

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**REVESTIMENTOS FRIOS PARA
COBERTURAS E FACHADAS NO BRASIL:**
caracterização e avaliação do
desempenho térmico

MARCELA MACEDO DE ANDRADE

MARCELA MACEDO DE ANDRADE

VERSÃO CORRIGIDA

**REVESTIMENTOS FRIOS PARA COBERTURAS E FACHADAS NO BRASIL:
CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO**

Dissertação apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo

Área de concentração:

Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientadora:

Prof.^a Dra. Kelen Almeida Dornelles

Financiamento:

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP

SÃO CARLOS

2023

AUTORIZO A REPRODUCAO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRONICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A554r Andrade, Marcela Macedo de
Revestimentos frios para coberturas e fachadas no
Brasil: caracterização e avaliação do desempenho
térmico / Marcela Macedo de Andrade; orientadora
Kelen Almeida Dornelles. -- São Carlos, 2023.
196 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e
Tecnologia -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade de São Paulo, 2023.

1. materiais frios. 2. refletância solar. 3.
propriedades radiativas. 4. desempenho térmico. 5.
composição química. I. Dornelles, Kelen Almeida ,
orient. II. Título.

Bibliotecária responsável pela estrutura de catalogação da publicação de acordo com a AACR2:
Brianda de Oliveira Ordonho Sígolo - CRB - 8/8229

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Marcela Macedo de Andrade

Título da dissertação: "Revestimentos frios para coberturas e fachadas no Brasil: caracterização e avaliação do desempenho térmico".

Data da defesa: 06/04/2023

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Kelen Almeida Dornelles


Comissão Julgadora:

Resultado:



Prof^ª Dr^ª Kelen Almeida Dornelles
(IAU/USP)

Não votante



Prof^ª Dr^ª Karin Maria Soares Chvatal
(IAU/USP)

Aprovada



Prof^ª Dr^ª Roberta Vieira Gonçalves de Souza

Aprovada

(UFMG)



Prof. Dr. Deivis Luis Marinoski
(UFSC)

Aprovada

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Prof. Dr. João Marcos de Almeida Lopes.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por sempre estar comigo, me guiando, iluminando os meus passos, me abençoando com tantos presentes divinos e me dando talvez além do que posso merecer. Obrigada por toda providência divina à minha disposição e que no meu âmago permitiu o meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional nesse período.

À minha família, principalmente meus pais Júnior e Eugênia e minha irmã Mariana pela compreensão, ao serem privados em muitos momentos da minha presença e atenção, e pelo profundo apoio, me estimulando nos momentos mais difíceis. Obrigada pelo esforço que fizeram em toda minha vida acadêmica para que pudesse superar cada obstáculo em meu caminho e chegar aqui e especialmente, pelo amor imenso que vocês sentem por mim e aos meus amigos que tornaram esta jornada mais alegre e leve e pela torcida, mesmo à distância.

À professora Dra. Kelen Dornelles, orientadora do meu trabalho, sou grata pela confiança depositada em mim ainda no processo seletivo. Obrigada pelo suporte durante todo o processo, inclusive nos momentos de pandemia, atenção e zelo nas orientações, o que me manteve motivada.

Aos funcionários técnicos-administrativos do Instituto de Arquitetura de São Carlos que estiveram sempre à disposição para ajudar, especialmente o Pedro Henrique Mattia, Paulo Wanderley Pratavieira e José Renato Dibo por todo o auxílio prestado nas dependências dos laboratórios.

Ao professor Dr. Deivis Luis Marinoski, pela realização das medições de refletância solar e emitância térmica na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e como membro da minha banca de Qualificação e Defesa de Mestrado juntos às professoras Dra. Karin Maria Soares Chvatal e Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza, aos quais agradeço pelos conselhos, sugestões e interesse em contribuir para o desenvolvimento desta pesquisa.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela credibilidade dada à minha pesquisa e concessão da bolsa de Mestrado (Processo nº 2019/20050-9).

“Aqueles que se sentem **satisfeitos**

sentam-se e nada fazem.

Os **insatisfeitos** são os **únicos**

benfeitores do mundo.”

(Walter S. Landor, escritor e poeta inglês)

RESUMO

Uma das formas para contribuir com a redução das emissões de gases de efeito estufa e da poluição do ar é diminuir o consumo de energia utilizada para resfriamento nos edifícios utilizando, dentre as soluções, os materiais frios como revestimento nas edificações. O material frio possui alta refletância dos componentes especular e difuso da radiação solar e sua superfície aquece menos do que uma convencional de mesmo acabamento. Deste modo, o objetivo da pesquisa foi avaliar as propriedades ópticas, térmicas e químicas de revestimentos frios disponíveis no Brasil e sua relação com o desempenho térmico para o envelope construtivo de edifícios. Assim, foram escolhidos revestimentos para uso em paredes e coberturas de edifícios que possuem nomenclatura “térmica” ou “refletiva” a partir de produtos disponíveis no mercado nacional. Desta forma, foram avaliados telhas, tintas e aditivo refletivo em pó (para adicionar em tintas convencionais) para coberturas e fachadas. As medições das coordenadas de cor CIELab, refletância solar e emitância térmica foram realizadas com métodos e equipamentos normatizados para 34 materiais frios e 07 de referência. Foram registradas imagens térmicas de amostras dos materiais expostos ao Sol na cidade de São Carlos (SP) e complementarmente, a análise química quantificou os elementos químicos presentes na superfície das amostras. Os resultados demonstraram que: a) a região espectral visível contribuiu com a maior redução da temperatura pela análise de regressão múltipla. Portanto, superfícies de cores mais claras esquentam menos, em maior grau, por causa da sua maior refletância no visível, e apresentaram as menores temperaturas superficiais; b) os materiais refletivos escuros apesar da maior refletância no infravermelho próximo do que no visível não obtiveram menores temperaturas superficiais em relação aos convencionais; c) todos os materiais avaliados apresentaram elevada emitância térmica com variações insignificantes no que diz respeito aos convencionais e d) as análises de correlação indicaram que quanto maior a concentração do elemento metálico titânio diminui-se a emitância térmica, contudo, não foi encontrada significância estatística entre maior quantidade de titânio ou silício, dos óxidos inorgânicos, com o aumento da refletância infravermelha próxima ou solar. Esta pesquisa teve o intuito em identificar quais componentes químicos presentes na superfície dos materiais frios interferem nos seus maiores valores de refletância solar e emitância térmica e assim contribuir com informações para auxiliar na escolha mais adequada de revestimentos refletivos para a envoltória das edificações.

Palavras-chave: Materiais frios. Propriedades radiativas. Desempenho térmico. Composição química.

ABSTRACT

One way to contribute with reduction of greenhouse gas emissions and air pollution is decreasing energy consumption for cooling purposes in buildings, among solutions, using cool materials as coatings in buildings. Cool material has high reflectance of specular and diffuse components of solar radiation and its surface heats up less than a conventional one with same topcoat. Thus, research's aim was to evaluate optical, thermal and chemical properties of cool coatings available in Brazil and their relationship with thermal performance for buildings' envelope. Thus, coatings were chosen for use on walls and roofs buildings' which have "thermal" or "reflective" denomination from products available on national market. In this way, tiles, paints and reflective powder additive (to be added to conventional paints) for roofs and facades were evaluated. Measurements were performed of CIELab color coordinates, solar reflectance and thermal emittance were performed using standardized methods and equipment for 34 cool materials and 07 reference materials. Thermal images of samples exposed to the Sun were recorded in the city of Sao Carlos (SP) and, in addition, chemical analysis quantified chemical elements present on samples' surface. Results showed that: a) visible spectral region contributed with the greatest temperature reduction by multiple regression analysis. Therefore, lighter-colored surfaces heat up less, into a greater level, because of their greater visible reflectance and had the lowest surface temperatures; b) dark reflective materials, despite greater reflectance in the near infrared than visible, did not obtain lower surface temperatures in relation to the conventional ones; c) all evaluated materials presented high thermal emittance with insignificant variations concerning conventional ones and d) correlation analyzes indicated that higher concentration of metallic element titanium decreases thermal emittance, however, no statistical significance was found between greater amounts of titanium or silicon, from inorganic oxides, with increased near-infrared or solar reflectance. This research aimed for identify which chemical components present on cool materials surface interfere with solar reflectance and thermal emittance highest values and therefore contribute with information to assist in most appropriate choice of reflective coatings for building envelope.

Keywords: Cool materials. Radiative properties. Thermal performance. Chemical composition.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica

Figura 2.1 – Espectro eletromagnético solar	24
Figura 2.2 – Radiância espectral do corpo negro para objetos terrestres	26
Figura 2.3 (a) – Níveis eletrônicos	29
Figura 2.3 (b) – Transição eletrônica de um elétron entre níveis energéticos no átomo	29
Figura 2.4 – Transição vibracional e rotacional do elétron	31
Figura 2.5 – Irradiâncias espectrais global e extraterrestre	33
Figura 2.6 – Radiação solar incidente sobre uma superfície opaca.....	34
Figura 2.7 – Radiação solar incidente sobre uma superfície opaca “fria”	43
Figura 2.8 (a) – Rótulo de logo para produtos de telhado frio licenciado pelo CRRC	45
Figura 2.8 (b) – Rótulo de logo para produtos de fachada fria licenciado pelo CRRC	45
Figura 2.8 (c) - Etiqueta de produto para telhado frio classificado pelo CRRC	45
Figura 2.9 – Espalhamento da luz por partículas em um filme pigmentado	48
Figura 2.10 – Espalhamento da luz ao interagir com diversos tamanhos de partículas esféricas	49
Figura 2.11 (a) – Imagem microscópica dos cristais da matriz de polietileno pura na escala 100 μm	52
Figura 2.11 (b) - Imagem microscópica dos cristais da matriz de polietileno na escala 100 μm adicionada com TiO_2 anastásio	52
Figura 2.11 (c) – Imagem microscópica dos cristais da matriz de polietileno na escala 100 μm adicionada com TiO_2 rutilo	52
Figura 2.11 (d) - Imagem microscópica dos cristais da matriz de polietileno na escala 100 μm adicionada com TiO_2 anastásio/rutilo.....	52
Figura 2.12 (a) – Mapeamento da área por EDS da argamassa branca com 5% de adição de TiO_2 na escala de 250 μm	54
Figura 2.12 (b) – Mapeamento da área por EDS da argamassa branca com 5% de adição de TiO_2 na escala de 60 μm	54
Figura 2.13 (a) – Imagem microscópica do pigmento TiO_2 rutilo R902 por MEV na escala de 1 μm	54
Figura 2.13 (b) – Imagem microscópica do pigmento TiO_2 rutilo R902 por MET na escala de 0,2 μm	54
Figura 2.14 (a) – Imagem microscópica do pigmento TiO_2 P25 na escala de 0,2 μm por MEV em Werle.....	55

Figura 2.14 (b) – Imagem microscópica do pigmento TiO ₂ P25 na escala de 0,2 µm por MET em Preuss.....	55
Figura 2.15 – Diferença entre partículas aglomeradas e agregadas	55
Figura 2.16 (a) – Composição de tintas frias sobre substrato opaco e camada base branca ...	59
Figura 2.16 (b) – Composição de tintas frias sobre substrato opaco e camada base preta	59
Figura 2.16 (c) – Composição de tintas frias entre substrato opaco e laca transparente	59
Figura 2.17 – Composição de camadas em telha de concreto fria	68
Figura 2.18 (a) – Telha cerâmica fria com revestimento de óxido de ferro	69
Figura 2.18 (b) – Telha cerâmica fria com base branca e revestimento de óxido de ferro	69
Figura 2.18 (c) – Telha cerâmica fria com base branca e revestimento de óxido de ferro diluído.....	70
Capítulo 3 – Materiais e métodos	
Figura 3.1 (a) – Corte na serra circular das telhas de concreto	84
Figura 3.1 (b) – Corte na serra circular das telhas de fibrocimento	84
Figura 3.2 – Amostras de tamanhos menores e médios das telhas de concreto e fibrocimento	84
Figura 3.3 – Amostras de tamanhos maiores das telhas de concreto e fibrocimento	85
Figura 3.4 – Processo de incorporação e mistura da tinta acrílica ao pó aditivo refletivo	86
Figura 3.5 – Amostras menores dos materiais líquidos aplicados nas plaquinhas cimentícias	87
Figura 3.6 – Amostras maiores dos materiais líquidos pintados sobre as plaquinhas cimentícias.....	87
Figura 3.7 – Fluxograma do tamanho das amostras, métodos e equipamentos utilizados.....	90
Figura 3.8 – Colorímetro de refletância Colorium 2	91
Figura 3.9 – Especificação de cor no espaço de cor L*a*b*	91
Figura 3.10 – Identificação dos pontos medidos nas telhas e placas cimentícias	92
Figura 3.11 – Disposição do pó refletivo sobre as lâminas e entre as lamínulas para a medição de cor	93
Figura 3.12 – Espectrofotômetro Perkin Elmer (modelo Lambda 1050).....	94
Figura 3.13 – Emissômetro portátil com voltímetro digital da Devices& Services.....	96
Figura 3.14 – Identificação dos pontos medidos nas telhas e placas cimentícias	96
Figura 3.15 – Disposição de todos os materiais pelas bases de isopor	97
Figura 3.16 – Termômetro de infravermelho Testo Brasil e câmera termográfica da Flir	97
Figura 3.17 (a) – Identificação do ponto medido nas placas cimentícias	98
Figura 3.17 (b) – Identificação dos pontos medidos nas telhas	98
Figura 3.18 (a) – Disposição das amostras por grupo de materiais (telhas).....	99
Figura 3.18 (b) – Disposição das amostras por grupo de materiais (mantas líquidas e tintas)	99

Figura 3.18 (c) – Disposição das amostras por grupo de materiais (tintas aditivadas e de referências)	99
Figura 3.19 – Posição dos elementos no experimento com as amostras expostas ao Sol dispostas sobre as bancadas de isopor, a cadeira e o tripé com a máquina fotográfica.....	100
Figura 3.20 (a) – Forma de obtenção dos valores das temperaturas para cada amostra nas imagens térmicas das telhas.....	101
Figura 3.20 (b) – Forma de obtenção dos valores das temperaturas para cada amostra nas imagens térmicas das mantas líquidas e tintas	101
Figura 3.20 (c) – Forma de obtenção dos valores das temperaturas para cada amostra nas imagens térmicas das tintas aditivadas e de referências	101
Figura 3.21 (a) – Exemplo de imagem térmica no isopor das tintas aditivadas e de referências tiradas no momento da medição	102
Figura 3.21 (b) – Exemplo de imagem térmica no isopor das tintas aditivadas e de referências após o tratamento no software FLIR Tools®	102
Figura 3.22 (a) – Amostras analisadas no MEV/EDS em sentido anti-horário a partir da placa de MDF antes da metalização em carbono	103
Figura 3.22 (b) – Amostras analisadas no MEV/EDS em sentido anti-horário a partir da placa de MDF depois da metalização em carbono.....	103
Figura 3.23 - Identificação de 03 pontos aleatórios coletados por EDS na placa de MDF e a dimensão da área visualizada (após ampliação de 250x) nas micrografias.....	104
Figura 3.24 (a) – Imagem microscópica (ampliação 250x) da amostra T-07 em preto e branco.....	104
Figura 3.24 (b) – Imagem microscópica (ampliação 250x) da amostra T-07 colorida elementar individual (elemento Ti).....	104
Figura 3.24 (c) - Imagem microscópica (ampliação 250x) da amostra T-07 colorida elementar sobreposta com todos os elementos químicos mapeados.....	104
Capítulo 4 – Resultados	
Figura 4.1 – Coordenadas cromáticas (a^*b^*) e eixo de luminosidade (L^*) para os materiais frios e de referência, simbolizados por grupo de materiais	107
Figura 4.2 – Coordenadas cromáticas (a^*b^*) e eixo de luminosidade (L^*) para as telhas de concreto frias e de referência.....	109
Figura 4.3 – Coordenadas cromáticas (a^*b^*) e eixo de luminosidade (L^*) para as telhas de fibrocimento frias e de referência.....	109

