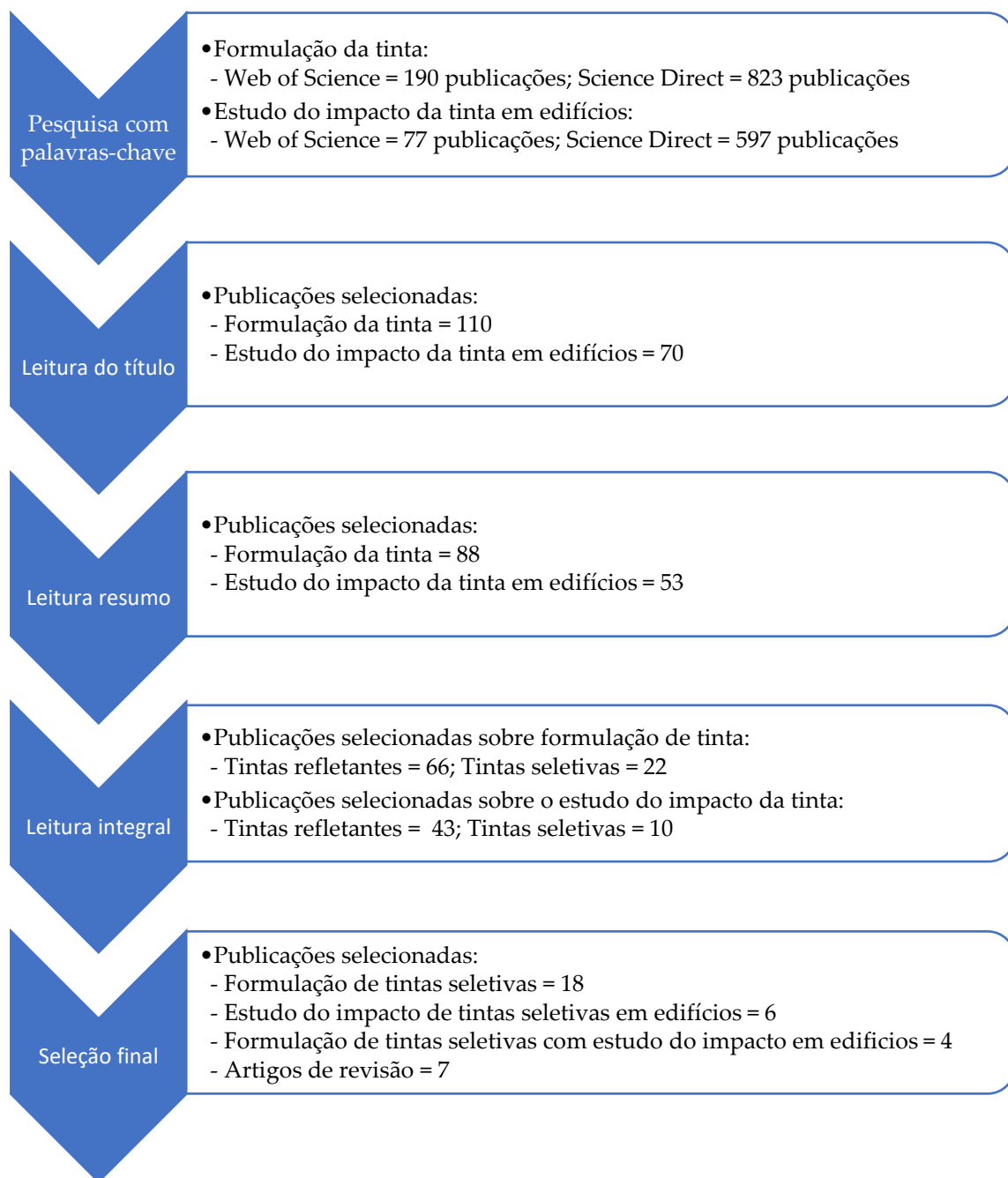


Figura 1.2 - Processo de seleção da literatura

## 1.4. Organização da dissertação

A dissertação está estruturada em cinco capítulos principais, conforme se descreve:

O Capítulo 1 introduz o contexto do trabalho, explorando os desafios climáticos e a pressão energética no setor da construção, com particular destaque para a relevância das estratégias de arrefecimento passivo. São analisados os problemas associados às alterações climáticas e ao fenómeno das ilhas urbanas de calor, bem como as iniciativas globais e europeias para a sustentabilidade, incluindo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), o Pacto Ecológico Europeu e a EPBD. Este capítulo identifica os problemas e os objetivos que motivaram a realização da dissertação, além de apresentar a abordagem metodológica seguida para enfrentar os desafios identificados.

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão abrangente das estratégias de arrefecimento passivo, explorando desde soluções tradicionais até abordagens mais inovadoras. É analisada a necessidade de soluções de arrefecimento em diferentes regiões da Europa, bem como a viabilidade do arrefecimento radiativo, considerando o seu potencial a nível global e com um foco específico na Europa. Por fim, é introduzido o conceito de arrefecimento radiativo, começando com uma explicação dos seus fundamentos de forma clara e acessível. Posteriormente, são aprofundados os princípios físicos que permitem estimar o desempenho térmico dos materiais radiativos, apresentando uma análise detalhada das condições que influenciam o seu comportamento.

O Capítulo 3 centra-se no desenvolvimento de tintas seletivas como materiais de arrefecimento radiativo. São apresentados os avanços mais significativos nesta área, acompanhados de uma análise aprofundada dos principais desafios associados à produção e implementação desta tecnologia em larga escala. Entre os aspetos abordados destacam-se os custos de fabrico, o impacto ambiental associado à sua produção e aplicação, a durabilidade dos materiais em condições reais de uso e a cor como requisito estético.

O Capítulo 4 explora a aplicação prática das tintas seletivas em edifícios, através de uma análise de estudos experimentais e numéricos. Este capítulo avalia o impacto energético destas tintas em edifícios reais e protótipos, destacando os resultados obtidos e as limitações encontradas nos estudos analisados.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões da dissertação, sintetizando os principais resultados da investigação e reafirmando a relevância das tintas seletivas como uma solução sustentável de arrefecimento passivo. Este capítulo inclui ainda sugestões para futuras investigações, orientadas pelas lacunas identificadas ao longo da revisão da literatura.

Além dos capítulos principais, este documento inclui ainda uma secção de bibliografia e um apêndice. A bibliografia apresenta a lista completa das fontes consultadas, garantindo a transparência e a credibilidade das informações utilizadas ao longo do texto. O apêndice "Revisão Bibliométrica Complementar", elaborado com base na experiência adquirida durante a dissertação, apresenta uma análise bibliométrica sobre a evolução da produção científica no campo das tintas para arrefecimento radiativo. Esta análise foi realizada com a inclusão de novas palavras-chave, identificadas ao longo do processo de investigação, permitindo aprofundar a recolha de dados. Os resultados incluem gráficos que documentam o número de publicações anuais e acumuladas, proporcionando uma visão detalhada do panorama científico.

Adicionalmente, foi incluído um artigo identificado na fase final da redação da dissertação, cuja integração se justifica pelo seu contributo informativo sobre o campo do arrefecimento radiativo. Este artigo apresenta informações relevantes, como a distribuição geográfica das publicações e patentes, os principais autores e instituições científicas, e as áreas de estudo predominantes, enriquecendo a compreensão do panorama científico atual e fornecendo uma perspetiva detalhada sobre o impacto e as tendências de investigação na área.

## ARREFECIMENTO PASSIVO

O Capítulo 2 apresenta as estratégias de arrefecimento passivo aplicadas em edifícios, destacando o seu potencial enquanto soluções sustentáveis para redução do consumo energético. São analisadas as necessidades de arrefecimento e o potencial da tecnologia de arrefecimento radiativo em diferentes localizações geográficas. Por fim, é apresentado em detalhe o balanço energético de superfícies radiativas, considerando os principais fatores que influenciam a sua eficiência, como as características dos materiais e as condições atmosféricas.

### 2.1. Estratégias Passivas para a Eficiência Energética em Edifícios

As estratégias passivas são um conjunto de soluções arquitetónicas e construtivas que permitem reduzir a temperatura interior dos edifícios sem recurso a sistemas mecânicos ou consumo energético significativo. Baseia-se na utilização de fenómenos naturais, como a ventilação, a inércia térmica dos materiais, o sombreamento e a radiação, para minimizar os ganhos térmicos e promover a dissipação do calor acumulado. Estas estratégias são particularmente relevantes em climas quentes ou temperados, e podem ser aplicadas tanto em edifícios novos como em intervenções de reabilitação, contribuindo para o conforto térmico, a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental.

Entre as principais soluções passivas destacam-se:

i. Orientação do edifício em relação ao sol: A posição do edifício desempenha um papel fundamental na gestão da temperatura interior. No hemisfério norte, as janelas orientadas a sul maximizam a captação de radiação solar no inverno, enquanto no verão o uso de elementos de sombreamento, como palas, reduzem os ganhos solares, garantindo maior conforto, conforme exemplificado na Figura 2.1:

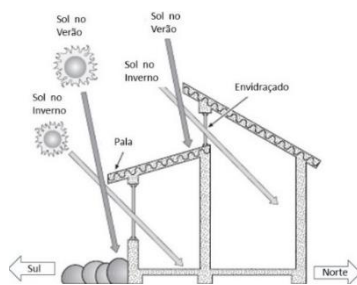


Figura 2.1 - Representação sobre a incidência solar em edifícios do hemisfério norte no verão e no inverno. Adaptado de (Guia Casa Eficiente, 2014)

ii. Ventilação natural: A ventilação por aberturas estrategicamente posicionadas facilita a entrada de ar fresco e a saída do ar quente (Figura 2.2). Em Portugal, durante o verão, a ventilação noturna é especialmente eficaz: durante o dia, minimiza-se a ventilação para evitar a entrada de ar quente; à noite, aproveitam-se as temperaturas mais amenas para arrefecer o espaço interior;

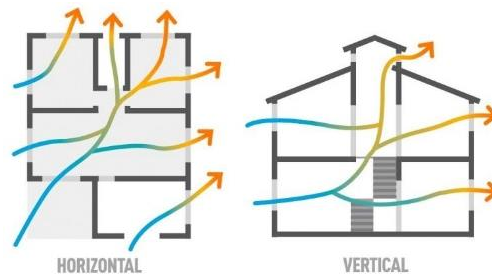


Figura 2.2 - Representação sobre ventilação natural. Adaptado de (Projetou Blog, 2021)

iii. Materiais de alta inércia térmica: O uso de materiais como pedra ou betão nos elementos construtivos permite estabilizar a temperatura interior, armazenando e libertando calor de forma gradual;

iv. Isolamento térmico: A aplicação de isolamento nas envolventes do edifício reduz as trocas de calor com o exterior, melhorando significativamente o desempenho térmico dos mesmos;

v. Vegetação para sombreamento: A plantação de árvores de folha caduca em pontos estratégicos proporciona sombra no verão e permite a entrada de luz solar no inverno, favorecendo o conforto térmico, conforme ilustrado na Figura 2.3;



Figura 2.3 - Representação do sombreamento com recurso a árvores de folha caduca. Adaptado de (Dicas de Arquitetura, 2018)

vi. Coberturas e fachadas verdes: A aplicação de vegetação em coberturas e fachadas reduz a absorção de radiação solar, diminuindo as temperaturas superficiais das envolventes e atenuando os picos de temperatura nessas superfícies (Akbari, 2002; Yu and Hien, 2009);

vii. Revestimentos radiativos: A utilização de materiais com propriedades radiativas seletivas, que refletem grande parte da luz solar e emitem radiação infravermelha, permite reduzir o aquecimento das superfícies reduzindo a transferência de calor para o interior do edifício (Gentle, Aguilar and Smith, 2011; Santamouris, 2013).

Embora estas estratégias sejam inteiramente passivas, existem outras soluções que, apesar de exigirem um consumo energético reduzido, podem potenciar poupanças significativas. Entre estas incluem-se:

i. Sistemas de ventilação com tubos enterrados: Estes sistemas tiram partido da temperatura relativamente estável do solo para pré-arrefecer ou pré-aquecer o ar antes da sua entrada nos edifícios. A solução pode incluir ventiladores elétricos para forçar a circulação do ar nos dutos (Figura 2.4);

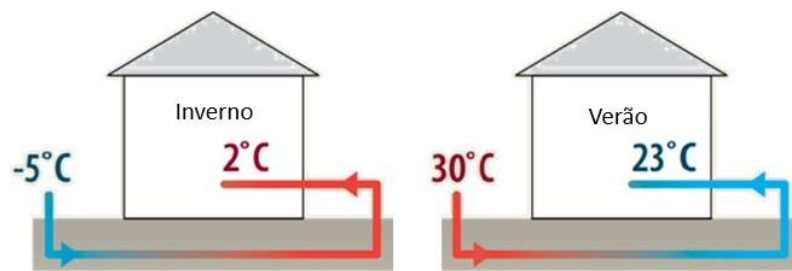


Figura 2.4 - Representação do funcionamento do sistema de ventilação com dutos subterrâneos durante o verão e inverno. Adaptado de (Guide Perrier, 2015)

ii. Proteções solares automatizadas: Esta estratégia consiste na utilização de dispositivos motorizados ou equipados com sensores que se ajustam automaticamente para controlar a entrada de radiação solar, otimizando o conforto térmico;

iii. Sistemas de automação e gestão energética: Estas soluções monitorizam as condições interiores e exteriores do edifício, ajustando automaticamente a ventilação, o aquecimento ou o arrefecimento para maximizar a eficiência energética e o conforto do edifício.

A aplicação combinada de estratégias passivas em edifícios pode ser ajustada às condições climáticas locais e às necessidades específicas de cada construção, proporcionando um ambiente interno confortável ao longo do ano, reduzindo o consumo de energia e o impacto ambiental do edifício.

Além dos benefícios imediatos, em termos de conforto, estas soluções apresentam outras vantagens:

i. Redução de custos operacionais a longo prazo: A diminuição do stress térmico nos materiais de construção reduz a frequência de ações de manutenção e prolonga a vida útil dos elementos construtivos (Berdahl *et al.*, 2008);

ii. Aumento da eficiência dos sistemas de arrefecimento artificial: Estes dispositivos operam de forma mais eficiente quando a temperatura do ambiente circundante é mais baixa, reduzindo o consumo energético e aumentando o desempenho global (Gentle, Aguilar and Smith, 2011);

iii. Melhoria na eficiência dos sistemas fotovoltaicos: A redução da temperatura da cobertura onde estão instalados os painéis solares contribui para um aumento significativo do seu desempenho (Gentle, Aguilar and Smith, 2011; Rahmani, Robinson and Barzegaran, 2021);

iv. Contribuição para a sustentabilidade e eficiência energética: A implementação de práticas mais responsáveis e alinhadas com os objetivos globais de eficiência energética e preservação ambiental promove a redução do consumo energético e da pegada de carbono.

## 2.2. Necessidades de arrefecimento e potencial de arrefecimento radiativo

Após a descrição das principais técnicas passivas para regulação térmica dos edifícios, procede-se à análise das necessidades de arrefecimento em diferentes contextos, com especial atenção à Europa, e do potencial do arrefecimento radiativo como uma solução sustentável e inovadora. Esta análise visa identificar as regiões com maiores necessidades de arrefecimento, bem como os locais onde o arrefecimento radiativo pode ter um impacto mais significativo.

Na Europa, as necessidades de arrefecimento variam significativamente entre as diferentes regiões. Estudos como o de Guerrero Delgado, Sánchez Ramos and Álvarez Domínguez (2020), ilustrado na Figura 2.5, identificaram três zonas distintas:

– Zona fria: Inclui o Norte, o Oeste e o Leste da Europa, com necessidades inferiores a 5  $kWh/m^2 \cdot ano$ ;

– Zona temperada: Abrange o norte do sul da Europa, com necessidades entre 10 a 20  $kWh/m^2 \cdot ano$ ;

– Zona quente: Refere-se ao extremo sul da Europa, com necessidades de até 40  $kWh/m^2 \cdot ano$ .

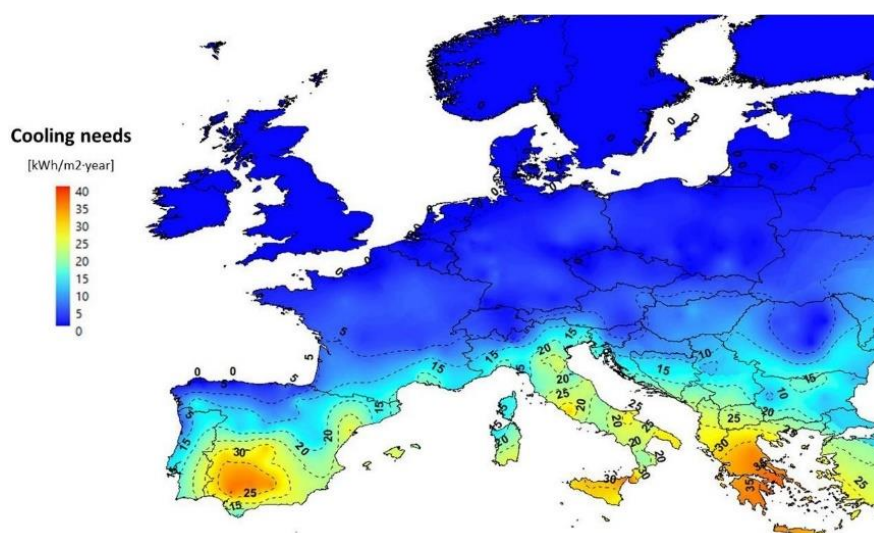


Figura 2.5 - Estimativa das necessidades de arrefecimento ("cooling needs") de referência na Europa ( $kWh/m^2 \cdot ano$ ). (Guerrero Delgado, Sánchez Ramos and Álvarez Domínguez, 2020)

A Figura 2.5 destaca a distribuição espacial destas necessidades, evidenciando valores mais elevados no sul do continente. Estes resultados indicam que o sul da Europa é a região onde as soluções de arrefecimento podem ter maior impacto, reforçando a necessidade de adaptar estas estratégias às características específicas de cada local.

Face às alterações climáticas, o estudo de Larsen *et al.* (2020) prevê que, até 2050, as necessidades de arrefecimento continuarão a crescer, podendo duplicar em países como França, Espanha e Itália, sob cenários extremos. Em Portugal, este cenário é particularmente preocupante, dado que o aumento projetado das temperaturas médias, estimado entre 1,5 a 2°C segundo o relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, representa um desafio acrescido na garantia do conforto térmico das habitações (Tarlattini *et al.*, 2024).

Com o aumento das temperaturas globais e a crescente procura por soluções sustentáveis de arrefecimento, o arrefecimento radiativo tem ganho destaque como uma alternativa inovadora. Avaliar a sua viabilidade é crucial para estimar o seu potencial em diferentes contextos climáticos e regiões do globo.

Aili, Yin and Yang (2021) contribuíram significativamente para este tema ao desenvolverem mapas globais, sazonais e per capita que fornecem uma visão abrangente das condições climáticas e atmosféricas indispensáveis à avaliação do arrefecimento radiativo (Vilà *et al.*, 2023). Os mapas consideram variáveis como temperatura ambiente média, água precipitável, radiação solar e nebulosidade, conforme ilustrado na Figura 2.6, sendo essenciais para identificar as regiões mais favoráveis à implementação de superfícies radiativas à escala global.

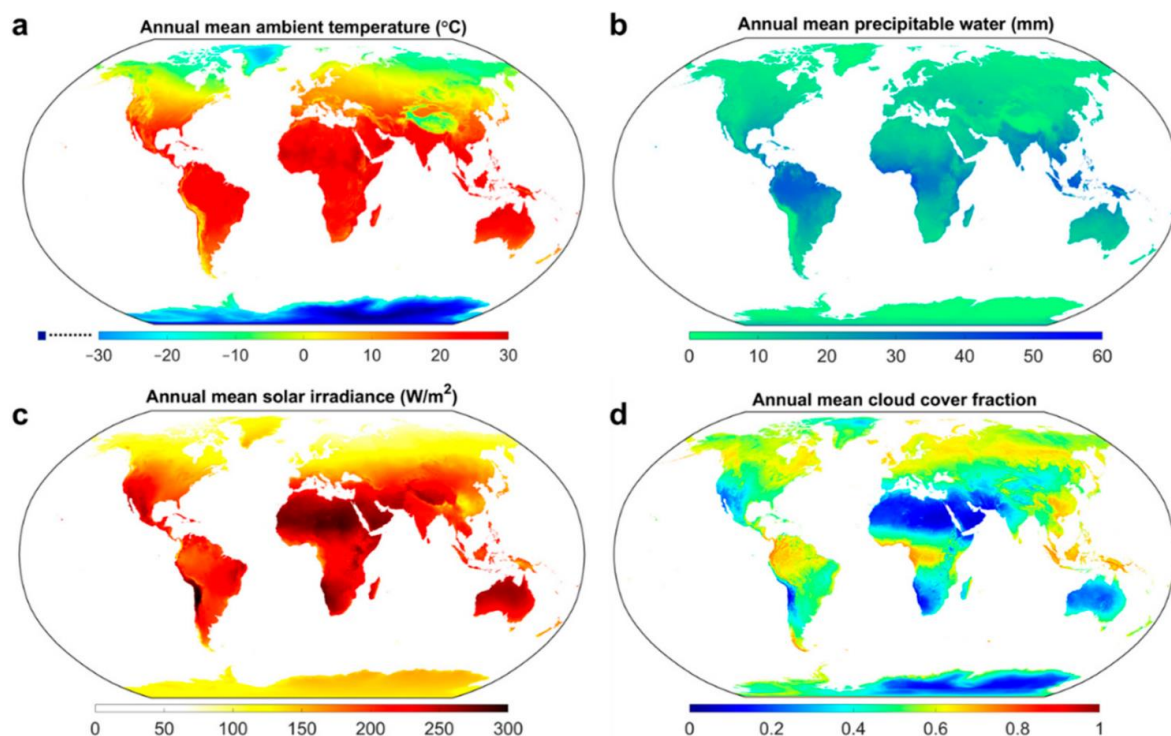


Figura 2.6 - Mapas climáticos médios anuais globais baseados nas médias mensais no período 2015–2019. (a) Temperatura ambiente, °C. (b) Água precipitável, mm. (c) Irradiação solar,  $W/m^2$ . (d) Fração de cobertura de nuvens. (Aili, Yin and Yang, 2021)

A Figura 2.7 apresenta os fluxos radiativos anuais médios globais, fundamentais para avaliar o balanço energético das superfícies radiativas. O mapa (a) mostra a radiação ascendente de ondas longas emitida por uma superfície ideal à temperatura ambiente, o mapa (b) apresenta a radiação descendente da atmosfera, incluindo o efeito da cobertura de nuvens e o mapa (c) combina ambos os fluxos para representar a radiação líquida, considerando ainda uma absorção solar de 5%.

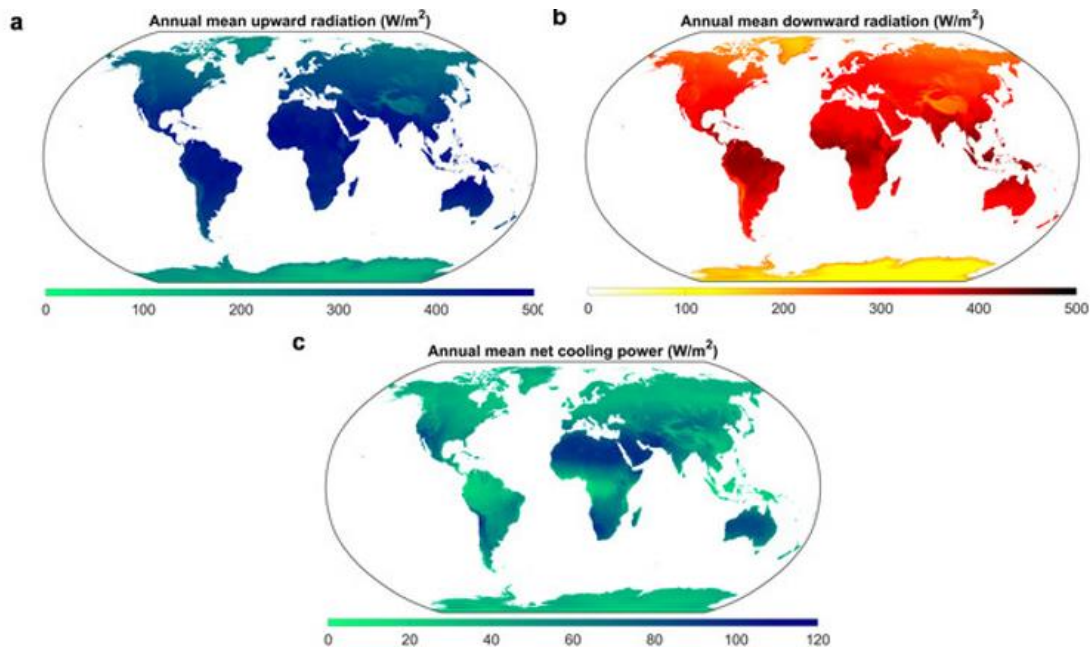


Figura 2.7 - Mapas radiativos médios anuais globais baseados na modelagem. (a) A densidade de potência da radiação ascendente de ondas longas de uma superfície radiativa "preto ideal" operando à temperatura ambiente. (b) A densidade de potência da radiação de ondas longas descendente da atmosfera, incluindo os efeitos da cobertura de nuvens. (c) A densidade de potência da radiação líquida, considerando a radiação ascendente na superfície, radiação atmosférica descendente e uma absorção solar de 5%. (Aili, Yin and Yang, 2021)

Na Figura 2.8 são apresentados os mapas globais do potencial de arrefecimento radiativo médio sazonal (W/m<sup>2</sup>), (a) e (c) mostram o potencial médio de arrefecimento radiativo durante o verão e o inverno, respetivamente, enquanto (b) e (d) apresentam as anomalias desses potenciais em relação à média anual.

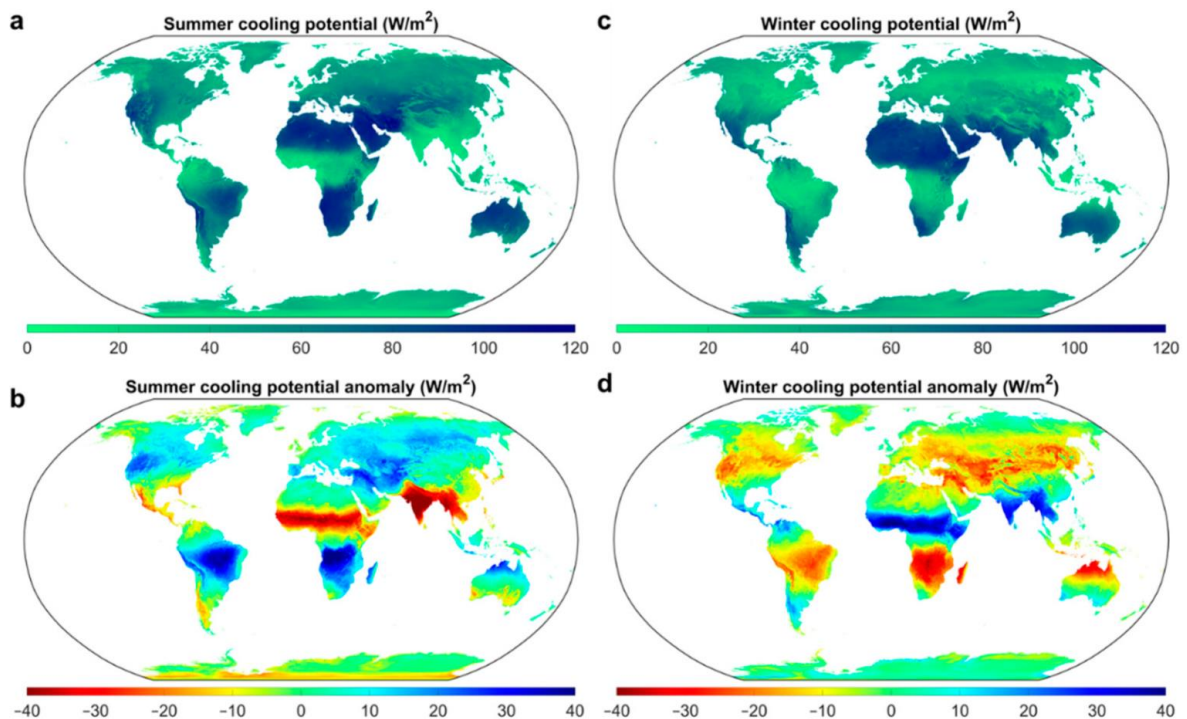


Figura 2.8 - Mapas globais do potencial de arrefecimento radiativo médio sazonal (W/m<sup>2</sup>). (a, b): O potencial médio de arrefecimento radiativo durante o verão e a sua anomalia, respetivamente. (c, d): O potencial médio de arrefecimento radiativo durante o inverno e a sua anomalia, respetivamente. (Aili, Yin and Yang, 2021)

As anomalias ajudam a identificar variações no desempenho do arrefecimento radiativo ao longo das estações. Uma anomalia positiva indica um desempenho sazonal superior à média anual, enquanto uma anomalia negativa reflete uma eficiência inferior. Estes dados são indispensáveis para compreender a sazonalidade do arrefecimento radiativo e identificar períodos do ano em que a tecnologia é mais eficaz ou enfrenta maiores limitações.

No contexto europeu, Argiriou *et al.* (1992) foram pioneiros na estimativa do desempenho do arrefecimento radiativo noturno em 28 localidades no sul da Europa. Nos últimos anos, este estudo foi ampliado para cobrir áreas mais extensas, recorrendo a algoritmos geoestatísticos que permitem mapear o potencial de arrefecimento radiativo em regiões desconhecidas, com base no potencial previamente conhecido em outras regiões (Vilà *et al.*, 2023).

Atendendo às alterações climáticas, Vilà, Medrano and Castell (2023) analisaram o potencial de arrefecimento radiativo sob três cenários diferentes de alterações climáticas (A1B, B1 e A2), propostos pelo IPCC no relatório AR4. Este estudo, que abrange o período de 2020 a 2050, visou avaliar o impacto das alterações climáticas no potencial de arrefecimento radiativo (Vilà *et al.*, 2023). Para a análise, foram utilizados ficheiros climáticos agregados por hora ao longo dos 365 dias do ano, com variáveis como temperatura ambiente, radiação infravermelha atmosférica, radiação solar global horizontal, humidade relativa, índice de transparência atmosférica e pressão atmosférica.

Os cenários climáticos do IPCC apresentam diferentes projeções futuras baseadas em diferentes dinâmicas socioeconómicas e ambientais (Vilà, Medrano and Castell, 2023):

- Cenário A1B: Prevê um rápido crescimento económico aliado à introdução de tecnologias eficientes e à redução da desigualdade de rendimento per capita, resultando num aumento médio de temperatura global de 2,8°C;

- Cenário A2: Projeta emissões elevadas num mundo marcado por independência regional e crescimento populacional constante, com um aumento médio de temperatura global de 3,4°C;

- Cenário B1: Antecipa uma transição para uma economia global mais sustentável, centrada em serviços e informação, acompanhada de uma redução no consumo de materiais, estimando-se um aumento médio de temperatura global mais contido, de 1,8°C.

Os resultados, apresentados de seguida, incluem mapas com linhas horizontais que dividem a Europa em três regiões principais: norte (53.55°N–71.15°N), centro (43.46°N–53.55°N) e sul (34.60°N–43.46°N).

A análise sazonal do arrefecimento radiativo noturno na Europa permite identificar as variações de potência e energia disponíveis ao longo das estações do ano. As Figuras 2.9 e 2.10 apresentam os mapas que ilustram, respetivamente, a potência média sazonal de arrefecimento radiativo e o potencial anual de energia associado a este mecanismo, considerando diferentes regiões e condições climáticas no continente europeu.

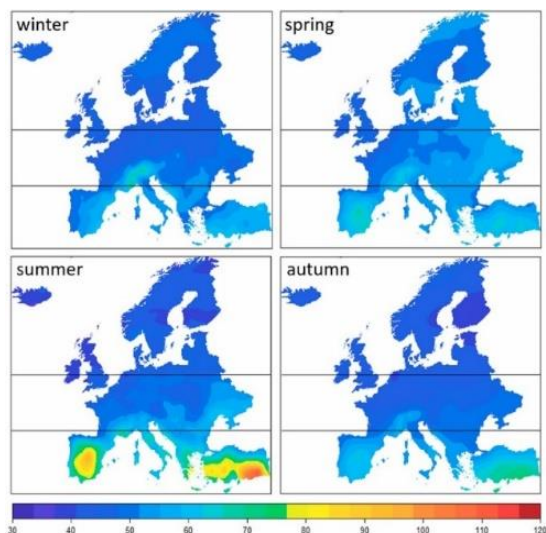


Figura 2.9 - Mapas de potência de arrefecimento radiativo noturno para as diferentes estações do ano na Europa (em  $W/m^2$ ). (Vilà, Medrano and Castell, 2023)

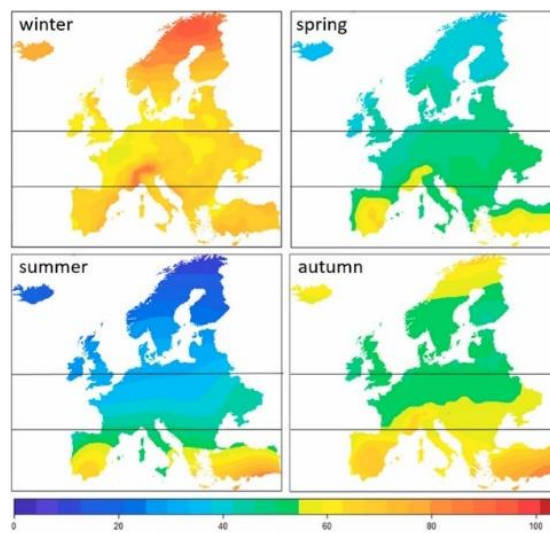


Figura 2.10 - Mapas do potencial anual de energia de arrefecimento radiativo noturno para as diferentes estações do ano na Europa (em  $kWh/(m^2.ano)$ ). (Vilà, Medrano and Castell, 2023)

Em termos de potência de arrefecimento radiativo noturno sazonal, a primavera e o verão apresentam os maiores valores, com destaque para a zona sul da Europa, que exibe maior variabilidade sazonal. Por outro lado, em termos de potencial energético acumulado, o inverno destaca-se como a estação com maior capacidade de aproveitamento.

Este fenómeno foi estudado por Vilà, Medrano and Castell (2021), que demonstraram que um maior potencial de potência não implica, necessariamente, uma maior produção de energia acumulada. Este valor está diretamente relacionado ao número de horas disponíveis para a realização do arrefecimento radiativo. Durante o verão, por exemplo, os dias mais longos e as noites mais curtas reduzem as horas disponíveis para este processo. Adicionalmente, o potencial energético acumulado não está apenas relacionado à duração da noite, mas também às condições climáticas regionais. No sul da Europa, mesmo com noites mais curtas, o elevado potencial de arrefecimento radiativo é alcançado devido às condições favoráveis, como baixa humidade e menor cobertura de nuvens, enquanto que no norte da Europa, apesar de as noites serem mais longas, as condições menos favoráveis, como maior humidade e cobertura de nuvens, limitam significativamente a eficácia do arrefecimento radiativo (Vilà *et al.*, 2023; Vilà, Medrano and Castell, 2023).

Graças aos avanços em materiais que permitem arrefecimento subambiente durante o dia - cuja caracterização será realizada nos capítulos seguintes - é possível considerar o arrefecimento radiativo como uma solução viável ao longo de todo o dia. As Figuras 2.11 e 2.12 apresentam, respetivamente, os mapas de potência média sazonal e o potencial energético acumulado de arrefecimento radiativo diurno e noturno ao longo de todo o ano na Europa.