Figura 4.4 – Coordenadas cromáticas (a^*b^*) e eixo de luminosidade (L^*) para mantas líquidas frias e a placa cimentícia	110
Figura 4.5 – Coordenadas cromáticas (a^*b^*) e eixo de luminosidade (L^*) para as tintas frias e placa cimentícia	111
Figura 4.6 – Coordenadas cromáticas (a^*b^*) e eixo de luminosidade (L^*) para as tintas aditivadas e de referências e a placa cimentícia	111
Figura 4.7 (a) – Curvas espectrais de refletância das telhas de concreto do fabricante A ...	117
Figura 4.7 (b) – Curvas espectrais de refletância das telhas de fibrocimento brancas de fabricantes diferentes	117
Figura 4.8 (a) – Curvas espectrais de refletância das mantas líquidas e tintas do fabricante B	119
Figura 4.8 (b) – Curvas espectrais de refletância das mantas líquidas e tintas do fabricante C	119
Figura 4.8 (c) – Curvas espectrais de refletância das mantas líquidas e tintas do fabricante D	119
Figura 4.8 (d) – Curvas espectrais de refletância das mantas líquidas e tintas brancas de fabricantes diferentes	119
Figura 4.9 (a) – Curvas espectrais de refletância das tintas brancas aditivadas e de referência do fabricante D	121
Figura 4.9 (b) – Curvas espectrais de refletância das tintas pérolas aditivadas e de referência do fabricante D	121
Figura 4.9 (c) – Curvas espectrais de refletância das tintas cinzas aditivadas e de referência do fabricante D	121
Figura 4.9 (d) – Curvas espectrais de refletância das tintas vermelhas aditivadas e de referência do fabricante D	121
Figura 4.10 – Curvas espectrais de refletância de todas as amostras brancas avaliadas, divididas por grupo de materiais	122
Figura 4.11 – Evolução temporal da radiação solar e temperatura de bulbo seco (TBS)	126
Figura 4.12 – Os registros da abóbada celeste, no dia do experimento, com uma lente olho de peixe acoplado à câmera digital no início do experimento e a cada tempo de medição	126
Figura 4.13 – Temperaturas de bulbo seco (TBS) e superficiais das telhas de concreto e de fibrocimento	127
Figura 4.14 – Temperaturas de bulbo seco (TBS) e superficiais das mantas líquidas, tintas e placa cimentícia	128
Figura 4.15 – Temperaturas de bulbo seco (TBS) e superficiais da placa cimentícia e tintas de referência e aditivadas	129

Figura 4.16 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) da base de MDF usada como substrato para a aplicação dos materiais líquidos	135
Figura 4.17 – Agrupamento de médias de Scott-Knott para a luminosidade L* dos materiais avaliados	146
Figura 4.18 – Agrupamento de médias de Scott-Knott para a emitância térmica dos materiais avaliados	147
Figura 4.19 (a) – Agrupamento de médias de Scott-Knott do elemento químico carbono nos materiais avaliados	148
Figura 4.19 (b) – Agrupamento de médias de Scott-Knott do elemento químico oxigênio nos materiais avaliados	148
Figura 4.19 (c) – Agrupamento de médias de Scott-Knott do elemento químico silício nos materiais avaliados	148
Figura 4.19 (d) – Agrupamento de médias de Scott-Knott do elemento químico cálcio nos materiais avaliados	148
Figura 4.19 (e) – Agrupamento de médias de Scott-Knott do elemento químico titânio nos materiais avaliados	148
Figura 4.20 (a) – Correlação entre a luminosidade L* e a refletância visível para todos os materiais	149
Figura 4.20 (b) – Correlação entre a luminosidade L* e a refletância solar para todos os materiais	149
Figura 4.21 (a) – Correlação entre a refletância visível com a temperatura máxima registrada nos materiais avaliados	151
Figura 4.21 (b) – Correlação entre a refletância no infravermelho próximo com a temperatura máxima registrada nos materiais avaliados	151
Figura 4.21 (c) – Correlação entre a refletância total com a temperatura máxima registrada nos materiais avaliados	151
Figura 4.22 (a) – Imagem microscópica (ampliação 250x) em preto e branco para a amostra de tinta T-08	154
Figura 4.22 (b) – Imagem microscópica (ampliação 250x) em preto e branco para a amostra de tinta T-02-C	154
Figura 4.22 (c) – Imagem microscópica (ampliação 250x) em preto e branco para a amostra de tinta T-02-V	154

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica

Tabela 2.1 – Transmitância térmica de referência para paredes externas	37
Tabela 2.2 – Transmitância térmica de referência para coberturas	37
Tabela 2.3 – Parâmetros ambientais adotados para a determinação da temperatura superficial.....	41
Tabela 2.4 – Requisitos prescritivos para edifícios residenciais baixos.....	45
Tabela 2.5 – Requisitos prescritivos para edifícios residenciais altos, hotéis e motéis.....	46
Tabela 2.6 – Requisitos prescritivos para edifícios não-residenciais	46

Capítulo 3 – Materiais e métodos

Tabela 3.1 – Especificações técnicas de alguns materiais de construção avaliados.....	81
Tabela 3.2 – Número de demãos aplicadas e proporção de diluição nas mantas líquidas e tintas	89
Tabela 3.3 – Número de demãos aplicadas e proporção de diluição nas tintas aditivadas e convencionais.	89

Capítulo 4 - Resultados

Tabela 4.1 – Parâmetros cromáticos CIELAB dos materiais frios.....	108
Tabela 4.2 – Parâmetros cromáticos CIELAB dos materiais de referência	108
Tabela 4.3 – Diferença entre os parâmetros cromáticos CIELAB nas telhas de fibrocimento brancas não-correspondentes em cor.....	112
Tabela 4.4 – Diferença entre os parâmetros cromáticos CIELAB nas tintas brancas não-correspondentes em cor	112
Tabela 4.5 – Diferença entre os parâmetros cromáticos CIELAB nas tintas brancas correspondentes em cor	113
Tabela 4.6 – Diferença entre os parâmetros cromáticos CIELAB nas tintas aditivadas (02 demãos) (03 demãos) correspondentes em cor.....	113
Tabela 4.7 – Diferença entre os parâmetros cromáticos CIELAB nas tintas aditivadas (01 demão) com as de referência correspondentes em cor	114
Tabela 4.8 – Diferença entre os parâmetros cromáticos CIELAB nas tintas aditivadas (03 demãos) com as de referência correspondentes em cor.....	114
Tabela 4.9 – Refletância espectral e solar dos materiais frios.	116
Tabela 4.10 – Refletância espectral e solar dos materiais de referência	116
Tabela 4.11 – Emitância térmica dos materiais frios.....	122
Tabela 4.12 – Emitância térmica dos materiais de referência	123

Tabela 4.13 – Temperaturas máxima e mínima registradas em (°C) e a temperatura média calculada em (°C) dos materiais frios	125
Tabela 4.14 – Temperaturas máxima e mínima registradas em (°C) e a temperatura média calculada em (°C) dos materiais de referência.....	125
Tabela 4.15 – Parâmetros climáticos monitorados.....	126
Tabela 4.16 – Porcentagem (%) dos elementos químicos presentes na superfície das amostras analisadas por MEV/EDS	137
Tabela 4.17 – Descrição dos elementos químicos relativos às matérias-primas (pigmento, carga especial, dispersante) presentes nas superfícies das amostras e as concentrações apresentadas na ficha técnica e as detectadas para cada elemento no EDS.....	142
Tabela 4.18 – Análise de variância (ANOVA) para a luminosidade de cor dos materiais avaliados	144
Tabela 4.19 – Análise de variância (ANOVA) para a emitância térmica dos materiais avaliados	145
Tabela 4.20 – Análise de variância (ANOVA) para os elementos químicos dos materiais avaliados	145
Tabela 4.21 – Matriz de correlação entre a emitância térmica e a refletância no infravermelho próximo e solar com os elementos químicos dos materiais avaliados	153
APÊNDICE B	
Tabela B.1 – Porcentagem (%) dos elementos químicos e óxidos presentes no pó aditivo refletivo por fluorescência de raio-X.....	184

LISTA DE QUADROS

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica

Quadro 2.1 – Materiais de revestimento aplicados nas coberturas e fachadas das células-testes.....76

Capítulo 3 – Materiais e métodos

Quadro 3.1 – Materiais de construção avaliados na pesquisa 82

Capítulo 4 – Resultados

Quadro 4.1 – Imagens termográficas das amostras, por grupo de material (Isopor) a cada período de medição..... 131

APÊNDICE B

Quadro B.1 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras do fabricante B 175

Quadro B.2 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras do fabricante C 179

Quadro B.3 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras de tintas para telhas do fabricante D 182

Quadro B.4 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras de tinta branca do fabricante D, antes e após a adição do pó refletivo 187

Quadro B.5 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras com maiores percentuais de cálcio 191

Quadro B.6 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras com maiores percentuais de silício..... 195

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Objetivos.....	23
<i>1.1.1 Objetivo geral.....</i>	<i>23</i>
<i>1.1.2 Objetivos específicos</i>	<i>23</i>
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 Radiação eletromagnética.....	24
<i>2.1.1 Radiação solar</i>	<i>24</i>
<i>2.1.2 Radiação térmica</i>	<i>26</i>
2.2 Interação da radiação com a matéria	27
<i>2.2.1 Interação da radiação eletromagnética com o material.....</i>	<i>27</i>
<i>2.2.2 Interação da radiação solar com a atmosfera</i>	<i>31</i>
<i>2.2.3 Interação da radiação solar com as superfícies opacas</i>	<i>34</i>
<i>2.2.3.1 Propriedades radiantes</i>	<i>34</i>
<i>2.2.3.2 Efeito da carga térmica nas superfícies opacas.....</i>	<i>38</i>
2.3 Superfícies frias	43
2.3.1 Regulamentação	44
<i>2.3.1.1 Internacional</i>	<i>44</i>
<i>2.3.1.2 Nacional</i>	<i>47</i>
2.3.2 Tintas frias	47
<i>2.3.2.1 Espalhamento da luz pelos pigmentos.....</i>	<i>48</i>
<i>2.3.2.2 Fatores que influenciam na refletividade espectral do material.....</i>	<i>50</i>
<i>2.3.2.3 Fatores que influenciam na refletância espectral da superfície</i>	<i>51</i>
<i>2.3.2.4 Interação dos pigmentos com o polímero</i>	<i>52</i>
<i>2.3.2.5 Tipos de pigmentos</i>	<i>55</i>
<i>2.3.2.6 Desempenho térmico</i>	<i>60</i>
2.3.3 Telhas frias	66
<i>2.3.3.1 Desempenho térmico</i>	<i>67</i>
2.3.4 Estudos de caso	73
<i>2.3.4.1 Em cobertura</i>	<i>73</i>
<i>2.3.4.2 Em cobertura e fachada</i>	<i>75</i>
2.4 Conclusão.....	78
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	81

3.1 Seleção dos materiais	81
3.2 Preparo das amostras	83
3.2.1 Telhas	83
3.2.2 Materiais líquidos	85
3.2.2.1 <i>Incorporação do aditivo refletivo às tintas convencionais</i>	85
3.2.2.2 <i>Corte e pintura</i>	86
3.3 Métodos empregados	90
3.3.1 Parâmetros de cor	91
3.3.2 Propriedades óptica-físicas	93
3.3.2.1 <i>Refletância solar com espectrofotômetro</i>	93
3.3.2.2 <i>Emitância térmica com emissômetro portátil</i>	95
3.3.3 Temperatura superficial	97
3.3.4 Micrografia da superfície	102
3.4 Análise estatística	105
4 RESULTADOS	107
4.1 Análise e tratamento dos dados	107
4.1.1 Parâmetros de cor	107
4.1.2 Propriedades óptica-físicas	115
4.1.2.1 <i>Refletância solar com espectrofotômetro</i>	115
4.1.2.2 <i>Emitância térmica com emissômetro portátil</i>	122
4.1.3 Temperatura superficial	124
4.1.4 Micrografia da superfície	135
4.2 Análise estatística	144
4.3 Conclusões	156
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	161
5.1 Recomendações para trabalhos futuros	163
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164
APÊNDICE A	171
APÊNDICE B	173

1 INTRODUÇÃO

As condições para projetar edificações, de acordo com Frota e Schiffer (2001), envolvem o conhecimento das exigências humanas de conforto térmico e do clima, associados às características térmicas dos materiais. O bem-estar térmico para Corbella e Yannas (2009) tem relação com aspectos climáticos como, por exemplo, a temperatura, umidade, velocidade do ar e radiação solar incidente.

Logo, em virtude da sua posição geográfica, regiões tropicais como em algumas localidades de baixa latitude no Brasil recebem muita radiação solar praticamente todo o ano. Então, a principal causa de desconforto térmico é o ganho de calor produzido pela absorção de energia solar que atinge as superfícies dos ambientes construídos e aumenta a sua temperatura. Segundo Corbella e Yannas (2009), para alcançar um bom nível de conforto em clima tropical é controlar estes ganhos de calor na para a edificação usando estratégias de projeto tal como minimizar a energia solar absorvida pelas aberturas e paredes externas.

Então, como soluções projetuais no envelope construtivo para obter melhorias nas condições de conforto no interior da edificação, Lamberts, Dutra e Pereira (2014) citam a utilização de isolamento térmico ou dispositivos de sombreamento em paredes janelas e telhados, além da escolha do tipo de telha e vidro empregado nas janelas. O conhecimento das propriedades térmicas então é um dos aspectos a ser levado em conta na especificação dos materiais de construção, porque têm uma forte influência nas condições de conforto do ambiente interior.

Neste sentido, o impacto da carga térmica nos edifícios proveniente da fonte solar depende, dentre outros fatores, da propriedade superficial conhecida como absorptância, a qual é definida pela relação entre a energia solar absorvida por uma superfície e a energia total incidente sobre ela. Portanto, a escolha por materiais opacos de revestimento na envoltória das edificações com menor absorptância (ou maior refletância solar) minimizam ganhos excessivos de calor, que são indesejáveis. Outra propriedade térmica superficial trata da perda de uma parcela de calor, que foi absorvido pela superfície, através do processo de transferência radiativa na forma de radiação infravermelha de onda longa a qual é denominada emitância térmica.

Dessa forma, os materiais frios, que possuem alta refletância solar e elevada emitância térmica, têm ganhado uma aceitação cada vez maior para a sua utilização de forma difundida e apresentam de acordo com Santamouris *et al.* (2008) potencial para redução da temperatura superficial e ambiente.

À vista disso, a diminuição nas temperaturas superficiais externas como resultado da aplicação destes materiais frios como revestimentos implica em menor fluxo de calor que atravessa os componentes construtivos. Portanto, influencia na redução da temperatura do ar no interior e melhora das condições de conforto térmico, especialmente nas edificações que não possuem sistema de resfriamento artificial.

Em edificações que possuem sistema de ar-condicionado, verifica-se a redução das cargas térmicas para resfriamento, o que diminui o uso de energia com esse propósito, assim como reduz-se o pico da demanda energética para resfriamento e das taxas cobradas pelo serviço, o que para Synnefa e Santamouris (2012) gera uma economia entre 3% a 35% no uso total da eletricidade, o que depende dos níveis de isolamento do teto, a localização do duto e configuração do sótão.

Esta redução de gastos é mais acentuada em edificações com baixos níveis de isolamento e maior área superficial do telhado, em comparação com outras superfícies do edifício, assim como para condições climáticas quentes de acordo com Synnefa e Santamouris (2012) e evidencia para Zinzi e Bozonnet (2012) o potencial direto da utilização desses materiais para edificações típicas com sistemas construtivos de baixo isolamento térmico.

A economia de energia elétrica relacionada com o uso do ar-condicionado, a qual possui valores significativos, ocorre durante o período de verão. Apesar disso, na estação de inverno, as perdas de calor, cuja energia térmica é necessária para o aquecimento, ocasionadas pelos altos valores da refletância solar dos materiais frios, são menos consideráveis para Synnefa e Santamouris (2012) e têm impacto reduzido em relação às economias correspondentes de energia para resfriamento em locais com condições climáticas moderadas e quentes.

Então, além dos benefícios em prover o ambiente construído mais confortável termicamente, os materiais frios também contribuem na redução do consumo energético de equipamentos elétricos para resfriamento. Além do mais, a análise do consumo de energia em uma edificação é considerada por Lamberts, Dutra e Pereira (2014) um fator determinante na decisão dos sistemas de controle ambiental utilizados e importante ferramenta no processo projetual.

Nas edificações térreas, a maior incidência de radiação solar, em razão dos maiores ângulos zenitais da trajetória solar, contribui para a maior intensidade nas superfícies horizontais. Portanto, a cobertura é o sistema que mais recebe energia térmica proveniente do sol, enquanto as fachadas são mais afetadas pela radiação solar em edifícios mais altos, porque os panos

verticais possuem maior área superficial no envelope construtivo do que a cobertura. Dessa forma, o país beneficiar-se-ia largamente através da implantação desses materiais refletivos nos seus edifícios, os quais utilizam técnicas construtivas tradicionais sem isolamento térmico.

Na mesoescala, a ampla utilização de revestimentos frios, às vezes associado com a cobertura vegetal, promove reduções da temperatura do ar no microclima urbano, especialmente durante o dia, porque as superfícies estão mais frias e transferem menos calor por convecção ao ar ambiente. Além do mais, outros benefícios citados por Synnefa e Santamouris (2012) são a redução da poluição do ar e das emissões de gases de efeito estufa, os quais provenientes das usinas elétricas são reduzidos de forma direta em razão da diminuição do consumo de energia para resfriamento e indiretamente pela desaceleração da formação do gás ozônio (O_3), o qual produz uma neblina com fumaça, quando há menores temperaturas do ar.

Dessa forma, os materiais frios, que são altamente refletivos, são definidos de acordo com Santamouris, Synnefa e Karlessi (2011, p. 3086, tradução nossa) como

Uma técnica passiva, ambientalmente amigável e econômica que contribui para alcançar a eficiência energética em edifícios ao reduzir a demanda de energia para resfriamento e melhorar o microclima urbano, diminuindo as temperaturas da superfície e do ar.

Segundo o 5º relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas, a substituição de um telhado escuro ($\rho = 0,15$) por um branco envelhecido ($\rho = 0,55$), o que acarreta o aumento de 40% na refletância solar, produz uma compensação de dióxido de carbono (CO_2) entre 1 a 2,5 toneladas (t) para cada 10 m^2 de área de telhado e, na escala global, esse potencial pode alcançar valores de 78 a 100 Giga toneladas (Gt) de CO_2 (IPCC, 2014), o que segundo Synnefa e Santamouris (2012) gera uma força radiativa negativa significativo para a mitigação do aquecimento global.

Por isso, em razão dos benefícios mencionados da sua aplicação e da ausência ou inconfiabilidade dos dados acerca das propriedades térmicas fornecidos pelos fabricantes, pretende-se contribuir com informações fidedignas para auxiliar na escolha mais adequada de revestimentos na especificação técnica dos materiais na envoltória das edificações.

Portanto, neste trabalho, estão apresentados os dados de refletância solar, emitância térmica e temperatura superficial de materiais selecionados no mercado brasileiro que são designados

como frios ou refletivos, além de complementar com informações sobre os parâmetros de cor e a análise microscópica e composicional química das suas superfícies.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar as propriedades óticas, térmicas e químicas de revestimentos frios comercialmente disponíveis no Brasil e sua relação com o desempenho térmico desses materiais para o envelope construtivo de edifícios.

1.1.2 Objetivos específicos

- Mensurar os valores das propriedades óptica-físicas (refletância solar e emitância térmica) para os materiais frios disponibilizados e selecionados no mercado brasileiro;
- Caracterizar a cor dos materiais frios por parâmetros de um sistema cromático e avaliar a influência na refletância em todo o espectro solar e para a região visível;
- Investigar a composição química dos materiais refletivos para identificar os componentes que interferem nas suas propriedades óptica-físicas;
- Caracterizar o comportamento térmico dos materiais refletivos em campo face à radiação solar quando expostos nas mesmas condições ambientais;
- Fornecer subsídios para o desenvolvimento de revestimentos frios para o ambiente construído, aplicáveis à realidade construtiva brasileira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

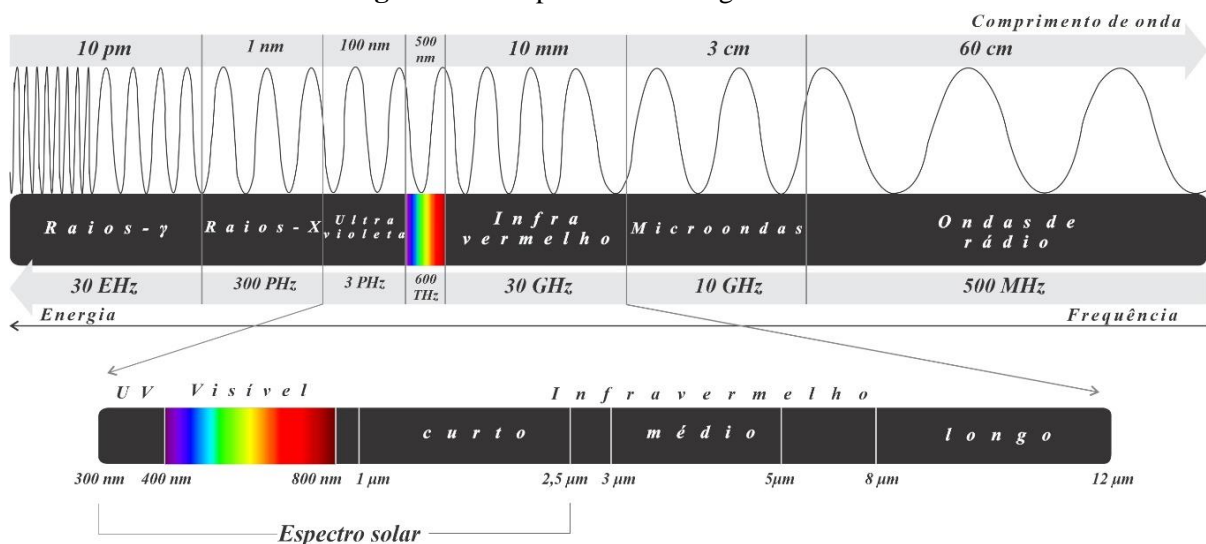
2.1 Radiação eletromagnética

A radiação eletromagnética é uma forma de energia radiante que consiste num campo eletromagnético, o qual propaga-se pelo espaço no vácuo, isto é, sem necessidade de um meio para isso, e ao sofrer absorção por alguma matéria transforma-se em calor (LADCHUMANANANDASIVAM, 2007a).

2.1.1 Radiação solar

O Sol é a principal fonte de energia do sistema Terra-atmosfera, por causa do processo de fusão termonuclear que ocorre no seu núcleo, em que transforma os átomos de hidrogênio (H) em hélio (He) (PEREIRA *et al.*, 2017). O Sol emite radiação em quase todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético (Figura 2.1). Contudo, os raios- γ , raios-X, a radiação infravermelha térmica, as microondas e ondas de rádio representam apenas 1% do total (YAMASOE; CORRÊA, 2016). Dessa forma, a radiação solar (250 a 2.500 nm) constitui-se praticamente da radiação ultravioleta, visível e infravermelha próxima.

Figura 2.1 – Espectro eletromagnético solar



Fonte: Adaptado de Singh *et al.* (2020).

A radiação ultravioleta é produzida em grande quantidade pelo Sol e abrange o intervalo espectral entre 100 e 400 nm, a qual é bastante energética, e encontra-se muito próxima aos raios-X e raios- γ . As suas subdivisões são o UV-A (315 a 400 nm), UV-B (280 a 315 nm) e UV-C (100 a 280 nm), potencialmente a sub-região mais danosa aos seres humanos. A partir de 300 nm, causa desbotamento nas superfícies e auxilia na sintetização da vitamina D, por

causa da absorção na camada fina mais externa da pele humana, porém em longos períodos de exposição solar, provoca queimaduras e envelhecimento precoce.

A radiação visível, ou simplesmente a luz, é segundo Yamasoe e Corrêa (2016, p. 13) “qualquer radiação capaz de causar diretamente uma sensação visual”. O intervalo espectral desta região não é bem definido, porque existem outras variáveis, como o fluxo radiativo emitido pela fonte de luz, em Watts (W), e a sensibilidade ocular do observador, os quais influenciam na visualização do objeto. Portanto, Yamasoe e Corrêa (2016) consideram como limite inferior e superior, respectivamente, entre 360 e 400 nm e de 760 a 830 nm, mas a Comissão Internacional de Iluminação (CIE) restringe-a apenas entre 360 e 780 nm.

A existência material da cor só é possível para Pedrosa (1982) em razão da existência simultânea de dois elementos. Primeiro, da luz que atua como um estímulo físico a partir do qual o feixe luminoso, que pode ser direto ou refletido, estimula o segundo elemento: o olho humano. Este é o órgão fisiológico receptor, responsável pela visão, cujo feixe é decomposto na retina, e a resposta visual é encaminhada das células nervosas ao cérebro, que decifra a sensação da cor a qual este objeto aparenta-se ter sobre uma superfície qualquer.

No entanto, Ladchumananandasivam (2007b) acrescenta que o objeto constitui-se também em elemento importante, porque as propriedades da sua superfície influenciam quais comprimentos de onda da radiação são refletidos por esta substância material. Então, a cor de um objeto depende da luz, a qual é emitida por uma fonte, das suas propriedades superficiais e do observador. Logo, conclui-se que os objetos e corpos não têm cor, pois de acordo com Pedrosa (1982) a cor não é uma propriedade intrínseca das substâncias e, portanto, trata-se de um fenômeno subjetivo (LADCHUMANANANDASIVAM, 2007b).

Para a identificação de forma precisa e objetiva para fins científicos das cores foram criados sistemas de referência para a organização e descrição delas. O mais bem sucedido foi desenvolvido por Albert Munsell e adotado em 1942 pela norma norte-americana como padrão na avaliação cromática por meio de três características: o matiz, valor e croma (PEDROSA, 1982).

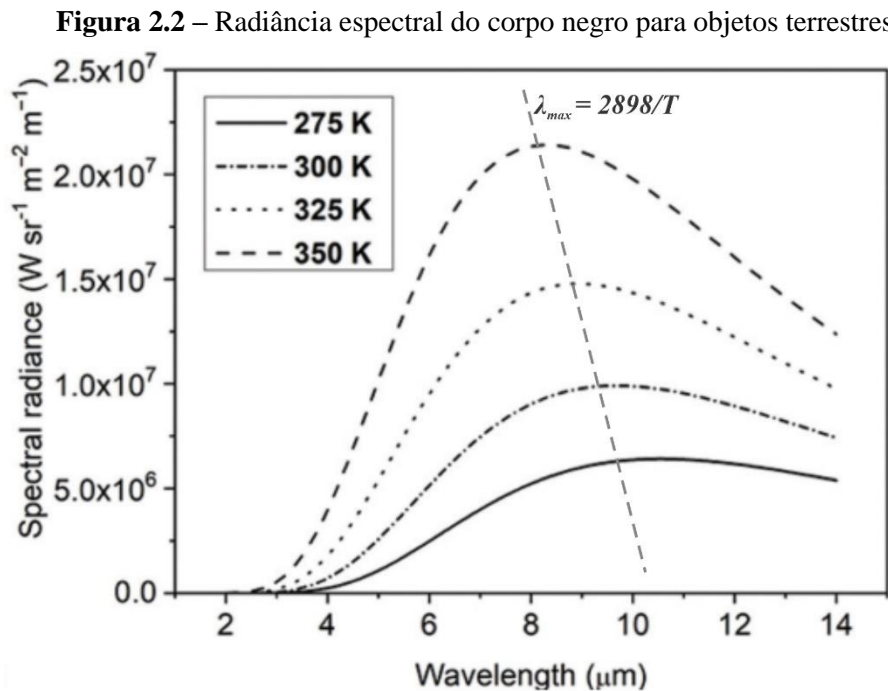
Por fim, a radiação da banda infravermelha, que compõem o espectro solar, está na região entre 1.000 nm a 2.500 nm, isto é, em comprimentos de onda menores. Por este motivo é conhecida como “infravermelho de ondas curtas” ou pela proximidade aos outros componentes da radiação solar de “infravermelho próximo”. As outras regiões que são subdivididas em

infravermelho de ondas médias (3.000 a 5.000 nm) e de ondas longas (8.000 a 12.000 nm) fazem parte do denominado “infravermelho térmico”.

2.1.2 Radiação térmica

A radiação térmica é emitida pela superfície de qualquer matéria, quando sua temperatura é superior ao zero kelvin (0 K) absoluto, para um corpo de menor temperatura, e não necessita de meio para propagar-se, ao contrário dos outros dois modos de transferência de calor, a condução e convecção, em que ocorrem pela matéria (ASHRAE, 2017).