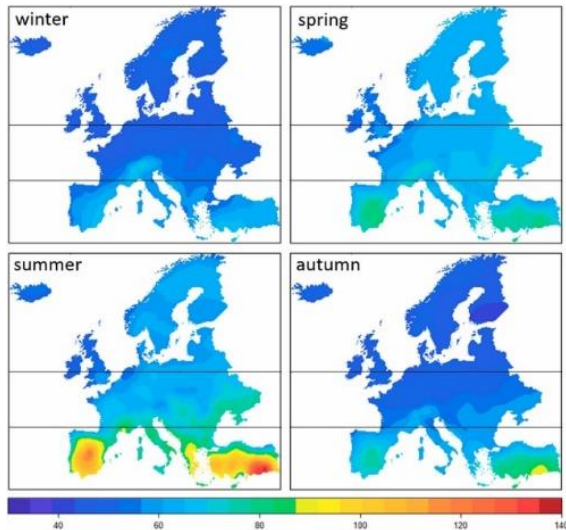


Figura 2.11 - Mapas de potência de arrefecimento radiativo durante todo o dia para as diferentes estações do ano na Europa (em  $W/m^2$ ). (Vilà, Medrano and Castell, 2023)

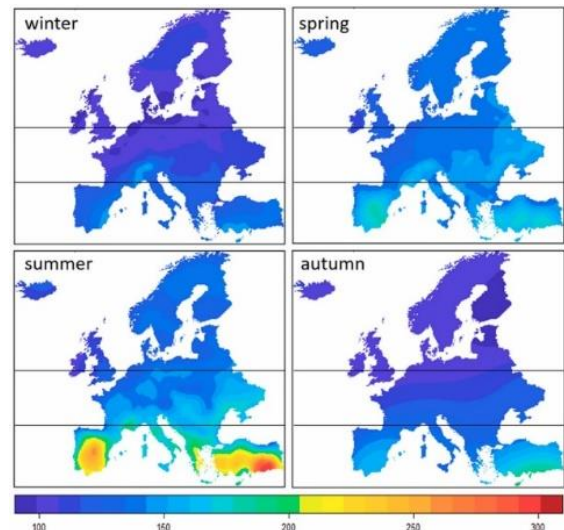


Figura 2.12 - Mapas do potencial anual de energia de arrefecimento radiativo durante todo o dia para as diferentes estações do ano na Europa (em  $kWh/(m^2 \cdot ano)$ ). (Vilà, Medrano and Castell, 2023)

Combinando o arrefecimento radiativo diurno e noturno, observa-se um aumento significativo na potência sazonal: 6% no inverno, 22% na primavera, 33% no verão e 14% no outono, com o valor mais elevado registado no sul da Europa durante o verão. O potencial energético acumulado aumenta ainda mais, com ganhos de 129% no inverno, 196% na primavera, 303% no verão e 108% no outono em comparação com aplicações exclusivamente noturnas (Vilà, Medrano and Castell, 2023).

As Figuras 2.13 e 2.14 mostram o impacto de diferentes cenários climáticos (A1B, A2 e B1) no desempenho do arrefecimento radiativo noturno e durante todo o dia, respetivamente.

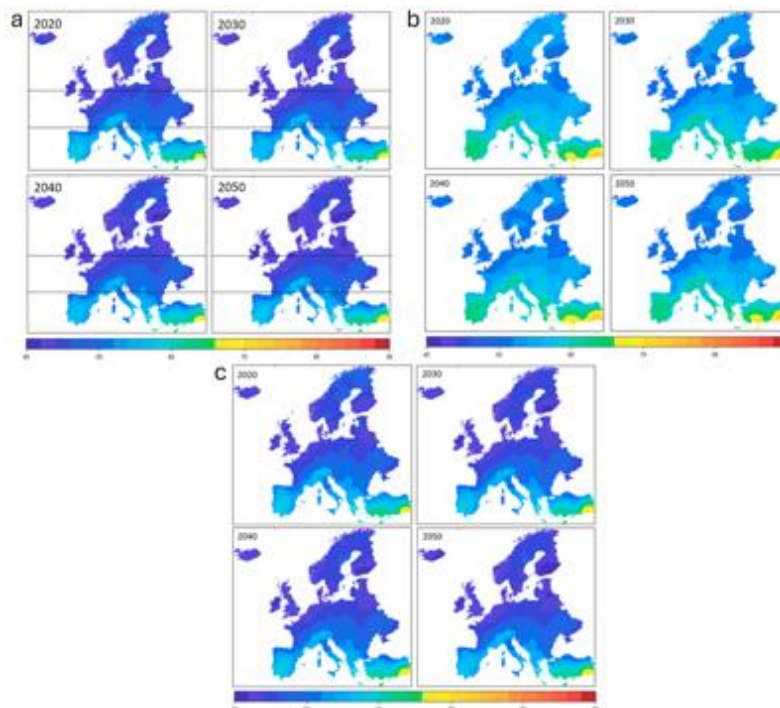


Figura 2.13 - Mapas de potência de arrefecimento radiativo médio noturno (em  $W/m^2$ ) para: a) o cenário A1B; b) para o cenário A2 e c) para o cenário B1. (Vilà, Medranoc and Castell, 2023)

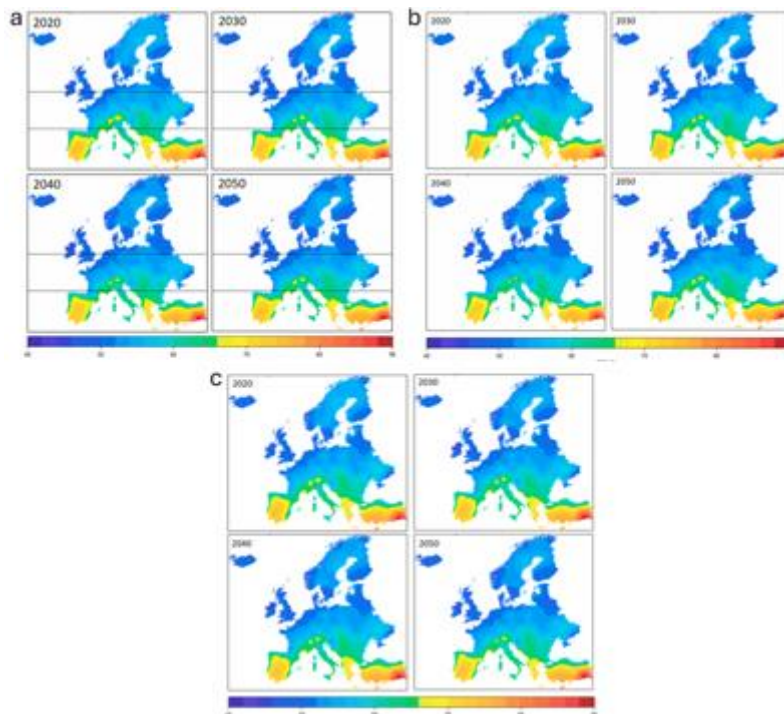


Figura 2.14 - Mapas de potência de arrefecimento radiativo médio durante todo o dia (em  $W/m^2$ ) para: a) o cenário A1B; b) para o cenário A2 e c) para o cenário B1. (Vilà, Medrano and Castell, 2023)

Da análise dos mapas, constata-se que o potencial de arrefecimento radiativo permanece praticamente constante ao longo do período considerado, demonstrando a sua resiliência e eficácia para os cenários climáticos futuros. Em termos analíticos, os autores relatam pequenas reduções no potencial de arrefecimento radiativo.

No contexto português, o estudo de Aili, Yin and Yang (2021) sugere que Portugal beneficia mais do arrefecimento radiativo durante o verão (Figura 2.8a). A anomalia positiva observada no verão (Figura 2.8b) confirma que, nesta estação, o potencial de arrefecimento radiativo é superior à média anual, o que coincide com as necessidades mais elevadas de arrefecimento. No inverno (Figura 2.8c), o potencial de arrefecimento radiativo reduz-se significativamente, e é acompanhada por uma anomalia negativa (Figura 2.8d), refletindo o impacto das condições climáticas menos favoráveis, como o aumento da cobertura de nuvens e da humidade atmosférica, que limitam a radiação de ondas longas para o espaço, reduzindo a eficácia do arrefecimento radiativo no inverno.

O estudo de Vilà, Medrano and Castell (2023) reforça que, nas regiões do sul da Europa, onde a procura por arrefecimento é maior no verão, a implementação de sistemas de arrefecimento radiativo durante todo o dia apresenta um elevado potencial de aplicação, chegando a triplicar a energia gerada em comparação com o arrefecimento radiativo noturno. O estudo reforça que Portugal possui um elevado potencial para a implementação de superfícies de arrefecimento radiativo, especialmente em regiões interiores e durante os meses de verão e que estas apresentam uma notável resiliência face às alterações climáticas, reforçando a sua viabilidade como uma estratégia sustentável a longo prazo.

Com base nestes dados, conclui-se que o arrefecimento radiativo apresenta um desempenho teórico eficaz em Portugal durante o verão, sendo particularmente útil em regiões interiores, mais quentes e secas. Por outro lado, no inverno, a eficiência da tecnologia é reduzida devido às condições climáticas características desta estação.

## 2.3. Introdução ao arrefecimento radiativo

Dando continuidade à análise das necessidades de arrefecimento e do potencial do arrefecimento radiativo, abordam-se de seguida os fundamentos físicos e a evolução histórica desta técnica.

A Terra recebe radiação solar, sendo grande parte dessa energia absorvida e transformada em calor. Sem mecanismos eficientes para dissipar esse calor, a temperatura do planeta aumentaria rapidamente para valores insustentáveis à vida humana. Felizmente, tal fenómeno não ocorre devido à capacidade do planeta em perder calor através da emissão de ondas eletromagnéticas para o espaço, um processo conhecido por arrefecimento radiativo (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019). Este processo é representado no balanço energético da Terra, ilustrado na Figura 2.15.

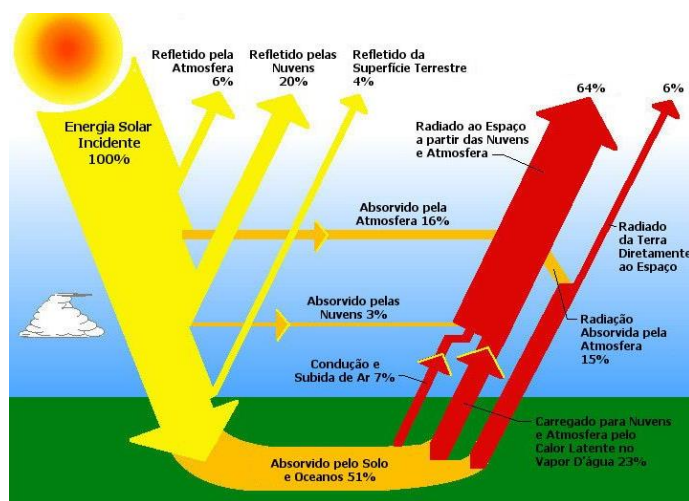


Figura 2.15 - Balanço energético do planeta terra. (Mende, 2017)

Do ponto de vista físico, qualquer corpo com temperatura acima do zero absoluto ( $0K$ ) emite radiação eletromagnética, cuja intensidade e comprimento de onda estão diretamente relacionado à sua temperatura (Stephens, 1992). Estas radiações estão organizadas no espectro eletromagnético, ilustrado na Figura 2.16, onde são identificados sete tipos de ondas eletromagnéticas, classificados por frequência e comprimento de onda. Embora todas se propaguem à velocidade da luz, apenas a luz visível é perceptível ao olho humano.

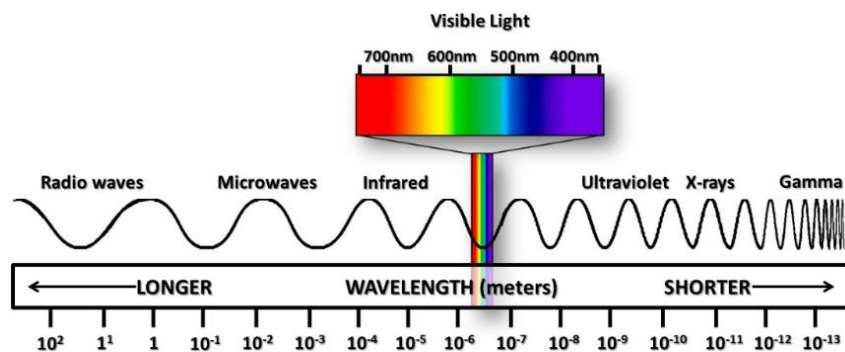


Figura 2.16 - Espectro Eletromagnético. (CSI, 2023)

A interação destas radiações com a atmosfera terrestre é essencial para compreender os processos de absorção e emissão que regulam o equilíbrio térmico do planeta. A composição da atmosfera, formada por gases como azoto, oxigénio, dióxido de carbono e vapor de água, influencia significativamente estes processos. Cada gás absorve radiação em comprimentos de onda específicos, como mostrado na Figura 2.17. A sobreposição dos espectros de absorção destes gases origina regiões no espectro onde a atmosfera tem maior transparência à radiação, conhecidas como janelas atmosféricas, que permitem a passagem de radiação com relativa facilidade (Tso, Chan and Chao, 2017).

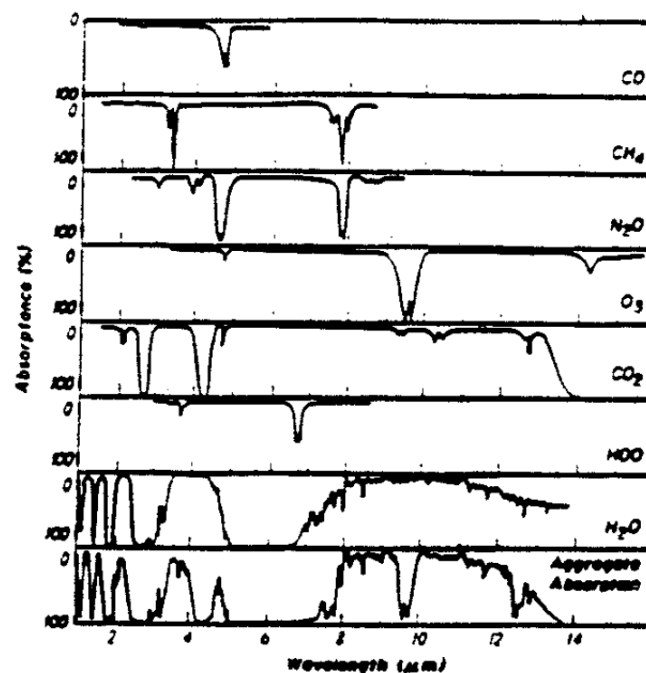


Figura 2.17 - Perfis de absorção de ondas eletromagnéticas dos principais gases que constituem a atmosfera terrestre. (Stephens, 1992)

Onde:  $CO$  - Monóxido de carbono;  $CH_4$  - Metano;  $N_2O$  - Óxido Nitroso;  $O_3$  - Ozono;  $CO_2$  - Dióxido de carbono;  $HO_2$  - Radical Hidroperóxido;  $H_2O$  - Vapor de água; Aggregate Absorption - perfil de absorção total.

Com uma temperatura média de aproximadamente 3 K, o universo atua como um dissipador termodinâmico infinito, permitindo a perda de calor da Terra para o espaço. Este princípio é a base do arrefecimento radiativo, que tira partido das janelas atmosféricas, especialmente nas faixas de comprimento de onda  $0,3 - 2,5 \mu m$  e  $8 - 13 \mu m$ .

Entre estas faixas, destaca-se a radiação solar, que está concentrada nos comprimentos de onda entre  $0,3$  e  $2,5 \mu m$ , abrangendo as faixas do ultravioleta (UV), visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR), conforme ilustrado na Figura 2.18.

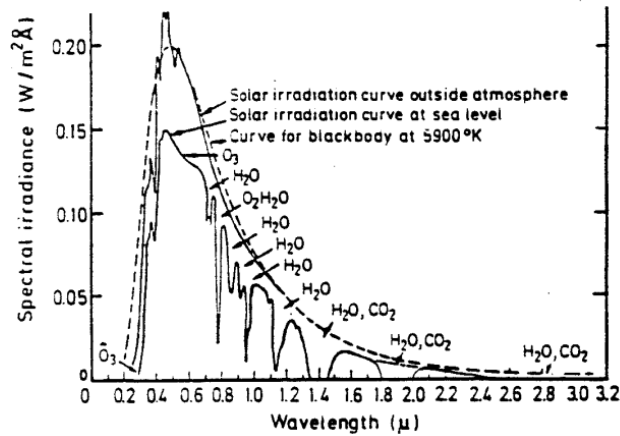


Figura 2.18 - Espectro de radiação solar com representação da curva fora da atmosfera, da curva ao nível do solo e indicação das moléculas que absorvem energia nos comprimentos de onda considerados. (Stephens, 1992)

Ao incidir sobre um objeto, a radiação solar pode ser absorvida, refletida ou transmitida, dependendo das propriedades do material. Nos materiais de construção, estas propriedades determinam o comportamento térmico das superfícies. Materiais com elevada reflexão solar, como revestimentos brancos (reflexão > 0,8) refletem a maior parte da radiação incidente, reduzindo a absorção de calor. Em contraste, materiais como o asfalto, com uma reflexão solar de apenas 0,1, absorvem grande parte da radiação, aumentando a temperatura superficial e o fluxo de calor (Zinzi and Fasano, 2009).

Outra propriedade determinante é a emissividade térmica infravermelha, que expressa a capacidade de uma superfície emitir energia sob a forma de radiação. Superfícies com alta emissividade dissipam calor de forma eficiente, enquanto aquelas com baixa emissividade tendem a acumular calor (Zinzi and Fasano, 2009).

Esta propriedade é particularmente relevante quando conjugada com a janela atmosférica infravermelha, localizada entre 8 – 13 μm, faixa na qual a atmosfera é altamente transparente à radiação, especialmente em condições de baixa humidade. Este intervalo, segundo a lei de Planck, coincide com o pico de emissão térmica de corpos negros à temperatura ambiente (~300 K, 27°C). Assim, objetos à temperatura ambiente emitem radiação predominantemente dentro desta faixa, que atravessa a atmosfera e dissipa calor de forma eficiente, conforme ilustrado na Figura 2.19.

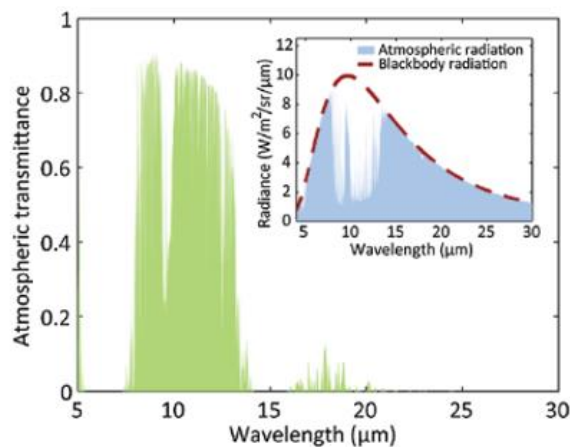


Figura 2.19 - Perfil de transmitância e absorção da atmosfera nos comprimentos de onda 5 - 30 μm. (Hossain and Gu, 2016)

Ao otimizar as propriedades radiativas das superfícies terrestres (elevada reflexão na faixa solar  $0,3 - 2,5 \mu m$ , para minimizar o ganho de radiação solar, e alta emissividade na janela atmosférica de  $8 - 13 \mu m$ , para maximizar a dissipação de calor), é possível alcançar temperatura abaixo da temperatura ambiente, mesmo sob radiação solar direta, sem recorrer ao consumo de energia externa (Hossain and Gu, 2016).

Embora o aproveitamento destas propriedades tenha sido impulsionado por tecnologias modernas, o princípio subjacente é conhecido há séculos. No século V a.C, os persas desenvolveram estruturas conhecidas como *Yakhchals* ("poço de gelo") destinadas à produção e armazenamento de gelo. Estas estruturas tiravam partido do arrefecimento radiativo em noites claras e secas, mesmo com condições climáticas áridas (Bahadori, 1978). Um exemplo destas estruturas está ilustrado na Figura 2.20, representando uma aplicação histórica deste mecanismo natural.



Figura 2.20 - *Yakhchals* - "poço de gelo". (Andrews, 2017)

Além das aplicações humanas, o arrefecimento radiativo também ocorre nos seres vivos, desempenhando um papel crucial no controlo da sua temperatura corporal. Por exemplo, a formiga prateada do deserto do Saara utiliza este mecanismo para manter a sua temperatura corporal significativamente mais baixa do que o ambiente, mesmo em temperaturas na ordem dos  $\sim 47^\circ C$ . Este fenómeno deve-se às propriedades únicas dos pelos da formiga. Shi *et al.* (2015) demonstraram que a superfície corporal da formiga possui uma reflexão de 0,69 na região do Infravermelho Visível-Próximo ( $0,43 - 1,68 \mu m$ ) e uma emissividade de 0,89 na faixa do MIR ( $2,5 - 16 \mu m$ ) (Shi *et al.*, 2016).

Ao longo das últimas décadas, o estudo sobre materiais de arrefecimento radiativo tem evoluído significativamente, podendo ser segmentado em diferentes estágios de desenvolvimento.

Na fase inicial, o foco esteve na criação de filmes de dupla camada, compostos por uma camada emissiva e outra refletora. Materiais como o policloreto de vinila (PVC) (Trombe, 1975), o polifluoretileno (PVF) (Bartoli et al., 1977) e o polimetilpenteno (TPX) (Grenier, 1979), foram amplamente utilizados em radiadores para arrefecimento noturno (B. Zhao, Hu, Ao and Pei, 2019).

Nos anos 80, surgiram revestimentos que incorporavam compostos à base de silício ( $Si_xN_x$ ,  $Si_xO_x$ ,  $SiO_xN_x$ ) na camada emissiva e metais como o alumínio e a prata na camada refletora (Granqvist, 1981; Granqvist and Hjortsberg, 1981; Granqvist, Hjortsberg and Eriksson, 1982; Eriksson and Granqvist, 1983) (B. Zhao, Hu, Ao and Pei, 2019).

Com o progresso tecnológico, surgiram os cristais fotônicos, materiais estruturados periodicamente para manipular a propagação de ondas de luz. A periodicidade e o índice de refração destes materiais criam uma banda proibida fotônica (*band gap*), que impede a propagação da luz em determinadas frequências. Um marco histórico deste estágio foi o trabalho de Raman et al. (2014), que alcançaram pela primeira vez o arrefecimento radiativo diurno, mantendo um objeto 5°C abaixo da temperatura ambiente sob luz solar direta (Hossain and Gu, 2016). Esta solução revolucionou a área e reavivou o interesse científico nos materiais de arrefecimento radiativo (Leroy et al., 2019), particularmente num contexto de crise energética e aquecimento global (Jiang, Fan and Wang, 2023). Hoje, o arrefecimento radiativo é visto como uma tecnologia promissora para enfrentar as alterações climáticas e promover a sustentabilidade energética (Yu et al., 2022).

O estágio atual caracteriza-se pelo uso de metamateriais, projetados para apresentar propriedades físicas inexistentes na natureza. Compostos por elementos em escalas menores que o comprimento de onda da radiação alvo, esses materiais permitem ajustar propriedades de reflexão e emissividade. Além disso, apresentam baixos custos de fabrico, tornando-os mais acessíveis para aplicações práticas (B. Zhao, Hu, Ao and Pei, 2019).

Em termos de aplicações, o arrefecimento radiativo abrange diferentes áreas do conhecimento e tem sido investigado em aplicações como o fotovoltaico (Sun et al., 2017; Li et al., 2022), o arrefecimento de componentes eletrónicos (Miyazaki, Oe and Tsuruta, 2020; H. Zhang et al., 2022), a captação de água (Y. Zhang et al., 2022; Wang et al., 2023) e a gestão de calor humano (Liu et al., 2023; Pakdel and Wang, 2023). Contudo, o seu maior impacto concentra-se na aplicação em edifícios (Mandal et al., 2020), que, conforme discutido, representam uma parcela significativa do consumo global de energia e emissões de  $CO_2$  (Wijesuriya et al., 2022; Xia et al., 2023).

## 2.4. Princípios fundamentais do arrefecimento radiativo

Quando um material é exposto ao ambiente exterior, este interage simultaneamente com diferentes formas de radiação, incluindo a luz solar e a radiação térmica emitida pela atmosfera. Estas trocas de energia são determinantes para definir as condições térmicas das superfícies expostas.

No contexto do arrefecimento radiativo, a capacidade de um material dissipar calor para o espaço, através da emissão de radiação térmica, é analisada com base no balanço energético das trocas de energia entre a superfície e o ambiente. Este equilíbrio, que envolve tanto a absorção como a emissão de radiação, permite estimar o desempenho teórico do material, quantificado pelo poder líquido de arrefecimento radiativo ( $q_{cool}$ ). O conceito será explorado neste subcapítulo, estabelecendo os fundamentos para compreender o desempenho térmico de materiais com potencial para o arrefecimento radiativo passivo.

### 2.4.1. Balanço energético

O balanço energético de uma superfície, designada como "radiador" neste contexto, considera quatro fluxos de energia:  $q_{rad}$ , correspondente à energia irradiada;  $q_{sun}$ , refere-se à energia solar absorvida;  $q_{sky}$ , é a energia radiativa atmosférica absorvida e  $q_{loss}$  representa a energia intrínseca perdida por arrefecimento. O processo é representado na Figura 2.21:

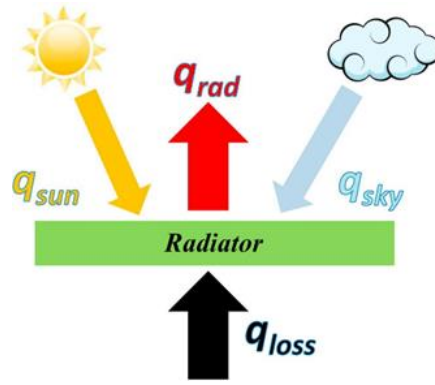


Figura 2.21 - Balanço energético de uma superfície exposta às condições ambientais exteriores. (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019)

Com base nesta interação, o poder líquido de arrefecimento radiativo ( $q_{cool}$ ) de um radiador pode ser expresso conforme a Equação 2.1 (Raman *et al.*, 2014; B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$q_{cool} = q_{rad}(T_r) - q_{sky}(T_{amb}) - q_{sun} - q_{loss} \quad (2.1)$$

#### 2.4.1.1. Energia irradiada

Considerando um radiador de área  $A_r$  à temperatura  $T_r$ , cuja emissividade direcional espectral à temperatura  $T_r$  é  $\varepsilon_r(\lambda, \theta, \varphi, T_r)$ , quando exposto a um céu limpo, este encontra-se sujeito à radiação solar e à radiação atmosférica (correspondente à temperatura ambiente -  $T_{amb}$ ). A energia irradiada por este pode ser calculada com a Equação (2.2) (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$q_{rad}(T_r) = \int_0^{+\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon_r(\lambda, \theta, \varphi, T_r) I_b(\lambda, T_r) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi d\lambda \quad (2.2)$$

Em aplicações práticas, o efeito do ângulo azimutal  $\varphi$  em  $\varepsilon_r(\lambda, \theta, \varphi, T_r)$  pode ser desprezado na maioria dos cálculos de engenharia, bem como o efeito da temperatura da superfície  $T_r$  em  $\varepsilon_r$  devido à sua limitada variação (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019).

Tendo em conta estas simplificações, resulta a Equação 2.3 (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$q_{rad}(T_r) = A_r \int d\Omega \cos \theta \int_0^{\infty} \varepsilon_r(\lambda, \theta) I_b(\lambda, T_r) d\lambda \quad (2.3)$$

Onde  $\int d\Omega = 2\pi \int_0^{\pi/2} d\theta \cos \theta$  corresponde à integral angular sobre um hemisfério (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019).

Simplificando, obtém-se a Equação 2.4 (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$q_{rad}(T_r) = A_r \pi \int_0^{+\infty} \int_0^{\pi/2} \varepsilon_r(\lambda, \theta) I_b(\lambda, T_r) \sin(2\theta) d\theta d\lambda \quad (2.4)$$

A intensidade espectral da radiação de um corpo negro à temperatura  $T_r$  -  $I_b(\lambda, T_r)$  - é calculada pela Lei de Planck (Raman *et al.*, 2014):

$$I_b(\lambda, T_r) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T_r)} - 1} \quad (2.5)$$

Em que:

- $h$  – Constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ )
- $k_B$  – Constante de Boltzman ( $1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )
- $c$  – Velocidade da luz ( $2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$ )
- $\lambda$  – Comprimento de onda ( $\text{m}$ )

De acordo com a lei de Planck e a lei de Wien, um corpo à temperatura ambiente apresenta o pico de emissão no comprimento de onda de  $9,7 \mu\text{m}$ . Ao integrar a Lei de Planck em todos os comprimentos de onda, obtém-se o fluxo de banda larga descrito pela Lei de Stefan-Boltzmann, através da qual se entende que a potência irradiada total escala como a quarta potência da temperatura do radiador:

$$F(T_r) = \sigma T_r^4 \quad (2.6)$$

Sendo  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )

Relativamente à emissividade do radiador -  $\varepsilon_r(\lambda, \theta)$  - pode ser obtida com a Equação 2.7 (Jiang *et al.*, 2023):

$$\varepsilon_r(\lambda, \theta) = 1 - t(\lambda) \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.7)$$

Em que  $t(\lambda)$  representa a transmitância da atmosfera, que pode ser modelada tendo em conta diversas variáveis, através do software *MODTRAN* (Peoples *et al.*, 2022).

Esta característica é essencial para diferenciar os tipos de radiadores descritos na literatura: radiadores seletivos e radiadores de banda larga. A principal diferença entre estes reside no perfil de emissividade espectral, conforme ilustrado na Figura 2.22, que determina desempenhos distintos no arrefecimento radiativo.

Os radiadores de banda larga ("Emitter B" na Figura 2.22) apresentam emissividade semelhante à do corpo negro em toda a banda de emissão atmosférica, exceto na faixa espectral solar principal ( $0,3 - 2,5 \mu\text{m}$ ). Por outro lado, os radiadores seletivos ("Emitter A" na Figura 2.22) concentram a sua emissividade na janela atmosférica entre  $8 - 13 \mu\text{m}$ .

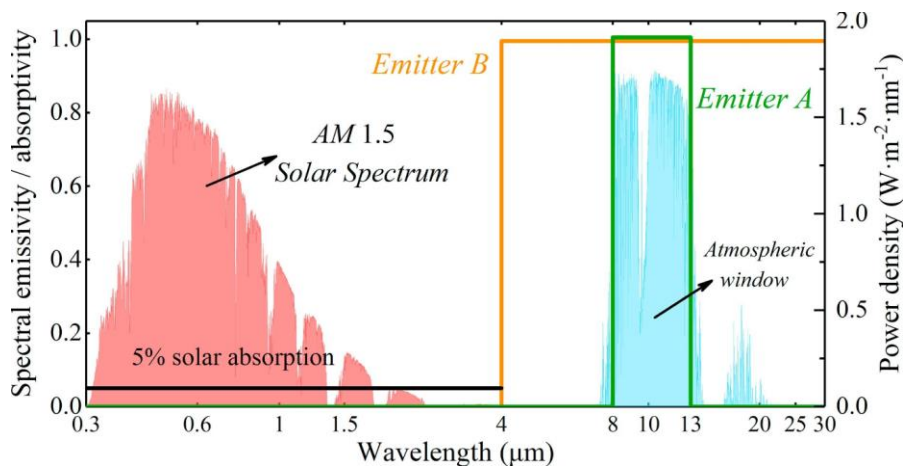


Figura 2.22 - Perfil espectral de absorção/emissividade de diferentes radiadores, com o espectro solar AM 1,5 e a identificação da janela atmosférica. (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019)

Relativamente ao desempenho, os radiadores seletivos apresentam maior eficácia no arrefecimento radiativo em comparação com os radiadores de banda larga (Hossain and Gu, 2016; M. Chen *et al.*, 2020; Zhai, Fan and Li, 2022). Esta superioridade deve-se à capacidade de limitar

a sua emissividade e absorção a uma faixa específica de comprimentos de onda, concentrando-se principalmente na janela atmosférica 8–13  $\mu m$ , assegurando uma troca mínima de calor radiativo com a atmosfera, permitindo uma dissipação eficaz do calor para o espaço.

#### 2.4.1.2. Energia radiativa atmosférica absorvida

A radiação infravermelha proveniente do céu, absorvida pelo radiador, é calculada pela Equação 2.8 (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$q_{sky} = A_r \pi \int_0^{+\infty} \int_0^{\pi/2} a_r(\lambda, \theta) I_s(\lambda, \theta, T) \sin(2\theta) d\theta d\lambda \quad (2.8)$$

Onde  $I_s(\lambda, \theta, T)$  corresponde à intensidade de radiação espectral atmosférica e  $a_r(\lambda, \theta)$  corresponde à absorptividade espectral do radiador, que, de acordo com a lei de Kirchhoff, pode ser substituída pela emissividade direcional espectral do radiador  $\varepsilon_r(\lambda, \theta)$ .

Relativamente ao cálculo da intensidade de radiação espectral atmosférica -  $I_s(\lambda, \theta, T)$ , a literatura apresenta três pontos de vista clássicos: dependente espectral e dependente direcional (SD-DD); independente espectral e independente direcional (SI-DI) e dependente espectral e independente direcional (SD-DI).

##### i. Dependente do Espectro e da Direção (SD-DD)

Do ponto de vista dependente do espectro e dependente da direção (SD-DD) assume-se que a propriedade radiativa da atmosfera do céu é dependente do espectro e da direção.

A intensidade espectral da radiação direcional atmosférica do céu  $I_s(\lambda, \theta, T)$  (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$I_s(\lambda, \theta, T) = \varepsilon_s(\lambda, \theta) I_b(\lambda, T_{amb}) \quad (2.9)$$

Onde:

- $\varepsilon_s(\lambda, \theta)$  – Emissividade direcional espectral da atmosfera
- $T_{amb}$  – Temperatura ambiente em Kelvin

Embora esta abordagem ofereça alta precisão, o cálculo é complexo devido à influência dos gases atmosféricos e limitações nas correlações existentes para calcular a emissividade atmosférica. A Tabela 2.1 apresenta as correlações mais relevantes:

Tabela 2.1 - Resumo das correlações da emissividade atmosférica do céu do ponto de vista SD – DD. Adaptado de (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019)

Autores	Correlação	Notas
Granqvist and Hjortsberg (1981)	$\varepsilon_s(\lambda, \theta) = 1 - [1 - \varepsilon_s(\lambda, 0)]^{1/\cos\theta}$	○ $\varepsilon_s(\lambda, \theta)$ - Emissividade da atmosfera na direção vertical.
Raman <i>et al.</i> (2014) Zhu <i>et al.</i> (2014) Bao <i>et al.</i> (2017) Li <i>et al.</i> (2017)	$\varepsilon_s(\lambda, \theta) = 1 - [\tau_s(\lambda, 0)]^{1/\cos\theta}$	○ $\tau_s(\lambda, 0)$ - Transmissão da atmosfera na direção vertical.
Lushiku, Hjortsberg and Granqvist (1982) Lushiku and Granqvist (1984)	$\varepsilon_s(\lambda, \theta) = \begin{cases} 1 & (\lambda < 8 \mu m, \lambda > 13 \mu m) \\ 1 - [1 - \varepsilon_s(0)]^{1/\cos\theta} & (8 \mu m < \lambda < 13 \mu m) \end{cases}$	○ $\varepsilon_s(0)$ - Emissividade zenital média da atmosfera.
Berdahl, Martin and Sakkal (1983)	$\varepsilon_s(\lambda, \theta) = 1 - (1 - \varepsilon_s)[\tau_s(\lambda, 0)/\tau_{m\u00e9dio}]e^{1.7b - \frac{1}{\cos\theta}b}$	○ $\varepsilon_s$ - Emissividade atmosférica total; ○ $\tau_{m\u00e9dio}$ - Transmissão média da atmosfera; ○ $b$ - Parâmetro empírico.

## ii. Independente de Espectro e Direção (SI-DI)

Se a radiação infravermelha do céu for considerada independente do espectro e da direção, a sua descrição torna-se mais simplificada, permitindo uma obtenção mais direta da potência da radiação.