Em Lim (2020), os objetos terrestres considerados como corpos negros, que possuem temperaturas variáveis de 275 K a 350 K (2°C a 77°C), emitem radiação térmica na região espectral de 2 a 14 μm (Figura 2.2).



Fonte: Adaptado de Lim (2020).

Portanto, pela representação das curvas, quanto maior a temperatura do corpo, tem-se também maior radiância emitida, porém no ponto em que esse valor é máximo, representado pelos picos que variam entre 8 e 11 μm , ocorrem em menores comprimentos de onda, observando a partir daí uma tendência decrescente nas curvas.

A radiância espectral (L_λ) é definida por Yamasoe e Corrêa (2016) como a potência radiante emitida em uma dada direção de um dado ponto de uma superfície ($\text{W}/\text{sr} \cdot \text{m}^2$). Um corpo denominado “negro” (2016, p. 29-30) é um meio ou substância capaz de absorver toda a

radiação incidente independentemente do comprimento de onda e da direção de incidência sobre si. Portanto, a radiância espectral do corpo negro é a máxima radiação térmica emitida a uma dada temperatura (T), isto é, considera-se um corpo absorvedor perfeito ($\alpha_\lambda = 1$) e um perfeito emissor ($\epsilon_\lambda = 1$).

2.2 Interação da radiação com a matéria

As diversas partes do espectro eletromagnético, que correspondem à diferentes tipos de radiação, ao interagir com a matéria causam efeitos distintos, os quais dependem do tipo da matéria e dos níveis de energia quântica (atômica e molecular) apropriados para a “excitação” de certos tipos de processos físicos (SINGH *et al.*, 2020).

Por exemplo, para Singh et al. (2020) não ocorre nenhum tipo de processo físico quando a radiação apenas “atravessa” o material, porque ela não possui níveis energéticos disponíveis que correspondam à energia quântica dessa radiação, como por exemplo os raios-X e gama (γ) e o corpo humano. A matéria neste caso é considerada “transparente” a essa radiação e é transmitida de forma direta. No caso de correspondência entre as energias da radiação e matéria, acontece algum processo físico, como a absorção, por exemplo, e considera-se o material “opaco”.

2.2.1 Interação da radiação eletromagnética com o material

A emissão das ondas eletromagnéticas fundamenta-se na teoria das vibrações elásticas, as quais propagam-se como uma mola ou fio esticado, com dimensão finita igual ao comprimento de onda (λ), e suas vibrações (ν) aumentam progressivamente de tal forma que tendem ao infinito ($\nu \rightarrow \infty$). Desta forma, pelo exemplo de Feynman, Leighton e Sands (1977) apud Yamasoe e Corrêa (2016), um forno elétrico ligado, o qual emite calor na forma de ondas infravermelhas térmicas ($\nu = 10^{13}$ Hz), e a conseqüente elevação da sua temperatura de forma gradual acarretaria o aumento da frequência infinitamente, as quais transformar-se-iam em outras formas de radiação, como em ondas de raio-X ($\nu = 10^{19}$ Hz).

No entanto, a afirmação não condiz com a realidade e em razão desta distorção, considera-se que a transferência de energia não acontece na forma de onda eletromagnética, mas sim como uma corrente de partículas. Esta contém pacotes finitos de energia ou *quanta*, a qual foi pressuposta pelo físico alemão Max Planck e descrita pela teoria quântica ou óptica corpuscular (Equação 2.1). As partículas energizadas, conhecidas como fótons, não possuem massa e têm energia bem definida. Por isso, elas são quantificadas na unidade de energia Joule (J) e na escala

molecular tem-se o elétron-volt (eV), o qual indica o quanto uma partícula carrega uma carga eletrônica unitária (e) caso haja uma diferença de potencial de 1 volt (V) (LADCHUMANANANDASIVAM, 2007a). Portanto, como a constante de Planck (h) possui valor fixo, então quanto maior a frequência (ν), e conseqüentemente menor comprimento de onda (λ), resulta em maior carga energética (E), porque elas são grandezas diretamente proporcionais.

$$E = h \cdot \nu \text{ (J)} \quad \dots [2.1]$$

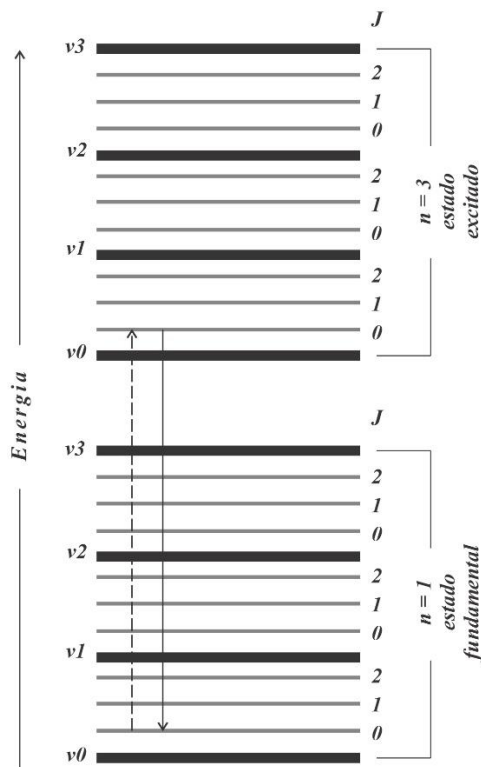
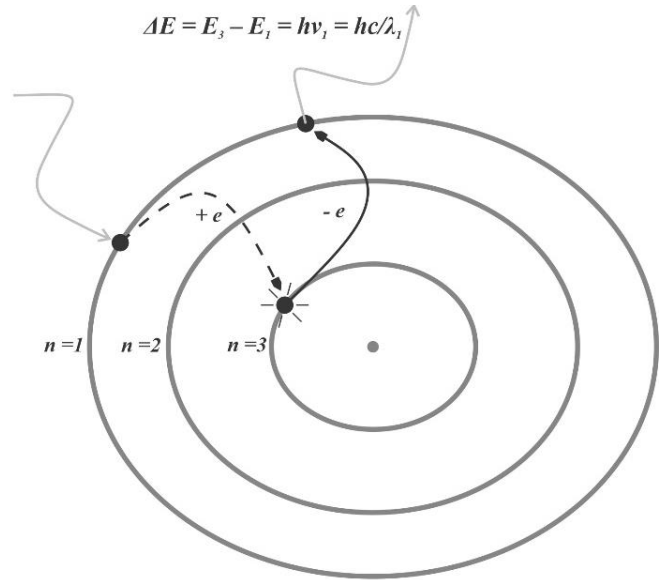
Em que:

- E é a energia representada pelos fótons (J);
- $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ é a constante de Planck (J.s);
- ν é a frequência (Hz).

Então, toda matéria pode apresentar-se na forma de luz e substância, a qual é composta por moléculas. Estas são formadas por átomos, que possuem nêutrons (elemento neutro) e prótons (carga positiva) no núcleo, cujo tamanho é desprezível em relação ao átomo todo, e pelas órbitas elípticas, em número e tamanho estabelecidos, nas quais os elétrons (carga negativa) movem-se ao redor deste centro (PEDROSA, 1982).

Tanto os átomos como íons e moléculas apresentam estados eletrônicos, os quais possuem quantidade definida de energia, e na sua configuração inicial os elétrons encontram-se no estado original ou fundamental ($n = 1$) pela Figura 2.3 (a). Caso uma fonte externa de certa magnitude atravesse a matéria, algumas frequências dos fótons da radiação eletromagnética são absorvidas de forma seletiva pelos elétrons destas partículas, que compõem a substância. Nesta transferência de energia, os elétrons são promovidos para uma camada mais energética e encontram-se em um estado eletrônico denominado “excitado” ($n \geq 2$) na Figura 2.3 (b). Quanto mais níveis eletrônicos existem, mais complexa é a molécula, com relação a um átomo isolado, em que ocorre a transmissão eletrônica.

A dependência da frequência (ν) da energia do fóton e o seu comprimento de onda (λ) são os pontos-chaves para determinar a interação com a matéria (SINGH *et al.*, 2020). Para Pedrosa (1982), os fatores que determinam quais fótons, caracterizados por suas frequências (ν), são absorvidos pela matéria são o núcleo atômico e a carga do campo eletrônico, que está relacionado à quantidade de elétrons e as dimensões das órbitas em que eles transitam, o que é conhecido como seletividade espectral.

Figura 2.3 (a) – Níveis eletrônicos**Figura 2.3 (b)** – Transição eletrônica de um elétron entre níveis energéticos no átomo

Fonte: Adaptado de Ladchumananandasivam (2007a).

Então, as partículas, carregadas eletricamente, energizam-se e estão em movimento, porém elas têm a tendência de retornar ao seu estado original. Desta forma, as partículas “excitadas” relaxam até seu estado fundamental ($n = 1$), cujo nível energético é menor, e ocorre a liberação da energia excedente como fótons, que são emitidos na forma de radiação eletromagnética, na frequência ν_1 como na Figura 2.3 (b). Nas transições eletrônicas, a frequência (ν) ou o comprimento de onda (λ) da radiação estão associados à diferença energética entre os dois estados eletrônicos ($E_3 - E_1$), como pode ser visto na equação 2.2.

$$E = E_3 - E_1 = h \cdot \frac{c}{\lambda_{31}} = h \cdot \nu_{31} \quad \dots [2.2]$$

Da interação da radiação eletromagnética com a matéria, os processos físicos de emissão e absorção ocorrem em um fluxo permanente entre a substância e o meio, a qual está rodeada. Por isso, Pedrosa (1982) afirma que todo átomo tem a capacidade de absorver e emitir energia na forma de luz, que nestas circunstâncias refere-se tanto à luz visível como também à radiação infravermelha. Dwivedi et al. (2020) complementam que as estruturas moleculares, inclusive misturas químicas complexas de moléculas, podem ser determinadas através dos espectros de emissão e absorção da banda infravermelha, tanto no aspecto qualitativo como quantitativo. À

vista disso, a quantidade da energia absorvida varia de acordo com a composição molecular da matéria, como também do tipo de radiação eletromagnética que incide sobre ela, a qual interage com a carga elétrica das partículas constituintes da substância (PEDROSA, 1982).

Então, somente radiações eletromagnéticas com maiores frequências e, portanto, mais energéticas são capazes de realizar transições entre estados eletrônicos. Por exemplo, apenas as frequências dos raios-X são capazes de interagir com os átomos mais próximos do núcleo, enquanto as das radiações ultravioleta e visível causam agitação nas ligações covalentes. Desta forma, os elétrons das camadas mais externas, sigma (σ) e pi (π) ou os não ligantes (n) “excitam-se” e deslocam-se à níveis mais energéticos, também conhecido como orbital não-ligante σ^* ou π^* (LADCHUMANANANDASIVAM, 2007a).

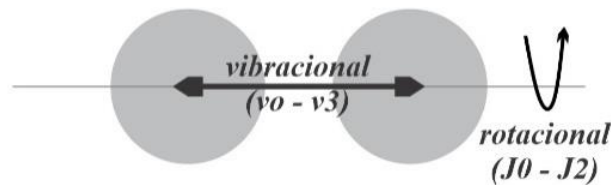
Então, dentre as radiações, da ultravioleta a partir do UV-C ($\lambda \approx 100$ nm), até a região de transição da radiação visível, próximo à banda infravermelha ($\lambda \approx 800$ nm), a energia absorvida varia entre 100 a 1.200 KJ/mol, que corresponde de 1 a 120 eV, e é suficiente para a remoção dos elétrons para entre os níveis energéticos exemplificados acima (LADCHUMANANANDASIVAM, 2007a). Singh et al. (2020) citam os mecanismos químicos responsáveis pela fotossíntese das plantas e a visão humana como outros exemplos de transições eletrônicas na região visível.

A radiação ultravioleta possui energia (≈ 43 eV) superior à energia molecular das partículas dos óxidos metálicos, como o dióxido de titânio (TiO_2), o que provoca a “excitação” do elétron do estado eletrônico fundamental para um nível mais elevado e, por causa disso, Dwivedi et al. (2020, p. 34) denominam o ultravioleta como “radiação de ionização molecular”. Em outro tipo de interação, da radiação visível com os metais semicondutores, ocorre menor desprendimento de energia ($\approx 1,7$ a $3,0$ eV) de forma a tornar os elétrons livres e “promovê-los” do estado de valência a uma banda de condução (DWIVEDI *et al.*, 2020).

As transições eletrônicas não ocorrem com radiações de menores frequências, porque a energia absorvida é suficiente apenas para promover transições vibracional e rotacional, que ocorrem dentro do nível energético, em que os átomos se encontram. Então, de acordo com Singh et al. (2020, p. 02), a radiação que não consegue expulsar elétrons dos átomos do material, ou seja, o efeito que causa é apenas aquecê-lo, é chamado de “radiação não-ionizante”. Nesse caso, a radiação infravermelha provoca apenas a transição de estado fundamental a “excitado” por meio de vibração molecular (DWIVEDI *et al.*, 2020).

A transição vibracional (v_0 a v_3) acontece quando a energia absorvida, proveniente da radiação infravermelha próxima, é capaz apenas de promover interação interatômica, ou seja, aumenta ou diminui a distância entre átomos, o que é conhecido como estiramento ou então causa o encolhimento, em que se modifica o eixo original da ligação. Já a transição rotacional (J_0 a J_2) exige bem menos energia ($\approx 0,005$ eV) (LADCHUMANANANDASIVAM, 2007a), tendo em vista que as partículas rotacionam-se em torno de seus centros de gravidade, o que é provocada pela radiação infravermelha distante e microondas (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Transição vibracional e rotacional do elétron



Fonte: Própria autora.

Portanto, a energia associada à absorção de uma molécula é composta pela adição desses três itens, os quais são vistos na equação 2.3.

$$E = E_{eletrônica} + E_{vibracional} + E_{rotacional} \quad \dots [2.3]$$

Dentre os efeitos, o aquecimento é muito mais evidente no componente vibracional, em que a energia incorporada é decorrente da absorção no infravermelho próximo, do que é observado em qualquer outro tipo de radiação eletromagnética (DIAS; ANDRADE NETO; MILTÃO, 2007).

2.2.2 Interação da radiação solar com a atmosfera

O Sol irradia fluxo de radiação, em Joule (J), na unidade de tempo segundo (s), o que equivale aproximadamente $3,86 \cdot 10^{26}$ Watts (W) em potência radiante, cuja temperatura na sua superfície é cerca de 5.778 K (5.505°C). Contudo a taxa de energia que alcança a Terra é variável por causa de fatores astronômicos no espaço e tempo (PEREIRA *et al.*, 2017).

Dessa forma, a irradiância solar total (G_0) em direção à Terra no topo da atmosfera é um valor aproximado em $1.360,8 \pm 0,5$ W para uma unidade de área (m^2). Nesta situação, considera-se a trajetória dos raios solares perpendicular, à uma distância média entre Terra e Sol, em direção à superfície, considerando-os como feixes colimados e paralelos entre si (YAMASOE; CORRÊA, 2016).

A transferência radiativa pela atmosfera depende da sua constituição, com os quais os diversos comprimentos de onda da radiação eletromagnética solar interagem (PEREIRA *et al.*, 2017). Os componentes atmosféricos, como gases, aerossóis e nuvens variam de acordo com Ladchumananandasivam (2007a), em razão da latitude e estação do ano, das condições climáticas locais e do tempo no dia, como o nível de nebulosidade, por exemplo.

Da interação, originam-se os processos físicos de transmissão, reflexão ou absorção da energia solar, os quais provocam atenuação da irradiância solar no seu percurso em direção à superfície terrestre. De forma geral, considera-se que 5% da radiação solar em aproximação é atenuada por causa da absorção atmosférica (acima de 40 Km) e outros 10 a 15% são absorvidos pelas camadas inferiores da atmosfera ou dispersos de volta ao espaço (SINGH *et al.*, 2020).

A transmissão de forma direta é aquela que não sofre desvio do seu trajeto original ao atravessá-la e denomina-se radiação solar direta. Todavia, na transmissão difusa, ocorre processo de espalhamento da radiação solar, a qual desvia-se da sua direção inicial. Portanto, uma parcela pode ser transmitida, outra absorvida, total ou parcial, quando atravessa a atmosfera, isto é, a energia radiante que foi perdida no “caminho” ocasiona aumento na temperatura do meio atravessado. Por fim, ela pode ser refletida de volta ao espaço, sendo que não alcança a superfície terrestre, e, portanto, não se contabiliza como componente da radiação solar difusa (YAMASOE; CORRÊA, 2016).

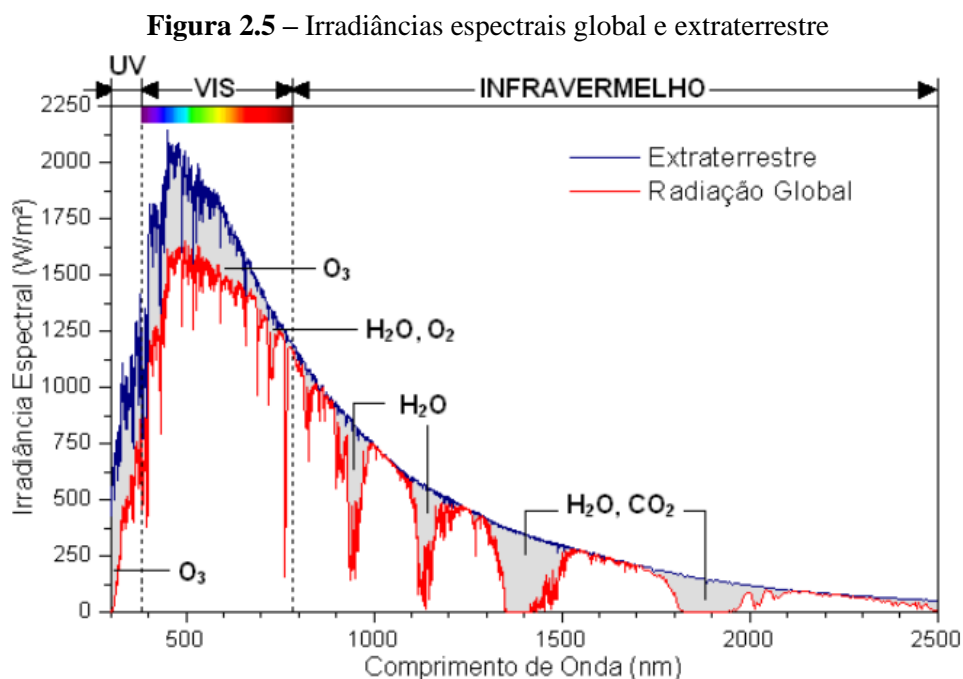
Em relação aos gases atmosféricos, o nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) em camadas acima de 100 Km, na termosfera, absorvem fortemente comprimentos de onda inferiores a 180 nm, os quais correspondem à região UV-C (de 100 a 280 nm) e o UV-B (de 280 a 320 nm), que penetra profundamente na pele, é majoritariamente, dentro do intervalo espectral entre 200 e 300 nm, absorvido pelo gás ozônio (O_3) na estratosfera (SINGH *et al.*, 2020), por isso é de suma importância a manutenção desta camada.

Assim como o ozônio (O_3), o dióxido de carbono (CO_2), cuja concentração é constante e cerca de 0,03% da atmosfera seca terrestre, são denominados “gases-traços” por Pereira et al. (2017, p. 17), porque apesar da baixa concentração desempenham papel essencial na transferência radiativa atmosférica. Este, junto ao vapor d’água (H_2O), o qual varia de 1% nas regiões desérticas e nos polos até 4% nos trópicos úmidos, são gases absorvedores na região da radiação infravermelha de onda curta, a qual é emitida pelo Sol devido à sua elevada temperatura, bem como o oxigênio (O_2).

Portanto, a somatória das parcelas da radiação solar, direta (G_{dir}) e difusa (G_{dif}), em uma superfície horizontal denomina-se irradiância global horizontal, a qual incide na superfície terrestre e alcança valores em cerca de 1.000 W/m^2 ao meio-dia. Nesta hora, o Sol encontra-se na posição perpendicular ao zênite e atravessa a menor espessura da atmosfera, considerando condições sem nebulosidade. Porém, já foi verificado valor de irradiância de até 1.400 W/m^2 por curto espaço de tempo em condições de nebulosidade parcial como consequência de espalhamento por bordas de nuvens ou efeito lente causado pela geometria sol/nuvens/Terra (PEREIRA *et al.*, 2017).

Adotou-se nesta pesquisa uma curva de irradiância espectral da energia solar padrão, empregado pela Sociedade Americana de Testagem e Materiais na norma ASTM G173-03 (ASTM, 2020b), o que foi motivado pela não existência de um espectro específico para a realidade brasileira. Então, a norma utiliza como referência uma superfície inclinada com orientação a 37° Sul, que é a representativa da latitude média de 48° nos EUA, em condições atmosféricas consideradas médias dentro do período de um ano.

Da irradiância espectral (W/m^2), para cada comprimento de onda (λ) da luz solar incidente, em direção à Terra, observa-se na figura 2.5 duas curvas, a azul representa a radiação extraterrestre ou no espaço mais distante, enquanto a vermelha indica a radiação solar global, a qual sofreu atenuação em decorrência do processo de absorção atmosférica, que efetivamente alcança a superfície terrestre.



Fonte: Dornelles (2008).

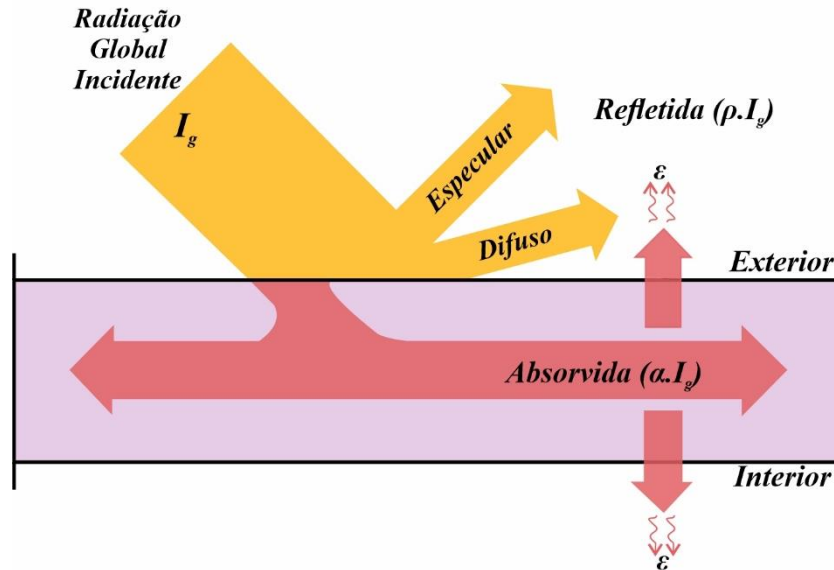
2.2.3 Interação da radiação solar com as superfícies opacas

Para Lim (2020), existem quatro mecanismos reguladores de calor, os quais são absorção, reflexão, transmissão e dispersão, na superfície ao interagir com a radiação solar incidente sobre ela. Pela ASTM C168-22 (2022), para uma superfície opaca, considerando uma situação de equilíbrio, a soma da refletância e da absorptância é a unidade, logo a transmissão de calor diretamente é nula ($\tau = 0$) (Equação 2.4).

$$\alpha + \rho + \tau = 1, \forall \tau = 0 \therefore \alpha + \rho = 1 \quad \dots [2.4]$$

Então, após a interação, a parcela de radiação absorvida aquece o material e transfere a energia térmica por meio do processo de condução para o ambiente interior. Portanto, o restante não absorvido, isto é, a porção da radiação refletida interage com as superfícies adjacentes e o ar ao redor desta superfície e promove troca calor com estes, aquecendo-os (LIM, 2020). Além do mais, perde-se calor também nas faces externa e interna do material por radiação térmica, a qual está representada pelo coeficiente ε (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Radiação solar incidente sobre uma superfície opaca



Fonte: Adaptado de Dornelles (2008).

Portanto, a seguir estão discutidas as definições sobre as propriedades radiantes das superfícies e parâmetros considerados aceitáveis pela norma de desempenho NBR 15.575 em edificações residenciais para sistemas de vedação vertical (ABNT, 2021b) e cobertura (ABNT, 2021c).

2.2.3.1 Propriedades radiantes

Nesta pesquisa, por tratar-se de superfícies frias ou refletivas, faz-se menção ao mecanismo da reflexão, logo os seus termos subjacentes também. De acordo com a definição da NBR 15.220-1 (2005a, p. 03), a **refletância** à radiação solar (ρ) relaciona-se ao “quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície”. Na ASTM C168-22 (2022, p. 05) o conceito de **refletância** refere-se “a fração da radiação incidente sobre uma superfície que é refletida da superfície”. O conceito de **emitância** (E) como a “taxa de emissão de radiação por unidade de área” na unidade W/m^2 definido pela NBR 15.220-1 (2005a, p. 03) coincide com a definição de irradiância total emitida por um corpo real (E) pela lei de Stefan-Boltzmann. Então, pode-se calculá-la em relação ao corpo negro (E_B) como observado na equação 2.5.

$$E = E_B \cdot \varepsilon = \sigma \cdot T^4 \cdot \varepsilon \quad (W/m^2) \quad \dots [2.5]$$

Em que:

- E é a irradiância total emitida por um corpo real (W/m^2);
- E_B é a irradiância do corpo negro (W/m^2);
- ε é o coeficiente de emissividade total hemisférica (adimensional);
- $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ é a constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2 \cdot K^4$);
- T é a temperatura absoluta do corpo (K).

A **emissividade** total hemisférica (ε) é definida pela NBR 15.220-1 (2005a, p. 03) como o “quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura”. Este coeficiente depende das características da superfície, o qual relaciona-se à natureza dos materiais subjacentes, o seu arranjo microscópico e a temperatura absoluta do corpo.

Pela terminologia da norma ASTM C168-22 (2022, p. 03) a **emitância** (ε) que é “a razão entre o fluxo radiante emitido por uma amostra e o emitido por um corpo negro na mesma temperatura e sob as mesmas condições”, em que entende-se sob as mesmas condições espectrais e geométricas de medição. Para cálculos de engenharia, a ASTM C168-22 (2022) sugere a adoção da propriedade total, cujo termo designado é **emitância** hemisférica total (ε_{HT}) que corresponde ao valor direcional médio sobre um envelope hemisférico que cobre uma superfície com todos os comprimentos de onda da energia radiante emitida integrados.

Através da discussão na norma ASTM E772-15 (2021) compreende-se que a propriedade da **refletividade** trata do material, a qual não sofre alteração por exemplo ao aumentar ou reduzir a espessura da sua camada enquanto a **refletância** trata-se da propriedade de uma amostra do material, a qual não se limita à espessura ou topografia da sua superfície. Como nota-se, não há consenso na literatura a respeito das definições acerca das propriedades radiantes, as quais destoam especialmente na utilização dos sufixos.

Para Roriz, Caram e Roriz (2011), a **absortividade** e **emissividade** então são propriedades dos materiais e a **absortância** e **emitância** são características da superfície, a qual é composta não apenas pelo material de constituição, mas também pelo seu acabamento superficial e geometria, que se refere tanto a rugosidade como a ondulação. Estas características, muitas vezes ignoradas, podem causar interreflexões e sombras nas superfícies e assim alterar o comportamento das superfícies aos fluxos por radiação.

Portanto, considera-se na norma ASTM C168-22 (2022) os termos **absortividade**, **refletividade** e **emissividade** como restritos aos materiais, cujas superfícies são opticamente planas e opacas, porque segundo Roriz, Caram e Roriz (2011) elas não oferecem dificuldade à troca radiativa de calor. Pode-se considerar então os conceitos de **refletividade** e **refletância** equivalentes ao tratar-se de superfícies perfeitamente planas e lisas, como é o caso na pesquisa, a qual não se objetiva analisar a influência de aspectos como a geometria ou acabamento superficial. Então, adotou-se os termos **refletividade** e **emissividade** ao tratar dos materiais e **refletância** solar e **emitância** térmica ao fazer referência às superfícies opacas.

Os métodos de medição das propriedades térmicas dos materiais e elementos construtivos são indicados pela norma NBR 15.575-1 (2021a). Para a absortância solar são recomendados a utilização dos métodos descritos nas normas americanas ASTM C1549 (refletômetro solar portátil), ASTM E903 (espectrofotômetro) ou ASTM E1918 (albedômetro ou piranômetro), considerando as três faixas do espectro UV-VIS-NIR, e na emitância indica-se a norma ASTM C1371 (emissômetro portátil).

A norma divulga formas de analisar o desempenho térmico das edificações residenciais, sendo uma delas o método simplificado, o qual utiliza como referência pré-requisitos. Em caso da não obtenção de níveis satisfatórios no desempenho, deve-se recorrer ao método de simulação computacional. A seguir, apresentam-se os níveis máximos de transmitância térmica (U) aceitáveis, associados a valores de absortância solar (α), a serem adotados nas vedações

verticais externas (Tabela 2.1) e coberturas (Tabela 2.2), de acordo com o zoneamento bioclimático brasileiro, apresentado na NBR 15220-3 (2005b).

Tabela 2.1 – Transmitância térmica de referência para paredes externas

Transmitância térmica de paredes (U_{par}) [W/ (m ² .K)]		
Zonas bioclimáticas 1 e 2	Zonas bioclimáticas 3 a 8	
$U_{par} \leq 2,7$	$\alpha_{par}^a \leq 0,6$	$\alpha_{par} > 0,6$
	$U_{par} \leq 3,7$	$U_{par} \leq 2,5$

^a α_{par} é a absorptância à radiação solar da superfície externa da parede. Recomenda-se a consideração da degradação do desempenho desta superfície, conforme ABNT NBR 15.575-1:2021, 11.2.

Os limites de α_{par} estabelecem a transmitância térmica de referência que deve ser considerada nas paredes externas.

Fonte: ABNT (2021b).