Esta abordagem, baseia-se na primeira lei da termodinâmica e utiliza duas aproximações típicas para descrever o comportamento da radiação atmosférica de forma prática e eficaz.

Primeiro, assume-se que a atmosfera do céu é um corpo negro completo a uma temperatura efetiva do céu  $T_{s-eff}$ . Assim, a intensidade espectral da radiação direcional atmosférica do céu -  $I_s(\lambda, \theta, T)$  é expressa da seguinte forma (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$I_s(\lambda, \theta, T) = I_b(\lambda, T_{s-eff}) \quad (2.10)$$

Em segundo lugar, assume-se que a atmosfera do céu é um corpo real à temperatura ambiente  $T_{amb}$ , com uma emissividade efetiva de  $\varepsilon_{s-eff}$ . Assim, a intensidade radiativa  $I_s(\lambda, \theta, T)$  é dada por (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$I_s(\lambda, \theta, T) = \varepsilon_{s-eff} I_b(\lambda, T_{amb}) \quad (2.11)$$

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, quando as equações atrás descritas são combinadas, a relação entre a temperatura efetiva do céu e a emissividade pode ser derivada conforme mostrado na Equação 2.12, comprovando a interdependência desses dois parâmetros efetivos (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019).

$$T_{s-eff} = (\varepsilon_{s-eff})^{\frac{1}{4}} T_{amb} \quad (2.12)$$

Esta abordagem é amplamente utilizada devido à sua simplicidade e à disponibilidade de equipamentos, como pirgeómetros, para medir a radiação infravermelha do céu (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019).

Na literatura, diversas correlações são estabelecidas entre a temperatura e a emissividade efetiva do céu, bem como a radiação emitida pela atmosfera. Essas correlações abrangem uma ampla gama de abordagens, desde métodos semi-empíricos até abordagens teóricas e experimentais. Informações detalhadas, incluindo a aplicabilidade regional e sazonal dessas correlações, foram compiladas por B. Zhao *et al.* (2019). A tabela adaptada da publicação encontra-se de seguida:

Tabela 2.2 - Resumo das correlações da emissividade atmosférica do céu do ponto de vista SI – DI. Adaptado de (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019)

Autores	Céu	Correlação	Notas
Brunt (1932)	√	$E_s = (C_1 + C_2 e_a^{1/2}) \sigma T_a^4$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>e_a</math> - Pressão de vapor de água, mb;</li> <li>○ <math>C_1</math> e <math>C_2</math> - Coeficientes empíricos, dependem da região.</li> </ul>
Angström (1936)	√	$E_s = (C_1 - C_2 10^{-C_3 e_a}) \sigma T_a^4$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>e_a</math> - Pressão de vapor de água, mb;</li> <li>○ <math>C_1, C_2</math> e <math>C_3</math> - Coeficientes empíricos, dependem da região.</li> </ul>
Bliss (1961)	√	$\varepsilon_{S-eff} = 0.8004 + 0.00396 T_{dp}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>T_{dp}</math> - Temperatura do ponto de orvalho, °C.</li> </ul>
Swinbank (1963)	√	$E_s = -17.09 + 1.195 \sigma T_a^4$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Baseado em dados medidos do céu em Benson e Kerang (Austrália).</li> </ul>
Swinbank (1963)	√	$E_s = 5.31 \times 10^{-14} T_a^6$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Baseado em dados medidos do céu em Benson e Kerang (Austrália).</li> </ul>
Idso and Jackson (1969)	√	$\varepsilon_{S-eff} = 1 - 0.261 e^{-0.00077(273-T_a)^2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Baseado nos dados medidos do céu em Arizona e Alasca (EUA).</li> </ul>
Staley and Jurica (1972)	√	$\varepsilon_{S-eff} = C_1 e^{C_2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>C_1</math> e <math>C_2</math> - Coeficientes empíricos, dependem da região;</li> <li>○ À pressão atmosférica padrão, <math>C_1 = 0.67</math> e <math>C_2 = 0.08</math>.</li> </ul>
Skies (1981)	√	$\varepsilon_{S-eff} = 0.7 + 0.0000595 e_a e^{(1500/T_a)}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>T_a</math> - Temperatura ambiente, K;</li> <li>○ <math>e_a</math> - Pressão de vapor de água, mb.</li> </ul>
Berdahl and Fromberg (1982)	√	$\varepsilon_{S-eff} = \begin{cases} 0.741 + 0.0062 T_{dp}, & (\text{noite}) \\ 0.727 + 0.0060 T_{dp}, & (\text{dia}) \end{cases}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>T_{dp}</math> - Temperatura do ponto de orvalho, °C;</li> <li>○ Baseado nos dados medidos do céu em Tucson, Arizona, EUA; Gaithersburg, Maryland, EUA; e St. Louis, Missouri, EUA.</li> </ul>
Berdahl and Martin (1984)	√	$\varepsilon_{S-eff} = 0.711 + 0.0056 T_{dp} + 0.000073 T_{dp}^2 + 0.013 \cos(t)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>T_{dp}</math> - Temperatura do ponto de orvalho, °C;</li> <li>○ <math>t</math> - tempo solar, horas;</li> <li>○ Baseado nos dados medidos do céu em seis cidades, incluindo Tucson and San Antonio, EUA.</li> </ul>
Berger, Buriot and Garnier (1984)	√	$\varepsilon_{S-eff} = 0.770 + 0.0038 T_{dp}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>T_{dp}</math> - Temperatura do ponto de orvalho, °C;</li> <li>○ Baseado nos dados medidos do céu em França.</li> </ul>
Martin and Berdahl (1984)	×	$\varepsilon_{S-eff} = \varepsilon_{c\acute{e}u-limpo} + (1 - \varepsilon_{c\acute{e}u-limpo}) F$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>\varepsilon_{c\acute{e}u-limpo}</math> - Emissividade do céu em condições de céu claro;</li> <li>○ <math>F</math> - fator relacionado com a influência das nuvens.</li> </ul>

Tabela 2.2 - Resumo das correlações da emissividade atmosférica do céu do ponto de vista SI – DI. Adaptado de (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, et al., 2019) (continuação)

Autores	Céu	Correlação	Notas
Sugita and Brutsaert (1993)	×	$E_s = E_{\text{céu-limpo}}(1 + 0.0496m^{2.45})$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>\varepsilon_{\text{céu-limpo}}</math> - Emissividade do céu em condições de céu claro;</li> <li>○ <math>m</math> - nebulosidade;</li> <li>○ Baseado nos dados medidos do céu em Kansas, EUA.</li> </ul>
Chen <i>et al.</i> (1995)	–	$\varepsilon_{S\text{-eff}} = 0.736 + 0.00571T_{dp} + 3.3318 \times 10^{-6}T_{dp}^2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>T_{dp}</math> - Temperatura do ponto de orvalho, °C;</li> <li>○ Baseado nos dados medidos do céu em Bennington, Nebraska.</li> </ul>
Niemelä, Räisänen and Savijärvi (2001)	√	$\varepsilon_{S\text{-eff}} = \begin{cases} 0.72 + 0.009(e_a - 2), & (e_a \geq 2) \\ 0.72 + 0.076(e_a - 2), & (e_a < 2) \end{cases}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>e_a</math> - Pressão de vapor de água, hpa;</li> <li>○ Baseado nos dados medidos do céu em Sodankylä, Finlândia.</li> </ul>
Tang, Etzion and Meir (2004)	√	$\varepsilon_{S\text{-eff}} = 0.754 + 0.0044T_{dp}, \quad (\text{noite})$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>T_{dp}</math> - Temperatura do ponto de orvalho, °C.</li> </ul>
Lhomme, Vacher and Rocheteau (2007)	√	$\varepsilon_{S\text{-eff}} = 1.18(e_a/T_a)^{1/7}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>e_a</math> - Pressão de vapor de água, hpa.</li> </ul>
Lhomme, Vacher and Rocheteau (2007)	×	$\varepsilon_{S\text{-eff}} = \varepsilon_{\text{céu-limpo}}(1.37 - 0.34s)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>s</math> - relação entre a radiação solar sob céu nublado e sob céu claro.</li> </ul>
Sicart <i>et al.</i> (2010)	×	$\varepsilon_{S\text{-eff}} = C_1(e_a/T_a)^{1/m}F$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>C_1</math> e <math>m</math> - coeficientes empírico, dependem da região;</li> <li>○ <math>e_a</math> - Pressão de vapor de água, hp;</li> <li>○ <math>F</math> - Fator de emissão das nuvens.</li> </ul>

Nota: Os símbolos √, × e – na coluna "Céu" representam céu claro, céu nublado e condição média, respectivamente.

### iii. Dependente do Espectro e Independente da Direção (SD-DI)

O ponto de vista dependente do espectro e independente da direção, considera a seletividade espectral da atmosfera, mas simplifica a dependência direcional. Assim, a intensidade radiativa  $I_s(\lambda, \theta, T)$  e a potência de radiação emitida pelo céu  $E_s$  são descritas como (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$\begin{cases} I_s(\lambda, \theta, T) = \varepsilon_s(\lambda)I_b(\lambda, T_a) \\ E_s = \int_0^{+\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon_s(\lambda)I_b(\lambda, T_a) \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi d\lambda = \pi \int_0^{+\infty} \varepsilon_s(\lambda)I_b(\lambda, T_a) dy \end{cases} \quad (2.13)$$

Das and Iqbal (1987) desenvolveram, com recurso a métodos computacionais, o cálculo da emissividade espectral do céu -  $\varepsilon_s(\lambda)$  - com base na quantidade de vapor de água precipitado, utilizado como único parâmetro para qualquer latitude geográfica e estação. A expressão é definida pela Equação 2.14 (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$\varepsilon_s(\lambda) = 1 - \exp[a(\lambda) + b(\lambda)w + c(\lambda)w^2 + s(\lambda)w^3] \quad (2.14)$$

onde:

- $a(\lambda), b(\lambda), c(\lambda)$  - Coeficientes espectral-dependentes
- $w$  - Quantidade de vapor de água precipitado, *cm*
- $\lambda$  e  $w$  são limitados a (5,25  $\mu\text{m}$ , 42,83  $\mu\text{m}$ ) e (0,31 *cm*, 3,68 *cm*), respectivamente.

A quantidade de vapor de água precipitável -  $w$  - refere-se à quantidade total de vapor de água na direção zenital entre o solo e o topo da atmosfera. Frequentemente expressa como a espessura da água líquida,  $w$  representa o volume de água que seria gerado caso todo o vapor da coluna atmosférica fosse condensado.

### iv. Resumo

Em síntese, o modelo SD–DI apresenta uma descrição e cálculo mais simplificados em comparação com o SD–DD, embora seja mais complexo do que o SI–DI. Apesar dessa característica intermediária, a literatura sobre o ponto de vista SD–DI ainda é relativamente limitada (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019).

A abordagem SI-DI parte do pressuposto de que a atmosfera do céu não é espectralmente seletiva. Nesse contexto, a emissividade efetiva e/ou a temperatura do céu são determinadas a partir do balanço energético, utilizando correlações empíricas baseadas em parâmetros meteorológicos, como a temperatura do ponto de orvalho e a pressão de vapor de água, que oferecem uma estimativa aproximada da radiação infravermelha do céu. Quando as propriedades espectrais da atmosfera são consideradas, adota-se a abordagem SD-DI, tornando-se mais detalhada e precisa a descrição da radiação infravermelha do céu (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019).

Dado que as propriedades radiativas da atmosfera são influenciadas tanto pelo espectro quanto pela direção da radiação, a abordagem SD–DD é considerada a mais precisa e realista. Atualmente, é amplamente reconhecido como a abordagem universal para descrever a radiação infravermelha do céu e tem sido extensivamente utilizado em pesquisas recentes para avaliar o desempenho do arrefecimento radiativo (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019).

### 2.4.1.3. Energia solar absorvida

A quantidade de radiação solar absorvida por um radiador pode ser expressa da seguinte forma (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$q_{sun} = A_r G \frac{\int_0^{+\infty} a_r(\lambda, \theta_{sun}) I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{+\infty} I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda} \quad (2.15)$$

Nesta expressão, assume-se que a estrutura está voltada para o Sol em um ângulo fixo  $\theta_{sun}$ . O termo  $I_{AM1.5}$  refere-se à distribuição de espectral padrão definida como a distribuição espectral da radiação solar total (direta + difusa) incidente ao nível do mar num dia de céu limpo, numa superfície perpendicular aos raios solares e inclinada relativamente à horizontal de  $37^\circ$ , correspondendo a uma irradiância total de  $1000 \text{ W/m}^2$ .  $G$  é a irradiância solar por unidade de área.

A Figura 2.23 ilustra o espectro solar padrão, considerando a absorção atmosférica - AM 1.5 (radiação  $1000 \text{ W/m}^2$ ) e o espectro correspondente em condições sem absorção atmosférica - AM 0.

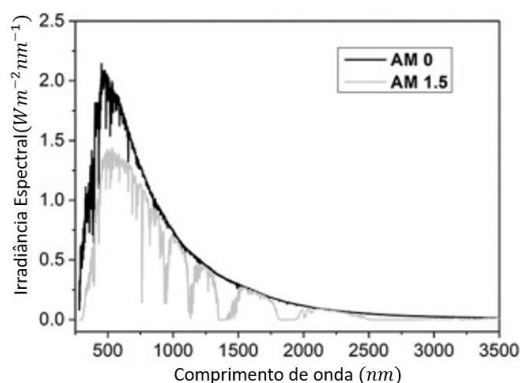


Figura 2.23 - Espectro Solar. Adaptado de (Lim, 2020)

A energia radiativa espectral pode ser avaliada experimentalmente utilizando um espectro radiômetro solar, um método útil para validar a aplicação do espectro AM 1.5 em diferentes condições climáticas locais.

Para corpos opacos, a soma entre os valores de absorção e reflexão é igual a 1. Dessa forma, ao calcular a reflexão solar, é possível deduzir o valor da absorção espectral  $a_r(\lambda, \theta_{sun})$ , utilizado na Equação 2.15.

A reflexão solar ( $R_{solar}$ ) é obtida com recurso à Equação 2.16 (He *et al.*, 2022):

$$R_{solar} = \frac{\int_{0,3}^{2,5} R(\lambda) I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda}{\int_{0,3}^{2,5} I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda} \quad (2.16)$$

Onde  $\lambda$  representa o comprimento de onda,  $R(\lambda)$  é a reflexão espectral e  $I_{AM1.5}(\lambda)$  é a intensidade espectral solar padrão AM1.5.

#### 2.4.1.4. Energia intrínseca perdida por arrefecimento

A perda de energia do radiador ( $q_{loss}$ ) ocorre devido a três mecanismos: radiação, convecção e condução, sendo estes últimos dois os principais responsáveis pela ineficiência térmica do material em contextos de arrefecimento radiativo (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019). A convecção refere-se à troca de calor entre a superfície do revestimento e o ar ambiente, enquanto a condução ocorre entre o revestimento e o elemento construtivo ao qual este está aplicado (Jiang *et al.*, 2023).

A perda de energia intrínseca ( $q_{loss}$ ) é descrita matematicamente pela Equação 2.17, que relaciona a diferença de temperatura entre o radiador ( $T_r$ ) e o ar ambiente ( $T_{amb}$ ), mediada pela condutância térmica superficial por convecção -  $h_{conv}$  (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$q_{loss} = h_{conv}A_r(T_{amb} - T_r) \quad (2.17)$$

O coeficiente  $h_{conv}$  é frequentemente determinado por fórmulas empíricas, sobretudo em condições que  $T_r > T_{amb}$ . A Tabela 2.3 apresenta as principais correlações empíricas utilizadas na literatura para calcular  $h_{conv}$ :

Tabela 2.3 - Resumo das fórmulas empíricas utilizadas pelos diversos autores para calcular o valor de  $h_{conv}$

Autores	Fórmula Empírica	Notas
Watmuff, Charters and Proctor (1977)	$h_{conv} = 2,8 + 3,0u_a$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Correlação válida para velocidades de vento entre 0 e 7 <math>m \cdot s^{-1}</math>;</li> <li>○ <math>u_a</math> - a velocidade do vento em <math>m \cdot s^{-1}</math>.</li> </ul>
adaptada de Peoples <i>et al.</i> (2022)	$h_{conv} = 12,12 - 1,16u_a + 11,6u_a^{0,5}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Correlação válida para velocidades de vento entre 2 e 20 <math>m \cdot s^{-1}</math>;</li> <li>○ <math>u_a</math> - a velocidade do vento em <math>m \cdot s^{-1}</math>.</li> </ul>
adaptada de Jiang <i>et al.</i> (2023)	$h_{conv} = 8,3 + 2,5u_a$	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>u_a</math> - a velocidade do vento em <math>m \cdot s^{-1}</math>.</li> </ul>

Contudo, a Equação 2.17 apresenta limitações quando aplicada em condições reais. Quando  $T_{amb} = T_r$ , a fórmula assume que as perdas por arrefecimento intrínseco são eliminadas. No entanto, em aplicações práticas, estas perdas resultam da interação térmica direta entre o radiador ( $T_r$ ) e a outra face da solução construtiva, em contacto com o espaço interior ( $T_{in}$ ) (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019).

Para descrever este comportamento de forma mais abrangente, torna-se necessário adotar uma formulação que inclua a contribuição de  $T_{in}$ , resultando na seguinte Equação:

$$q_{loss} = h_{conv}A_r(T_{amb} - T_r) + h_{cond}A_r(T_{in} - T_r) \quad (2.18)$$

Onde  $h_{cond}$  corresponde ao coeficiente de condutibilidade de calor no interior de um material, sendo calculado com o inverso do quociente entre a espessura do material pela sua condutibilidade térmica.

Esta abordagem permite uma análise mais precisa e eficaz do desempenho térmico do radiador em condições reais.

Em contexto de arrefecimento radiativo subambiente (quando o radiador opera a uma temperatura inferior à do ar ambiente ( $T_r < T_{amb}$ )), as perdas de calor intrínsecas do radiador podem ser estimadas por simulações numéricas realizadas com softwares comerciais (ex: COMSOL) (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019).

### 2.4.1.5. Resumo do balanço energético

O desempenho de um material de arrefecimento radiativo pode ser avaliado utilizando um modelo matemático abrangente, que considera as propriedades intrínsecas do material, as características atmosféricas e as condições ambientais. O modelo integra as variáveis associadas aos fluxos de energia e todas as equações previamente apresentadas, permitindo estimar o poder líquido de arrefecimento radiativo ( $q_{cool}$ ) e analisar o comportamento térmico do material em diferentes condições ambientais (B. Zhao, Hu, Ao, Chen, *et al.*, 2019):

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{cool} = q_{rad}(T_r) - q_{sky}(T_{amb}) - q_{sun} - q_{loss} \\ q_{rad}(T_r) = \int_0^{+\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon_r(\lambda, \theta, \varphi, T_r) I_b(\lambda, T_r) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi d\lambda \\ q_{sky} = \pi \int_0^{+\infty} \int_0^{\pi/2} \alpha_r(\lambda, \theta) \left\{ 1 - [\tau_s(\lambda, \theta)]^{\frac{1}{\cos(\theta)}} \right\} I_b(\lambda, T_{amb}) \sin(2\theta) d\theta d\lambda \\ q_{sun} = A_r G \frac{\int_0^{+\infty} a_r(\lambda, \theta_{sun}) I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{+\infty} I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda} \\ q_{loss} = h_{conv} A_r (T_{amb} - T_r) \end{array} \right. \quad (2.19)$$

## TINTAS COM PROPRIEDADES RADIATIVAS

Este capítulo começa com uma contextualização histórica sobre a utilização de tintas na construção civil, destacando a sua evolução e o impacto no setor da construção ao longo dos anos. De seguida, são apresentados os avanços mais recentes no desenvolvimento de tintas seletivas, com ênfase nas suas propriedades que favorecem o arrefecimento radiativo. Finalmente, são discutidos os desafios relacionados com a formulação destas tintas, abordando questões como custos de produção, durabilidade, impacto ambiental e a problemática da acumulação de sujidade nas superfícies expostas.

### 3.1. Introdução

Ao longo da história, as tintas têm desempenhado um papel fundamental na construção, tanto na proteção de estruturas como na evolução da arquitetura. Desde as civilizações antigas até aos dias de hoje, a sua aplicação tem sido orientada pelas necessidades funcionais e estéticas, refletindo os avanços tecnológicos e culturais de cada época.

Nas civilizações antigas, como a egípcia e a romana, as tintas eram frequentemente produzidas com materiais naturais (pigmentos minerais, argilas e óleos vegetais) e foram utilizadas para decorar as construções (Gooch, 2002; Hradil *et al.*, 2003). Durante a Idade Média, ganharam destaque na proteção contra as intempéries, especialmente em estruturas de madeira. Destacaram-se as tintas à base de óleo de linhaça que conferiam aos elementos cor e uma barreira contra a humidade.

O Renascimento e a Revolução Industrial assinalaram uma nova fase na história das tintas, com o surgimento de técnicas de fabrico mais avançadas e a introdução de pigmentos sintéticos, o que ampliou a paleta de cores e resultou em produtos mais duráveis e versáteis (Barnett, Miller and Pearce, 2006). No século XX, o desenvolvimento de tintas resistentes à água e às intempéries tornou-se crucial para responder às exigências dos edifícios modernos.

Mais recentemente, as tintas têm vindo a desempenhar um papel central na eficiência energética dos edifícios, onde se destacam as tintas denominadas "frias" (*cool paints*), que são consideradas como a tecnologia de arrefecimento mais acessível e eficaz devido à sua facilidade de aplicação em edifícios existentes (Jiang *et al.*, 2023). Estas tintas, de forma simplificada, são compostas por quatro elementos principais: pigmentos, aglutinantes, solventes (ou dispersantes) e cargas. Quando aplicadas num substrato, o solvente evapora, permitindo que o aglutinante solidifique e una os pigmentos à superfície (Jiang, Fan and Wang, 2023). Entre os pigmentos, destaca-se o dióxido de titânio ( $TiO_2$ ), amplamente utilizado em tintas brancas,

onde é disperso em aglutinantes como acrílico ou silicone numa proporção de massa aproximada de 1:1. Adicionalmente, são frequentemente incorporadas cargas como dióxido de sílica ( $SiO_2$ ) ou carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ), que conferem uma emitância de banda larga e quase unitária de  $\sim 0,95$  às tintas, devido às suas propriedades intrinsecamente emissivas (YU *et al.*, 2016).

Contudo, para alcançar temperaturas inferiores às do ambiente, é necessário que a tinta reflita eficientemente a radiação solar. No entanto, devido à absorção intrínseca da luz ultravioleta ( $\lambda \sim 0,3\text{--}0,4 \mu\text{m}$ ), violeta ( $\lambda \sim 0,4\text{--}0,41 \mu\text{m}$ ) e solar de infravermelho próximo ( $\lambda \sim 0,7\text{--}2,5 \mu\text{m}$ ) pelos aglutinantes de polímeros, a reflexão das tintas brancas está abaixo de 0,86 (Mandal *et al.*, 2020), o que inibe o processo de arrefecimento radiativo diurno (Chen and Lu, 2020).

Nos últimos anos, os esforços de investigação em tintas de arrefecimento radiativo centraram-se na melhoria da capacidade de refletir a radiação solar. Antes dos avanços mais recentes, os materiais disponíveis no mercado apresentavam temperaturas superiores à temperatura ambiente. Mesmo tintas com elevada reflexão e emitância de banda larga ( $\sim 0,95$ ) enfrentavam limitações, absorvendo parte da energia no infravermelho e não a emitindo de forma eficiente, devido ao seu perfil de emissividade/absorção (YU *et al.*, 2016; Chen and Lu, 2020). Hoje, conforme demonstrado nos seguintes subcapítulos, já é possível alcançar temperaturas inferiores à do ambiente.

Atualmente, no campo do arrefecimento radiativo, destacam-se dois tipos principais de tintas: as tintas refletantes, concebidas para maximizar a reflexão solar, e as tintas de emissividade seletiva, que combinam alta reflexão solar com emissividade otimizada para a janela atmosférica. Embora a emissividade seja uma propriedade intrínseca dos materiais, se não for ajustada especificamente para a janela atmosférica, a superfície do material pode não atingir temperaturas inferiores à do ambiente. Ambos os tipos de tintas reduzem o calor absorvido pelas superfícies dos edifícios, apresentando temperaturas mais baixas que os materiais convencionais. Contudo, as tintas refletantes limitam-se a mitigar o calor urbano e a diminuir os ganhos de calor nos edifícios, sem alcançar temperaturas abaixo da temperatura ambiente. Já as tintas de emissividade seletiva possuem essa capacidade, proporcionando um arrefecimento efetivo (Baniassadi, Sailor and Ban-Weiss, 2019).

A literatura evidencia um maior número de estudos dedicados ao desenvolvimento e aplicação de tintas refletantes, abrangendo ensaios experimentais e modelações numéricas em diferentes tipos de edifícios e localizações geográficas. Em contrapartida, as tintas de emissividade seletiva, embora promissoras, são uma tecnologia mais recente e apresentam uma lacuna na literatura em termos de estudos práticos, seja de aplicação experimental ou numérica. Uma análise detalhada sobre as publicações identificadas encontra-se no capítulo 4.

## 3.2. Caracterização das tintas seletivas

### 3.2.1. Principais resultados

O estudo da formulação de tintas para arrefecimento radiativo tem evoluído ao longo de décadas, como mencionado no início deste capítulo.

Num dos primeiros estudos, Harrison and Walton (1978) prepararam uma tinta branca com dióxido de titânio ( $TiO_2$ ) que foi aplicada numa fina camada sobre folhas de alumínio. Os resultados comprovaram que uma concentração de  $TiO_2$  de 35% permitia atingir uma

temperatura subambiente de 15°C sob um céu claro. Contudo, este desempenho foi atribuído principalmente à elevada reflexão solar do substrato metálico, e não exclusivamente às propriedades da tinta.

Avanços posteriores focaram-se na melhoria da reflexão solar, face às limitações dos materiais existentes na emissão de energia dentro da janela atmosférica. Um marco significativo foi alcançado por Raman *et al.* (2014), que demonstraram o arrefecimento radiativo sob luz solar direta, impulsionado pelo desenvolvimento de nanomateriais avançados (Hossain and Gu, 2016). Devido a este desenvolvimento, diversas equipas de investigação regressaram ao tópico do arrefecimento radiativo e introduziram materiais de nova geração nas formulações de tintas.

Num dos primeiros estudos de tintas seletivas, Xu *et al.* (2018) criaram uma tinta com cristais de  $Mg_{11}(HPO_3)_8(OH)_6$ , que apresentou uma reflexão de 88% na faixa de 0,2 a 2,5  $\mu m$  e uma emissividade de 87% na faixa de 8 a 14  $\mu m$ . Os testes demonstraram que ao aplicar a tinta produzida numa folha de alumínio, esta permitiu manter uma célula de teste entre 6 a 8 °C mais fria que uma coberta com papel de alumínio e 2 a 4 °C mais fria que células de teste com tintas de  $TiO_2$  e  $CaCO_3$ .

Mais tarde, Xue *et al.* (2020) produziram uma tinta, de baixo impacto ambiental, à base de pó de rutilo de dióxido de titânio, uma emulsão polimérica, microesferas de vidro e partículas fluorescentes. O revestimento apresentou baixo custo de fabrico, reflexão solar de 90%, emissividade na janela atmosférica de 96%, destacando-se dos restantes revestimentos por apresentar fluorescência, o que permite converter parte da luz solar absorvida em emissão por fluorescência na região visível, aumentando a reflexão solar efetiva. Em testes de campo, o revestimento aplicado sobre uma placa de alumínio permaneceu 6°C abaixo da temperatura ambiente, sob radiação solar direta com intensidade de 744  $W/m^2$ .

Em 2020, Li *et al.* (2020) desenvolveram uma tinta acrílica com carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ), que alcançou 95% de reflexão solar e 94% de emissividade na janela atmosférica 8 – 13  $\mu m$ . A Figura 3.1 apresenta o perfil de absorção/emissividade da tinta desenvolvida em comparação com uma tinta comercial.

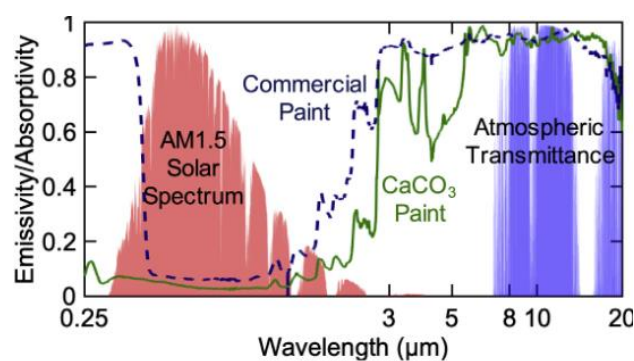


Figura 3.1 - Perfil de absorção/emissividade da tinta à base de  $CaCO_3$  em comparação com uma tinta comercial. (Li *et al.*, 2020)

Os autores apresentaram uma imagem térmica (Figura 3.2) de uma superfície onde foi aplicado um padrão em "P" com a tinta desenvolvida à base de  $CaCO_3$  sobre uma área coberta com tinta branca comercial. Sob luz solar direta, a imagem captada por uma câmara de infravermelho demonstra que a zona coberta pela tinta de  $CaCO_3$  apresenta uma temperatura significativamente mais baixa.

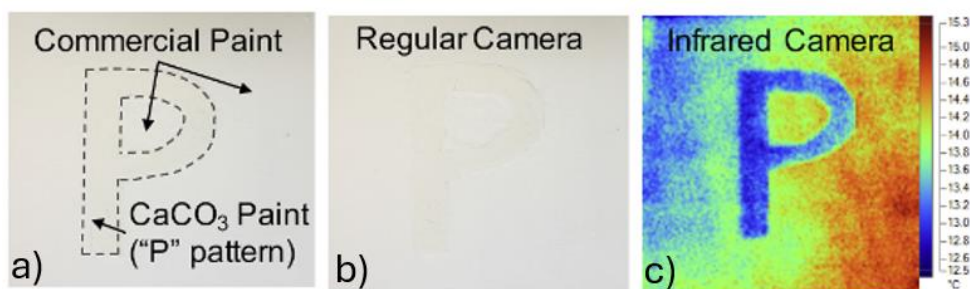


Figura 3.2 - Superfície pintadas com as diferentes tintas, em forma de "P". a) mostra a captura com uma câmara normal e c) mostra uma captação com uma câmara térmica. (Li *et al.*, 2020)

Em testes de campo, a tinta desenvolvida permaneceu 10°C abaixo da temperatura ambiente durante a noite e 1,7°C abaixo da temperatura ambiente sob radiação solar direta, conforme ilustrado na Figura 3.3. A análise do desempenho térmico indica que a tinta alcançou um poder de arrefecimento médio de 56  $W/m^2$  durante a noite e de 37  $W/m^2$  sob radiação solar. A Figura 3.3 apresenta a evolução das temperaturas da tinta à base de carbonato de cálcio e do ambiente ao longo do tempo, simultaneamente com os valores de radiação solar.

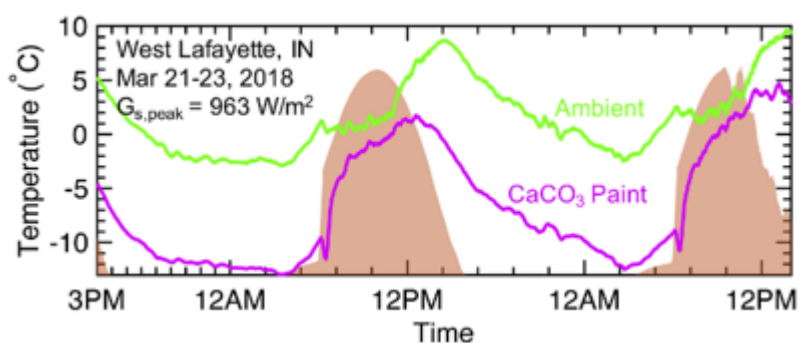


Figura 3.3 - Temperatura da amostra durante os testes de campo. (Li *et al.*, 2020)

Posteriormente, X. Li *et al.* (2021) produziram uma tinta branca com sulfato de bário ( $BaSO_4$ ) que apresentou 98% de reflexão solar e 95% de emissividade na janela atmosférica. Durante os testes de campo, conforme ilustrado na Figura 3.4, a tinta permaneceu 6,8°C abaixo da temperatura ambiente sob luz solar direta, alcançando um poder de arrefecimento superior a 80  $W/m^2$ . A Figura 3.4 apresenta a evolução das temperaturas da tinta e do ambiente ao longo do tempo, bem como os valores de radiação solar incidentes.

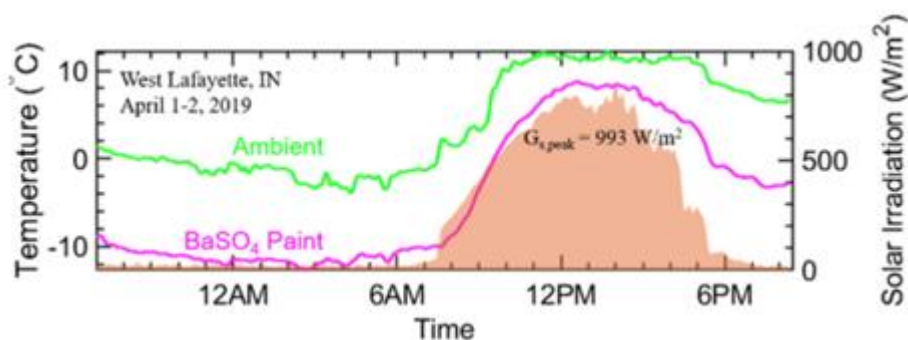


Figura 3.4 - Temperatura da amostra durante os testes de campo. (X. Li *et al.*, 2021)

Testando novas combinações, Chae *et al.* (2021) produziram uma tinta com micropartículas de  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ , combinadas com dois tipos de ligante (DPHA e acrilato). A tinta apresentou uma reflexão solar de 94% e uma emissividade de 93,5% na janela atmosférica. Os autores compararam o desempenho da tinta desenvolvida ("RC paint") com o de uma tinta à base de dióxido de titânio ("CW paint"). Os perfis de absorção/emissividade são demonstrados na Figura 3.5.

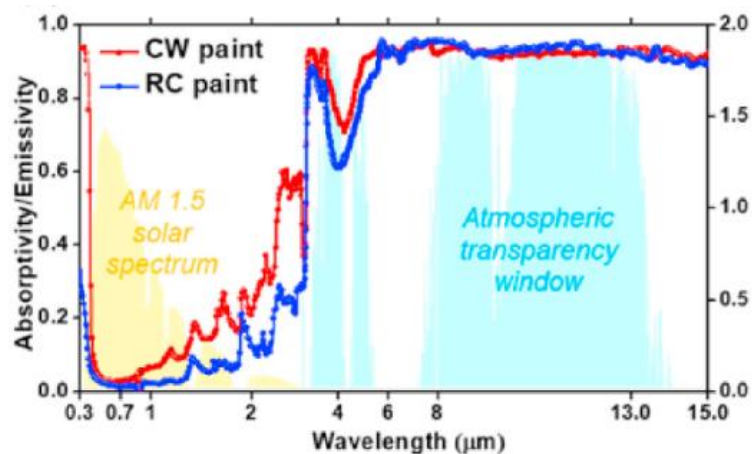


Figura 3.5 - Perfis de absorção/emissividade da tinta desenvolvida pelos autores ("RC paint") e de uma tinta à base de dióxido de titânio ("CW paint"). (Chae *et al.*, 2021)

Nos testes de campo, a tinta seletiva manteve temperaturas superficiais abaixo da temperatura ambiente, tanto sob céu claro quanto nublado. Para ilustrar o desempenho em situações reais, os autores pintaram pequenas casas, como mostrado na Figura 3.6, uma com a tinta seletiva e a outra com tinta à base de dióxido de titânio.

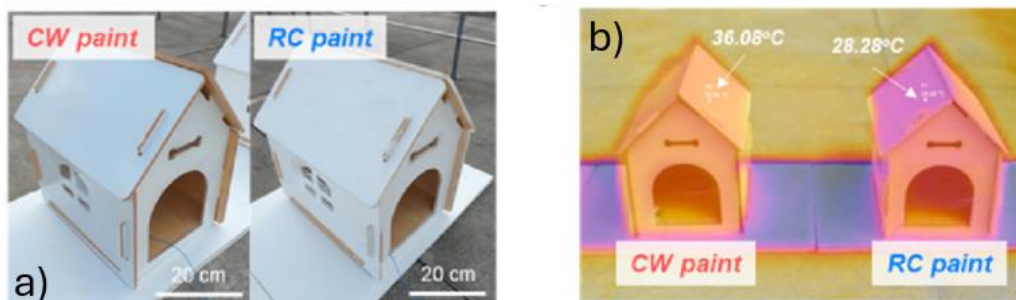


Figura 3.6 - Em a), duas pequenas casas revestidas com duas tintas de composições diferentes. Em b), uma imagem termográfica das duas casas pintadas, sob radiação solar. (Chae *et al.*, 2021)

A análise dos testes demonstra que, sob radiação solar, a casa revestida com tinta seletiva manteve uma temperatura superficial abaixo da temperatura ambiente. A Figura 3.7 apresenta o perfil de temperaturas do interior das casas miniatura, bem como a temperatura ambiente ao longo do tempo.

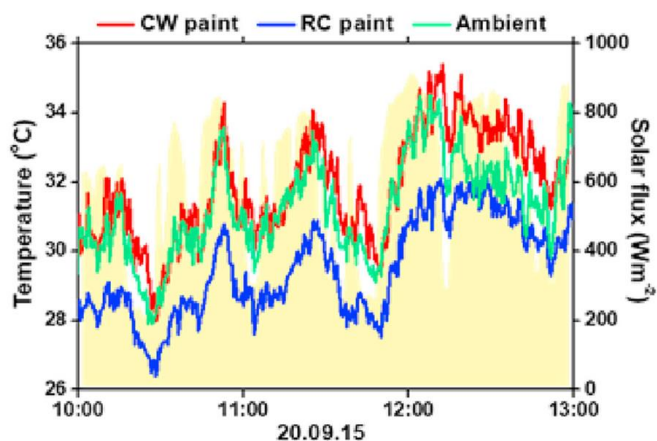


Figura 3.7 - Perfil de temperaturas do interior das duas casas miniatura e da temperatura exterior. (Chae *et al.*, 2021)

A partir da Figura 3.7, é possível observar que o interior da casa pintada com a tinta seletiva ("RC paint") manteve uma temperatura consistentemente inferior à da casa pintada com a tinta comercial ("CW paint") e à temperatura ambiente.

Com o objetivo de aprofundar a análise do desempenho térmico das tintas seletivas ("RC Paint"), os autores conduziram simulações que compararam este material com tintas convencionais à base de dióxido de titânio ("CW Paint"). O estudo considerou dois cenários de transmitância da atmosfera: "AM 1.5 atm", que representa condições ideais de transmitância e "Mid-latitude Summer", que reflete as condições típicas de uma região a latitude média durante o verão. O poder líquido de arrefecimento ( $P_{net}$ ) e a temperatura de arrefecimento ( $\Delta T$ ) foram calculados com a temperatura ambiente a 300 K e a condutância térmica superficial por convecção ( $h_c$ ) foi fixada em  $6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , à exceção da Figura 3.10 que representa o estudo da sua variação. Os resultados encontram-se ilustrados nas Figuras 3.8 a 3.12. A Figura 3.8 apresenta a variação do poder líquido de arrefecimento em função da temperatura ambiente:

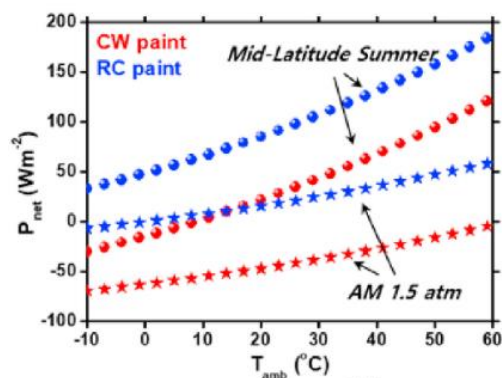


Figura 3.8 - Poder líquido de arrefecimento em função da temperatura ambiente. (Chae *et al.*, 2021)

Da análise da Figura 3.8, verifica-se que a tinta de arrefecimento radiativo ("RC Paint") apresenta um poder líquido de arrefecimento positivo para todas as temperaturas ambiente consideradas, tanto em condições atmosféricas ideais como em condições típicas de uma região a latitude média durante o verão. Os resultados demonstram claramente que a tinta seletiva oferece um desempenho superior em termos de arrefecimento quando comparada com a tinta à base de dióxido de titânio, particularmente em condições atmosféricas menos

favoráveis. A Figura 3.9 apresenta a variação da temperatura de arrefecimento em função da temperatura ambiente.

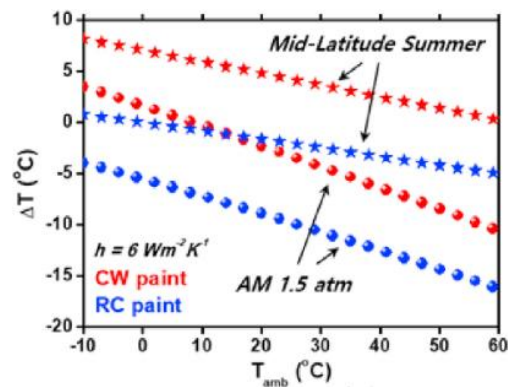


Figura 3.9 - Temperatura de arrefecimento em função da temperatura ambiente. (Chae *et al.*, 2021)

Os resultados mostram que a tinta seletiva ("RC Paint"), em condições ideais de transmitância da atmosfera, apresenta temperaturas superficiais sempre inferiores à temperatura ambiente. Em condições atmosféricas "Mid-Latitude Summer", observa-se que a temperatura superficial da tinta seletiva permanece inferior à temperatura ambiente para valores de temperatura ambiente a rondar os 30  $^{\circ}\text{C}$ . A Figura 3.10 apresenta a variação da temperatura de arrefecimento em função do coeficiente não radiativo.

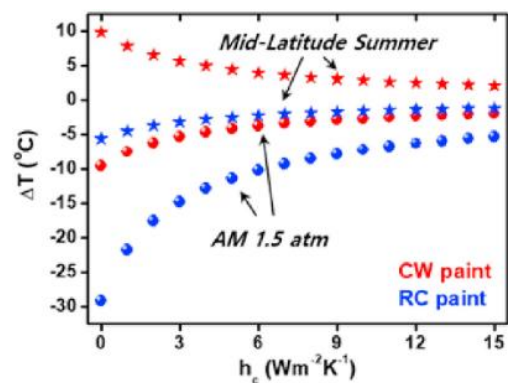


Figura 3.10 - Temperatura de arrefecimento em função do coeficiente não radiativo. (Chae *et al.*, 2021)

A Figura 3.10 destaca o impacto do coeficiente não radiativo na eficácia do arrefecimento radiativo. Em condições atmosféricas ideais, a tinta seletiva mantém temperaturas superficiais abaixo da temperatura ambiente, independentemente do valor de  $h_c$ . No entanto, em condições atmosféricas de uma região a latitude média durante o verão, verifica-se que, para valores de  $h_c$  superiores a 7 - 8  $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , a temperatura superficial da tinta seletiva aproxima-se da temperatura ambiente, mantendo-se, ainda assim, ligeiramente inferior. A Figura 3.11 apresenta a variação do poder líquido de arrefecimento em função do fluxo solar.

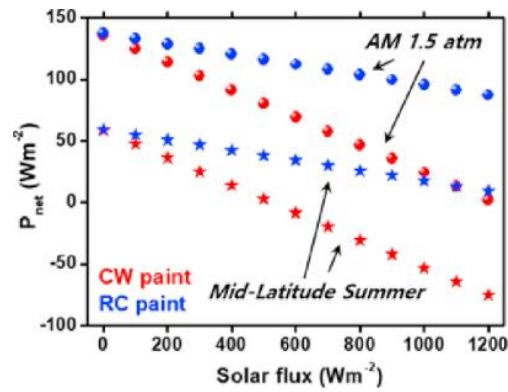


Figura 3.11 - Poder líquido de arrefecimento em função do fluxo solar. (Chae *et al.*, 2021)

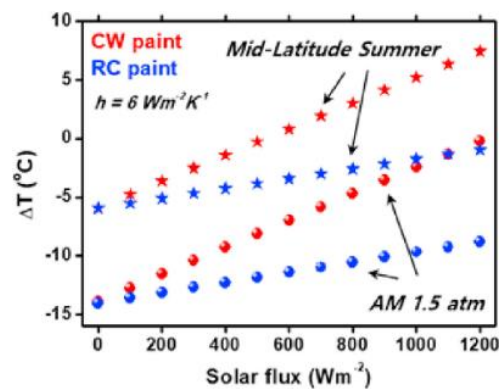


Figura 3.12 - Temperatura de arrefecimento em função do fluxo solar. (Chae *et al.*, 2021)

As Figuras 3.11 e 3.12 confirmam que a tinta seletiva mantém um desempenho superior em termos de arrefecimento, mesmo sob altos fluxos solares. Para valores de fluxo solar até  $1200 \text{ W/m}^2$  e condições atmosféricas de uma região a latitude média durante o verão, a tinta seletiva apresenta temperatura superficiais sub-ambiente e um poder líquido de arrefecimento positivo.

No seguimento do trabalho de Li *et al.* (2020), Lim *et al.* (2022) preparam uma tinta, com baixo custo de produção, à base de  $\text{CaCO}_3$  combinado com o polímero hexa acrilato de dipentaeritritol (DPHA). A solução apresentou 92% de emissividade na janela atmosférica e 89% de reflexão solar. Quando aplicada sobre uma superfície de vidro, a amostra atingiu temperaturas médias de  $6,52^\circ\text{C}$  abaixo da ambiente durante o dia e  $3,38^\circ\text{C}$  durante a noite, com uma capacidade de arrefecimento de  $93.1 \text{ W/m}^2$ . Analiticamente, os autores estimaram uma redução máxima da temperatura superficial em  $10^\circ\text{C}$  durante o dia.

Em 2022, diferenciando-se dos outros estudos pela forma de aplicação das tintas, Lin *et al.* (2022) propuseram a aplicação de duas tintas sobrepostas, uma à base de dióxido de titânio (camada inferior) e outra à base de óxido de alumínio (camada superior). A conjugação apresentou uma reflexão de 92% e emissividade de 95% na faixa do infravermelho médio ( $2500\text{nm} - 25\mu\text{m}$ ). Em testes de campo, com a aplicação da solução numa amostra, a temperatura superficial da amostra permaneceu a temperaturas inferiores à ambiente de  $1,5^\circ\text{C}$  e  $4,5^\circ\text{C}$ , durante o dia e durante a noite, respetivamente.

Outro estudo relevante foi realizado por Luo *et al.* (2023), que produziram um revestimento à base de óxido ítrico ( $Y_2O_3$ ) que apresentou 94,52% de reflexão solar e 93,4% de emissividade na janela atmosférica. Em testes de campo, o revestimento atingiu o arrefecimento radiativo subambiente de 7,4°C sob irradiação solar de  $1132 W/m^2$ , destacando-se por apresentar hidrofobicidade, resistência às intempéries, boa adaptabilidade ao substrato e flexibilidade mecânica, características essenciais para a aplicação a longo prazo ao ar livre.

### 3.2.2. Desafios na produção e implementação a larga escala

Apesar dos avanços significativos no desenvolvimento de tintas para arrefecimento radiativo, ainda existem vários desafios que limitam a sua implementação em larga escala e o seu desempenho a longo prazo. Estas questões tornam-se particularmente relevantes no contexto prático dos edifícios, onde fatores económicos, estéticos e de durabilidade desempenham papéis cruciais.

Um dos principais entraves reside no custo elevado da produção de tintas altamente eficientes, frequentemente associado ao uso de materiais avançados, como nanopartículas metálicas ou polímeros especializados (Li, Li and Shah, 2020; Nie *et al.*, 2020; Xue *et al.*, 2020; Lim *et al.*, 2022; Zhai, Fan and Li, 2022; Zhao *et al.*, 2022; Gong *et al.*, 2023). Paralelamente, levantam-se preocupações ambientais relacionadas com a extração, processamento e descarte de alguns destes materiais, bem como com os impactos ao longo do ciclo de vida das tintas (Xue *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2021; He *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022; Gong *et al.*, 2023).

Outro problema significativo é a acumulação de sujidade, que pode comprometer a reflexão solar e a emissividade das tintas com o tempo, diminuindo a sua eficiência (He *et al.*, 2022; Jiang, Fan and Wang, 2023). Adicionalmente, a cor das tintas apresenta-se como uma limitação estética, já que muitas das soluções desenvolvidas estão disponíveis apenas em tons brancos ou claros, que nem sempre se adaptam a todos os contextos arquitetónicos (H. Zhang *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022; Zhai, Fan and Li, 2022).

A espessura do revestimento também é um fator determinante no desempenho térmico e nos custos de aplicação (Felicelli *et al.*, 2022; He *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022). Camadas demasiado finas podem ser insuficientes para proporcionar os níveis necessários de reflexão e emissividade, enquanto camadas mais espessas elevam os custos e aumentam a complexidade da aplicação. Por fim, a durabilidade das tintas, incluindo a resistência às intempéries, abrasão e envelhecimento, é essencial para assegurar a eficácia das soluções ao longo do tempo (He *et al.*, 2022; Luo *et al.*, 2023; Xia *et al.*, 2023).

De seguida, serão apresentados estudos que abordaram estas questões, explorando soluções inovadoras para ultrapassá-las e para otimizar o desempenho e a viabilidade das tintas destinadas ao arrefecimento radiativo.

#### 3.2.2.1. Custo de fabrico

Apesar dos benefícios significativos associados às envolventes frias, a implementação de tecnologias de arrefecimento radiativo enfrenta desafios, sendo o custo inicial um dos principais entraves. Estas soluções, incluindo as tintas de arrefecimento radiativo, apresentam, muitas vezes, um preço ligeiramente superior ao dos produtos convencionais, o que pode dificultar a sua adoção no mercado. Adicionalmente, a consciencialização e a regulamentação insuficientes representam barreiras adicionais (Tso, Chan and Chao, 2017), existindo já organismos

que estão a incentivar a utilização de coberturas frias através de políticas e incentivos financeiros (Cool Roof Rating Council, 2024).

Para ultrapassar os desafios financeiros associados ao desenvolvimento de tintas de arrefecimento radiativo, as equipas de investigação têm explorado alternativas para reduzir os custos, nomeadamente através da incorporação de materiais com maior custo-benefício e com o desenvolvimento de processos de fabrico mais acessíveis. Estudos demonstram que a alta emissividade, essencial para o desempenho dessas tintas, pode ser alcançada com diferentes abordagens: pigmentos intrinsecamente emissivos (Berdahl *et al.*, 2018; X. Li *et al.*, 2021); aplicação de tintas seletivas em substratos emissivos (Harrison and Walton, 1978; Y. Chen *et al.*, 2020); introdução de pigmentos obtidos através de óxidos (Zhai, Fan and Li, 2022) e inclusão de vazios de ar na tinta para melhorar a dispersão ótica ou integração de materiais como microesferas de vidro inteiras ou quebradas (Nie *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022).

No caso específico da introdução de vazios na tinta, estes desempenham um papel crucial na melhoria da reflexão da luz solar, contribuindo significativamente para a eficiência do arrefecimento radiativo. Contudo, a criação de vazios de ar apresenta limitações, uma vez que o método baseado na evaporação natural é difícil de controlar, resultando em variações no desempenho do arrefecimento. Como alternativa, as esferas ocas surgem como uma solução promissora para substituir os vazios de ar, permitindo um controlo preciso tanto do tamanho quanto do volume das partículas, otimizando, assim, o desempenho e a consistência das tintas de arrefecimento radiativo (Yu *et al.*, 2022).

Com o objetivo de reduzir os custos de fabrico, Nie *et al.* (2020) desenvolveram uma tinta seletiva para aplicação em edifícios, incorporando microesferas de vidro, o que resultou num baixo custo de produção. Esta solução apresentou uma reflexão solar de 92% e emissividade no infravermelho médio de 85%. Quando aplicada sobre um provete de argamassa coberto por uma película de polietileno e exposta a condições exteriores, a amostra atingiu uma temperatura superficial de 9,6°C abaixo da temperatura ambiente sob radiação solar direta.

Posteriormente, Zhao *et al.* (2022) produziram um revestimento através de um processo aquoso que integrou microesferas ocas de vidro disponíveis no mercado. Este revestimento destacou-se pelo seu reduzido custo e baixo impacto ambiental, uma vez que o processo aquoso eliminou a libertação de compostos orgânicos voláteis (VOC's). Além disso, o material demonstrou forte potencial para produção a larga escala, repelência à água e excelente flexibilidade. Contudo, apesar de alcançar 93% de reflexão solar e elevada emissividade térmica no infravermelho, a solução não atingiu temperaturas sub-ambiente durante os testes de campo.

Com base nos avanços dos trabalhos de Nie *et al.* (2020) e Zhao *et al.* (2022), Yu *et al.* (2022) identificaram que o baixo desempenho em termos de reflexão solar estava relacionado com o tamanho das bolas de vidro utilizadas nas formulações. Para superar essa limitação, os autores desenvolveram uma tinta incorporando bolas de vidro moídas, o que resultou numa melhoria significativa do desempenho ótico da solução.

Os autores compararam duas formulações de tinta: uma contendo bolas de vidro inteiras e outra utilizando bolas de vidro partidas. O processo de moagem das bolas aumentou a refletividade solar de 93,3% para 97,3% e a emissividade térmica foi idêntica para ambas as tintas, com um valor de 93,4%.

Os perfis de refletividade das duas tintas podem ser observados na Figura 3.13 e os perfis de emissividade na Figura 3.14.

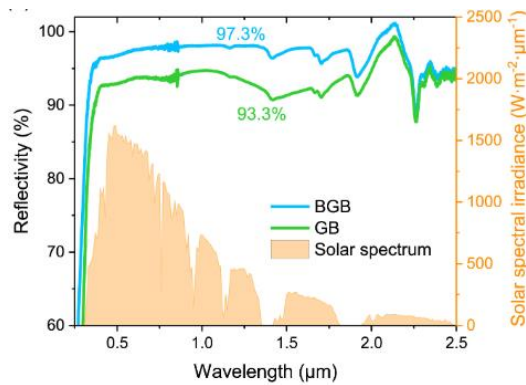


Figura 3.13 - Perfis de refletividade das tintas produzidas pelos autores. "BGB" representa a tinta com bolas de vidro partidas e "GB" representa a tinta com bolas de vidro inteiras. "Solar spectrum" representa o espectro solar. (Yu *et al.*, 2022)

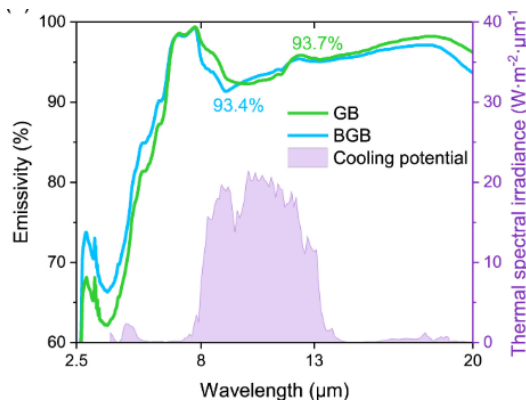


Figura 3.14 - Perfis de emissividade das tintas produzidas pelos autores. "BGB" representa a tinta com bolas de vidro partidas e "GB" representa a tinta com bolas de vidro inteiras. "Cooling potencial" refere o potencial de arrefecimento através da janela atmosférica. (Yu *et al.*, 2022)

Em testes de campo, realizados em Hong Kong, a tinta "GB" permaneceu 1,8°C abaixo da temperatura ambiente ao meio-dia, enquanto a tinta "BGB" apresentou um desempenho superior, mantendo-se 3,5°C abaixo da temperatura ambiente nas mesmas condições, sem recurso a coberturas para mitigar as perdas não radiativas. Durante a noite, ambas as tintas foram capazes de reduzir a temperatura para cerca de 6,5°C abaixo do ambiente, durante a noite. Com a aplicação de um filme de polietileno nanoporoso ("NanoPE") sobre a tinta "BGB", os resultados mostraram uma melhoria considerável no desempenho térmico, com a temperatura superficial reduzida para 8,5°C abaixo da temperatura ambiente ao meio-dia e 14,1°C durante a noite. Esta melhoria é atribuída à capacidade do filme em reduzir as perdas não radiativas, otimizando o efeito de arrefecimento radiativo.

A Figura 3.15 ilustra os resultados de temperatura e diferença térmica em relação à temperatura ambiente para as tintas "GB", "BGB", e "BGB with NanoPE" ao longo de 24 horas de teste.

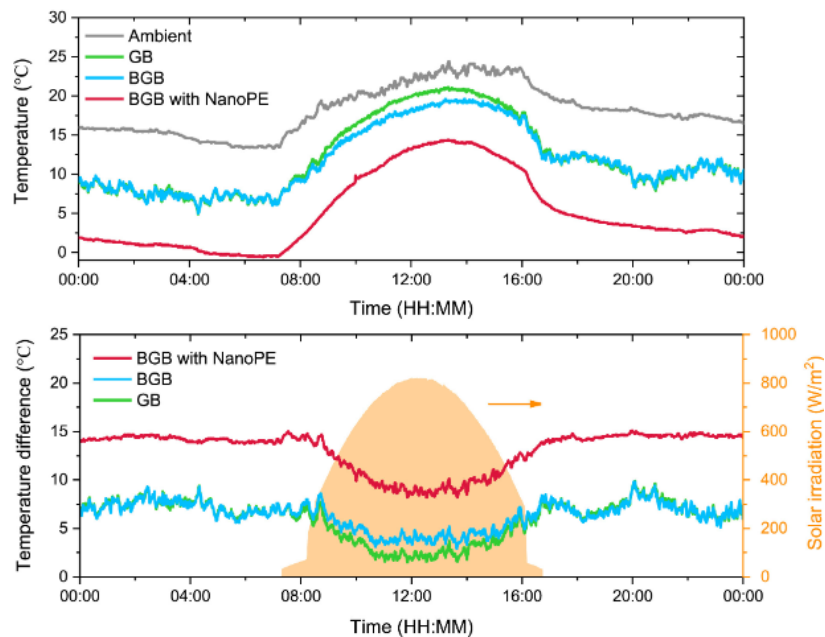


Figura 3.15 - Perfis de temperatura (em cima) e perfis de diferença de temperatura em relação à ambiente (em baixo), ambos para a duração do teste de campo de 24 horas, para as duas tintas testadas e para a tinta BGB coberta com um filme de polietileno nanoporoso. (Yu *et al.*, 2022)

Observa-se que a diferença de 4% na refletividade solar entre "GB" e "BGB" tem um impacto significativo no desempenho de arrefecimento diurno, reforçando a importância da reflexão solar para reduzir a absorção de radiação solar. Além disso, a aplicação do "NanoPE" demonstrou um efeito complementar, ao minimizar perdas por convecção e condução, maximizando o arrefecimento radiativo (Yu *et al.*, 2022).

### 3.2.2.2. Impacto ambiental associado ao processo de fabrico e aplicação

A problemática ambiental das tintas de arrefecimento radiativo está amplamente associada ao impacto de materiais tradicionalmente utilizados na sua formulação. Os pigmentos tradicionalmente utilizados podem contaminar o solo e os recursos hídricos devido ao seu escorrimento, enquanto os solventes tóxicos, como a acetona presente em tintas poliméricas, volatilizam-se e contribuem para a poluição atmosférica (Xia *et al.*, 2023).

O impacto ambiental das tintas é ainda amplificado pela presença de compostos orgânicos voláteis (VOC's), cuja libertação ultrapassa frequentemente os limites estabelecidos pelas agências ambientais (Huang *et al.*, 2021; Gong *et al.*, 2023). Diversos estudos (Wang *et al.*, 2020; D. Li *et al.*, 2021; Jing *et al.*, 2021; Zhong *et al.*, 2021) demonstraram soluções para arrefecimento radiativo que apresentavam dificuldades de aplicação devido à libertação de VOC's acima do permitido pelas agências do ambiente (Gong *et al.*, 2023). A substituição destes materiais por alternativas mais sustentáveis, como pigmentos naturais e solventes aquosos, surge como uma estratégia eficaz para reduzir a pegada ambiental das tintas, contribuindo para o aumento da sua durabilidade (Gong *et al.*, 2023). Neste sentido, Gong *et al.* (2023) destaca os trabalhos de Xue *et al.*, (2020); Huang *et al.*, (2021) e Zhao *et al.*, (2022).

No contexto das preocupações ambientais relacionadas com a produção e aplicação de revestimentos, Huang *et al.* (2021) desenvolveram uma tinta com baixas emissões de compostos orgânicos voláteis (71g/L), baseada num polímero combinado com bolas moídas de polifluoreto de vinilideno. O material exibiu uma reflexão solar de 94% e uma emissividade na janela

atmosférica de 97%. Em testes de campo, sob um alto fluxo solar de  $\sim 1100W/m^2$ , o revestimento apresentou uma redução de temperatura de  $3,3^\circ C$  em relação a tintas comerciais à base de dióxido de titânio e de  $1,7^\circ C$  em relação à temperatura ambiente. Além disso, o revestimento destacou-se pela sua estabilidade de armazenamento, insolubilidade em água e resistência ao envelhecimento, tornando-o promissor para aplicações em larga escala.

Em outro estudo, Gong *et al.* (2023) criaram uma tinta aquosa completamente livre de emissões de compostos orgânicos voláteis, na qual utilizaram esferas de vidro como aditivo funcional. A tinta exibiu uma emissividade infravermelha média de 92% e uma reflexão solar de 94%. Em testes de campo realizados numa região subtropical, a tinta demonstrou uma redução de temperatura de  $6^\circ C$  abaixo da temperatura ambiente em condições de alta humidade e baixa incidência solar. Sob radiação solar direta, a tinta manteve temperaturas entre  $2^\circ C$  e  $5^\circ C$  abaixo da temperatura ambiente. Os autores estimaram um período de retorno de apenas seis meses para a aplicação da tinta em coberturas de edifícios na China, reforçando o seu potencial viável para implementação prática em larga escala.

Outro exemplo de inovação foi apresentado por Xia *et al.* (2023), que produziram uma tinta para aplicação em fachadas de edifícios à base de água, combinando caulim e poliacrilato como pigmentos. A tinta apresentou uma reflexão solar de 86,6% e uma emissividade na janela atmosférica de 96,8%. Em testes de campo, sob radiação solar média de  $778W/m^2$  e com revestimento superficial para minimizar as trocas não radiativas, a tinta permaneceu  $13,2^\circ C$  abaixo da temperatura ambiente. Sem o revestimento complementar, a tinta apresentou um desempenho de  $3,1^\circ C$  abaixo da temperatura ambiente. Adicionalmente, o material demonstrou forte adesão ao substrato, excelente resistência à água e elevada durabilidade.

### 3.2.2.3. Acumulação de sujidade ao longo do tempo de exposição às condições climáticas

Qualquer elemento exposto às condições climáticas exteriores está sujeito à acumulação de poeiras, partículas e outros contaminantes na sua superfície. Este problema é particularmente agravado em ambientes urbanos, onde a poluição do ar e a elevada concentração de partículas suspensas intensificam a deposição de sujidade. Para as tintas de arrefecimento radiativo, este fenómeno representa um enorme desafio, uma vez que a alta reflexão da luz solar é um pré-requisito essencial para alcançar o arrefecimento radiativo diurno subambiente e pode ser comprometida pela acumulação de sujidade (Song *et al.*, 2022).

Para mitigar estes problemas, materiais como ligantes à base de fluoropolímeros ou polidimetilsiloxano têm demonstrado eficácia na redução da acumulação de partículas na superfície, prolongando a vida útil do revestimento. Produtos resistentes à sujidade, como acabamentos hidrofóbicos e resistentes à bioincrustação, têm-se destacado por manterem o desempenho ótico e térmico das tintas mesmo em ambientes desafiantes. Estas soluções, além de reduzirem a necessidade de manutenção frequente, garantem que o desempenho de arrefecimento radiativo seja preservado ao longo do tempo, tornando-as uma aposta promissora para aplicações práticas (Jiang, Fan and Wang, 2023).

Neste contexto, Jiang, Fan and Wang (2023) desenvolveram uma tinta seletiva para aplicação em edifícios, destacando-se pelas suas propriedades de autolimpeza. A tinta apresentou reflexão solar de 90,6% e emissividade na janela atmosférica de 98,1%. Em testes de campo, a amostra permaneceu, em média,  $4,63^\circ C$  abaixo da temperatura ambiente sob radiação solar máxima de  $981,8W/m^2$ . Após um ano de exposição às condições climáticas, incluindo a

ausência de precipitação na semana anterior à recolha das amostras para testes laboratoriais, verificaram-se alterações nas propriedades radiativas do material. Sob radiação de uma lâmpada de xenon durante 1 hora, a amostra anteriormente exposta ao ambiente alcançou uma temperatura 4,5°C abaixo da temperatura ambiente de teste, enquanto a amostra armazenada em laboratório atingiu 6,7°C abaixo da temperatura ambiente de teste. Apesar dos resultados, os autores relatam que após uma limpeza da amostra com sujidade, com recurso a gotas de água (de forma a simular a chuva), esta apresentou resultados semelhantes à amostra guardada em laboratório.

#### 3.2.2.4. A cor como requisito estético

A cor é um dos principais desafios na formulação de tintas para arrefecimento radiativo. De uma forma lógica, as tintas brancas, quando expostas à radiação solar, apresentam temperatura superficiais inferiores às tintas coloridas, porém, o mercado requiere tintas coloridas, sendo estas largamente utilizadas como revestimento superficial dos edifícios. Às vezes, uma cobertura branca não é socialmente aceite por razões estéticas (Boixo *et al.*, 2012). Com a introdução de cores intensas a reflexão solar do revestimento é comprometida, uma vez que os pigmentos responsáveis pelas cores absorvem parte significativa da luz visível, aumentando a absorção de energia e, conseqüentemente, a temperatura superficial.

Assim, desenvolver tintas coloridas que mantenham propriedades radiativas eficazes é um foco crescente da investigação, exigindo avanços em materiais e técnicas de formulação que equilibrem desempenho técnico e requisitos estéticos.

No sentido de alcançar o arrefecimento radiativo com tintas coloridas, uma equipa identificou e caracterizou as propriedades óticas de um grande número de pigmentos, criando um banco de dados (Levinson, Berdahl and Akbari, 2005a, 2005b) de características de pigmentos, classificando-os como "frios" ou "quentes".

A razão pela qual observamos a cor de um objeto é que este absorve seletivamente uma parte da luz solar no visível, assim, para obter revestimentos coloridos, é inevitável sacrificar uma parte da reflexão nesse comprimento de onda. Felizmente, de acordo com o perfil de distribuição da energia solar incidente, esta tem uma distribuição de 6%, 42% e 52% ns faixas (UV) (0,28 – 0,38  $\mu\text{m}$ ), VIS (0,38 – 0,76  $\mu\text{m}$ ) e NIR (0,76 – 2,5  $\mu\text{m}$ ), respetivamente, conforme identificado na Figura 3.16. Assim, um revestimento seletivo colorido, deve absorver seletivamente a luz solar na faixa VIS e ser altamente reflexivo na zona do infravermelho próximo do espectro solar, a fim de manter uma alta reflexão solar (Synnefa, Santamouris and Apostolakis, 2007; Zhai, Fan and Li, 2022).

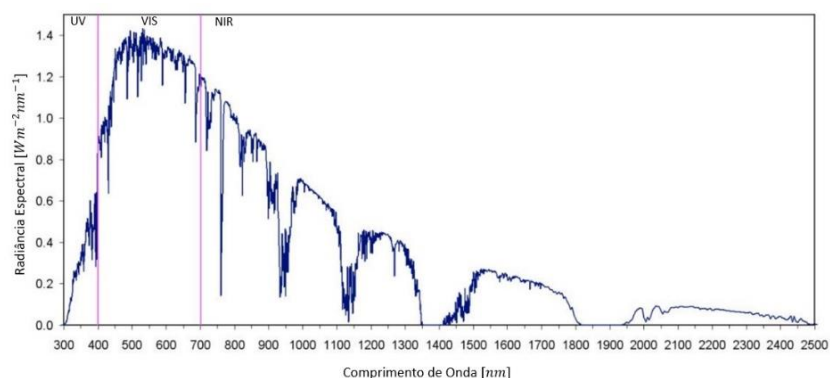


Figura 3.16 - Espectro de radiação solar ao nível do mar para radiância solar em Air Mass 1.5. Adaptado de (Pockett, 2010; 'ASTM G173-03', 2017)

A utilização de pigmentos fluorescentes (Berdahl *et al.*, 2016, 2018), que convertem a absorção visível em emissão no campo das ondas longas, e a utilização da solução de bicamada têm sido utilizados para maximizar o arrefecimento e atribuir cor ao revestimento.

Nos primeiros protótipos de materiais para arrefecimento diurno coloridos, diversos investigadores (Zhou *et al.*, 2019; Chae *et al.*, 2020; Fan, Shi and Xia, 2020; Kim *et al.*, 2021) utilizaram uma camada metálica para refletir a luz solar e uma camada superficial para atribuir cor ao material e emitir radiação infravermelha. Esta solução denomina-se solução bicamada. Contudo, esta solução apresenta enormes custos e dificuldades de aplicação em larga escala, dado que a camada refletora inclui metais como prata (Y. Chen *et al.*, 2020; Lim *et al.*, 2022). O comportamento de um revestimento aplicado em bicamada é apresentado na Figura 3.17.

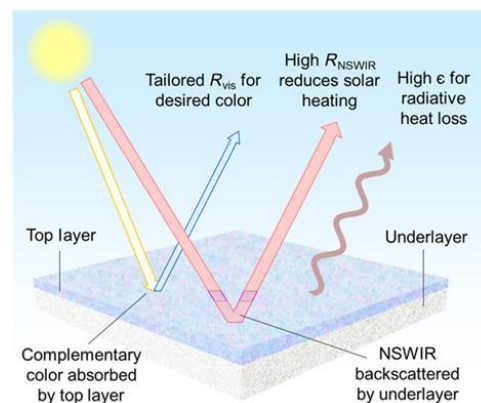


Figura 3.17 - Esquema ilustrando a interação entre a luz solar e a radiação térmica com a solução bicamada. (Y. Chen *et al.*, 2020)

Onde: "Top Layer" - camada superior; "Tailored  $R_{vis}$  for desired color" -  $R_{vis}$  ajustado para a cor desejada; "High  $R_{NIR}$  reduces solar heating" - Alto  $R_{NIR}$  reduz o aquecimento solar; "High  $\epsilon$  for radiative heat loss" - Alto  $\epsilon$  para perda de calor radiativo; "Underlayer" - camada inferior; "Complementary color absorbed by top layer" - Cor complementar absorvida pela camada superior e "NSWIR backscattered by underlayer" - NSWIR refletido pela camada inferior. NSWIR (Near-Short Wave Infrared) trata-se de uma parte do espectro infravermelho que abrange comprimentos de onda localizados entre o infravermelho próximo e o infravermelho de ondas curtas,  $\lambda \sim 1$  a  $2,5 \mu m$ .