Tabela 2.2 – Transmitância térmica de referência para coberturas

Transmitância térmica de paredes (U_{cob}) [W/ (m ² .K)]				
Zonas bioclimáticas 1 e 2	Zonas bioclimáticas 3 a 6		Zonas bioclimáticas 7 e 8	
$U_{cob} \leq 2,30$	$\alpha_{cob}^a \leq 0,6$	$\alpha_{cob} > 0,6$	$\alpha_{cob} \leq 0,4$	$\alpha_{cob} > 0,4$
	$U_{cob} \leq 2,3$	$U_{cob} \leq 1,5$	$U_{cob} \leq 2,3.FT^*$	$U_{cob} \leq 1,5.FT$

^a α_{cob} é absorptância à radiação solar da superfície externa da parede. Recomenda-se a consideração da degradação do desempenho desta superfície, conforme ABNT NBR 15.575-1:2021, 11.2.

Os limites de α_{cob} estabelecem a transmitância térmica de referência que deve ser considerada nas paredes externas.

* FT é o fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas (adimensional).

Fonte: ABNT (2021c).

A norma recomenda adotar o valor de absorptância considerando o efeito ao longo do tempo de eventual degradação superficial, o qual sofre alteração, como por exemplo, em tintas e plásticos, os quais sofrem deposição de poeira e o crescimento de fungos e bactérias (ABNT, 2021a).

Para isso, estabelece duas formas de avaliação da absorptância degradada em função do tempo de exposição sendo por meio do estudo (i) do produto em uso com a inspeção sistemática de uma amostra representativa em condições de exposição relevante no edifício ou (ii) de corpos de prova com pequenas dimensões do revestimento, aplicado sobre o mesmo substrato, envelhecidos naturalmente em estações na inclinação de 45° Norte em condições climáticas semelhantes ao do local de implantação do edifício.

Além do mais, a norma NBR 15.575-1 (2021a) apresenta também uma solução empírica (Equação 2.6), supondo-se três anos de envelhecimento natural para a superfície exposta de forma a obter-se o valor de absorptância solar degradado.

$$\alpha_{t=3} = 0,07. (\alpha_{t=0})^2 + 0,59. \alpha_{t=0} + 0,27 \quad \dots [2.6]$$

Em que:

- $\alpha_{t=3}$ é a absorptância à radiação solar da superfície externa após degradação de três anos (adimensional);
- $\alpha_{t=0}$ é a absorptância à radiação solar inicial da superfície externa (adimensional);
- t é o tempo de exposição da superfície, expresso em anos.

2.2.3.2 Efeito da carga térmica nas superfícies opacas

Por causa da parcela absorvida da radiação solar, a taxa de fluxo de calor (Q), em um dado intervalo de tempo (t), é transmitida por meio do processo de condução através de um fechamento. Para Frota e Schiffer (2001), o fenômeno ocorre em consequência de dois fatores (i) a diferença de temperatura (ΔT) entre as faces do elemento construtivo e (ii) a sua resistência térmica (R_t), que representa a oposição à passagem do fluxo de calor em uma unidade superficial (m^2) (Equação 2.7).

$$Q_{(t)} = \frac{T_{ext(t)} - T_{int(t)}}{\left(\frac{1}{h_e} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_i}\right) \cdot A} \therefore Q_{(t)} = \frac{T_{ext(t)} - T_{int(t)}}{(R_{se} + R_t + R_{si}) \cdot A} \therefore Q_{(t)} = \frac{\Delta T_{(t)}}{R_T \cdot A} \therefore Q_{(t)} = \frac{\Delta T_{(t)}}{U \cdot A} \therefore$$

$$Q_{(t)} = \Delta T_{(t)} \cdot U \cdot A \text{ (W)} \quad \dots [2.7]$$

Em que:

- t é a hora do dia (h);
- T_{ext} e T_{int} são as temperaturas do ar externo e interno, respectivamente (K);
- h_e e h_i são os coeficientes de condutância térmica superficial dos ambientes externo e interno, respectivamente ($W/m^2.K$);
- e é a espessura do fechamento (m);
- λ é a condutividade térmica ($W/m.K$);
- A é a área da superfície (m^2);
- R_{se} e R_{si} são as resistências térmicas superficiais externa e interna, respectivamente ($m^2.K/W$);
- R_t é a resistência térmica do elemento construtivo ($m^2.K/W$);
- R_T é a resistência térmica total ($m^2.K/W$);
- U é a transmitância térmica ($W/m^2.K$).

De acordo com a NBR 15.220-1 (2005a, p. 01), a taxa ou apenas fluxo de calor é o “quociente da quantidade de calor que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo pela duração

desse intervalo”. Então, pela equação 2.7 representa-se uma situação que está delimitada por um marco temporal (t), o que constitui um regime transitório ou variável.

No entanto, a resistência térmica total (R_T) ou a sua propriedade inversa, a transmitância térmica (U), são determinadas em condições de estado estacionário, isto é, não apresentam alterações no tempo. Portanto, elas não retratam o comportamento dinâmico de uma superfície constantemente exposta ao ciclo de radiação solar. Desta forma, observa-se que a radiação solar influencia diretamente na elevação da temperatura externa (T_{ext}), e como consequência, torna-se o principal parâmetro para o aumento do fluxo de calor (Q_t) que parte em direção ao ambiente interno.

Por causa disso, a temperatura do ar externo (T_{ext}) é melhor representada pela temperatura *Ar-Sol* (T_{ar-sol}), a qual refere-se à temperatura externa fictícia, e de acordo com Pisello e Rosso (2016) equivale à mesma quantidade de calor transferido pelo elemento quando a superfície externa está exposta à radiação solar incidente (E_{sol}). Portanto, também se incluem as trocas de calor efetuadas por processos de convecção (hc_e), através do vento, e de radiação (hr_e), com o céu e as superfícies circundantes a esta. A somatória dos coeficientes, representativos destes processos de intercâmbio de energia ($hc_e + hr_e$), apresentado na equação 2.7, resulta no coeficiente de condutância térmica superficial externa (h_e).

As variações horárias que ocorrem com a irradiância solar (E_{sol}) ao longo do dia, representada por (t) alteram substancialmente os valores da temperatura *Ar-Sol* (T_{sol-ar}). Por exemplo, durante o período noturno, em que cessa a influência da radiação solar ($E_{sol} = 0$), a T_{sol-ar} equivale à temperatura do ar externo (T_{ext}), em contrapartida, aumenta-se gradualmente a partir do nascer do Sol, alcança o seu valor máximo ao meio dia ($t = 12$ h), em uma superfície horizontal, e por fim, declina-se até o pôr-do-Sol, o que caracteriza um “padrão de evolução temporal periódica” conforme afirmam Muscio e Akbari (2017, p. 187).

Além do parâmetro mais influente, a irradiância solar (E_{sol}), nota-se pela equação 2.8 que quanto maior o valor de refletância solar (ρ_{sol}) da superfície e/ou maior coeficiente de condutância térmica superficial externa (h_e), ocorre diminuição da T_{ar-sol} , e, logo, evita-se maiores ganhos de calor para o ambiente interno. Em áreas urbanas, Frota e Schiffer (2001) aconselham adotar a velocidade do vento baixa ($v_{ar} = 2$ m/s), e em casos especiais $v_{ar} = 3$ m/s, de forma que o componente convectivo (hc_e) tem menor impacto nas trocas de calor do que o radiativo (hr_e), relacionado à emitância térmica (ε) da superfície externa.

$$T_{ar-sol}(t) = T_{ext}(t) + \frac{(1-\rho_{sol})}{h_e} \cdot E_{sol}(t) \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \dots [2.8]$$

Em que:

- t é a hora do dia (h);
- ρ_{sol} é a refletância solar da superfície ($0 < \rho_{sol} < 1$);
- $(1 - \rho_{sol})$ equivale à absorptância solar da superfície α_{sol} ($0 < \alpha < 1$);
- h_e é o coeficiente de condutância térmica superficial externa ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);
- E_{sol} é a irradiância solar global incidente (W/m^2).

A partir do quociente da taxa de fluxo de calor (Q_t) pela área (A), ao reescrever a equação 2.7 substituindo a T_{ext} pela T_{ar-sol} determina-se a densidade de fluxo de calor (q) pela equação 2.9. Segundo a definição da NBR 15.220-1 (2005a, p. 01) a densidade é o “quociente do fluxo de calor que atravessa uma superfície pela área dessa superfície”. Agora, trata-se de um regime permanente, não mais variável, porque adotou-se a constante solar (E_g), que representa um valor padrão de irradiância solar global incidente, de forma que as temperaturas *Ar-Sol* (T_{ar-sol}) e interna (T_{int}) não sofrem alterações em função do tempo (t).

$$Q_t = \Delta T_t \cdot U \cdot A \quad \therefore \quad \frac{Q_t}{A} = U \cdot \Delta T_t \quad \therefore \quad q = U \cdot (T_{sol-ar} - T_{int}) \quad \therefore$$

$$q = U \cdot \left(T_{ext} + \frac{\alpha_{sol} \cdot E_g}{h_e} - T_{int} \right) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad \dots [2.9]$$

Então, logo após a passagem de calor por dentro do fechamento, assume-se que as faces do elemento se encontram à mesma temperatura, pela lei zero da termodinâmica. Portanto, o equilíbrio térmico de um elemento opaco, que esteja exposto à radiação solar, é descrito pela equação 2.10.

$$(1 - \rho_{sol}) \cdot I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{sup}^4 - T_{céu}^4) + h_c \cdot (T_{sup} - T_{ar}) - \lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad \dots [2.10]$$

Em que:

- ρ_{sol} é a refletância solar da superfície irradiada ($0 < \rho_{sol} < 1$);
- $(1 - \rho_{sol})$ equivale à absorptância solar da superfície irradiada α ($0 < \alpha < 1$);
- I é a irradiância solar (W/m^2);
- ε é a emissividade superficial ($0 < \varepsilon < 1$);
- $\sigma = 5,6685 \cdot 10^{-8}$ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W/m}^2 \text{K}^4$);

- T_{sup} , $T_{\text{céu}}$ e T_{ar} são as temperaturas absolutas da superfície dada, aparente do céu e absoluta do ar, respectivamente (K);
- h_c é o coeficiente de convecção ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$);
- λ é a condutividade térmica da superfície ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$);
- dT/dx é o gradiente de temperatura da camada superficial, o que representa a mudança de temperatura na direção “x” considerada.

Logo, desconsidera-se na equação 2.10 a última variável (dT/dx), porque trata-se da passagem de calor por condução dentro do fechamento, isto é, o fluxo térmico unidirecional, perpendicular à superfície. Para Akbari, Levinson e Berdahl (1996), a temperatura superficial (T_{sup}) em condições de estado estacionário está intrinsecamente relacionada às propriedades radiantes superficiais, as quais são a refletância solar (ρ) e emitância térmica (ϵ). Pisello (2017) complementa ainda que para superfícies com isolamento térmico, as quais possuem baixíssimos valores de condutividade térmica (λ), a refletância solar é a principal propriedade térmica que afeta a temperatura superficial, durante as horas do dia, enquanto à noite, sem a influência da radiação solar, esta sofre maior impacto da emitância térmica (ϵ).

Além disso, recomenda-se que a superfície exposta deve estar seca e perfeitamente isolada por baixo e as seguintes condições ambientais e o padrão solar sejam adotados conforme a tabela 2.3 (AKBARI; LEVINSON; BERDAHL, 1996). O coeficiente convectivo (h_c) varia de acordo com a velocidade do vento e determinada como intermediária ($2 \text{ m/s} < v_{\text{ar}} < 6 \text{ m/s}$) pelos autores.

Tabela 2.3 – Parâmetros ambientais adotados para a determinação da temperatura superficial

I	T_{ar}	$T_{\text{céu}}$	h_c
1000 W/m^2	310 K (37°C)	300 K (27°C)	12 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k}$

Fonte: Akbari, Levinson e Berdahl (1996).

Desta forma, pode-se estimar a temperatura de estado estacionário de qualquer superfície (T_{sup}), em Kelvin (K), de acordo com a equação 2.11, nas circunstâncias em que os valores de refletância solar (ρ_{sol}) ou então absorptância solar (α), isto é, que trata do seu complemento à unidade ($\rho_{\text{sol}} = 1 - \alpha$), e a emitância térmica (ϵ) já tenham sido mensurados.

$$T_s(K) = 310,04 + 82,49 \cdot \alpha - 2,82 \cdot \epsilon - 54,33 \cdot \alpha \cdot \epsilon + 21,72 \cdot \alpha \cdot \epsilon^2 \quad \dots [2.11]$$

Então, Akbari, Levinson e Berdahl (1996), a partir de dois corpos de referência, sendo um preto ($\rho_{\text{sol}} = 0,05$; $\epsilon = 0,9$) e outro branco ($\rho_{\text{sol}} = 0,8$; $\epsilon = 0,9$), resolveram-na, nos quais são obtidos os respectivos valores de temperaturas superficiais: 355,61 K (82,6°C) e 317,76 K (44,7°C). Logo, quanto maior o valor de refletância solar (ρ_{sol}), e consequentemente menor absorptância

solar (α), tem-se menor temperatura da superfície, considerando o mesmo valor de emitância térmica ($\varepsilon = 0,9$). Quanto menor este valor, pressupõe-se maiores temperaturas superficiais, tendo em vista que o corpo não perderá facilmente calor na forma de radiação de onda longa e, portanto, ficará retido na superfície.

Diante do exposto, propôs-se o índice de refletância solar SRI (*Solar Reflectance Index*), o qual associa os efeitos conjuntos das propriedades radiantes superficiais, isto é, a refletância solar (ρ_{sol}) e emitância térmica (ε) para superfícies planas ou pouco inclinadas (AKBARI; LEVINSON; BERDAHL, 1996). Observa-se por este parâmetro o quanto a diminuição da temperatura da superfície analisada (T_s) em relação ao corpo preto (T_p) é análoga à diminuição no tocante ao corpo branco (T_b), sendo expresso pela equação 2.12, na forma de porcentagem, cujo índice varia de zero (tão quente como um corpo preto) até 100 (tão frio quanto um corpo branco).

$$SRI = \frac{T_p - T_s}{T_p - T_b} \cdot 100 (\%) \quad \dots [2.12]$$

Ou então, ela pode ser reescrita, como na equação 2.13, substituindo-se já os valores das temperaturas dos corpos de referência preto ($T_p = 82,6^\circ \text{C}$) e branco ($T_b = 44,7^\circ \text{C}$), em graus Celsius ($^\circ\text{C}$), que foram previamente calculados, sendo referentes às superfícies de alta emitância térmica ($\varepsilon = 0,9$).

$$SRI = 218 - 2,64 \cdot T_s (\text{ }^\circ\text{C}) (\%) \quad \dots [2.13]$$

O índice de refletância solar (SRI) é considerado um bom predictor para superfícies que tenham emitância térmica elevada ($\varepsilon > 0,8$), ou seja, as não metálicas, porque não ocorrem alterações significativas no indicador quando modificam-se as condicionantes ambientais, como as temperaturas do ar e do céu (T_{ar} e $T_{céu}$) e a velocidade do vento (h_c), por exemplo (AKBARI; LEVINSON; BERDAHL, 1996).