Outra forma de aplicar um revestimento é com a solução monocamada que recorre à aplicação de apenas um material na superfície a revestir, sendo amplamente utilizada na construção devido à sua simplicidade e custo reduzido. Nas tintas monocamada concebidas para arrefecimento radiativo, os pigmentos ou os corantes são utilizados para absorver luz visível complementar à cor desejada, enquanto as partículas de  $TiO_2$  dispersam e refletem a restante radiação solar incidente (Y. Chen *et al.*, 2020). No entanto, a radiação infravermelha incidente, especialmente na faixa de ondas longas (NSWIR), apresenta comprimentos de onda significativamente maiores do que a luz visível, o que resulta numa profundidade de penetração consideravelmente maior. Para que o revestimento possa refletir eficientemente a radiação infravermelha, é necessário aumentar a espessura da tinta muito além do que seria necessário para refletir apenas a luz visível (Y. Chen *et al.*, 2020). Contudo, esse aumento de espessura implica uma maior deposição de pigmentos e aglutinantes na superfície, o que amplifica os desafios óticos. Como os materiais presentes possuem índices de refração diferentes, a interação entre as partículas gera um aumento do caminho percorrido pela radiação infravermelha dentro do

revestimento. Isso resulta num incremento substancial da absorção residual pelos pigmentos e aglutinantes, levando a uma maior energia retida no material (Y. Chen *et al.*, 2020).

O funcionamento, da componente reflexiva, das duas soluções de aplicação é demonstrado na Figura 3.18.

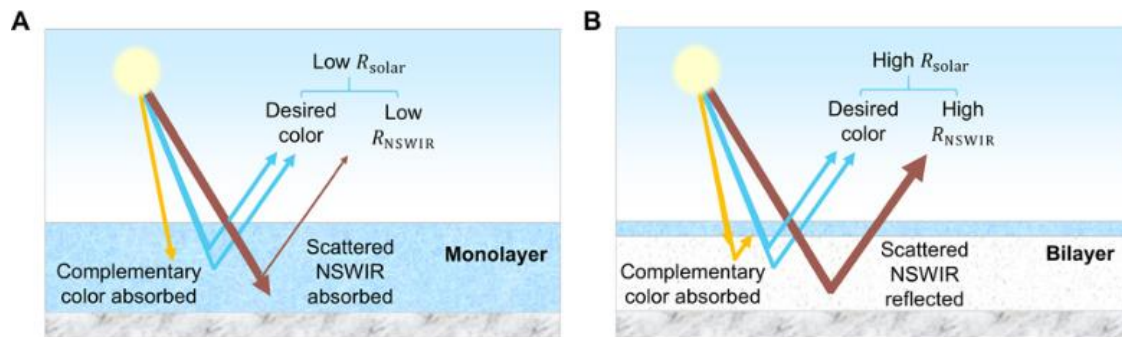


Figura 3.18 - Esquema que ilustra a interação da luz solar com revestimentos monocamada (A) e bicamada (B), respectivamente. (Y. Chen *et al.*, 2020)

Uma das estratégias utilizadas para superar as limitações das tintas monocamada é a incorporação de partículas otimizadas, como microesferas e nanomateriais. Estas partículas têm a capacidade de aumentar a dispersão óptica da radiação incidente, melhorando a reflexão solar sem comprometer a eficiência radiativa dos revestimentos. Outra abordagem complementar consiste no desenvolvimento de pigmentos com baixos índices de absorção na região do infravermelho próximo de onda curta (NSWIR) que permitem reduzir o impacto da absorção nesta faixa espectral, possibilitando a criação de revestimentos mais finos e igualmente eficientes (Y. Chen *et al.*, 2020).

Considerando o requisito estético, Wang *et al.* (2022) desenvolveram uma tinta que altera a sua cor em função da temperatura ambiente, apresentando um comportamento auto-adaptativo. Quando aplicada sobre uma placa de alumínio, esta tinta demonstrou a capacidade de atingir temperaturas abaixo da temperatura ambiente em 7,8°C durante a noite, e 7,1°C sob luz solar direta. A principal característica deste revestimento é a incorporação de microcápsulas termocrômicas reversíveis, que permitem a mudança de cor do material conforme a temperatura ambiente. Para temperaturas superiores a 25°C, o revestimento assume uma tonalidade branca, apresentando reflexão solar de 96% e emissividade na janela atmosférica de 94%, promovendo arrefecimento radiativo subambiente. Por outro lado, quando a temperatura ambiente está abaixo dos 25°C, a tinta muda gradualmente de cor, aumentando a absorção da radiação solar e, conseqüentemente, a temperatura superficial do material, atingindo até 9,5°C acima da temperatura ambiente. Adicionalmente, os autores verificaram que, ao ajustar a proporção de um dos componentes da tinta, é possível modificar a temperatura crítica ( $T_c$ ) em que o revestimento alterna entre os estados de aquecimento e arrefecimento. Este ajuste permite configurar o revestimento para diferentes condições climáticas, com valores de  $T_c$  testados em 18°C, 22°C, 25°C e 28°C. A flexibilidade desta abordagem sugere a possibilidade de adaptar a tinta às necessidades específicas de edifícios em diferentes regiões e climas, eliminando o impacto negativo dos revestimentos frios durante o inverno, tornando a tecnologia mais propícia à sua aplicação a larga escala.

A Figura 3.19 ilustra o funcionamento do revestimento: para temperaturas acima da temperatura crítica, o material assume a cor branca e promove arrefecimento radiativo subambiente.

Para temperaturas inferiores à temperatura crítica, o revestimento escurece gradualmente, aumentando a absorção de calor e produzindo aquecimento.

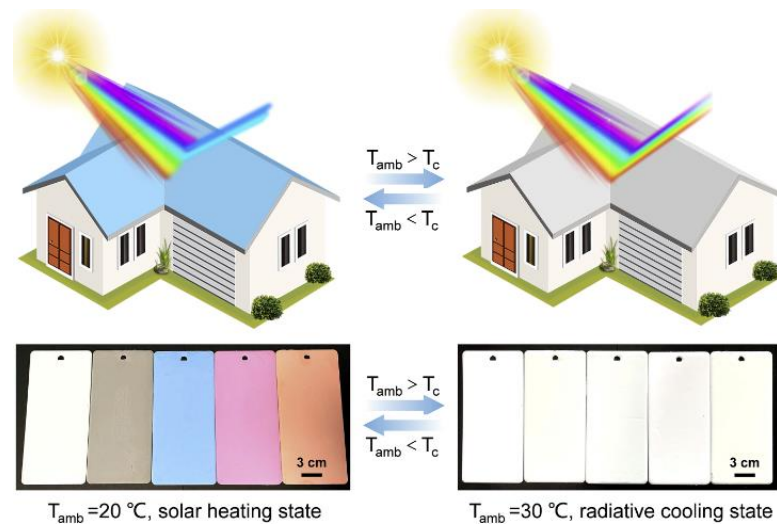


Figura 3.19 - Ilustração do funcionamento do revestimento produzido por Wang *et al.* (2022). (Wang *et al.*, 2022)

No mesmo ano, H. Zhang *et al.* (2022) produziram uma tinta cinzenta que demonstrou uma reflexão solar de 89% e uma emissividade de 96% na janela atmosférica. Embora a tinta tenha sido inicialmente concebida para aplicação em componentes eletrônicos, os autores destacaram o potencial de produção de tintas coloridas com propriedades radiativas comparáveis às das tintas brancas tradicionais. Durante os testes de campo realizados na China, a tinta foi aplicada sobre uma folha de alumínio e, sob radiação solar direta, alcançou uma temperatura superficial 2,6°C abaixo da temperatura ambiente.

Já Zhai, Fan and Li (2022) desenvolveram dois revestimentos coloridos que podem ser aplicados como tinta, utilizando pigmentos provenientes de duas fases cristalinas do composto  $Bi_2O_2$ , denominadas fases alfa e beta. Os pigmentos foram obtidos através do composto orgânico  $Bi_2O_2CO_3$ , conhecido como carbonato de oxibismuto. A Figura 3.20 apresenta as cores dos revestimentos obtidos, sendo a amostra à esquerda referente à fase beta do composto, enquanto a amostra à direita representa a fase alfa.

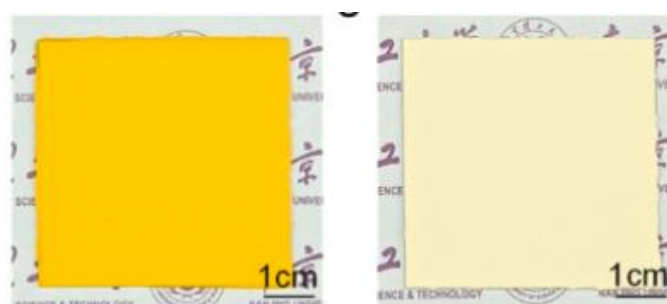


Figura 3.20 - Cor da amostra com o composto beta e alfa, respectivamente. (Zhai, Fan and Li, 2022)

O revestimento que utilizou pigmentos da fase alfa demonstrou melhor desempenho em comparação com a fase beta, exibindo uma reflexão de 99% no espectro NIR (0,76-2,5  $\mu m$ ) e uma emissividade de 97% na janela atmosférica. Durante os testes de campo, a amostra alcançou

uma temperatura superficial 2,31°C abaixo da temperatura ambiente sob radiação solar direta com intensidade de 885  $W/m^2$  e um poder de arrefecimento de 68  $W/m^2$ .

O estudo destaca a viabilidade da utilização de materiais óxidos como pigmentos de baixo custo e com um processo de preparação simples, promovendo alternativas acessíveis e eficientes para aplicações de arrefecimento radiativo (Zhai, Fan and Li, 2022).

### 3.2.2.5. Espessura do material aplicado na superfície a revestir

A aplicação de revestimentos em monocamada, como discutido anteriormente, requer um aumento significativo da espessura do material para atingir níveis aceitáveis de reflexão solar. No entanto, esse incremento de espessura promove a absorção residual de energia pelos pigmentos e aglutinantes presentes na composição, resultando em maior energia retida no material (Y. Chen et al., 2020).

Embora a solução bicamada apresente vantagens em termos de espessura reduzida, ainda tem que ser suficientemente espessa para absorver comprimentos de onda visíveis complementares à cor desejada, enquanto reflete outros comprimentos de onda, seja pela camada superior, seja pela camada inferior. Apesar dos avanços na formulação de tintas de alta reflexão, a aplicabilidade das mesmas ainda enfrenta desafios consideráveis. Para alcançar os elevados valores de reflexão solar e emissividade na janela atmosférica, as tintas geralmente requerem uma espessura equivalente a mais de 5-8 demãos quando aplicadas com um rolo, o que dificulta a obtenção de altos níveis de reflexão solar em camadas finas (Felicelli *et al.*, 2022).

Também neste âmbito, o trabalho de Yu *et al.* (2022), já discutido anteriormente, ganha destaque. A tinta desenvolvida pelos autores, que incorpora bolas de vidro moídas, demonstrou a capacidade de aumentar a espessura do revestimento sem comprometer sua eficiência em refletir a luz solar. Conforme ilustrado na Figura 3.21, a tinta mantém altos níveis de reflexão solar mesmo com o aumento da espessura, evidenciando o impacto positivo das partículas de vidro partidas na otimização do desempenho óptico do material.

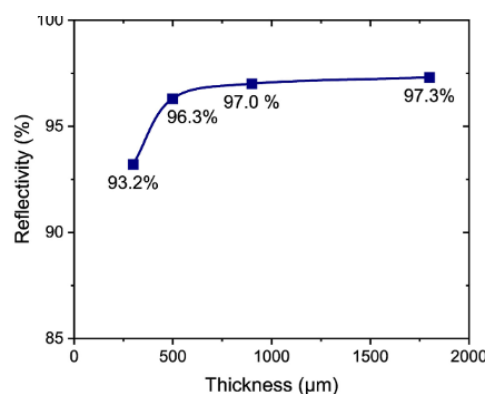


Figura 3.21 - Percentagem de reflexão da luz solar da tinta com bolas de vidro partidas para diferentes espessuras de tinta aplicada em uma superfície. (Yu *et al.*, 2022)

Outro avanço neste campo foi o de Felicelli *et al.* (2022) que produziram uma tinta acrílica branca incorporando nitreto de boro hexagonal (*hBN*) que alcançou uma reflexão solar de 97.9% e uma emissividade na janela atmosférica de 83%, com uma espessura de 150 $\mu m$ . Esta espessura é comparável à das tintas comerciais, que requerem de 2 a 3 camadas aplicadas com rolo, e é consideravelmente menor do que a maioria das tintas seletivas reportadas na

literatura. Nos testes de campo, a temperatura superficial da tinta permaneceu, em média, entre 5 a 6°C abaixo da temperatura ambiente durante o dia. Sob radiação solar direta, com intensidade de  $1063 \text{ W/m}^2$ , a amostra manteve-se entre 1 a 2°C abaixo da temperatura ambiente. Importa salientar que os testes foram realizados com as amostras cobertas por um filme, destinado a minimizar perdas não radiativas.

A Figura 3.22 apresenta graficamente os resultados obtidos nos testes de campo. Na parte superior, observa-se a variação da temperatura ambiente em comparação com a temperatura da tinta aplicada. Na parte inferior, apresenta-se a diferença de temperatura entre a tinta aplicada e o ambiente.  $G_s$  ilustra a radiação solar.

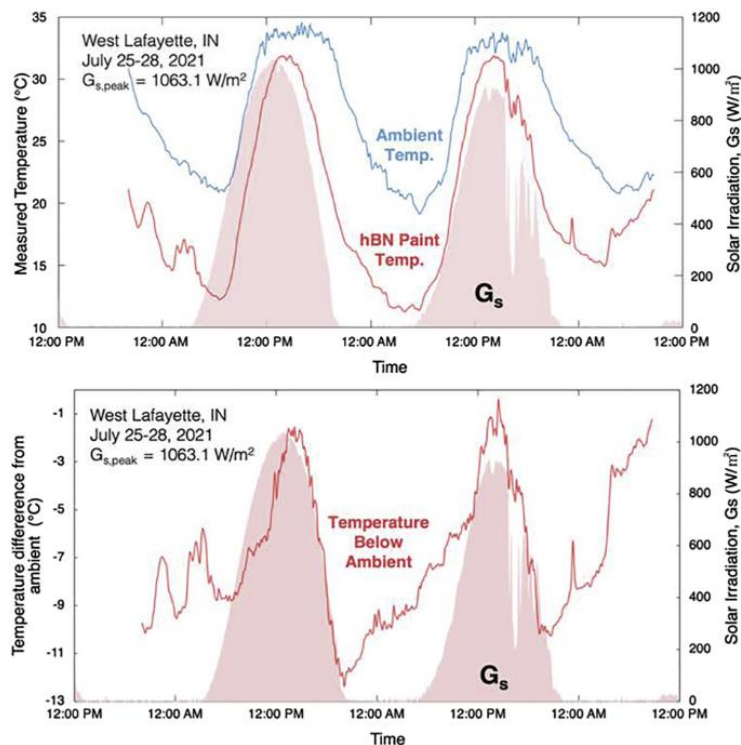


Figura 3.22 - Resultados dos testes de campo. (Felicelli *et al.*, 2022)

### 3.2.2.6. Durabilidade dos materiais

À semelhança de todos os materiais de construção, os revestimentos de arrefecimento radiativo também devem ser duradouros e manter as suas propriedades ao longo do tempo de vida útil. Os materiais enfrentam desafios significativos em ambientes exteriores, onde estão sujeitos à irradiação ultravioleta (UV), erosão ou corrosão causadas pelo vento, chuva e neve, acumulação de poeira, variações de temperatura e humidade, além de outras condições climáticas adversas e complexas. Essas ações podem levar à degradação física e química dos materiais, comprometendo as suas propriedades térmicas e óticas, como a reflexão solar e a emissividade na janela atmosférica.

A literatura destaca que a maior parte da redução da reflexão solar ocorre nos primeiros dois anos de exposição, durante os quais pode haver uma diminuição de até 20% na reflexão solar inicial (Bretz and Akbari, 1994). Após esse período, verifica-se uma estabilização das propriedades óticas. Por outro lado, estudos como os de (Petrie *et al.*, 2001; Boixo *et al.*, 2012) demonstram que a ação dos elementos naturais não tem impacto significativo na emissividade térmica dos materiais. Contudo, o envelhecimento natural dos polímeros, frequentemente

acompanhado de mudanças na cor devido ao amarelamento, e a acumulação de sujeira na superfície continuam a ser fatores críticos para a durabilidade dos revestimentos (Song *et al.*, 2022).

Atendendo a esta problemática, He *et al.* (2022) desenvolveram uma tinta seletiva incorporando zircônia e aerogel de sílica em uma resina de fluorocarbono à base de água. O revestimento apresentou reflexão solar de 95,7% e emissividade de banda larga de 99,08% nos comprimentos de onda 3-25 $\mu\text{m}$ . Durante os testes de campo, a tinta foi aplicada sobre um substrato exposto ao ambiente exterior, e para avaliar o desempenho térmico, foram realizados dois testes: um com o substrato coberto por um filme de polietileno (para minimizar perdas não radiativas) e outro sem essa cobertura. Os resultados mostraram que a temperatura da superfície traseira do substrato permaneceu 6°C abaixo da temperatura ambiente com o uso do filme e 4,5°C abaixo da temperatura ambiente sem o filme, ambos sob irradiação solar. A potência de arrefecimento teórica atingiu 53,2W/m<sup>2</sup> durante o dia e 96 W/m<sup>2</sup> à noite.

Além do desempenho térmico, o revestimento destacou-se pela sua durabilidade, apresentando resistência a altas temperaturas, ao envelhecimento provocado por radiação ultravioleta, propriedades de autolimpeza e baixa emissão de compostos voláteis orgânicos, o que sugere um elevado potencial de aplicação em larga escala.

Na Tabela 3.1, apresenta-se uma síntese das publicações analisadas sobre a formulação e testes de tintas seletivas, incluindo os materiais utilizados, os índices de reflexão solar e emissividade, bem como os principais resultados observados.

Tabela 3.1 - Síntese das publicações analisadas sobre a formulação e testes de tintas seletivas: materiais utilizados, índices de reflexão solar, emissividade na janela atmosférica e principais resultados observados

Autores	Material	Reflexão Solar (%)	Emissividade (%) e intervalo de comprimento de onda ( $\mu m$ )	Resultados relatados	Observações
Harrison and Walton (1978)	Dióxido de Titânio aplicado em folha de alumínio	-	-	Arrefecimento subambiente noturno em 15°C	- Primeiro estudo do desenvolvimento de tintas para arrefecimento radiativo
Xu <i>et al.</i> (2018)	Cristais de $Mg_{11}(HPO_3)_8(OH)_6$	88	87 (8-14 $\mu m$ )	Temperatura no interior da célula de teste: - 6 a 8°C abaixo da célula coberta com papel alumínio; - 2 a 4°C abaixo das células com as tintas de $TiO_2$ e $CaCO_3$ .	- Solução Bicamada
Li <i>et al.</i> (2020)	Carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) em tinta acrílica	95	94 (8-13 $\mu m$ )	Temperatura da amostra: - 10°C subambiente noturna; - 1,7°C subambiente sob radiação solar direta.	- Baixo custo
Nie <i>et al.</i> (2020)	Microesferas de vidro	92	85 (2,5-16 $\mu m$ )	Temperatura da amostra: - 9,6°C subambiente sob radiação solar direta, com película	- Baixo custo
Xue <i>et al.</i> (2020)	Pó de rutilo de dióxido de titânio, emulsão polimérica, microesferas de vidro e partículas fluorescentes	90	96 (8-13 $\mu m$ )	Temperatura da amostra: - 6°C subambiente sob radiação solar direta.	- Baixo custo - Baixo impacto ambiental - Solução Bicamada - Apresenta fluorescência
X. Li <i>et al.</i> (2021)	Sulfato de bário ( $BaSO_4$ )	98	95 (8-13 $\mu m$ )	Temperatura da amostra: - 6,8 °C subambiente sob radiação solar direta.	
Chae <i>et al.</i> (2021)	Micropartículas de $Al_2O_3$ e $SiO_2$ e dois tipos de ligante (DPHA e acrilato)	94	93,5 (8-13 $\mu m$ )	Temperaturas da amostra e no interior da pequena casa subambiente.	

Tabela 3.1 - Síntese das publicações analisadas sobre a formulação e testes de tintas seletivas: materiais utilizados, índices de reflexão solar, emissividade na janela atmosférica e principais resultados observados (continuação)

Autores	Material	Reflexão Solar (%)	Emissividade (%) e intervalo de comprimento de onda ( $\mu m$ )	Resultados relatados	Observações
Huang <i>et al.</i> (2021)	Polímero com bolas moídas de polifluoreto de vinilideno moídas	94	97 (8-13 $\mu m$ )	Temperatura da amostra: - 3,3°C abaixo da amostra com tinta branca comercial; - 1,7°C subambiente sob um alto fluxo de radiação solar.	- Baixa emissão de VOC's; - Insolubilidade na água; - Resistência ao envelhecimento.
Lim <i>et al.</i> (2022)	CaCO <sub>3</sub> com polímero DPHA	89	92 (8-13 $\mu m$ )	Temperatura da amostra: - 6,52°C subambiente diurna - 3,38°C subambiente noturna	- Baixo custo
Zhao <i>et al.</i> (2022)	Processo aquoso com microesferas ocas de vidro	93	93 (8-14 $\mu m$ )	A amostra não atingiu o arrefecimento subambiente	- Espessura - 500 $\mu m$ ; - Baixo custo; - Zero emissão de VOC's; - Repelência à água; - Excelente flexibilidade.
Yu <i>et al.</i> (2022)	Bolas de vidro inteiras	93,3	93,4 (8-13 $\mu m$ )	Temperatura da amostra: - 1,8°C subambiente diurna, sem película - 6,5°C subambiente noturna, sem película	- Aumento de 4% de reflexão apenas com a moagem das bolas de vidro.
	Bolas de vidro partidas	97,3	93,4 (8-13 $\mu m$ )	Temperatura da amostra: - 3,5°C subambiente diurna, sem película - 6,5°C subambiente noturna, sem película - 8,5°C subambiente diurna, com película - 14,1°C subambiente noturna, com película	- Possibilidade de aplicação com diversas espessuras sem comprometer a reflexão.
He <i>et al.</i> (2022)	Zircônia e aerogel de sílica com resina de fluorocarbono	95,7	99,1 (3-25 $\mu m$ )	Temperatura na superfície traseira do substrato: - 6°C subambiente diurna, com película - 4,5°C subambiente diurna, sem película	- Resistência ao envelhecimento ultra violeta - Propriedades de autolimpeza - Durabilidade; - Baixa emissão de VOC's - Espessura - 300 $\mu m$

Tabela 3.1 - Síntese das publicações analisadas sobre a formulação e testes de tintas seletivas: materiais utilizados, índices de reflexão solar, emissividade na janela atmosférica e principais resultados observados (continuação)

Autores	Material	Reflexão Solar (%)	Emissividade (%) e intervalo de comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resultados relatados	Observações
Felicelli <i>et al.</i> (2022)	Nitreto de boro hexagonal ( <i>hBN</i> )	97,9	83 (8-13 $\mu\text{m}$ )	Temperatura da amostra: - Média de 5 a 6°C subambiente diurna - 1 a 2°C subambiente sob um alto fluxo de radiação solar	- Espessura equivalente a tintas comerciais - 150 $\mu\text{m}$
H. Zhang <i>et al.</i> (2022)	-	89	96 (8-13 $\mu\text{m}$ )	Temperatura da amostra: - 2,6°C subambiente diurna	- Cor cinzenta - Bicamada
Zhai, Fan and Li (2022)	Pigmentos de duas fases cristalinas (fases alfa e beta) do composto $\text{Bi}_2\text{O}_2$	99 (para a fase alfa)	97 (8-13 $\mu\text{m}$ ) (para a fase alfa)	Temperatura da amostra: - 2,31°C subambiente sob radiação solar direta	- Revestimento colorido - Baixo custo
Wang <i>et al.</i> (2022)	Microcápsulas termocrômicas reversíveis	96 (acima de 25°C)	94 (8-13 $\mu\text{m}$ ) (acima de 25°C)	Temperatura da amostra: - 7,1°C subambiente diurna - 7,8°C subambiente noturna	- Cor auto adaptativa - Solução bicamada
Lin <i>et al.</i> (2022)	Dióxido de titânio e óxido de alumínio	92	95 (2,5-25 $\mu\text{m}$ )	Temperatura da amostra: - 1,5°C subambiente diurna - 4,5°C subambiente noturna	- Solução bicamada
Luo <i>et al.</i> (2023)	Óxido ítrico ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ )	94,52	93,4 (8-13 $\mu\text{m}$ )	Temperatura da amostra: - 7,4°C subambiente sob radiação solar direta	- Hidrofobicidade - Resistência às intempéries - Boa adaptabilidade ao substrato - Flexibilidade mecânica
Gong <i>et al.</i> (2023)	Tinta aquosa com esferas de vidro	94	92 (3-25 $\mu\text{m}$ )	Temperatura da amostra: - 6°C subambiente em condições de alta umidade e baixa incidência solar - entre 2 a 5°C subambiente sob radiação solar direta	- Baixo custo - Zero emissão de VOC's

Tabela 3.1 - Síntese das publicações analisadas sobre a formulação e testes de tintas seletivas: materiais utilizados, índices de reflexão solar, emissividade na janela atmosférica e principais resultados observados (continuação)

Autores	Material	Reflexão Solar (%)	Emissividade (%) e intervalo de comprimento de onda ( $\mu m$ )	Resultados relatados	Observações
<b>Xia <i>et al.</i> (2023)</b>	Tinta com caulim e poli-acrilato, à base de água	86,6	96,8 (8-13 $\mu m$ )	Temperatura da amostra: - 13,2°C subambiente sob radiação solar direta, com película - 3,1°C subambiente sob radiação solar direta, sem película	- Forte adesão ao substrato - Resistência à água - Resistência ao envelhecimento
<b>Jiang, Fan and Wang (2023)</b>	-	90,6	98,1 (8-13 $\mu m$ )	Temperatura da amostra: - Em média 4,63°C subambiente sob radiação solar direta	Propriedades de autolimpeza, mantendo desempenho após limpeza simulada com água

## APLICAÇÃO DE TINTAS SELETIVAS EM EDIFÍCIOS

O principal objetivo do desenvolvimento de tintas seletivas é a sua aplicação prática, especialmente em edifícios. Este capítulo apresenta os principais estudos relacionados com a aplicação de tintas seletivas em edifícios, abordando o seu impacto e aplicabilidade através de três abordagens: modelação energética, estudos experimentais e modelação energética validada com dados experimentais. As publicações selecionadas abrangem diferentes condições climáticas, tipologias de utilização de edifícios e métodos construtivos.

### 4.1. Introdução

Apesar do crescente interesse nesta área, a literatura ainda revela uma lacuna significativa no estudo da aplicação de tintas seletivas em edifícios. Essa lacuna pode ser atribuída a dois fatores principais: (i) o desenvolvimento de tintas com capacidade de arrefecimento radiativo diurno enfrenta desafios significativos, como discutido no capítulo 3. Trata-se de uma tecnologia ainda em fase inicial, o que dificulta sua adaptação para produções em larga escala e a implementação prática (Bu *et al.*, 2022). (ii) As principais ferramentas de simulação energética, como *ESP-r*, *DOE-2*, *EnergyPlus* e *DeST*, apresentam limitações consideráveis na previsão do impacto das tintas seletivas, comprometendo a fiabilidade dos resultados (Yu and Chen, 2021; Bu *et al.*, 2022). Essas limitações estão principalmente relacionadas à incapacidade de considerar a emissividade seletiva dos materiais e o comportamento seletivo da atmosfera no espectro infravermelho (Chen, Lu, Gong, Wang, *et al.*, 2021; De Masi *et al.*, 2023). Para contornar essas limitações e melhorar a precisão das simulações, alguns pesquisadores têm utilizado softwares interligados aos programas de modelação energética, como MATLAB ou Python. No entanto, essa interligação aumenta significativamente a complexidade das simulações (Bu *et al.*, 2022).

Em termos de aplicação, as tintas de arrefecimento radiativo têm sido amplamente estudadas para as envolturas opacas dos edifícios, sendo frequentemente associadas aos conceitos de “cool roofs” (coberturas frias) e “cool façades” (fachadas frias). Embora teoricamente toda a superfície exterior de um edifício possa ser revestida com soluções de arrefecimento radiativo (como tintas, películas, membranas ou revestimentos rígidos), fatores como custo, estética e durabilidade limitam a viabilidade económica de cobrir todas as superfícies opacas. Além disso, em áreas urbanas densas, o fator de forma das paredes em relação ao céu é reduzido, o que torna as coberturas as superfícies mais práticas para aplicação desses revestimentos (Wijesuriya *et al.*, 2022). De modo geral, os estudos subsequentes têm-se concentrado principalmente no impacto da aplicação de tintas seletivas nas coberturas dos edifícios.

## 4.2. Estudos numéricos

Baniassadi, Sailor and Ban-Weiss (2019) realizaram um estudo sobre os benefícios das coberturas seletivas em três tipos de edifícios, em oito cidades dos Estados Unidos. Utilizando o software EnergyPlus (EnergyPlus), analisaram cidades com diferentes características climáticas, todas em regiões com políticas públicas que incentivam o uso de "coberturas frias". As cidades e suas zonas climáticas estão listadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Cidades e respectiva zona climática abordadas no estudo de Baniassadi, Sailor and Ban-Weiss (2019)

Cidade	Zona Climática de acordo com a ASHRAE
Albuquerque	4B (Misto - Seco)
Atlanta	3A (Ameno - Húmido)
Chicago	5A (Fresco - Húmido)
Houston	2A (quente- Húmido)
Los Angeles	3B (Ameno - Seco)
Miami	1A (Muito Quente - Húmido)
Philadelphia	4A (Misto - Húmido)
Phoenix	2B (Quente - Seco)

Foram analisados três tipos de edifícios: residencial unifamiliar, multifamiliar e comercial. A representação destes edifícios encontra-se na Figura 4.1.

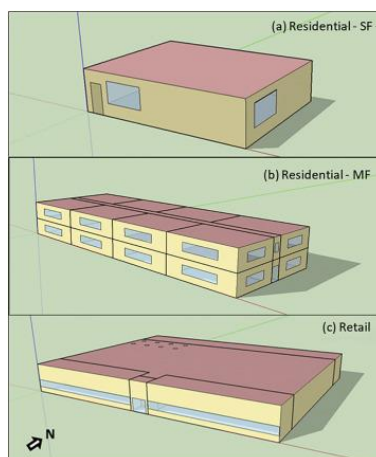


Figura 4.1 - Representação dos edifícios considerados pelos autores: Residencial unifamiliar (SF); Residencial multifamiliar (MF); Comércio (*Retail*). (Baniassadi, Sailor and Ban-Weiss, 2019)

O edifício unifamiliar foi modelado segundo os protocolos do *Building America House Simulation Protocols* e o *International Energy Conservation Code* (2003). Todos os edifícios, exceto em Phoenix e Miami, utilizam sistemas de ar condicionado para arrefecimento e aquecimento a gás natural. O edifício multifamiliar foi modelado com o protótipo *multifamily mid-rise* desenvolvido pelo *Building Technology Office of United States Department of Energy*. A análise

focou-se nas unidades do último andar, que são as mais influenciadas pelo comportamento da cobertura. Para o edifício comercial, foi utilizado o protótipo *stand-alone retail*, desenvolvido pelo *Building Technology Office of the United States Department of Energy*, conforme o padrão ASHRAE 90.1-2004. Os dados climáticos foram baseados no modelo *Typical Meteorological Year 3 (TMY3)*.

As Figura 4.2, 4.3 e 4.4 ilustram os resultados do estudo:

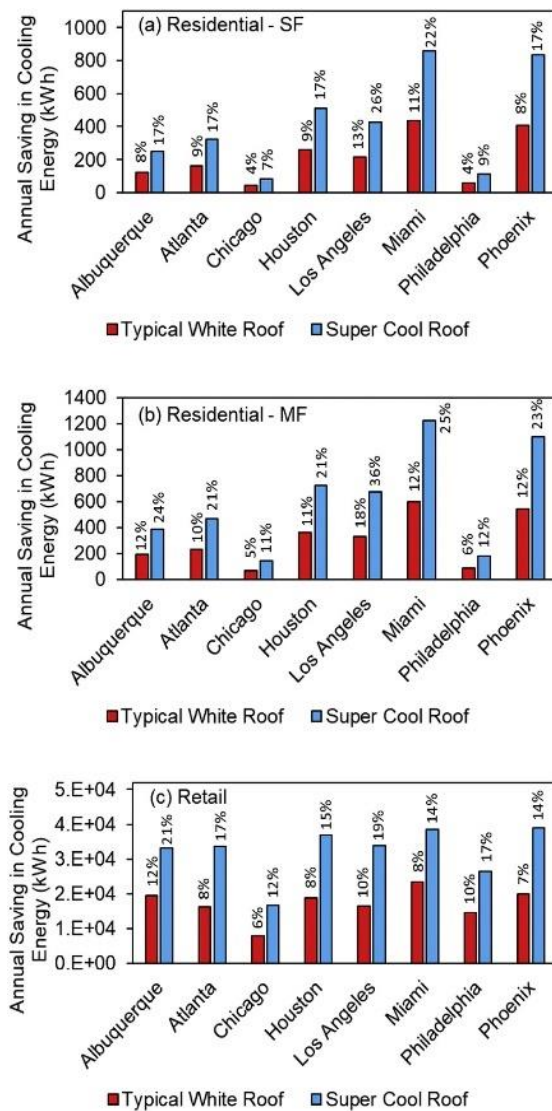


Figura 4.2 - Benefícios energéticos de arrefecimento para (a) edifício residencial unifamiliar, (b) edifício residencial multifamiliar e (c) comércio. (Baniassadi, Sailor and Ban-Weiss, 2019)

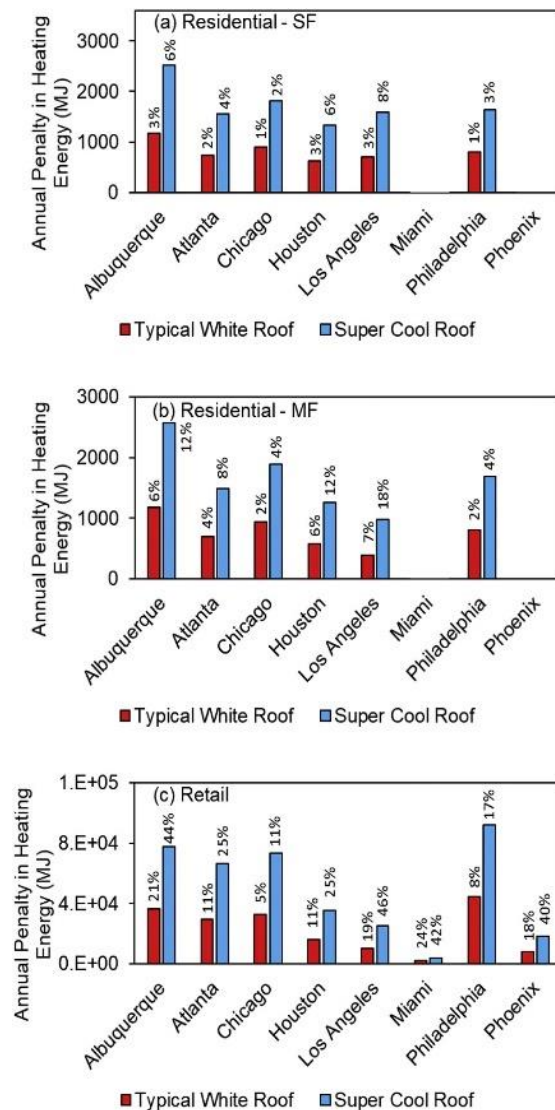


Figura 4.3 - Penalização energética de aquecimento para (a) edifício residencial unifamiliar, (b) edifício residencial multifamiliar e (c) comércio. (Baniassadi, Sailor and Ban-Weiss, 2019)

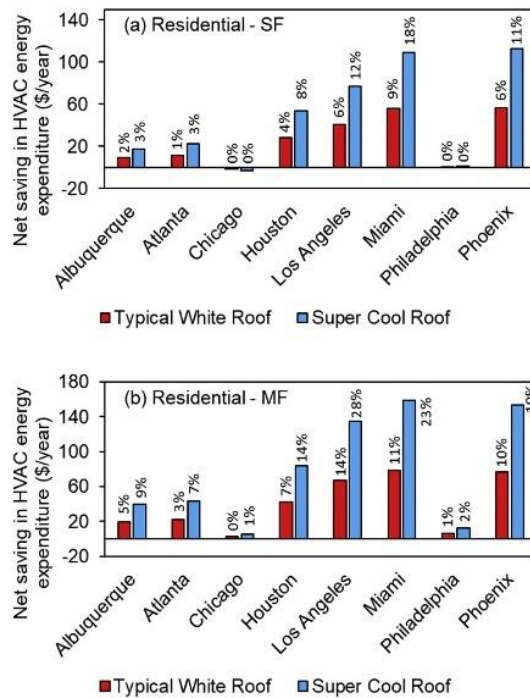


Figura 4.4 - Poupança líquida no consumo energético de HVAC para (a) edifício residencial unifamiliar, (b) edifício residencial multifamiliar e (c) comércio. Adaptado de (Baniassadi, Sailor and Ban-Weiss, 2019)

Os resultados mostraram que, em todos os climas analisados, a temperatura superficial da cobertura seletiva manteve-se abaixo da temperatura ambiente ao longo do ano, resultando em um fluxo de calor médio diário negativo de 30 a 40 W/m<sup>2</sup>. As coberturas seletivas duplicaram a economia de energia associada ao arrefecimento, compensando as penalidades energéticas no aquecimento, quando comparadas com coberturas brancas convencionais. A utilização de materiais seletivos reduziu o consumo de energia entre 4% e 19% em edifícios comerciais e até 28% em edifícios residenciais e apresentou maior impacto em regiões com verões quentes, invernos moderados e elevados custos de eletricidade (Baniassadi, Sailor and Ban-Weiss, 2019).

Um outro estudo, desenvolvido por Nie et al. (2020), estimou numericamente a influência de um revestimento seletivo criado pelos próprios autores, composto por microesferas de vidro, que apresentou uma reflexão solar de 92% e uma emissividade de 85% no infravermelho médio (conforme descrito no capítulo 3), no consumo energético de sete tipologias de edifícios em Los Angeles. O estudo utilizou o software EnergyPlus, juntamente com os bancos de dados de edifícios de referência comercial do Departamento de Energia dos EUA (DOE) e protótipos do padrão ASHRAE 90.1. Foram analisados edifícios residenciais de médio e grande porte, bem como hotéis (grande e pequeno) e escritórios (grande e pequeno). A escolha da cidade de Los Angeles deveu-se ao seu clima quente e à sua elevada densidade populacional. Os dados climáticos foram baseados no modelo *Typical Meteorological Year 3* (TMY3). O impacto do revestimento seletivo foi avaliado comparando o consumo energético dos modelos base com os dos mesmos edifícios após a aplicação de uma camada de revestimento seletivo de 2 mm nas superfícies exteriores das coberturas e das paredes exteriores.

Os resultados indicaram uma economia anual de energia para arrefecimento entre 1,52 MJ/m<sup>2</sup> e 11,85 MJ/m<sup>2</sup> (equivalentes a 0,42 kWh/m<sup>2</sup> a 3,29 kWh/m<sup>2</sup>). Os edifícios com maior proporção de área superficial exterior em relação ao seu volume apresentaram melhores resultados

em termos de economia energética. Entre as tipologias analisadas, os edifícios comerciais e residenciais pequenos, foram os mais beneficiados pela aplicação do revestimento (Nie *et al.*, 2020).

Com o objetivo de ultrapassar as limitações do software *EnergyPlus* em estimar o comportamento dos materiais seletivos, Yu and Chen (2021) criaram um código em linguagem *Python* (*Phyton*) que, ao ser acoplado ao *EnergyPlus*, permite considerar a influência das condições atmosféricas no desempenho de revestimentos radiativos. Em comparação com o modelo de emissividade constante existente no *EnergyPlus*, o modelo proposto considera a influência da emissividade dependente do espectro, temperatura da superfície do material, água de precipitação e nebulosidade na potência de arrefecimento radiativo no *EnergyPlus*. O edifício simulado foi um edifício comercial de um único piso, conforme ilustrado na Figura 4.5, e a resistência térmica da cobertura foi ajustada de acordo com a localização do estudo: 4,38 m<sup>2</sup>K/W (Tampa, Flórida, EUA; El Paso, Texas, EUA; Shenzhen, sudeste da China); 5,37 m<sup>2</sup>K/W (Nova Iorque, EUA; Denver, EUA; Rochester, EUA). O modelo foi validado com os dados obtidos experimentalmente por D. Zhao et al. (2019).

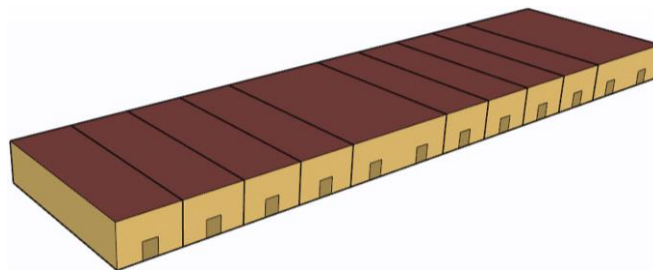


Figura 4.5 - Modelo 3D do edifício simulado pelos autores. (Yu and Chen, 2021)

Os autores simularam o comportamento de dois materiais: um com perfil de emissividade de banda larga e outro com perfil de emissividade seletivo, utilizando tanto o modelo de emissividade constante quanto o modelo dependente espectral proposto. Os resultados indicaram que o modelo de emissividade constante existente no *EnergyPlus* superestimou a potência de arrefecimento radiativo em 30,7% para um material com perfil de emissividade de banda larga, e em 7,3% para um material com perfil de emissividade seletivo, quando comparados com o modelo dependente espectral proposto pelos autores.

Na publicação, são apresentadas três razões possíveis para as divergências observadas: (i) a utilização da emissividade dependente espectral permite uma estimativa mais precisa da potência de arrefecimento radiativo do que a utilização de uma emissividade constante; (ii) o modelo proposto considerar a influência da água precipitável na emissividade espectral da atmosfera, enquanto o modelo pré-existente (*EnergyPlus* original) não o faz; (iii) o modelo acoplado calcula as temperaturas corretas da superfície do material por iteração entre o modelo de arrefecimento radiativo (código em linguagem *Python*) e o *EnergyPlus*, enquanto o modelo pré-existente assume uma temperatura fixa ao calcular a emissividade constante.

Para o estudo efetuado em diversas cidades, Yu and Chen (2021) concluíram que:

– Comparado com a cobertura original do centro comercial, o uso da cobertura com o material de arrefecimento radiativo de banda larga reduziria o consumo anual de eletricidade de arrefecimento em 17,5% em Rochester (clima frio e húmido), 16,3% em Denver (clima frio e seco), 11,9% em Nova Iorque (clima misto e húmido), 11,9% em El Paso (clima quente e seco) e 6,3% em Tampa (clima quente e húmido).

– Comparado com a cobertura original do centro comercial, o uso da cobertura de arrefecimento radiativo de banda larga aumentaria o consumo anual de gás natural para aquecimento em 4,3% em Rochester (clima frio e húmido), 13,9% em Denver (clima frio e seco) e 7,9% em Nova York (clima misto e húmido), onde o aquecimento é necessário no inverno.

– Comparado com a cobertura original do centro comercial, o uso da cobertura de arrefecimento radiativo de banda larga aumentaria o consumo total anual de energia primária para aquecimento e arrefecimento em 0,4% em Rochester, 1,8% em Denver (clima frio e seco), enquanto o reduziria em 0,2% em Nova York (clima misto e húmido), 5,8% em El Paso (clima quente e seco) e 5,4% em Tampa (clima quente e húmido).

Nota: O material de banda larga simulado foi produzido por Mandal *et al.* (2018) e apresenta uma emissividade na janela atmosférica de 97% e uma reflexão solar de 96%. O material seletivo simulado foi produzido por D. Li *et al.* (2021) e apresenta uma emissividade na janela atmosférica de 78% e uma reflexão solar de 96.3%.

Dando seguimento ao estudo de Yu and Chen (2021), Yu et al. (2022) desenvolveram uma tinta de arrefecimento radiativo com bolas de vidro moídas, alcançando uma reflexão solar de 97,3% e uma emissividade de 93,4% (conforme descrito no capítulo 3). Os autores avaliaram o impacto desta tinta no consumo energético de um edifício tipo centro comercial, utilizando o modelo proposto por Yu and Chen (2021). O estudo realizado em Shenzhen, China, com clima subtropical húmido, demonstrou que, ao revestir a cobertura original com a tinta desenvolvida, o consumo anual de eletricidade para arrefecimento no centro comercial poderia ser reduzido em 5,3%, conforme ilustrado na Figura 4.6:

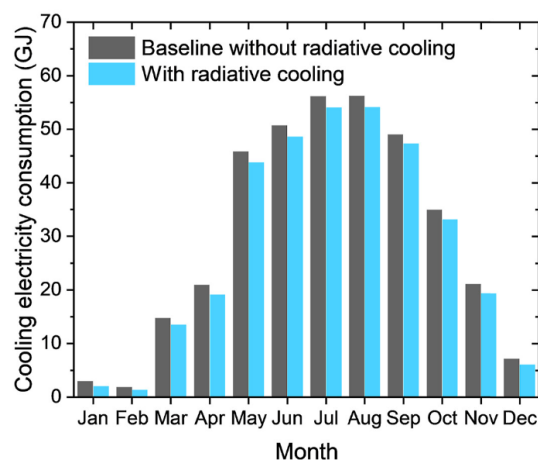


Figura 4.6 - Consumo de eletricidade para arrefecimento ambiente com (a azul) e sem (a cinzento) tinta de arrefecimento radiativo para o centro comercial em Shenzhen. (Yu *et al.*, 2022)

Com recurso a outro software, Bu *et al.* (2022) analisaram o comportamento térmico de um edifício comercial, de um piso, revestido com material seletivo na cobertura, simulando o desempenho em seis cidades com diferentes características climáticas. O modelo de simulação foi desenvolvido através da integração de um módulo de radiação espectral de comprimento de onda longa no software de simulação energética *DeST* (Yan *et al.*, 2008), validado experimentalmente.

As localizações selecionadas e as características das envolventes do edifício encontram-se descritas na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Zonas climáticas simuladas e coeficientes de transmissão térmica das envolventes do edifício. Adaptado de (Bu *et al.*, 2022).

Cidade	Zona Climática de acordo com a ASHRAE 169	Coeficiente de Transmissão Térmica [ $(W/m^2K)$ ]		
		Fachada	Cobertura	Envidraçado
Haikou (China)	1A - Muito quente e húmido	0.792	0.800	3.500
Cairo (Egipto)	2B - Quente e seco	0.849	0.359	3.690
Tucson (EUA)	2B - Quente e seco	0.849	0.359	3.690
Madrid (Espanha)	3A - Ameno e húmido	0.708	0.359	3.410
São Francisco (EUA)	3B - Ameno e seco	0.708	0.359	3.410
Kunming (China)	3C - Ameno e humidade média	0.792	0.800	3.500

Os coeficientes de transmissão térmica para as cidades de Haikou e Kunming foram definidos com base nas normas locais de projeto para edifícios públicos das respetivas regiões. Para as restantes cidades, foram adotados os valores normativos definidos pela ASHRAE 90.1.

A Figura 4.7 apresenta o modelo tridimensional do edifício comercial utilizado para o estudo de caso, incluindo a visualização externa e a representação no software *DeST*.

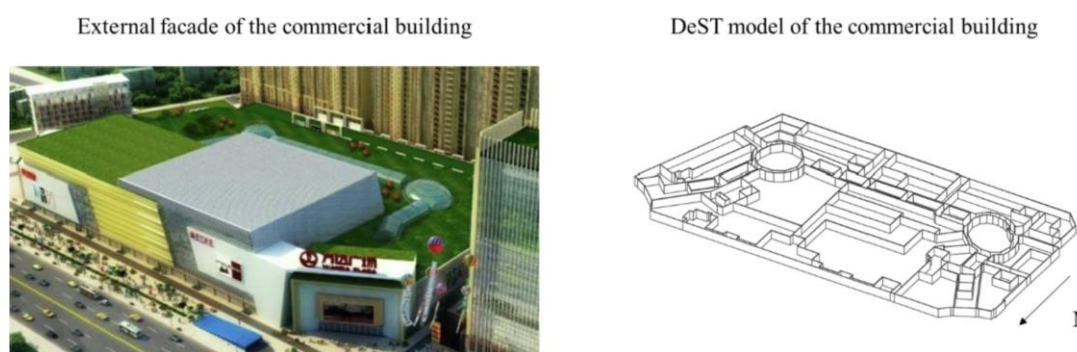


Figura 4.7 - Modelo do edifício comercial adotado para o estudo de caso. (Bu *et al.*, 2022).

Os resultados, apresentados na Figura 4.8, demonstram as cargas de arrefecimento anuais para cada cidade analisada, permitindo avaliar o desempenho do material seletivo aplicado na cobertura em distintas condições climáticas.

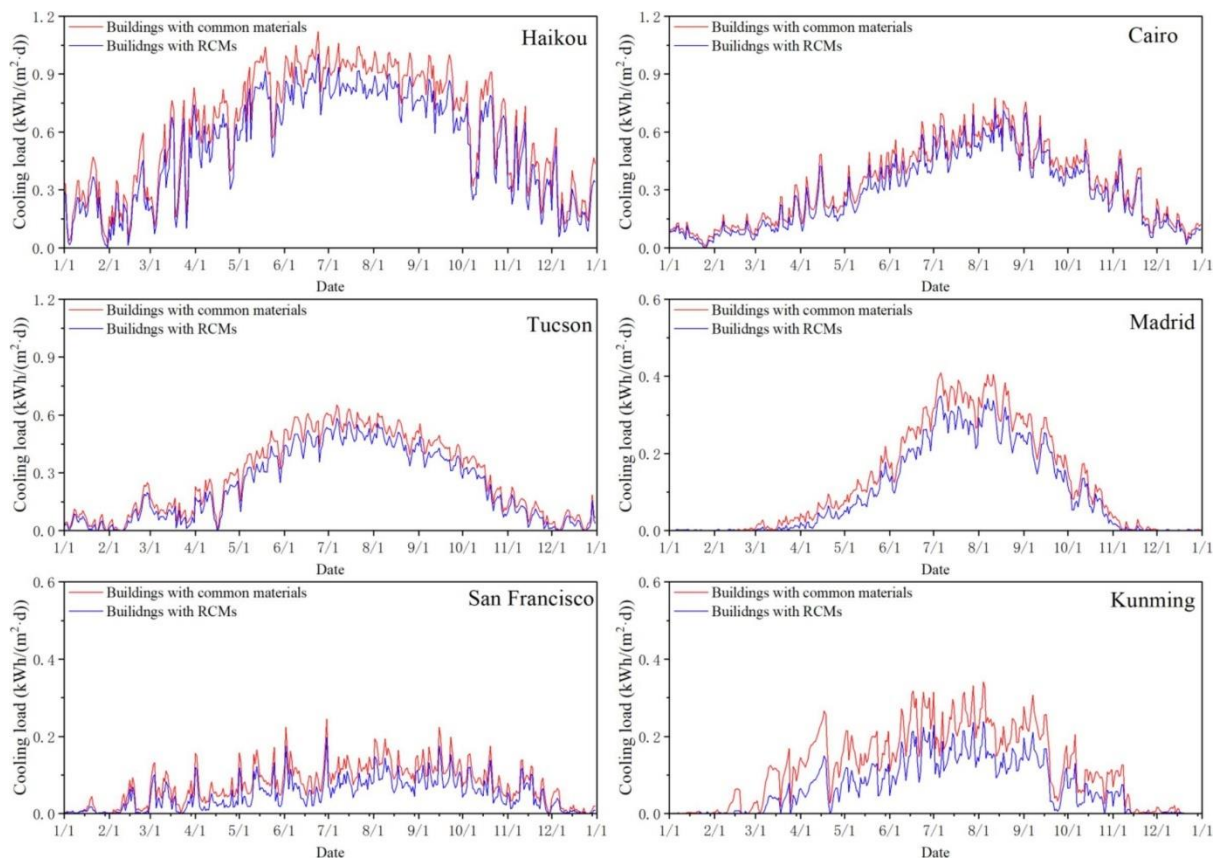


Figura 4.8 - Cargas de arrefecimento anuais por dia dos dois tipos de superfícies nas diferentes zonas climáticas. (Bu *et al.*, 2022)

Da análise da Figura 4.8 verifica-se que (Bu *et al.*, 2022):

- Na cidade de Haikou (China), caracterizada por apresentar um clima quente durante todo o ano, a solução seletiva demonstrou ser promissora, exibindo bom desempenho ao longo de todas as estações;

- Nas cidades de Cairo (Egito) e Tucson (EUA), o revestimento seletivo apresentou um desempenho eficiente durante a maior parte do ano. No entanto, nos meses de janeiro e dezembro, os benefícios foram menos evidentes, devido às baixas necessidades de arrefecimento nestes períodos;

- Em São Francisco (EUA) e Kunming (China), o impacto da utilização de materiais de arrefecimento radiativo foi menos significativo, devido às condições climáticas moderadas, que não exigem elevados níveis de arrefecimento;

- Em Madrid (Espanha), embora a cidade não exija arrefecimento durante o inverno, o potencial do material seletivo revelou-se elevado durante os meses quentes, mostrando-se eficaz na redução das cargas de arrefecimento na estação correspondente;

A taxa de poupança de energia encontra-se representada na Figura 4.9, que ilustra a carga de arrefecimento anual e as economias de energia para arrefecimento em diferentes zonas climáticas.

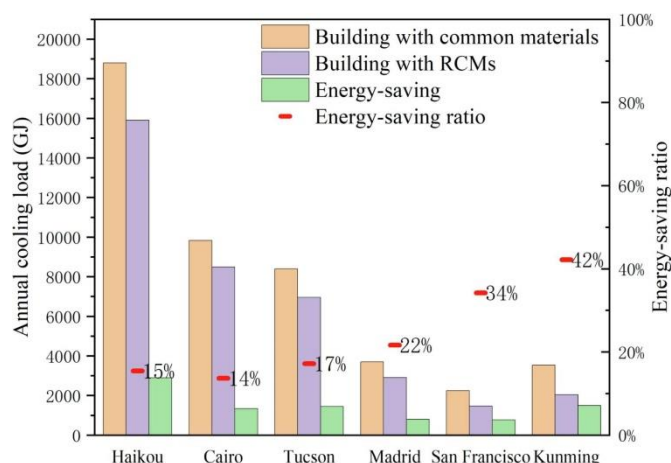


Figura 4.9 - Carga de arrefecimento anual e poupança de energia em diferentes zonas climáticas. (Bu *et al.*, 2022)

Com base na análise da Figura 4.9, podem ser retiradas as seguintes observações (Bu *et al.*, 2022):

– A taxa de poupança de energia revela-se mais elevada em cidades com climas amenos, como Kunming (China) e São Francisco (EUA). Ambas apresentaram uma poupança energética superior a 30%, devido à menor carga de arrefecimento em comparação com cidades de climas quentes;

– Haikou (China) destaca-se como a localização que apresenta maior poupança de energia para arrefecimento devido ao facto de possuir elevadas necessidades de arrefecimento durante todo o ano, o que favoreceu a utilização de materiais de arrefecimento radiativo nas coberturas;

– Nas cidades de Cairo (Egito), Tucson (EUA) e Madrid (Espanha), que apresentam verões quentes, a taxa de poupança energética variou entre 14% e 22%.

Já Peoples *et al.* (2022) desenvolveram um modelo numérico com recurso ao software *TRNSYS* (*TRNSYS*) para estimar o potencial de arrefecimento radiativo em edifícios residenciais localizados em diversas regiões dos EUA. O estudo focou-se num edifício unifamiliar térreo, comparando duas variantes: uma com isolamento térmico convencional e outra com maior uso de isolamento. A diferença entre as variantes foi determinada pelos coeficientes de transmissão térmica das superfícies opacas. No edifício convencional, os valores adotados foram  $0,305 \text{ W/m}^2\text{K}$  para a cobertura e  $0,486 \text{ W/m}^2\text{K}$  para a parede, enquanto para o edifício com maior utilização de isolamento térmico, os valores foram  $0,145 \text{ W/m}^2\text{K}$  na cobertura e  $0,229 \text{ W/m}^2\text{K}$  na parede.

Os pressupostos do modelo incluíram (Peoples *et al.*, 2022):

- 1) Fatores de forma para o céu de 0,9 para a cobertura (considerando sombreamento parcial por edifícios ou árvores circundantes) e 0,4 para as paredes, com base na relação altura/largura das fachadas;
- 2) Representação da tinta de arrefecimento radiativo no modelo *TRNSYS* como um fluxo de calor externo nas superfícies exteriores do edifício;
- 3) Consideração da transmitância atmosférica como constante na faixa de temperatura entre  $-100^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$ , centrando-se na janela atmosférica de  $8\text{-}13 \mu\text{m}$ ;
- 4) Definição do set-point do ar-condicionado em  $23^\circ\text{C}$ .

A tinta de arrefecimento radiativo simulada por Peoples et al. (2022) foi desenvolvida por X. Li et al. (2021), utilizando sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ ), e apresentou 98,1% de reflexão solar e emissividade superior a 95% na janela atmosférica (conforme descrito no capítulo 3).

Os resultados mostraram que o arrefecimento radiativo pode reduzir o consumo de energia elétrica para arrefecimento em mais de 7% em edifícios termicamente bem isolados e em mais de 12% em edifícios convencionais. Em climas quentes, os benefícios foram mais expressivos, com economias de até 22% em edifícios bem isolados termicamente e de 46% em edifícios convencionais (Peoples *et al.*, 2022).

### 4.3. Estudos experimentais

Michell and Biggs (1979) realizaram um dos primeiros estudos experimentais sobre o arrefecimento radiativo passivo em edifícios, monitorizando o desempenho térmico de duas pequenas construções no período noturno. Uma delas tinha cobertura de aço galvanizado pintada de branco, enquanto a outra tinha uma cobertura de alumínio revestida com filme 'Tedlar' aluminizado, atuando como superfície seletiva que absorve e irradia principalmente na faixa de 8 – 13  $\mu\text{m}$ . Os resultados mostraram que a cobertura pintada de branco proporcionou um arrefecimento ligeiramente superior ao da superfície seletiva, atingindo cerca de 5 °C abaixo da temperatura ambiente e uma potência útil de arrefecimento de aproximadamente 22  $\text{W}/\text{m}^2$  (com a superfície a 5 °C e o ar a 10 °C). Estes valores correspondem a uma potência de arrefecimento "bruta" estimada em mais de 29  $\text{W}/\text{m}^2$ , com cálculos teóricos a indicarem um limite máximo em torno de 40  $\text{W}/\text{m}^2$  sob condições ideais de céu limpo.

Com base nesses avanços iniciais, estudos recentes focaram-se em estender o arrefecimento radiativo a condições diurnas. Xue et al. (2020) desenvolveram um revestimento inovador com fluorescência, apresentando uma reflexão solar de 90% e uma emissividade de 96% na janela atmosférica (conforme descrito no capítulo 3), o qual foi aplicado num protótipo de um edifício localizado na cidade de Pequim na China. Em testes experimentais, realizados sob radiação solar direta durante o mês de agosto, o revestimento aplicado sobre uma placa de alumínio registou uma temperatura 6 °C inferior à temperatura ambiente, com uma irradiância solar de 744  $\text{W}/\text{m}^2$ . Quando aplicado no protótipo de edifício à escala real, a temperatura superficial da cobertura ficou cerca de 7 °C abaixo da ambiente, com irradiância de 850  $\text{W}/\text{m}^2$ .

Dando um passo adiante, Lin et al. (2022) propuseram uma solução flexível e escalável para arrefecimento radiativo diurno, validando a sua eficácia em clima húmido. Os autores compararam o comportamento de duas casas-modelo: uma revestida com uma tinta branca comercial (utilizada como referência) e a outra com a solução bicamada proposta, que apresenta reflexão solar de 92% e emissividade na faixa do infravermelho médio (2500nm - 25 $\mu\text{m}$ ) de 95%, conforme descrito no capítulo 3. Em comparação com a tinta branca comercial, a solução proposta resultou numa redução de 10,2°C da temperatura superficial da parede exterior de 5,6°C da temperatura do ar interior da casa-modelo. Adicionalmente, ao aplicar o revestimento bicamada em grande escala numa cobertura de edifício real, obteve-se uma redução da temperatura superficial de até 30 °C, em comparação com uma cobertura convencional, nas mesmas condições de exposição solar.

Por fim, estudos muito recentes têm avaliado o impacto direto do arrefecimento radiativo em células e edifícios completos, quantificando os benefícios térmicos e energéticos sazonais. Zhang et al. (2023) aplicaram um revestimento autolimpante em diversos tipos de edifícios,

incluindo protótipos de betão armado, um edifício real de alvenaria de tijolo, casas de contentores pré-fabricados e casas modulares. Os testes de campo foram efetuados em diversas províncias da China. O revestimento aplicado apresentou reflexão de 98%, emissividade global de 95% e emissividade na janela atmosférica de 99%.

Nos protótipos de edifícios de betão armado, a aplicação do revestimento resultou em temperaturas superficiais exteriores da cobertura e da parede oeste inferiores à temperatura ambiente em 11,1°C e 4,8°C, respetivamente, proporcionando uma poupança líquida de energia de 48%. No caso das casas de contentores pré-fabricados, a redução da temperatura superficial da cobertura foi de até 10,6°C abaixo da temperatura ambiente. Comparando as temperaturas máximas superficiais entre o contentor com o revestimento e o contentor de referência, verificou-se uma diferença de 33°C na cobertura. No interior do contentor revestido, as temperaturas foram inferiores às do ambiente exterior, e a eficiência energética líquida foi de 38,8%.

Quando aplicado em casas modulares pré-fabricadas, a temperatura da cobertura registou valores inferiores à ambiente de pelo menos 2,6°C. A casa pintada com o revestimento seletivo apresentou temperaturas superficiais exteriores e ambientes interiores mais baixas em comparação com a casa revestida com tinta refletante, resultando numa poupança líquida de energia de 27%. Os autores concluíram, ainda, que a aplicação de revestimentos seletivos penaliza o desempenho dos edifícios na estação de aquecimento e que a utilização de isolamento térmico na envolvente opaca dos protótipos reduz a eficácia do revestimento de arrefecimento radiativo.

Na Tabela 4.3 são apresentados os principais estudos sobre a aplicação de tintas seletivas em edifícios, com destaque para os métodos utilizados, o tipo de edificação e as intervenções realizadas. Além disso, são incluídas as localizações dos estudos e os principais resultados reportados, permitindo uma visão geral das abordagens e dos impactos observados.

Tabela 4.3 - Síntese dos estudos sobre a aplicação de tintas seletivas em edifícios: métodos utilizados, tipo de edificação e intervenções realizadas, localização e principais resultados reportados

Autores	Método	Tipo de Edifício e envolvente intervencionada	Localização	Resultados relatados
<b>Michell and Biggs (1979)</b>	Experimental	Pequeno edifício Cobertura		A cobertura pintada de branco apresentou melhores resultados que a solução de arrefecimento radiativo.
<b>Baniassadi, Sailor and Ban-Weiss, (2019)</b>	Estudo numérico com o software <i>Ener-gyPlus</i>	Edifícios residenciais e de comércio Cobertura	Diversas cidades dos EUA	<p>A temperatura superficial da cobertura seletiva manteve-se abaixo da temperatura ambiente ao longo do ano, resultando em um fluxo de calor médio diário negativo de 30 a 40 <math>W/m^2</math>.</p> <p>Redução do consumo energético entre 4–19% em edifícios comerciais e até 28% em edifícios residenciais, proporcionando o dobro da economia de custos em comparação com as coberturas brancas.</p> <p>Maior impacto em regiões com verões quentes, invernos moderados e elevados custos de eletricidade.</p>
<b>Nie et al. (2020)</b>	Estudo numérico com o software <i>Ener-gyPlus</i>	Edifícios residenciais e de serviços Cobertura e paredes exteriores	Los Angeles	<p>Redução anual de energia para arrefecimento ambiente entre 1,52MJ/m<sup>2</sup> até 11,85MJ/m<sup>2</sup> (0,42kWh/m<sup>2</sup> a 3,29 kWh/m<sup>2</sup>).</p> <p>Melhores resultados observados em edifícios com maior área superficial em relação ao volume, com destaque para edifícios comerciais e residenciais de pequena altura.</p>
<b>Xue et al. (2020)</b>	Experimental	Protótipo de um edifício Cobertura	Pequim, China	<p>Teste em placa de alumínio: O revestimento reduziu a temperatura em 6°C com irradiância de 744 <math>W/m^2</math>.</p> <p>Aplicação em protótipo real: A temperatura da cobertura foi 7°C inferior à ambiente, com irradiância de 850 <math>W/m^2</math>.</p>

Tabela 4.3 - Síntese dos estudos sobre a aplicação de tintas seletivas em edifícios: métodos utilizados, tipo de edificação e intervenções realizadas, localização e principais resultados reportados (continuação)

Autores	Método	Tipo de Edifício e envolvente intervencionada	Localização	Resultados relatados
Yu and Chen (2021)	Estudo numérico com o software <i>Ener-gyPlus</i> acoplada por um código em linguagem <i>Python</i> e validado com dados experimentais	Edifício de comércio Cobertura	Diversas cidades dos EUA	Redução do consumo de eletricidade para arrefecimento entre 16,3% e 17,5% em climas frios, entre 6,3% e 11,9% em climas quentes e mistos. Aumento do consumo de energia para aquecimento entre 4,3% e 13,9% em climas onde o aquecimento é necessário no inverno. Em termos líquidos, o consumo total de energia primária aumentou ligeiramente em climas frios (até 1,8%) e reduziu-se significativamente em climas quentes (até 5,8%).
Peoples et al. (2022)	Estudo numérico com o software <i>TRNSYS</i>	Edifício residencial Cobertura e paredes exteriores	Diversas cidades dos EUA	Redução do consumo de energia elétrica para arrefecimento em mais de 7% em edifícios termicamente bem isolados e mais de 12% em edifícios convencionais. Benefícios mais expressivos em climas quentes, com economias até 22% em edifícios bem isolados termicamente e até 46% em edifícios típicos.
Yu et al. (2022)	Estudo numérico com o software <i>Ener-gyPlus</i> acoplada por um código em linguagem <i>Python</i> e validado com dados experimentais	Edifício de comércio Cobertura	Shenzhen, China	Redução do consumo de energia para arrefecimento em 5,3%.

Tabela 4.3 - Síntese dos estudos sobre a aplicação de tintas seletivas em edifícios: métodos utilizados, tipo de edificação e intervenções realizadas, localização e principais resultados reportados (continuação)

Autores	Método	Tipo de Edifício e envolvente intervencionada	Localização	Resultados relatados
Lin et al. (2022)	Experimental	Casa protótipo Cobertura e paredes exteriores	Hong Kong	Em comparação com a tinta branca comercial, a solução proposta ajudou a reduzir a temperatura superficial interior da parede e do ar interior da casa protótipo em 10,2°C e 5,6°C, respetivamente.
		Edifício real de escritórios Cobertura		Redução da temperatura superficial da cobertura em 30°C.
Bu et al. (2022)	Estudo numérico com o software <i>DeST</i> e validado com dados experimentais	Edifício de comércio Cobertura	Diversas cidades de vários países	Redução do consumo de energia para arrefecimento entre superior a 30% em cidades com clima ameno, entre 14% e 22% em cidades com verões quentes e invernos com baixas necessidades de arrefecimento (necessidades sazonais) e de 15% para cidades com clima quente durante todo o ano. A localização com clima quente durante todo o ano, foi a que mais beneficiou da tecnologia, apresentando a maior poupança de energia para arrefecimento.

Tabela 4.3 - Síntese dos estudos sobre a aplicação de tintas seletivas em edifícios: métodos utilizados, tipo de edificação e intervenções realizadas, localização e principais resultados reportados (continuação)

Autores	Método	Tipo de Edifício e envolvente intervencionada	Localização	Resultados relatados
Zhang et al. (2023)	Experimental	Edifício protótipos de betão armado Cobertura e paredes exteriores	Diversas províncias da China	A cobertura e a parede oeste apresentaram temperaturas superficiais exteriores inferiores ao ambiente em 11,1°C e 4,8°C, respetivamente. Poupança líquida de energia de 48%.
		Casas de contentores pré-fabricadas Cobertura		Redução da temperatura da cobertura até 10,6°C abaixo da temperatura ambiente, com uma diferença máxima de 33°C entre a cobertura revestida e a de referência. No interior do contentor revestido pela solução seletiva verificaram-se temperaturas abaixo à ambiente exterior. Poupança líquida de energia de 38,8%.
		Casas modulares Cobertura		Temperatura da cobertura inferior à ambiente em pelo menos 2,6°C. O revestimento seletivo proporcionou temperaturas superficiais exteriores e interiores mais baixas em comparação com tintas refletantes. Poupança líquida de energia de 27% em relação à casa revestida de tintas refletantes.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS

### FUTUROS

Neste trabalho, apresenta-se uma revisão abrangente sobre os avanços recentes na aplicação de tintas seletivas como estratégia de arrefecimento passivo em edifícios, com análise das suas propriedades térmicas e radiativas, bem como o desempenho observado em testes de campo. Estas soluções demonstraram elevada eficácia na reflexão da radiação solar e na emissão de calor pela janela de transparência atmosférica, permitindo reduções significativas da temperatura superficial, frequentemente abaixo da temperatura ambiente, conforme evidenciado nos estudos analisados.

Destacam-se os trabalhos de Zhai, Fan and Li (2022) e He *et al.* (2022), que atingiram índices de reflexão solar e emissividade superiores a 99%. Além disso, soluções de baixo custo foram alcançadas com a incorporação de materiais como  $CaCO_3$  (Li *et al.*, 2020; Lim *et al.*, 2022) e microesferas de vidro (Nie *et al.*, 2020; Xue *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022), evidenciando o potencial e a necessidade de redução do custos de produção. Os estudos de Xue *et al.* (2020) e Zhao *et al.* (2022), em conjunto com os de Huang *et al.* (2021), He *et al.* (2022) e Gong *et al.* (2023) reforçam a importância do baixo impacto ambiental associado à formulação das tintas.

Ainda os estudos de Zhao *et al.* (2022) e He *et al.* (2022), juntamente com os de Felicelli *et al.* (2022), destacaram-se pela sua espessura de aplicação reduzida, aproximando estes revestimentos às soluções comercializadas, o que representa um avanço importante para a sua adoção em larga escala.

A durabilidade das tintas seletivas é um dos principais desafios quando expostas ao clima. Nesse aspeto, os estudos de Huang *et al.* (2021), Zhao *et al.* (2022), He *et al.* (2022), Luo *et al.* (2023), Xia *et al.* (2023) e Jiang, Fan and Wang (2023), demonstraram a eficácia de materiais que combinam propriedades de autolimpeza, repelência à água e elevada durabilidade, contribuindo para a manutenção das características funcionais a longo prazo. Adicionalmente, os estudos de H. Zhang *et al.* (2022), Zhai, Fan and Li (2022) e Wang *et al.* (2022) apontaram para a possibilidade de atribuir cor às tintas seletivas, ampliando o seu potencial de aceitação estética.

Outro progresso notável no estudo de Wang *et al.* (2022), foi a demonstração da capacidade que certos materiais possuem em proporcionar aquecimento ou arrefecimento consoante a temperatura ambiente. Esta solução inovadora permite que as superfícies forneçam arrefecimento durante as estações quentes e aquecimento durante as estações frias, mitigando as limitações destas tecnologias em climas sazonais, tornando-as mais versáteis.