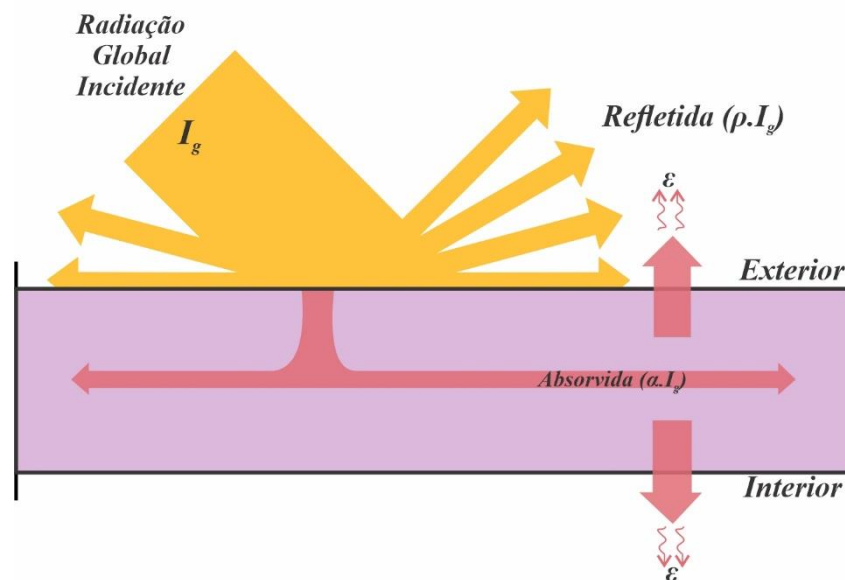
Embora trate-se de superfícies adiabáticas, porque não se considera quaisquer trocas de calor, isto não se torna uma limitação, porque a condutividade térmica (λ), a qual representa a passagem de calor por condução pelo fechamento, é de uma a duas ordens de magnitude inferior em relação à irradiância solar (I) como argumentam Muscio e Akbari (2017). No entanto, em superfícies metálicas não oxidadas, cujo valor de emitância térmica (ε) é muito baixo, Akbari, Levinson e Berdahl (1996) não recomendam utilizá-lo, porque o índice varia consideravelmente dependendo das condições ambientais.

Portanto, tanto a refletância solar (ρ) como a emitância térmica (ε) têm papel fundamental na determinação da temperatura superficial do envelope construtivo, o qual é influenciado diretamente pela radiação solar, e como consequência na densidade de fluxo de calor nas edificações, do ambiente externo ao interno, o que impacta o desempenho termoenergético das edificações.

2.3 Superfícies frias

De acordo com Pisello (2017), um revestimento frio caracteriza-se pela alta refletância dos componentes especular e difuso na região do espectro solar combinado à alta emitância térmica da superfície, que corresponde à emissão do calor na forma de radiação infravermelha de onda longa. Pela definição do Consórcio brasileiro de superfícies frias, estas superfícies possuem baixa absorvância e alta refletância da radiação solar, ou seja, aquecem menos que uma superfície convencional com o mesmo acabamento. Portanto, reduz-se a sua temperatura superficial e, portanto, a passagem de calor por condução através do envelope construtivo para o ambiente interior (Figura 2.7).

Figura 2.7 – Radiação solar incidente sobre uma superfície opaca “fria”



Fonte: Própria autora.

A dispersão da luz, que é considerada por Lim (2020) também como um mecanismo regulador de calor é uma forma de reflexão difusa e principal responsável pelo resfriamento em tintas frias. Portanto, em razão da natureza difusa da reflexão, a energia térmica, não desejável, dispersa-se para longe das edificações e do ar ao redor, e, portanto, não os aquece (Figura 2.7).

A dispersão apenas é eficiente quando o tamanho das partículas desta superfície é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação visível e infravermelha próxima (LIM, 2020), cujo fenômeno também é influenciado pela distribuição e forma destas partículas (DWIVEDI *et al.*, 2020).

2.3.1 Regulamentação

2.3.1.1 Internacional

O CRRC (*Cool Roof Rating Council*) é uma organização nacional dos Estados Unidos que envolve pessoas interessadas em coberturas frias no ramo da pesquisa, indústria e elaboradores de políticas públicas. O Conselho fornece a definição de termos técnicos e protocolos de padronização de métodos confiáveis e precisos para a avaliação das propriedades radiativas dos telhados e fachadas frias descritos na norma ANSI/CRRC S100 (2021) a qual foi aprovada pela ANSI (*American National Standards Institute*).

Para os produtos com pedidos de classificação no CRRC é necessário a medição inicial da refletância solar e emitância térmica em algum laboratório independente credenciado. Também se exige a realização dos testes de envelhecimento para averiguar os efeitos da sujidade e do intemperismo, pelo qual o material passou após três anos de exposição, o qual afeta o seu desempenho térmico, seja em laboratórios credenciados ou em fazendas de testes aprovadas.

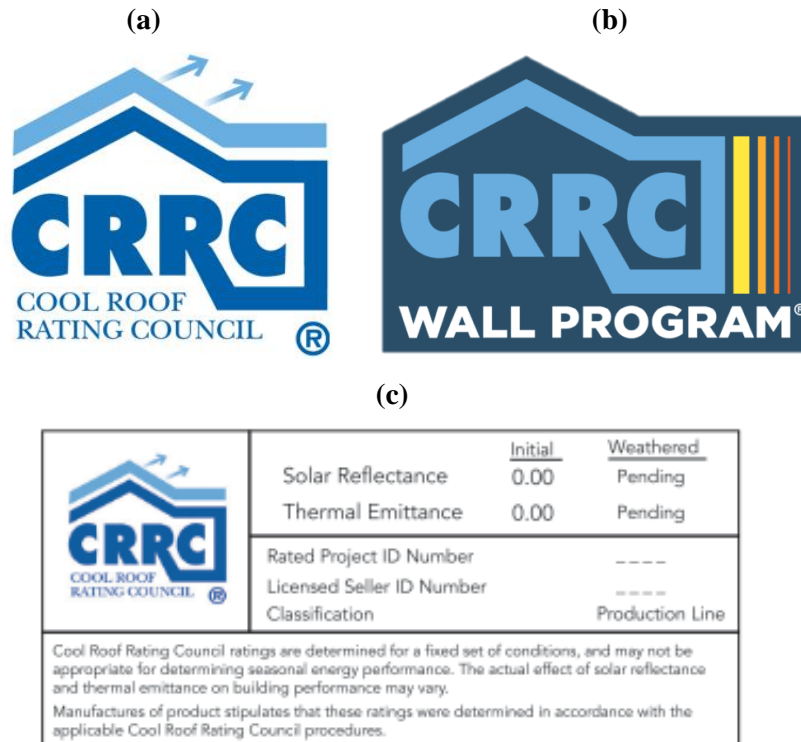
Portanto, exige-se o licenciamento ao programa de telhado e/ou fachada frios, respectivamente, como nos rótulos nas Figura 2.8. (a) e (b) ao produto que utilize o logotipo do CRRC e para a afixação da etiqueta como exemplificado na Figura 2.8 (c), apenas no programa telhado frio até o momento, torna-se necessário a assinatura do contrato de logotipo do produto classificado.

O número de identificação do produto, além da marca, modelo, fabricante, tipo, cor e os resultados obtidos dos testes iniciais e envelhecidos, incluso o índice de refletância solar (SRI) estão divulgados no diretório de produtos avaliados (CRRC, 2023b) (CRRC, 2023c). No dia 31 de maio de 2023, no extenso banco de dados existem 3.016 produtos para telhados frios e apenas 87 materiais para fachadas.

A classificação dos produtos pelo CRRC não está condicionada ao atendimento de valores mínimos ou máximos de refletância solar e de emitância térmica, isto é, não depende do seu desempenho radiativo, contanto que sejam testados de acordo com os Manuais do Programa de Classificação de Produto CRRC-1 (2022a) e CRRC-2 (2022b). Portanto, o Conselho não é

responsável pela certificação, porque implica que um produto atenda ou exceda um padrão e estes requisitos para as propriedades radiativas variam de acordo com as jurisdições.

Figura 2.8 (a) – Rótulos de logo para produtos de telhado frio licenciado pelo CRRC e **(b)** para fachada fria licenciado pelo CRRC; **(c)** Etiqueta de produto para telhado frio classificado pelo CRRC



Fonte: Cool Roof Rating Council (CRRC, 2023a).

Uma das principais normas de eficiência energética americana é o *California Title 24* que inclui requisitos prescritivos de eficiência pré-definidos para cada componente, os quais devem ser cumpridos, em edifícios residenciais e não-residenciais. Exige-se um telhado frio quando (i) o projeto residencial está em uma zona climática afetada, o qual varia de acordo com a inclinação do telhado (Tabela 2.4) e (ii) a substituição, recuperação ou recobrimento da superfície de telhados residenciais existentes (com uma área maior de 50% do telhado substituído) em zonas climáticas específicas (ENERGY CODE ACE, 2020).

Tabela 2.4 – Requisitos prescritivos para edifícios residenciais baixos

Inclinação do telhado	Zona climática	Esses valores de refletância e emitância OU esse valor de SRI		
		Refletância solar envelhecida em 03 anos (ρ_{env})	Emitância térmica (ϵ)	SRI (%)
Baixa ¹	13 e 15	≥ 0.63	≥ 0.75	≥ 75
Íngreme ²	10 a 15	≥ 0.20	≥ 0.75	≥ 16

¹ Menor do que 9,5°

² 9,5° ou mais

Fonte: Adaptado de *Building Energy Efficiency Standards* (BEES, 2019a).

De acordo com o código energético da Califórnia (2019), somente os produtos listados no CRRC podem ser utilizados para atender aos requisitos mínimos da norma para emitância térmica e refletância solar envelhecida. Estão apresentados os seus valores, os quais dependem da zona climática e a inclinação do telhado para edificações que são mecanicamente acondicionadas, divididas pelas tipologias residencial baixa (Tabela 2.4), residencial alta (Tabela 2.5) e não-residencial (Tabela 2.6). Ou os valores das propriedades radiativas devem ser atendidos, ou mesmo excedidos, simultaneamente ou então apenas o índice de refletância solar (SRI). A segunda alternativa é útil quando um determinado produto não atende ambas as propriedades, mas a combinação delas pode ser suficiente para o cumprimento da exigência da norma.

Tabela 2.5 – Requisitos prescritivos para edifícios residenciais altos, hotéis e motéis

Inclinação do telhado	Zona climática	Esses valores de refletância e emitância OU esse valor de SRI		
		Refletância solar envelhecida em 03 anos (ρ_{env})	Emitância térmica (ϵ)	SRI (%)
Baixa ¹	09*, 10, 11, 13, 14 e 15	≥ 0.55	≥ 0.75	≥ 64
Íngreme ²	02 a 15	≥ 0.20	≥ 0.75	≥ 16

* Não se aplica a alterações

¹ Menor do que 9,5°

² 9,5° ou mais

Fonte: Adaptado de *Building Energy Efficiency Standards* (BEES, 2019b).

Tabela 2.6 – Requisitos prescritivos para edifícios não-residenciais

Inclinação do telhado	Zona climática	Esses valores de refletância e emitância OU esse valor de SRI		
		Refletância solar envelhecida em 03 anos (ρ_{env})	Emitância térmica (ϵ)	SRI (%)
Baixa ¹	01 a 16	≥ 0.63	≥ 0.75	≥ 75
Íngreme ²	01 a 16	≥ 0.20	≥ 0.75	≥ 16

¹ Menor do que 9,5°

² 9,5° ou mais

Fonte: Adaptado de *Building Energy Efficiency Standards* (BEES, 2019b).

Caso o produto seja novo e o valor de refletância solar envelhecido não estiver disponível, o Código californiano sugere o cálculo do valor estimado pela fórmula 2.14 (ENERGY CODE ACE, 2020).

$$\rho_{env} = [0.2 + \beta \cdot (\rho_{inicial} - 0.2)] \quad \dots [2.14]$$

Em que:

- ρ_{env} é a refletância solar da superfície envelhecida em 03 anos ($0 < \rho_{env} < 1$);

- β refere-se à resistência à sujidade por tipo de produto;
 - para revestimento aplicado em campo ($\beta = 0,65$);
 - para outros ($\beta = 0,70$)
- ρ_{inicial} é a refletância solar inicial ($0 < \rho_{\text{inicial}} < 1$).

2.3.1.2 Nacional

O Consórcio brasileiro de superfícies frias (CBSF) foi criado no ano de 2015 para o contexto da necessidade em reduzir as ilhas de calor nas cidades e de reduzir a energia necessária para o conforto térmico em edifícios numa parceria entre universidades públicas e empresas da construção civil, o qual foi idealizado na feira FEICON Batimat.

Os métodos de avaliação para a refletância solar e emitância térmica utilizados são os mesmos das instituições internacionais como o CRRC, por exemplo. Um dos parâmetros para Shirakawa (2020) que influenciam na durabilidade do revestimento, como a manutenção da sua propriedade refletiva ao longo do tempo por causa da degradação superficial, é o crescimento microbiano, o qual confirmado em diferentes contextos climáticos estudados no Brasil. Hachich (2020) complementa que a velocidade de degradação depende de alguns fatores como a natureza orgânica ou inorgânica da superfície, as condições e tempo de exposição no local além da presença e intensidade dos agentes de degradação. Contudo, para Lamberts (2020) o mercado brasileiro não apresenta ainda estudos de degradação de seus produtos de acabamento externo.

Como etapas adicionais a serem contempladas e estudadas pelo consórcio Shirakawa (2020) cita (i) o investimento em testes acelerados de intemperismo em câmaras artificiais com UV (ultravioleta) e arco de xenônio, simulando diferentes condições ambientais em laboratório e (ii) o estudo sobre a influência da degradação da refletância solar em fachadas frias ao longo do tempo e como impacta no desempenho térmico da edificação.

2.3.2 Tintas frias

As tintas são compostas, em suas respectivas proporções, basicamente pelo aglutinante ($\approx 50\%$), uma resina polimérica (orgânica), na qual estão contidos os pigmentos ($\approx 50\%$), o solvente ($\approx 25\%$), que é o responsável pela sua forma líquida, e os aditivos ($\approx 1\%$), por exemplo, os espessantes, que garantem a viscosidade adequada e os dispersantes (LIM, 2020). Estes interagem e modificam as propriedades superficiais dos pigmentos e fornecem a

compatibilidade com a fase polimérica, de forma que os pigmentos sejam finamente dispersos e uniformemente distribuídos, porém não aglomerados (OREL *et al.*, 2012).