A aplicação prática destas tintas mostrou-se promissora em diversos cenários, com benefícios relevantes em eficiência energética, conforto térmico e redução de ilhas de calor urbanas. Os climas quentes foram identificados como os que mais beneficiam desta tecnologia, devido à necessidade constante de arrefecimento ao longo do ano. Em climas amenos, com verões bem definidos e invernos moderados, as tintas seletivas mostraram eficácia sazonal, embora possam penalizar o consumo energético durante o inverno, aumentando o gasto total anual para climatização. Yu and Chen (2021) observaram, em termos líquidos, uma redução de até 5,8% no consumo de energia primária em climas quentes e um aumento ligeiro, de até 1,8%, em climas frios.

O estudo de Bu *et al.* (2022) registou reduções superiores a 30% no consumo de energia para arrefecimento em cidades de clima ameno, entre 14% e 22% em cidades com verões quentes e invernos moderados, e de 15% em cidades com clima quente ao longo do ano, estas últimas obtendo os maiores benefícios na quantidade de energia reduzida.

Peoples *et al.* (2022) reportaram que o arrefecimento radiativo contribui para reduzir o consumo de energia elétrica para arrefecimento em mais de 7% em edifícios termicamente bem isolados e em mais de 12% em edifícios convencionais. Em climas quentes, os benefícios foram ainda mais expressivos, com economias estimadas de até 22% em edifícios bem isolados termicamente e de até 46% em edifícios típicos. Estes resultados são corroborados por Zhang *et al.* (2023), que observaram que o isolamento térmico nas envolventes opacas reduz a eficácia das tintas radiativas. Tal fenómeno ocorre devido à elevada resistência térmica, que limita a transferência de calor entre a superfície exterior revestida e o interior do edifício, dissipando o arrefecimento gerado maioritariamente para o ambiente através de transferência convectiva (Wijesuriya *et al.*, 2022).

No que respeita às características dimensionais dos edifícios, Nie *et al.* (2020) observaram melhores resultados em edifícios com maior área superficial em relação ao volume, como edifícios comerciais e residenciais de pequena altura. A capacidade de arrefecimento das superfícies radiativas está diretamente ligada à sua área de aplicação, o que explica este comportamento.

Relativamente ao impacto nas temperaturas interiores, os estudos de Xue *et al.* (2020), Lin *et al.* (2022) e Zhang *et al.* (2023) demonstraram que as superfícies exteriores dos edifícios mantiveram-se a temperaturas abaixo da temperatura ambiente. No estudo de Xue *et al.* (2020) as temperaturas interiores atingiram níveis próximos das condições de conforto, dispensando o arrefecimento ativo. No estudo de Zhang *et al.* (2023) verificaram-se temperaturas interiores inferiores à ambiente exterior.

Por fim, no que diz respeito à tipologia de utilização, o estudo de Baniassadi, Sailor and Ban-Weiss, (2019) destacou reduções no consumo de energia total entre 4% e 19% em edifícios comerciais e até 28% em edifícios residenciais.

Os estudos relatados indicam três observações importantes: (i) a utilidade desta tecnologia varia significativamente com as condições climáticas e atmosféricas, (ii) o potencial de economia de energia é alto em edifícios mal isolados termicamente e diminui à medida que o isolamento térmico aumenta, e (iii) devido à penalidade de aquecimento, a estimativa da economia de energia requer uma análise durante todo o ano, particularmente para climas mistos e mais frios.

Com base nos estudos de Aili, Yin and Yang (2021) e Vilà, Medrano and Castell (2023), o desempenho teórico em Portugal é elevado durante o verão, sobretudo nas regiões interiores,

onde os verões são mais quentes e secos. No entanto, durante o inverno, a eficiência desta tecnologia diminui, devido às condições climáticas mais adversas. No entanto, destaca-se a ausência de estudos focados na aplicação de tintas seletivas em edifícios, o que revela uma lacuna significativa na pesquisa e evidencia uma importante oportunidade para investigações futuras nesta área.

Embora os avanços sejam promissores, a literatura ainda evidencia lacunas importantes, nomeadamente no que diz respeito ao desempenho a longo prazo destas tecnologias em edifícios reais e à escassez de dados experimentais que validem os modelos energéticos (Yu and Chen, 2021; Yu *et al.*, 2022). Além disso, estudos como os realizados por Shukla, Yadav and Prakash (2023) indicam que o efeito combinado de tintas seletivas com painéis fotovoltaicos em coberturas de edifícios ainda necessita de uma investigação mais aprofundada.

No futuro, será fundamental explorar novas combinações de nanopartículas e materiais inovadores, que não só melhorem a refletividade e emissividade das tintas seletivas, mas também as adaptem a condições climáticas e regionais distintas. Paralelamente, é imprescindível avaliar o impacto ambiental destas tecnologias ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a produção até à aplicação e ao seu descarte, de forma a assegurar a sua conformidade com os princípios da sustentabilidade. Além disso, será relevante investigar como estas tintas influenciam o tempo de vida útil das soluções construtivas e o número de intervenções de manutenção necessárias. Compreender se estas tecnologias podem prolongar a durabilidade das superfícies e reduzir os custos associados à manutenção contribuirá para uma visão mais abrangente do seu impacto ambiental e económico.

Além do estudo da formulação das tintas e do seu impacto ambiental, torna-se indispensável avançar na padronização dos métodos de teste, com o objetivo de possibilitar a comparação consistente dos resultados obtidos em diferentes investigações. A falta de uniformidade em condições operacionais, como a espessura do revestimento, o ângulo de aplicação e a medição de desempenho em diferentes níveis de humidade e radiação solar, representa um entrave significativo ao progresso nesta área. Simultaneamente, estudos de longa duração sob condições reais de uso são indispensáveis para aferir a durabilidade e a eficácia prática destas tintas, fornecendo dados que não só contribuirão para ajustar e validar modelos computacionais, tornando-os mais representativos das condições reais, como também otimizarão a formulação e as propriedades das tintas seletivas. Estas ações são fundamentais para consolidar a confiança na aplicação destas tecnologias em diferentes climas e tipologias de edifícios, promovendo a sua adoção em larga escala.

Para maximizar o impacto destas tecnologias, será igualmente relevante investigar a sua integração com outras estratégias de construção sustentável, combinando diferentes soluções passivas para reduzir a dependência de sistemas ativos de aquecimento e arrefecimento. Adicionalmente, o desenvolvimento de tintas seletivas inteligentes, capazes de ajustar dinamicamente as suas propriedades em resposta às condições climáticas, bem como a sua aplicação em infraestruturas urbanas, como pavimentos e coberturas, pode desempenhar um papel importante na mitigação do efeito de ilhas de calor urbanas.

No contexto português, torna-se particularmente relevante realizar um estudo focado em tintas seletivas. Este estudo deveria explorar a emissividade seletiva das tintas, as condições atmosféricas locais e a interação com a janela atmosférica, o que permitiria uma avaliação mais precisa do desempenho destas tecnologias em diferentes regiões do país. Adicionalmente, a

investigação poderia ser expandida para o contexto mediterrânico, oferecendo uma perspectiva mais abrangente sobre o potencial dessas tecnologias na região.

Em conclusão, as tintas seletivas representam uma abordagem inovadora e eficaz para enfrentar os desafios do aquecimento global e da eficiência energética em edifícios, especialmente em climas quentes e temperados. A sua implementação em larga escala tem o potencial de reduzir significativamente a dependência de sistemas de ar condicionado e mitigar o efeito das ilhas de calor urbanas, promovendo um ambiente mais sustentável. Estudos económicos apontam que a aplicação de tintas para arrefecimento radiativo nas coberturas dos edifícios possuem um período de retorno entre 2 e 8 anos (Hernández-Pérez *et al.*, 2017; Chen, Lu, Gong, Lau, *et al.*, 2021; Rawat and Singh, 2022), reforçando a viabilidade e atratividade desta tecnologia.

Este trabalho foi parcialmente apresentado no 5º Congresso Luso Brasileiro de Materiais de construção sustentáveis / Congresso construção 2024 (Francisco and Aelenei, 2024).

Além disso, o autor participou na publicação de um artigo em revista internacional (Baptista *et al.*, 2024), que destacou que a etapa de manutenção das soluções de fachadas apresenta um impacto ambiental significativo, em grande parte devido à aplicação de revestimentos, como tintas e produtos preservativos. Este impacto é particularmente relevante quando se considera o ciclo de vida das soluções de construção, desde a produção até à sua substituição.

#### Desenvolvimentos futuros:

No seguimento desta investigação, está previsto o desenvolvimento de um projeto de doutoramento centrado na viabilidade e aplicação prática de tintas seletivas no contexto português. Este projeto propõe uma abordagem multidisciplinar, combinando investigação experimental e modelação numérica para avaliar o desempenho energético de revestimentos radiativos aplicados em edifícios. A investigação incluirá a formulação de tintas com estrutura core-shell, utilizando materiais como  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$  e  $Al_2O_3$ , aplicados sobre microesferas de acetato de celulose, visando maximizar a reflexão solar e a emissividade seletiva.

A campanha experimental será complementada por ensaios de caracterização térmica, ótica e mecânica dos materiais desenvolvidos, e pela sua aplicação em diferentes substratos utilizados na construção em Portugal. Serão realizadas medições em células de teste expostas a condições reais, com e sem isolamento térmico, de modo a aferir o impacto da aplicação das tintas seletivas em climas sazonais. Esta análise empírica permitirá aferir não só a redução de temperatura superficial, mas também a melhoria do conforto térmico interior e a eventual poupança energética associada.

Paralelamente, serão desenvolvidos modelos numéricos com base na ferramenta EnergyPlus, calibrados com os dados experimentais obtidos. Estes modelos permitirão simular o desempenho energético de edifícios equipados com estas soluções, em diferentes cenários climáticos e tipológicos, promovendo uma avaliação detalhada do seu impacto ao longo do tempo. A abordagem será complementada por uma análise do ciclo de vida, contemplando os custos de produção, aplicação e manutenção, bem como os impactos ambientais comparativos face aos revestimentos convencionais.

Este trabalho pretende não apenas contribuir para a produção de conhecimento científico na área do arrefecimento passivo, mas também apoiar a transição para práticas construtivas mais sustentáveis. A combinação entre inovação tecnológica, viabilidade ambiental e aplicação

prática poderá posicionar estas soluções como ferramentas eficazes na mitigação das alterações climáticas, especialmente em regiões mediterrânicas como Portugal.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Agência Portuguesa do Ambiente (2019)** *Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050*. Available at: <https://descarbonizar2050.apambiente.pt/>.

**Aili, A., Yin, X. and Yang, R. (2021)** 'Global Radiative Sky Cooling Potential Adjusted for Population Density and Cooling Demand', *Atmosphere*, 12(11), p. 1379. doi: 10.3390/atmos12111379.

**Akbari, H. (2002)** 'Shade trees reduce building energy use and CO<sub>2</sub> emissions from power plants', *Environmental Pollution*, 116, pp. S119–S126. doi: 10.1016/S0269-7491(01)00264-0.

**Andrews, S. (2017)** *The Yakhchāl was an ancient Persian "refrigerator" that stored food and even ice long before electricity was invented*. Available at: <https://www.thevintagenews.com/2017/12/20/yakhchal-ancient-persian-refrigerator/>.

**Angström, A. K. (1936)** *Effective radiation during the second international polar year*.

**Argiriou, A. et al. (1992)** 'POTENTIAL OF RADIATIVE COOLING IN SOUTHERN EUROPE', *International Journal of Solar Energy*, 13(3), pp. 189–203. doi: 10.1080/01425919208909784.

**Asimakopoulos, D. A. et al. (2012)** 'Modelling the energy demand projection of the building sector in Greece in the 21st century', *Energy and Buildings*, 49, pp. 488–498. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.02.043.

'ASTM G173-03' (2017). Available at: <https://www.astm.org/standards/g173>.

**Bahadori, M. N. (1978)** 'Passive Cooling Systems in Iranian Architecture', *Scientific American*, 238(2), pp. 144–155. Available at: <http://www.jstor.org/stable/24955643>.

**Baniassadi, A., Sailor, D. J. and Ban-Weiss, G. A. (2019)** 'Potential energy and climate benefits of super-cool materials as a rooftop strategy', *Urban Climate*, 29, p. 100495. doi: 10.1016/j.uclim.2019.100495.

**Bao, H. et al. (2017)** 'Double-layer nanoparticle-based coatings for efficient terrestrial radiative cooling', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 168, pp. 78–84. doi: 10.1016/j.solmat.2017.04.020.

**Baptista, J. F. et al. (2024)** 'A comparative life cycle assessment of ETICS and ventilated façade systems with timber cladding', *Energy and Buildings*, 304, p. 113842. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113842.

**Barnett, J. R., Miller, S. and Pearce, E. (2006)** 'Colour and art: A brief history of pigments', *Optics & Laser Technology*, 38(4–6), pp. 445–453. doi: 10.1016/j.optlastec.2005.06.005.

- Bartoli, B. et al. (1977)** 'Nocturnal and diurnal performances of selective radiators', *Applied Energy*, 3(4), pp. 267–286.
- Berdahl, P. et al. (2008)** 'Weathering of roofing materials – An overview', *Construction and Building Materials*, 22(4), pp. 423–433. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.10.015.
- Berdahl, P. et al. (2016)** 'Fluorescent cooling of objects exposed to sunlight – The ruby example', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157, pp. 312–317. doi: 10.1016/j.solmat.2016.05.058.
- Berdahl, P. et al. (2018)** 'High quantum yield of the Egyptian blue family of infrared phosphors (MCuSi<sub>4</sub>O<sub>10</sub>, M = Ca, Sr, Ba)', *Journal of Applied Physics*, 123(19). doi: 10.1063/1.5019808.
- Berdahl, P. and Fromberg, R. (1982)** 'The thermal radiance of clear skies', *Solar Energy*, 29(4), pp. 299–314. doi: 10.1016/0038-092X(82)90245-6.
- Berdahl, P. and Martin, M. (1984)** 'Emissivity of clear skies', *Solar Energy*, 32(5), pp. 663–664. doi: 10.1016/0038-092X(84)90144-0.
- Berdahl, P., Martin, M. and Sakkal, F. (1983)** 'Thermal performance of radiative cooling panels', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 26(6), pp. 871–880. doi: 10.1016/S0017-9310(83)80111-2.
- Berger, X., Buriot, D. and Garnier, F. (1984)** 'About the equivalent radiative temperature for clear skies', *Solar Energy*, 32(6), pp. 725–733. doi: 10.1016/0038-092X(84)90247-0.
- Bliss, R. W. (1961)** 'Atmospheric radiation near the surface of the ground: A summary for engineers', *Solar Energy*, 5(3), pp. 103–120. doi: 10.1016/0038-092X(61)90053-6.
- Boixo, S. et al. (2012)** 'Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia', *Energy*, 38(1), pp. 425–438. doi: 10.1016/j.energy.2011.11.009.
- Bretz, S. and Akbari, H. (1994)** 'Durability of high-albedo roof coatings and implications for cooling energy savings'.
- Brunt, D. (1932)** 'Notes on radiation in the atmosphere. I', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 58(247), pp. 389–420. doi: 10.1002/qj.49705824704.
- Bu, F. et al. (2022)** 'Systematically incorporating spectrum-selective radiative cooling into building performance simulation: Numerical integration method and experimental validation', *Applied Energy*, 312, p. 118733. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118733.
- Chae, D. et al. (2020)** 'Spectrally Selective Inorganic-Based Multilayer Emitter for Daytime Radiative Cooling', *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(7), pp. 8073–8081. doi: 10.1021/acami.9b16742.
- Chae, D. et al. (2021)** 'Scalable and paint-format microparticle–polymer composite enabling high-performance daytime radiative cooling', *Materials Today Physics*, 18, p. 100389. doi: 10.1016/j.mtphys.2021.100389.
- Chen, B. et al. (1995)** 'Measurement of night sky emissivity in determining radiant cooling from cool storage roofs and roof ponds', in *Proceedings of the National Passive Solar Conference*. AMERICAN SOLAR ENERGY SOCIETY INC, pp. 310–313.

- Chen, J., Lu, L., Gong, Q., Wang, B., et al. (2021)** 'Development of a new spectral selectivity-based passive radiative roof cooling model and its application in hot and humid region', *Journal of Cleaner Production*, 307, p. 127170. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127170.
- Chen, J., Lu, L., Gong, Q., Lau, W. Y., et al. (2021)** 'Techno-economic and environmental performance assessment of radiative sky cooling-based super-cool roof applications in China', *Energy Conversion and Management*, 245, p. 114621. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114621.
- Chen, J. and Lu, L. (2020)** 'Development of radiative cooling and its integration with buildings: A comprehensive review', *Solar Energy*, 212, pp. 125–151. doi: 10.1016/j.solener.2020.10.013.
- Chen, M. et al. (2020)** 'A Pragmatic and High-Performance Radiative Cooling Coating with Near-Ideal Selective Emissive Spectrum for Passive Cooling', *Coatings*, 10(2), p. 144. doi: 10.3390/coatings10020144.
- Chen, Y. et al. (2020)** 'Colored and paintable bilayer coatings with high solar-infrared reflectance for efficient cooling', *Science Advances*, 6(17). doi: 10.1126/sciadv.aaz5413.
- Comissão Europeia (2021)** *Pacto Ecológico Europeu*. Available at: <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/green-deal/>.
- Cool Roof Rating Council, C. R. R. C. (2024)**. Available at: <https://coolroofs.org/>.
- CSI, C. S. I. (2023)** *Electromagnetic Radiation*. Available at: <https://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/radiation-sun.php>.
- Das, A. K. and Iqbal, M. (1987)** 'A simplified technique to compute spectral atmospheric radiation', *Solar Energy*, 39(2), pp. 143–155. doi: 10.1016/S0038-092X(87)80042-7.
- Diário da República (2024)** *Despacho n.º 8023/2024, de 19 de julho*. Available at: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/despacho/8023-2024-872631226>.
- Dicas de Arquitetura (2018)**. Available at: <https://dicasdearquitetura.com.br/como-criar-conforto-termico-com-arvores/#gsc.tab=0>.
- Dominick Mselle, B. et al. (2024)** 'Research progress, trends, roadmap, and new perspectives on radiative cooling towards practical applications', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 71, p. 103987. doi: 10.1016/j.seta.2024.103987.
- EnergyPlus**. Available at: <https://energyplus.net/>.
- Eriksson, T. S. and Granqvist, C. G. (1983)** 'Infrared optical properties of electron-beam evaporated silicon oxynitride films', *Applied Optics*, 22(20), pp. 3204–3206.
- Fan, X., Shi, K. and Xia, Z. (2020)** 'Using multi-layer structure to improve the radiative cooling performance', *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 251, p. 107052. doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107052.
- Felicelli, A. et al. (2022)** 'Thin layer lightweight and ultrawhite hexagonal boron nitride nanoporous paints for daytime radiative cooling', *Cell Reports Physical Science*, 3(10), p. 101058. doi: 10.1016/j.xcrp.2022.101058.

- Francisco, A. . and Aelenei, D. (2024)** 'A utilização de tintas seletivas como estratégia de arrefecimento em edifícios: Revisão da literatura', in *Livro de atas. 5.º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. Congresso Construção 2024*. CERIS - Instituto de Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade. Available at: [https://ceris.pt/wp-content/uploads/2024/11/CLBMCS2024\\_Atas.pdf](https://ceris.pt/wp-content/uploads/2024/11/CLBMCS2024_Atas.pdf).
- Friedlingstein, P. et al. (2023)** 'Global Carbon Budget 2023', *Earth System Science Data*, 15(12), pp. 5301–5369. doi: 10.5194/essd-15-5301-2023.
- Gallego-Schmid, A. et al. (2020)** 'Links between circular economy and climate change mitigation in the built environment', *Journal of Cleaner Production*, 260, p. 121115. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121115.
- Gallo, E. et al. (2024)** 'Heat-related mortality in Europe during 2023 and the role of adaptation in protecting health', *Nature Medicine*, 30(11), pp. 3101–3105. doi: 10.1038/s41591-024-03186-1.
- Gentle, A. R., Aguilar, J. L. C. and Smith, G. B. (2011)** 'Optimized cool roofs: Integrating albedo and thermal emittance with R-value', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(12), pp. 3207–3215. doi: 10.1016/j.solmat.2011.07.018.
- Gong, Q. et al. (2023)** 'A novel aqueous scalable eco-friendly paint for passive daytime radiative cooling in sub-tropical climates', *Solar Energy*, 255, pp. 236–242. doi: 10.1016/j.solener.2023.03.033.
- González-Torres, M. et al. (2022)** 'A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers', *Energy Reports*, 8, pp. 626–637. doi: 10.1016/j.egy.2021.11.280.
- Gooch, J. W. (ed.) (2002)** 'History of Paint and Coatings Materials BT - Lead-Based Paint Handbook', in. Boston, MA: Springer US, pp. 13–35. doi: 10.1007/0-306-46905-7\_2.
- Google Scholar.** Available at: <https://scholar.google.com/>.
- Granqvist, C. G. (1981)** 'Radiative heating and cooling with spectrally selective surfaces', *Applied Optics*, 20(15), pp. 2606–2615.
- Granqvist, C. G. and Hjortsberg, A. (1981)** 'Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films', *Journal of Applied Physics*, 52(6), pp. 4205–4220. doi: 10.1063/1.329270.
- Granqvist, C. G., Hjortsberg, A. and Eriksson, T. S. (1982)** 'Radiative cooling to low temperatures with selectivity IR-emitting surfaces', *Thin Solid Films*, 90(2), pp. 187–190.
- Green Roof Organisation (GRO) (2023)** Available at: <https://www.greenrooforganisation.org/2023/06/23/green-roofs-and-the-urban-heat-island-effect/>.
- Grenier, P. (1979)** 'Réfrigération radiative. Effet de serre inverse', *Revue de Physique Appliquée*, 14(1), pp. 87–90.
- Guerrero Delgado, Mc., Sánchez Ramos, J. and Álvarez Domínguez, S. (2020)** 'Using the sky as heat sink: Climatic applicability of night-sky based natural cooling techniques in Europe', *Energy Conversion and Management*, 225, p. 113424. doi: 10.1016/j.enconman.2020.113424.

- Guia Casa Eficiente (2014).** Available at: <https://www.guiacasaeficiente.com/ArquiteturaE/VarandasAbasBeiraisSombra.html>.
- Guide Perrier (2015).** Available at: <https://guideperrier.ca/puits-canadien-quebec-geothermie/>.
- Harrison, A. W. and Walton, M. R. (1978)** 'Radiative cooling of TiO<sub>2</sub> white paint', *Solar Energy*, 20(2), pp. 185–188. doi: 10.1016/0038-092X(78)90195-0.
- He, Y. et al. (2022)** 'An easily prepared and long-term effective cooling coating that can be cooled to sub-ambient temperature without polyethylene film', *Solar Energy*, 246, pp. 1–13. doi: 10.1016/j.solener.2022.09.009.
- Hernández-Pérez, I. et al. (2017)** 'Reflective Materials for Cost-Effective Energy-Efficient Retrofitting of Roofs', in *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting*. Elsevier, pp. 119–139. doi: 10.1016/B978-0-08-101128-7.00004-6.
- Hossain, M. M. and Gu, M. (2016)** 'Radiative Cooling: Principles, Progress, and Potentials', *Advanced Science*, 3(7). doi: 10.1002/advs.201500360.
- Hradil, D. et al. (2003)** 'Clay and iron oxide pigments in the history of painting', *Applied Clay Science*, 22(5), pp. 223–236. doi: 10.1016/S0169-1317(03)00076-0.
- Huang, W. et al. (2021)** 'Scalable Aqueous Processing-Based Passive Daytime Radiative Cooling Coatings', *Advanced Functional Materials*, 31(19). doi: 10.1002/adfm.202010334.
- Idso, S. B. and Jackson, R. D. (1969)** 'Thermal radiation from the atmosphere', *Journal of geophysical research*, 74(23), pp. 5397–5403.
- IEA (2020)** *Cooling Emissions and Policy Synthesis Report, Cooling Emissions and Policy Synthesis Report*. Available at: <https://www.iea.org/reports/cooling-emissions-and-policy-synthesis-report>.
- Jiang, K. et al. (2023)** 'Experimental and numerical study on the potential of a new radiative cooling paint boosted by SiO<sub>2</sub> microparticles for energy saving', *Energy*, 283, p. 128473. doi: 10.1016/j.energy.2023.128473.
- Jiang, T., Fan, W. and Wang, F. (2023)** 'Long-lasting self-cleaning daytime radiative cooling paint for building', *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 666, p. 131296. doi: 10.1016/j.colsurfa.2023.131296.
- Jing, W. et al. (2021)** 'Scalable and Flexible Electrospun Film for Daytime Subambient Radiative Cooling', *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(25), pp. 29558–29566. doi: 10.1021/acsami.1c05364.
- Keller, R. C. (2019)** 'Europe's killer heat waves are a new norm. The death rates shouldn't be.' Available at: <https://www.washingtonpost.com/outlook/2019/07/26/europes-killer-heat-waves-are-new-norm-death-rates-shouldnt-be/>.
- Kim, M. et al. (2021)** 'Optimization and performance analysis of a multilayer structure for daytime radiative cooling', *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 260, p. 107475. doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107475.

- Larsen, M. A. D. et al. (2020)** 'Climate change impacts on trends and extremes in future heating and cooling demands over Europe', *Energy and Buildings*, 226, p. 110397. doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110397.
- Leroy, A. et al. (2019)** 'High-performance subambient radiative cooling enabled by optically selective and thermally insulating polyethylene aerogel', *Science Advances*, 5(10). doi: 10.1126/sciadv.aat9480.
- Levinson, R., Berdahl, P. and Akbari, H. (2005a)** 'Solar spectral optical properties of pigments—Part I: model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(4), pp. 319–349. doi: 10.1016/j.solmat.2004.11.012.
- Levinson, R., Berdahl, P. and Akbari, H. (2005b)** 'Solar spectral optical properties of pigments—Part II: survey of common colorants', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(4), pp. 351–389. doi: 10.1016/j.solmat.2004.11.013.
- Lhomme, J.-P., Vacher, J. J. and Rocheteau, A. (2007)** 'Estimating downward long-wave radiation on the Andean Altiplano', *Agricultural and Forest Meteorology*, 145(3–4), pp. 139–148.
- Li, D. et al. (2021)** 'Scalable and hierarchically designed polymer film as a selective thermal emitter for high-performance all-day radiative cooling', *Nature Nanotechnology*, 16(2), pp. 153–158. doi: 10.1038/s41565-020-00800-4.
- Li, S. et al. (2022)** 'Research on indirect cooling for photovoltaic panels based on radiative cooling', *Renewable Energy*, 198, pp. 947–959. doi: 10.1016/j.renene.2022.08.020.
- Li, W. et al. (2017)** 'A Comprehensive Photonic Approach for Solar Cell Cooling', *ACS Photonics*, 4(4), pp. 774–782. doi: 10.1021/acsp Photonics.7b00089.
- Li, W., Li, Y. and Shah, K. W. (2020)** 'A materials perspective on radiative cooling structures for buildings', *Solar Energy*, 207, pp. 247–269. doi: 10.1016/j.solener.2020.06.095.
- Li, X. et al. (2020)** 'Full Daytime Sub-ambient Radiative Cooling in Commercial-like Paints with High Figure of Merit', *Cell Reports Physical Science*, 1(10), p. 100221. doi: 10.1016/j.xcrp.2020.100221.
- Li, X. et al. (2021)** 'Ultrawhite BaSO<sub>4</sub> Paints and Films for Remarkable Daytime Subambient Radiative Cooling', *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(18), pp. 21733–21739. doi: 10.1021/acsaami.1c02368.
- Lim, H. et al. (2022)** 'CaCO<sub>3</sub> micro particle-based radiative cooling device without metal reflector for entire day', *Materials Today Communications*, 32, p. 103990. doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.103990.
- Lim, Y.-F. (2020)** 'Novel materials and concepts for regulating infra-red radiation: radiative cooling and cool paint', in *Energy Saving Coating Materials*. Elsevier, pp. 113–131. doi: 10.1016/B978-0-12-822103-7.00005-4.
- Lin, K. et al. (2022)** 'Nanoparticle-polymer hybrid dual-layer coating with broadband solar reflection for high-performance daytime passive radiative cooling', *Energy and Buildings*, 276, p. 112507. doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112507.

- Liu, X. et al. (2023)** 'A Shish-Kebab Superstructure Film for Personal Radiative Cooling', *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(13), pp. 17188–17194. doi: 10.1021/acsami.3c00120.
- Luo, C.-L. et al. (2023)** 'Enhanced passive radiative cooling coating with Y2O3 for thermal management of building', *Optical Materials*, 138, p. 113710. doi: 10.1016/j.optmat.2023.113710.
- Lushiku, E. M. and Granqvist, C.-G. (1984)** 'Radiative cooling with selectively infrared-emitting gases', *Applied Optics*, 23(11), p. 1835. doi: 10.1364/AO.23.001835.
- Lushiku, E. M., Hjortsberg, A. and Granqvist, C. G. (1982)** 'Radiative cooling with selectively infrared-emitting ammonia gas', *Journal of Applied Physics*, 53(8), pp. 5526–5530. doi: 10.1063/1.331487.
- Mandal, J. et al. (2018)** 'Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling', *Science*, 362(6412), pp. 315–319. doi: 10.1126/science.aat9513.
- Mandal, J. et al. (2020)** 'Paints as a Scalable and Effective Radiative Cooling Technology for Buildings', *Joule*, 4(7), pp. 1350–1356. doi: 10.1016/j.joule.2020.04.010.
- Martin, M. and Berdahl, P. (1984)** 'Characteristics of infrared sky radiation in the United States', *Solar Energy*, 33(3–4), pp. 321–336. doi: 10.1016/0038-092X(84)90162-2.
- De Masi, R. F. et al. (2023)** 'Thermal behaviour of a cool roof Aerogel-based: summer and autumn in-field campaign in a full-scale test-room', *Solar Energy*, 259, pp. 298–319. doi: 10.1016/j.solener.2023.05.033.
- Mende, L. (2017)** *Radiação Solar e o Balanço da Radiação*. Available at: <https://www-geografia.blogspot.com/2017/12/Radiacao-Solar.html>.
- Michell, D. and Biggs, K. L. (1979)** 'Radiation cooling of buildings at night', *Applied Energy*, 5(4), pp. 263–275. doi: 10.1016/0306-2619(79)90017-5.
- Miyazaki, H., Oe, K. and Tsuruta, M. (2020)** 'Fabrication of radiative cooling coatings and composite films using Si2N2O nano-particles with wide range temperatures', *Open Ceramics*, 4, p. 100039. doi: 10.1016/j.oceram.2020.100039.
- Nações Unidas (2022)** *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. Available at: <https://ods.pt/>.
- Nie, X. et al. (2020)** 'Cool White Polymer Coatings based on Glass Bubbles for Buildings', *Scientific Reports*, 10(1), p. 6661. doi: 10.1038/s41598-020-63027-2.
- Niemelä, S., Räisänen, P. and Savijärvi, H. (2001)** 'Comparison of surface radiative flux parameterizations: Part I: Longwave radiation', *Atmospheric research*, 58(1), pp. 1–18.
- Oliveira, M. J. et al. (2024)** 'Desenvolvimento de biomateriais compósitos de cortiça e casca de amendoim colonizados com micélio de cogumelos – procedimento e ensaios preliminares', in *Livro de atas. 5.º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. Congresso Construção 2024*. CERIS - Instituto de Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade. Available at: [https://ceris.pt/wp-content/uploads/2024/11/CLBMCS2024\\_Atas.pdf](https://ceris.pt/wp-content/uploads/2024/11/CLBMCS2024_Atas.pdf).

- Organização Mundial de Saúde (2024)** *Heat and health*. Available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health>.
- Pakdel, E. and Wang, X. (2023)** 'Thermoregulating textiles and fibrous materials for passive radiative cooling functionality', *Materials & Design*, 231, p. 112006. doi: 10.1016/j.matdes.2023.112006.
- Peoples, J. et al. (2022)** 'Energy savings of radiative cooling paints applied to residential buildings', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194, p. 123001. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123001.
- Petrie, T. W. et al. (2001)** 'Effect of solar radiation control on energy costs—a radiation control fact sheet for low-slope roofs', *Proceedings, Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII: Integration of Building Envelopes*.
- Python**. Available at: <https://www.python.org/>.
- Pockett, J. (2010)** 'Heat Reflecting Paints and a Review of Their Advertising Material', in: *Projetou Blog (2021)*. Available at: <https://www.projetou.com.br/posts/ventilacao-cruzada/>.
- Rahmani, F., Robinson, M. A. and Barzegaran, M. R. (2021)** 'Cool roof coating impact on roof-mounted photovoltaic solar modules at texas green power microgrid', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 130, p. 106932. doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106932.
- Raman, A. P. et al. (2014)** 'Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight', *Nature*, 515(7528), pp. 540–544. doi: 10.1038/nature13883.
- Rawat, M. and Singh, R. N. (2022)** 'Techno-economic analysis of cool roof materials in a composite climatic zone', *Materials Today: Proceedings*, 52, pp. 1406–1410.
- Rydin, Y. et al. (2012)** 'Shaping cities for health: complexity and the planning of urban environments in the 21st century', *The Lancet*, 379(9831), pp. 2079–2108. doi: 10.1016/S0140-6736(12)60435-8.
- Santamouris, M. (2013)** 'Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, pp. 224–240. doi: 10.1016/j.rser.2013.05.047.
- Santamouris, M. (2016)** 'Cooling the buildings – past, present and future', *Energy and Buildings*, 128, pp. 617–638. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.07.034.
- ScienceDirect**. Available at: <https://www.sciencedirect.com/>.
- Shi, N. N. et al. (2015)** 'Keeping cool: Enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants', *Science*, 349(6245), pp. 298–301. doi: 10.1126/science.aab3564.
- Shi, N. N. et al. (2016)** 'Radiative Cooling Nano-Photonic Structures Discovered in Saharan Silver Ants and Related Biomimetic Metasurfaces', in *Conference on Lasers and Electro-Optics*. Washington, D.C.: OSA, p. FTh3B.1. doi: 10.1364/CLEO\_QELS.2016.FTh3B.1.

- Shukla, A. K., Yadav, A. K. and Prakash, R. (2023)** 'Active and passive methods for cooling load reduction in a tropical building: A case study', *Energy Conversion and Management*, 293, p. 117490. doi: 10.1016/j.enconman.2023.117490.
- Sicart, J. E. et al. (2010)** 'Sky longwave radiation on tropical Andean glaciers: parameterization and sensitivity to atmospheric variables', *Journal of glaciology*, 56(199), pp. 854–860.
- Skies, R. F. C. (1981)** 'A Set of Equations for Full Spectrum and 8-to 14- $\mu$ m and 10.5-to 12.5- $\mu$ m Thermal', *WATER RESOURCES RESEARCH*, 17(2), pp. 295–304.
- Song, J. et al. (2022)** 'Durable radiative cooling against environmental aging', *Nature Communications*, 13(1), p. 4805. doi: 10.1038/s41467-022-32409-7.
- Staley, D. O. and Jurica, G. M. (1972)** 'Effective atmospheric emissivity under clear skies', *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 11(2), pp. 349–356.
- Stephens, G. L. (1992)** 'Radiative Transfer Notes'. Fort Collins, CO: Colorado State University. Available at: [https://reef.atmos.colostate.edu/~odell/at622/stephens\\_notes/](https://reef.atmos.colostate.edu/~odell/at622/stephens_notes/).
- Sugita, M. and Brutsaert, W. (1993)** 'Cloud effect in the estimation of instantaneous downward longwave radiation', *Water Resources Research*, 29(3), pp. 599–605.
- Sun, X. et al. (2017)** 'Optics-Based Approach to Thermal Management of Photovoltaics: Selective-Spectral and Radiative Cooling', *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(2), pp. 566–574. doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2646062.
- Swinbank, W. C. (1963)** 'Long-wave radiation from clear skies', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), pp. 339–348. doi: 10.1002/qj.49708938105.
- Synnefa, A., Santamouris, M. and Apostolakis, K. (2007)** 'On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment', *Solar Energy*, 81(4), pp. 488–497. doi: 10.1016/j.solener.2006.08.005.
- Tang, R., Etzion, Y. and Meir, I. A. (2004)** 'Estimates of clear night sky emissivity in the Negev Highlands, Israel', *Energy conversion and management*, 45(11–12), pp. 1831–1843.
- Tarlattini, S. et al. (2024)** 'Valorização de dreche cervejeira como solução de base natural para isolamento térmico', in *Livro de atas. 5.º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. Congresso Construção 2024*. CERIS - Instituto de Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade. Available at: [https://ceris.pt/wp-content/uploads/2024/11/CLBMCS2024\\_Atas.pdf](https://ceris.pt/wp-content/uploads/2024/11/CLBMCS2024_Atas.pdf).
- TRNSYS**. Available at: <https://www.trnsys.com/>.
- Trombe, F. (1975)** 'Perspectives sur l'utilisation des rayonnements solaires et terrestres dans certaines régions du monde'.
- Tso, C. Y., Chan, K. C. and Chao, C. Y. H. (2017)** 'A field investigation of passive radiative cooling under Hong Kong's climate', *Renewable Energy*, 106, pp. 52–61. doi: 10.1016/j.renene.2017.01.018.

**União Europeia (2024)** *Directiva (UE) 2024/1275 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de abril de 2024, relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)*. Available at: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L\\_202401275&pk\\_keyword=Energy&pk\\_content=Directive](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275&pk_keyword=Energy&pk_content=Directive).

**Vettorazzi, E. et al. (2024)** 'Desenvolvimento de painéis isolantes biocompósitos produzidos a partir de fibras de coco: Análise do desempenho térmico e acústico', in *Livro de atas. 5.º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. Congresso Construção 2024*. CERIS - Instituto de Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade. Available at: [https://ceris.pt/wp-content/uploads/2024/11/CLBMCS2024\\_Atas.pdf](https://ceris.pt/wp-content/uploads/2024/11/CLBMCS2024_Atas.pdf).

**Vilà, R. et al. (2023)** 'Potential maps for combined nocturnal radiative cooling and diurnal solar heating applications in Europe', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 59, p. 103381. doi: 10.1016/j.seta.2023.103381.

**Vilà, R., Medrano, M. and Castell, A. (2021)** 'Mapping Nighttime and All-Day Radiative Cooling Potential in Europe and the Influence of Solar Reflectivity', *Atmosphere*, 12(9), p. 1119. doi: 10.3390/atmos12091119.

**Vilà, R., Medrano, M. and Castell, A. (2023)** 'Climate change influences in the determination of the maximum power potential of radiative cooling. Evolution and seasonal study in Europe', *Renewable Energy*, 212, pp. 500–513. doi: 10.1016/j.renene.2023.05.083.

**Wang, Q. et al. (2023)** 'Radiative cooling layer boosting hydrophilic-hydrophobic patterned surface for efficient water harvesting', *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 658, p. 130584. doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.130584.

**Wang, T. et al. (2022)** 'Scalable and waterborne titanium-dioxide-free thermochromic coatings for self-adaptive passive radiative cooling and heating', *Cell Reports Physical Science*, 3(3), p. 100782. doi: 10.1016/j.xcrp.2022.100782.

**Wang, X. et al. (2020)** 'Scalable Flexible Hybrid Membranes with Photonic Structures for Daytime Radiative Cooling', *Advanced Functional Materials*, 30(5). doi: 10.1002/adfm.201907562.

**Watmuff, J. H., Charters, W. W. S. and Proctor, D. (1977)** 'Solar and wind induced external coefficients-solar collectors', *Cooperation Mediterranee pour l'Energie Solaire*, p. 56.

**Web of Science**. Available at: <https://www.webofscience.com/>.

**Wijesuriya, S. et al. (2022)** 'Potential energy savings benefits and limitations of radiative cooling coatings for U.S. residential buildings', *Journal of Cleaner Production*, 379, p. 134763. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134763.

**WorldBank (2021)** *The Cold Road to Paris: Mapping Pathways Toward Sustainable Cooling for Resilient People and Economies by 2050*.

**Xia, S. et al. (2023)** 'Water-based kaolin/polyacrylate cooling paint for exterior walls', *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 677, p. 132401. doi: 10.1016/j.colsurfa.2023.132401.

- Xu, Z. et al. (2018)** 'A new crystal Mg<sub>11</sub>(HPO<sub>3</sub>)<sub>8</sub>(OH)<sub>6</sub> for daytime radiative cooling', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 185, pp. 536–541. doi: 10.1016/j.solmat.2018.06.012.
- Xue, X. et al. (2020)** 'Creating an Eco-Friendly Building Coating with Smart Subambient Radiative Cooling', *Advanced Materials*, 32(42). doi: 10.1002/adma.201906751.
- Yan, D. et al. (2008)** 'DeST — An integrated building simulation toolkit Part I: Fundamentals', *Building Simulation*, 1(2), pp. 95–110. doi: 10.1007/s12273-008-8118-8.
- Yu, C. and Hien, W. N. (2009)** 'Thermal Impact of Strategic Landscaping in Cities: A Review', *Advances in Building Energy Research*, 3(1), pp. 237–260. doi: 10.3763/aber.2009.0309.
- YU, N. et al. (2016)** 'WO2016205717 - SYSTEMS AND METHODS FOR RADIATIVE COOLING AND HEATING'. Available at:  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2016205717>.
- Yu, X. et al. (2022)** 'Enhanced radiative cooling paint with broken glass bubbles', *Renewable Energy*, 194, pp. 129–136. doi: 10.1016/j.renene.2022.05.094.
- Yu, X. and Chen, C. (2021)** 'Coupling spectral-dependent radiative cooling with building energy simulation', *Building and Environment*, 197, p. 107841. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107841.
- Zhai, H., Fan, D. and Li, Q. (2022)** 'Scalable and paint-format colored coatings for passive radiative cooling', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 245, p. 111853. doi: 10.1016/j.solmat.2022.111853.
- Zhang, H. et al. (2022)** 'Radiative cooling gray paint with high solar reflectance for thermal management of electronic equipment', *Solar Energy*, 241, pp. 460–466. doi: 10.1016/j.solener.2022.06.019.
- Zhang, Y. et al. (2022)** 'Atmospheric Water Harvesting by Large-Scale Radiative Cooling Cellulose-Based Fabric', *Nano Letters*, 22(7), pp. 2618–2626. doi: 10.1021/acs.nanolett.1c04143.
- Zhang, Y. et al. (2023)** 'Sub-ambient cooling effect and net energy efficiency of a super-amphiphobic self-cleaning passive sub-ambient daytime radiative cooling coating applied to various buildings', *Energy and Buildings*, 284, p. 112702. doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112702.
- Zhao, B., Hu, M., Ao, X. and Pei, G. (2019)** 'Performance evaluation of daytime radiative cooling under different clear sky conditions', *Applied Thermal Engineering*, 155, pp. 660–666. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.028.
- Zhao, B., Hu, M., Ao, X., Chen, N., et al. (2019)** 'Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects', *Applied Energy*, 236, pp. 489–513. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.018.
- Zhao, D. et al. (2019)** 'Subambient Cooling of Water: Toward Real-World Applications of Daytime Radiative Cooling', *Joule*, 3(1), pp. 111–123. doi: 10.1016/j.joule.2018.10.006.
- Zhao, Y. et al. (2022)** 'Scalable aqueous processing-based radiative cooling coatings for heat dissipation applications', *Applied Materials Today*, 26, p. 101298. doi: 10.1016/j.apmt.2021.101298.

**Zhong, H. *et al.* (2021)** 'Hierarchically Hollow Microfibers as a Scalable and Effective Thermal Insulating Cooler for Buildings', *ACS Nano*, 15(6), pp. 10076–10083. doi: 10.1021/acsnano.1c01814.

**Zhou, L. *et al.* (2019)** 'A polydimethylsiloxane-coated metal structure for all-day radiative cooling', *Nature Sustainability*, 2(8), pp. 718–724. doi: 10.1038/s41893-019-0348-5.

**Zhu, L. *et al.* (2014)** 'Radiative cooling of solar cells', *Optica*, 1(1), p. 32. doi: 10.1364/OPTICA.1.000032.

**Zinzi, M. and Fasano, G. (2009)** 'Properties and performance of advanced reflective paints to reduce the cooling loads in buildings and mitigate the heat island effect in urban areas', *International Journal of Sustainable Energy*, 28(1–3), pp. 123–139. doi: 10.1080/14786450802453314.

## Revisão bibliométrica complementar

Na etapa final da redação da dissertação, foi realizada uma nova pesquisa na base de dados ScienceDirect com o objetivo de atualizar o número de publicações relacionadas às palavras-chave utilizadas. Este procedimento teve como propósito fornecer uma visão abrangente sobre a evolução do interesse científico na área de arrefecimento radiativo.

### i. Arrefecimento radiativo

Antes de explorar a aplicação e a formulação de tintas específicas para arrefecimento radiativo, é relevante compreender o panorama geral do interesse científico na área de arrefecimento radiativo. O gráfico apresentado na Figura 5.1 ilustra o número de publicações anuais e acumuladas relacionadas com o termo "radiative cooling", oferecendo uma visão abrangente da evolução deste campo ao longo das últimas duas décadas.

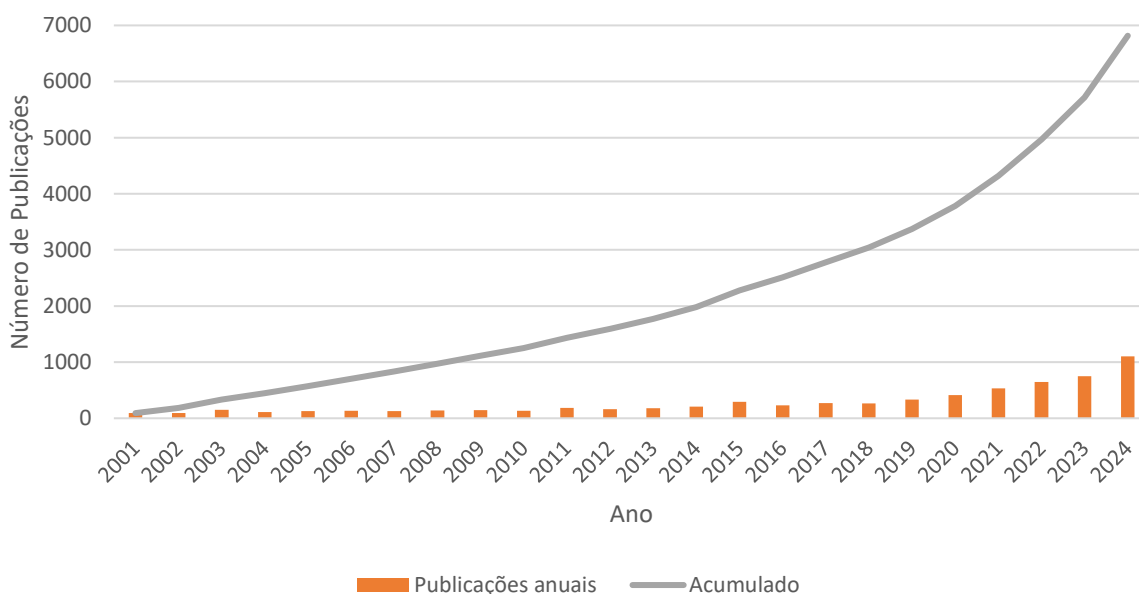


Figura 5.1 - Número de publicações anuais e acumulado sobre arrefecimento radiativo.

O gráfico revela um crescimento consistente no número de publicações relacionadas com o termo "radiative cooling", especialmente a partir de 2015, com um aumento mais acentuado nos últimos cinco anos. O volume acumulado de publicações evidencia a consolidação do campo como uma área de investigação madura, embora o crescimento recente também

indique que novas soluções e aplicações continuam a surgir, impulsionadas pelos avanços tecnológicos.

Além do interesse geral pelo tema do arrefecimento radiativo, é fundamental compreender como esta tecnologia tem sido explorada no setor da construção. O gráfico apresentado na Figura 5.2 ilustra o número de publicações anuais e acumuladas relacionadas com o termo "radiative cooling", combinado com palavras-chave específicas como "building" e "buildings", fornecendo uma visão da evolução do interesse pelo arrefecimento radiativo em edifícios.

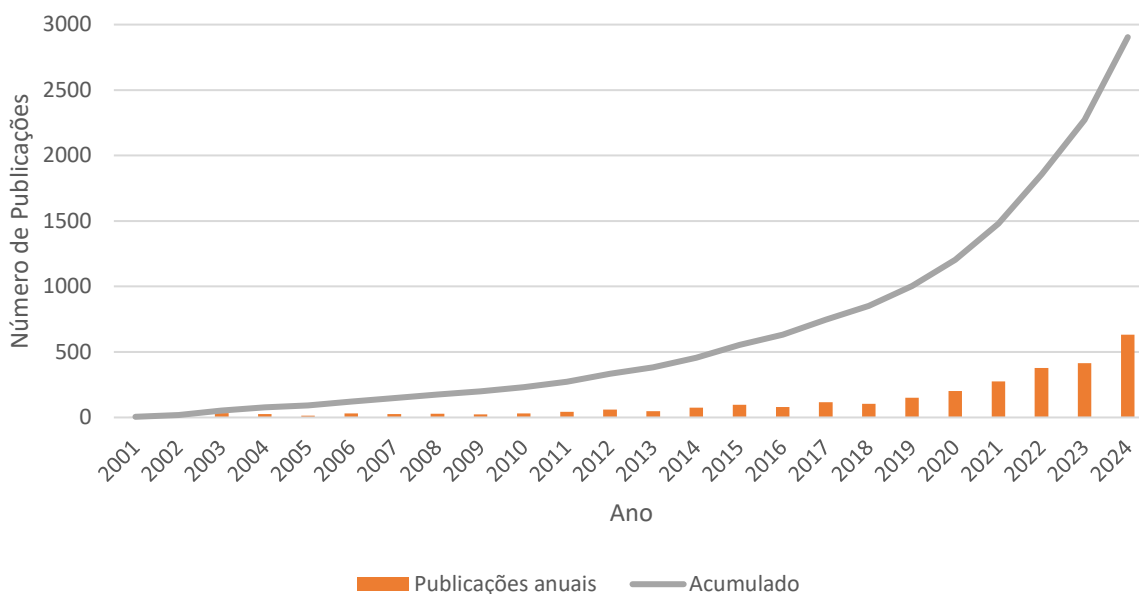


Figura 5.2 - Número de publicações anuais e acumulado sobre arrefecimento radiativo em edifícios.

O gráfico demonstra o interesse crescente na aplicação do arrefecimento radiativo no setor da construção, especialmente a partir de 2015. Este aumento reflete a crescente atenção dada pela indústria da construção ao potencial destas tecnologias como soluções passivas para melhorar a eficiência energética dos edifícios.

#### ii. Formulação de tintas para arrefecimento radiativo

Para identificar as tintas de arrefecimento radiativo, utilizou-se a conjugação de palavras-chave "radiative cooling" e "paint".

Tal como discutido no subcapítulo 1.3, os resultados associados à pesquisa "radiative cooling" e "paint" possuem um enorme volume de publicações associadas a tintas refletantes. Durante o trabalho de revisão da literatura, identificou-se que a principal diferença entre o comportamento de tintas refletantes e tintas seletivas está na emissividade na janela atmosférica, assim, acrescentou-se aos critérios de pesquisa a palavra-chave "atmospheric window", para identificar as publicações associadas às tintas seletivas. Note-se que nestes resultados ainda podem estar incluídas publicações de tintas refletantes com a menção à janela atmosférica por outras razões.

O número de publicações associadas a tintas refletantes foi obtido com base na diferença entre os resultados para tintas de arrefecimento radiativo e para tintas seletivas.

Os resultados do número de publicações anuais são apresentados na Figura 5.3 e a evolução de publicações anuais são apresentados na Figura 5.4.

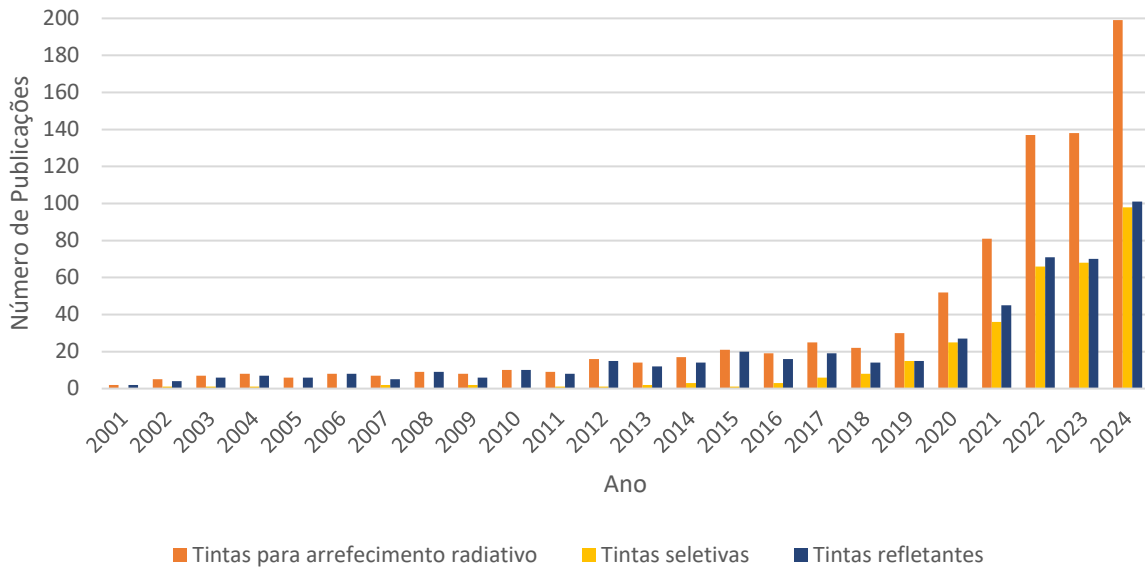


Figura 5.3 - Número de publicações anuais sobre tintas para arrefecimento radiativo, com distinção entre tintas seletivas e tintas refletantes.

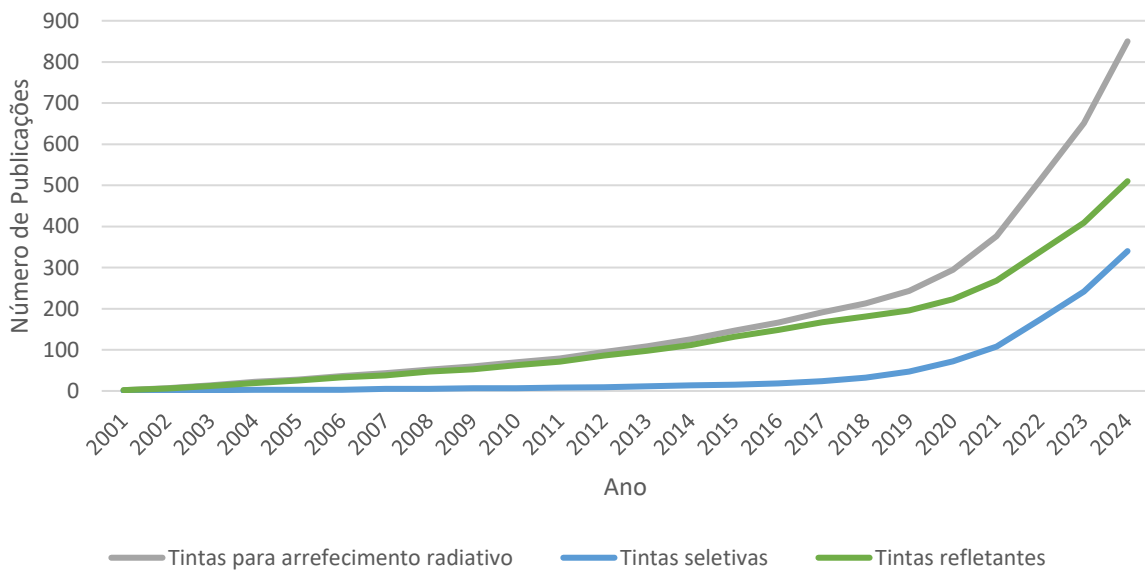


Figura 5.4 - Evolução do número de publicações sobre tintas para arrefecimento radiativo, com distinção entre tintas seletivas e tintas refletantes.

Os gráficos apresentados evidenciam um aumento significativo no número de publicações anuais relacionadas com tintas para arrefecimento radiativo a partir de 2020. Tanto as tintas seletivas como as refletantes apresentam trajetórias ascendentes, refletindo o avanço científico.

Apesar das tintas refletantes terem sido estudadas por um período mais longo, as tintas seletivas, embora mais recentes, já apresentam um número acumulado de publicações comparável. Este cenário demonstra que, mesmo com um histórico mais curto, as tintas seletivas têm recebido atenção significativa na investigação, refletindo o interesse crescente em soluções avançadas.

### iii. Aplicação de tintas para arrefecimento radiativo em edifícios

De forma a compreender a aplicabilidade das tintas para arrefecimento radiativo nos edifícios, estendeu-se a pesquisa demonstrada na Figura 5.3 com a introdução das palavras "buildings" ou "building" à pesquisa.

Os resultados da aplicação de tintas para arrefecimento radiativo em edifícios estão demonstrados na Figura 5.5, em termos de publicações anuais, e na Figura 5.6 em termos de evolução.

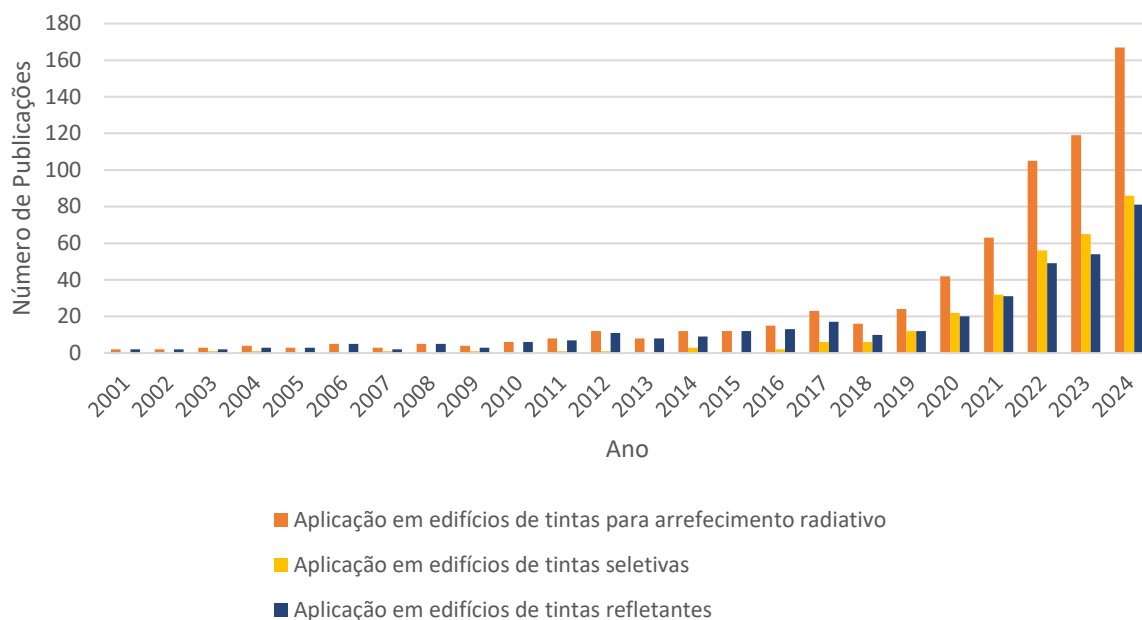


Figura 5.5 - Número de publicações anuais sobre a aplicação em edifícios de tintas para arrefecimento radiativo, com distinção entre tintas seletivas e tintas refletantes.

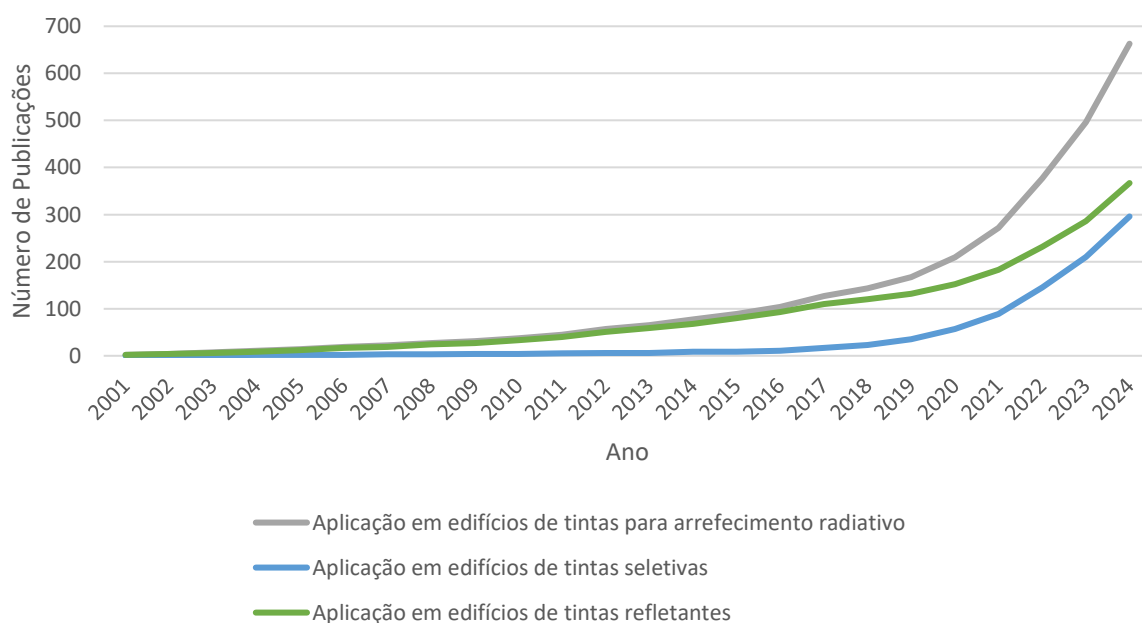


Figura 5.6 - Evolução do número de publicações sobre a aplicação em edifícios de tintas para arrefecimento radiativo, com distinção entre tintas seletivas e tintas refletantes.

Quando analisadas no contexto da aplicação em edifícios, as publicações também apresentam um crescimento constante, com destaque para os últimos cinco anos. Este aumento reflete a importância crescente destas tecnologias como ferramentas práticas para mitigar os impactos das alterações climáticas no setor da construção. Tanto as tintas seletivas como as refletantes contribuem para a eficiência energética dos edifícios, sendo as seletivas particularmente atraídas devido à sua capacidade de atingir temperaturas subambiente.

À semelhança dos resultados sobre a formulação das tintas, o número acumulado de publicações relacionadas à aplicação de tintas seletivas em edifícios encontra-se bastante próximo da aplicação de tintas refletantes, conforme evidenciado no gráfico da Figura 5.6. Este cenário demonstra que a comunidade científica tem dado grande atenção à aplicação prática das tintas seletivas em edifícios, reconhecendo o seu potencial para melhorar o conforto térmico e promover eficiência energética no setor da construção.

iv. Comparação dos resultados obtidos na análise bibliométrica com a revisão da literatura efetuada na dissertação

Os resultados macro obtidos através da análise bibliométrica estão em consonância com a revisão da literatura realizada ao longo da dissertação, bem como com o processo de seleção adotado. Os primeiros estudos sobre tintas seletivas surgiram entre 2016 e 2018, impulsionados pelo marco deixado pelo trabalho de Raman *et al.* (2014), enquanto as investigações focadas na sua aplicação em edifícios ganharam maior expressão a partir de 2019/2020.

A análise também confirma que as tintas refletantes, devido à sua longa história de investigação, podem ser confundidas com as tintas seletivas quando não são incluídas palavras-chave relacionadas com a janela atmosférica. Os resultados, com a inclusão destas palavras-chave, estão alinhados com o processo e resultados de seleção da literatura adotados na dissertação, ilustrado na Figura 1.2.

No que diz respeito à aplicação de tintas seletivas em edifícios, os resultados evidenciam o reduzido volume de estudos disponíveis nessa área, justificando a discrepância observada na revisão da literatura, onde foram considerados menos estudos relacionados com a aplicação em edifícios em comparação com aqueles focados na formulação de tintas seletivas. Este cenário reforça a necessidade de ampliar as investigações nesta temática, de modo a consolidar o conhecimento sobre a aplicação destas tecnologias no contexto da construção sustentável.

Por fim, destaca-se o estudo de Dominick Mselle *et al.* (2024) que avaliou a literatura existente sobre arrefecimento radiativo através de análises bibliométricas e de palavras-chave até ao ano de 2022, sobre o qual se destacam as seguintes conclusões:

i. Conforme apresentado na Figura 5.7, China e Estados Unidos da América destacam-se como os principais contribuidores para a pesquisa em arrefecimento radiativo. Ambos os países acumulam mais de 400 publicações cada um, refletindo um alto nível de investimento e interesse científico na área.

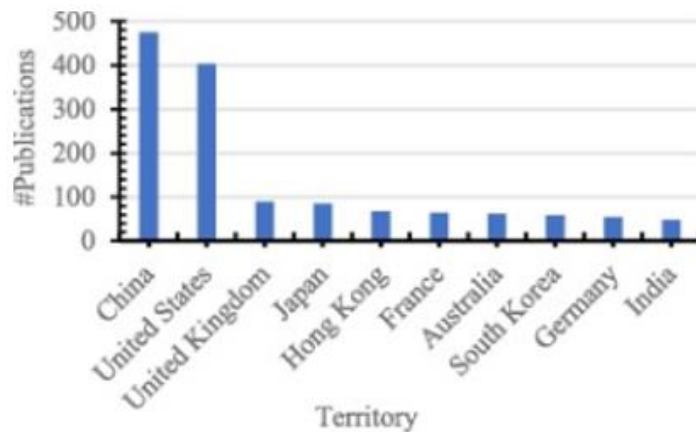


Figura 5.7 - Principais países a publicar sobre arrefecimento radioativo. (Dominick Mselle *et al.*, 2024)

ii. A análise de publicações de patentes, ilustrada na Figura 5.8, revela um panorama diferente. Os Estados Unidos da América lideram significativamente, seguidos por Japão e China. Este padrão sugere que, embora a China domine a produção científica, os EUA possuem uma maior tendência em transformar pesquisa em inovação tecnológica protegida por patentes.

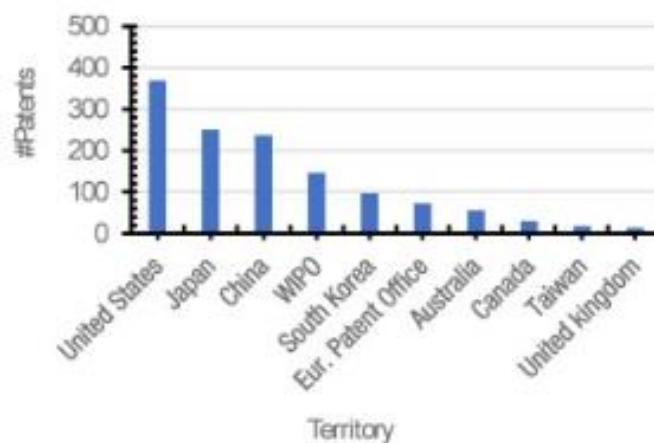


Figura 5.8 - Principais países a patentear materiais de arrefecimento radioativo. (Dominick Mselle *et al.*, 2024)

iii. A Tabela 5.1 apresenta os 15 principais autores sobre o tópico. Os três primeiros colocados da lista – Gang Pei, Mujiao Hu e Bin Zhao – representam instituições de renome, como a *University of Science and Technology of China* e a *National University of Singapore*, acumulando cada um mais de 40 publicações.

Tabela 5.1 - Ranking dos autores com mais publicações no tema *radiative cooling*. Adaptado de (Dominick Mselle *et al.*, 2024)

Posição	Autor	Afiliação	Número de Publicações
1	Gang Pei	<i>University of Science and Technology of China, China</i>	48
2	Mingke Hu	<i>National University of Singapore, Singapore</i>	45
3	Bin Zhao	<i>University of Science and Technology of China, China</i>	44
4	Xianze Ao	<i>Yangzhou Research Institute of Shenyang, China</i>	31
5	Ronggui Yang	<i>Huazhong University of Science and Technology, China</i>	26
6	Dongliang Zhao	<i>Southeast University, Nanjing, China</i>	22
7	Mattheos J. Santamouris	<i>UNSW Sydney, Sydney, Australia</i>	20
8	Shanhui Fan	<i>Ginzton Laboratory, Stanford, United States</i>	19
9	Yuehong Su	<i>University of Nottingham, UK</i>	19
10	Saffa B. Riffat	<i>University of Nottingham, UK</i>	18
11	Gang Tan	<i>College of Civil Eng. and Arch. Zhejiang University, China</i>	18
12	Xiaobo Yin	<i>University of Colorado Boulder, United States</i>	17
13	Junwei Liu	<i>Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong</i>	16
14	Chi Yan Tso	<i>City University of Hong Kong, Hong Kong</i>	16
15	Zhijia Zhou	<i>Tianjin University, China</i>	16

iv. A Figura 5.9 apresenta as 10 principais instituições com maior número de publicações no campo do arrefecimento radiativo. O panorama geral evidencia uma forte predominância de instituições asiáticas, refletindo a liderança da região nas pesquisas relacionadas ao arrefecimento radiativo.

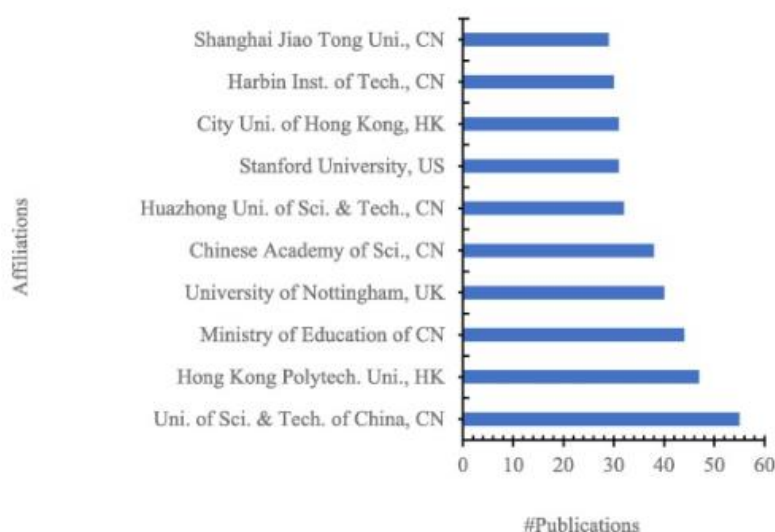


Figura 5.9 - Afiliações com maior contributo de publicações. (Dominick Mselle *et al.*, 2024)

v. A Figura 5.10 apresenta as áreas de pesquisa mais exploradas no campo do arrefecimento radiativo. As áreas com maior ênfase incluem as engenharias (27%), a energia (21%) e a ciência dos materiais (18%).

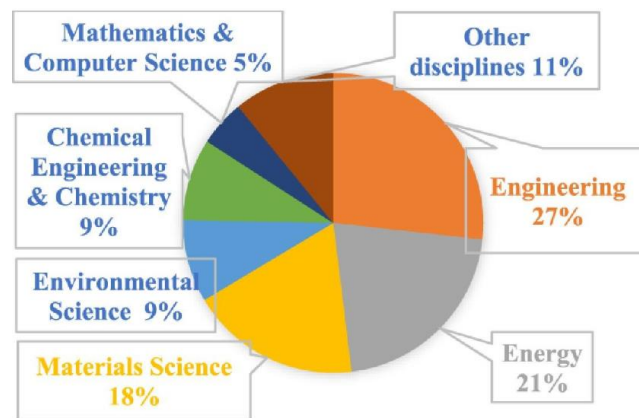


Figura 5.10 - Áreas de estudo do arrefecimento radiativo. (Dominick Mselle *et al.*, 2024)





2025

ANDRÉ VENTURA FRANCISCO

A UTILIZAÇÃO DE TINTAS SELETIVAS COMO ESTRATÉGIA DE  
ARREFECIMENTO RADIATIVO EM EDIFÍCIOS: REVISÃO DA