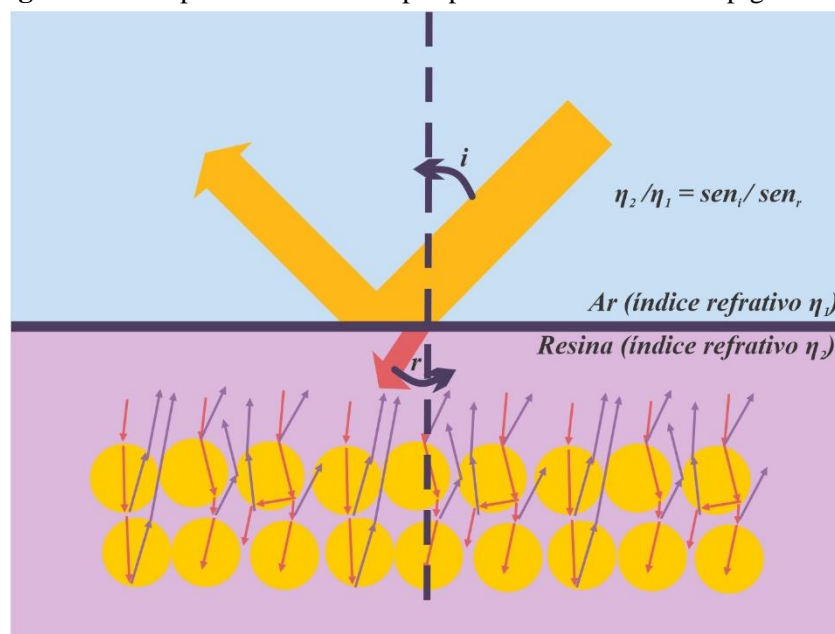
2.3.2.1 Espalhamento da luz pelos pigmentos

O contato da luz na forma de radiação eletromagnética em um filme pintado para Ladchumanandasivam (2007a) está sujeito aos processos de reflexão, absorção e dispersão (Figura 2.9). A luz que atravessa esta camada pigmentada muito fina sofre processo de espalhamento, cuja quantidade depende da diferença entre os índices de refração do segundo meio (η_2) em relação ao primeiro (η_1) (Equação 2.15), isto é, da resina para o ar.

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{\text{sen}_i}{\text{sen}_r} \quad \dots [2.15]$$

De acordo com a terceira lei de Descartes a razão entre os índices está relacionada pelo seno do ângulo de incidência do feixe (sen_i) sobre o seno do ângulo de refração (sen_r) conforme visualiza-se na ilustração da Figura 2.9. O fenômeno da difusão é uma propriedade da luz e o meio atravessado não é o responsável pelo processo difusor de forma que não se considera a natureza da substância a qual é atravessada (PEDROSA, 1982).

Figura 2.9 – Espalhamento da luz por partículas em um filme pigmentado



Fonte: Adaptado de Ladchumanandasivam (2007a) e Orel *et al.* (2012).

A forma analítica como ocorre a distribuição angular da luz espalhada decorrente da interação entre a radiação eletromagnética com uma partícula esférica homogênea de raio r , presumindo-se no caso o pigmento, foi explicada pelo físico alemão Gustav Mie apud Yamasoe e Corrêa

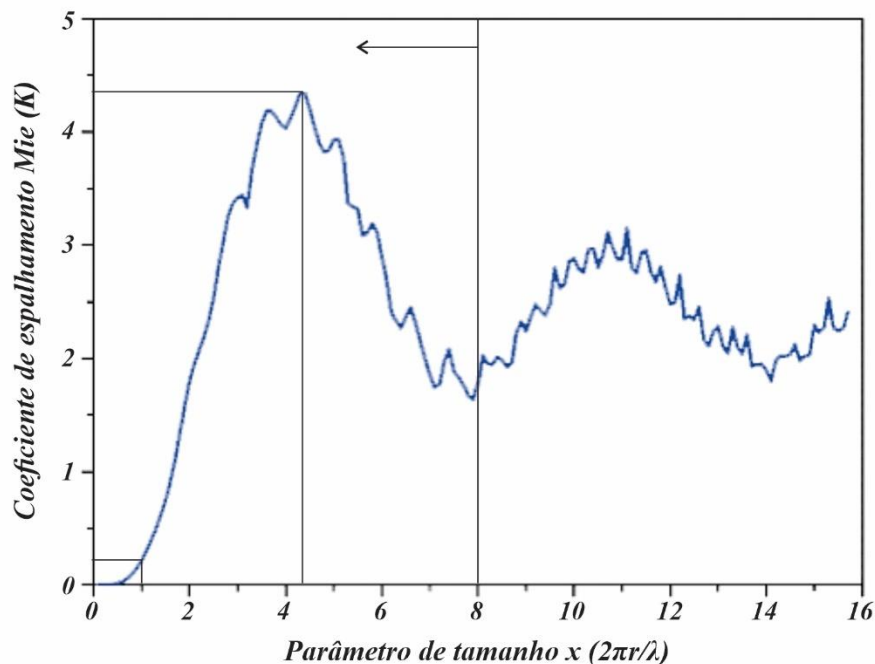
(2016), cuja teoria é conhecida como espalhamento Mie. Após atravessar a resina, a radiação interage com as partículas de corantes ou pigmentos, representada pelas setas laranjas, de tamanhos variados ($0,1 \mu\text{m} < \varnothing < 10 \mu\text{m}$), os quais estão distribuídos na matriz polimérica (Figura 2.9).

O principal critério observado é o tamanho da partícula, definido pelo parâmetro adimensional x , que se relaciona de maneira diretamente proporcional ao perímetro da esfera ($2\pi r$) e inversamente ao comprimento de onda (λ) conforme a equação 2.16 (LIM, 2020).

$$x \equiv \frac{2\pi r}{\lambda} \quad \dots [2.16]$$

A figura 2.10 relaciona o coeficiente de dispersão Mie (K), em um meio ($\eta = 1,5$), onde as partículas esféricas estão envolvidas, com relação ao parâmetro de tamanho delas (x). O coeficiente de dispersão (K) é máximo, isto é, o espalhamento é mais efetivo para o valor de x igual a 4,3 ($x = 4,3$), o que corresponde ao raio esférico aproximado de 70% do comprimento de onda ($r \approx 0,7 \cdot \lambda$) e coincide com a declaração de Lim (2020) de que o tamanho do pigmento seja da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda. Portanto, em relação às radiações eletromagnéticas na região do espectro solar, sugere-se que os pigmentos devem ter tamanho mínimo de 300 nm ($0,3 \mu\text{m}$) e preferencialmente entre 500 nm e 2.000 nm ($0,5 \mu\text{m}$ e $2 \mu\text{m}$) para que o espalhamento da luz seja eficaz (LIM, 2020).

Figura 2.10 – Espalhamento da luz ao interagir com diversos tamanhos de partículas esféricas



Fonte: Adaptado de Lim (2020).

No entanto, verifica-se para o valor de x inferior a um ($x < 1$), que os pigmentos possuem tamanhos ínfimos, cujo raio da partícula é inferior a 20% do comprimento de onda ($r < 0,2\lambda$) e não realizam espalhamento, uma vez que o coeficiente de Mie ($K \ll 0,5$) é praticamente inexistente (LIM, 2020). Portanto, caso suas dimensões sejam irrisórias, consideram-nos diluídos na resina e não são capazes de dispersar a radiação, apenas de absorvê-la (LADCHUMANANANDASIVAM, 2007a).

Por fim, as maiores partículas ($\phi > 10\lambda$) tanto absorvem a luz, mais eficazmente em uma banda espectral como dispersam-na em outra região (Figura 2.9). A quantidade da luz difundida pelos pigmentos depende também da diferença entre os índices de refração do pigmento para com a resina e varia de acordo com o comprimento de onda (λ). Logo, do ponto de vista físico, quanto maior a diferença deste índice entre partículas com a resina, melhor dá-se o espalhamento da luz de acordo com Dwivedi *et al.* (2020).

A parcela difundida que emerge para a superfície, definida por Levinson, Berdahl e Akbari (2005) como parâmetro de retrodifusão (representado pelas setas azuis na Figura 2.9) atinge outras partículas de forma a dispersar-se em todos os pontos e finalmente, a porção da luz que não sofre difusão pelos pigmentos é absorvida pela resina.

Portanto, Levinson, Berdahl e Akbari (2005a) por meio de um procedimento experimental determinaram os coeficientes de retroespalhamento de Kubelka-Munk (S) e de absorção (K) para vários filmes pintados predominantemente de um único tipo de pigmento com o intuito em determinar se um pigmento é "quente" ou "frio" por meio da caracterização das propriedades no infravermelho próximo.

2.3.2.2 Fatores que influenciam na refletividade espectral do material

Assim como no parâmetro de difusão, para Dwivedi *et al.* (2020) a **refletividade**, relativa à banda infravermelha, de um material depende da diferença no índice de refração entre o pigmento e o aglutinante no qual está imerso. Outros fatores considerados por ele que também definem a refletividade na região infravermelha são a composição química, o tamanho das partículas, a proporção relativa entre elas, concentração e distribuição delas no revestimento.

Jeevanandam *et al.* (2007) concluíram que os óxidos metálicos nanocristalinos na forma de pó possuem refletividade maior cerca de 15 a 20% na região infravermelha próxima do que os macrocristais nesta mesma condição. Além disto, estes cristais de compostos metálicos de tamanho nanométrico (10^{-9} m) apresentam-se em formas reconhecíveis, têm grande área

superficial e propriedades químicas diferentes de tal forma que o tamanho da partícula influencia no efeito da cor produzido e conseqüentemente nas suas propriedades refletivas (DWIVEDI *et al.*, 2020).

Então, em razão das suas propriedades espectrais, tanto os óxidos como os sulfetos metálicos de titânio (Ti), ferro (Fe) e manganês (Mn) nanocristalinos sintetizados na forma de pó fino, geralmente dopados com outros metais como ferro (Fe), cádmio (Cd), níquel (Ni) e antimônio (Sb), são utilizados em revestimentos frios, os quais também auxiliam na viscosidade das formulações das tintas (DWIVEDI *et al.*, 2020).

Levinson, Berdahl e Akbari (2005b) destacam que a utilização de altas concentrações de volume de pigmentos ocasiona a aglomeração deles, porém aumenta de forma eficaz o índice de refração do aglutinante. Contudo, também se reduz a eficiência do espalhamento da radiação que estas partículas provocam. Portanto, as partículas organizadas em camadas bem definidas ligadas entre si pelo aglutinante, em quantidade adequada, garantem a cobertura dos pigmentos no substrato de maneira uniforme (OREL *et al.*, 2012).

2.3.2.3 Fatores que influenciam na refletância espectral da superfície

Além da diferença entre os índices refrativos, para Levinson *et al.* (2007), a refletância espectral de um sistema com um revestimento pigmentado frio sobre um substrato opaco depende (i) da sua refletividade espectral, (ii) da espessura do revestimento e (iii) do quanto é absorvido, e posteriormente transformado em calor, e/ou espalhado pelos pigmentos suspensos na direção oposta para o mesmo comprimento de onda, isto é, relativos aos fenômenos de absorção e retroespalhamento, respectivamente.

Os autores também constataram que a diminuição da refletância solar provocada pela absorção é de uma ordem de magnitude maior em comparação ao aumento análogo da refletância causada pelo espalhamento da radiação pelos pigmentos, porque parte da luz retroespalhada em direção à superfície é posteriormente difundida para longe da mesma (LEVINSON *et al.*, 2007). Portanto, o impacto da propriedade de absorção/refletância solar é mais relevante para o balanço térmico do que o retroespalhamento decorrente do fenômeno da dispersão da luz.

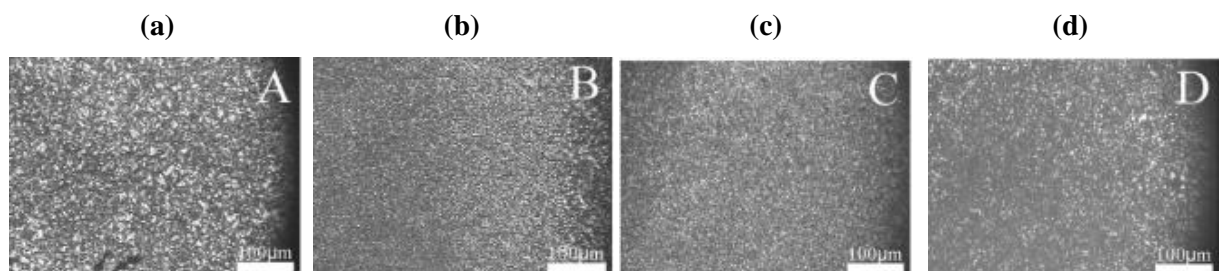
Para Dwivedi *et al.* (2020), quanto maior a espessura do revestimento, tem-se maior fator de reflexão, devido a uma faixa superior de nanopartículas no substrato que contribuem para a reflexão. Como exemplo, cita-se a aplicação sobre um substrato opaco cinza escuro liso, com baixa refletância no infravermelho próximo ($\rho = 10\%$), por Levinson *et al.* (2007) de um

revestimento de silicato, pigmentado com dióxido de titânio (TiO_2) rutilo e com óxido de ferro (Fe_2O_3) vermelho, para quais os valores alcançados de reflexão no infravermelho próximo foram de 65% e 40% com a espessura de 25 μm , respectivamente, e elevaram-se para 80% e até 50% com o aumento da espessura para 100 μm .

2.3.2.4 Interação dos pigmentos com o polímero

A adição de pigmentos inorgânicos como o dióxido de titânio (TiO_2) no teor de 3% em peso na matriz polimérica orgânica restringe de forma significativa o crescimento dos cristais do tipo esferulitos, os quais são observados no polietileno de alta densidade da Figura 2.11 (a) e reduz o seu tamanho médio. Por causa disto, são observados “pontos de luz” de acordo com Wang e Zhang (2014, p. 166) sob o microscópio óptico polarizado, como visto nas Figuras 2.11 (b) (c) (d), em relação à matriz pura, e estas partículas inorgânicas são chamadas de “agentes de nucleação heterogêneos”. Desta forma, elas induzem a matriz polimérica a formar cristais perfeitos estáveis, além de manter as suas cadeias poliméricas firmes.

Figura 2.11 (a) – Imagens microscópicas dos cristais da matriz de polietileno pura na escala 100 μm e (b) adicionada com TiO_2 anastásio; (c) rutilo e (d) anastásio/rutilo



Fonte: Wang e Zhang (2014).

Os pigmentos com maior eficiência de nucleação são o de estrutura cristalina rutilo (C) com maior dimensão de partícula (≈ 405 nm), e, portanto, mais denso, o qual não aglomerou, seguido pelo anastásio (B) (≈ 320 nm), ambos com tamanho micrométrico, e dispersam bem na matriz. No entanto, o tipo composto por cristais mistos (D) (80% anastásio e 20% rutilo) e diâmetro nanométrico (≈ 20 nm) são os que possuem maior área superficial e mais energia, logo, mais fácil as partículas se agregam em clusters, reduzindo a sua eficiência de nucleação.

Portanto, pode ocasionar concentração de tensões em torno das partículas agregadas e ocasionar danos ao material. Além disso, a dispersão homogênea pode resultar em melhor desempenho em termos de refletância solar e nas propriedades mecânicas. Então, a dispersão de pigmentos inorgânicos em matrizes poliméricas é considerada por Qi, Xiang e Zhang (2017) uma propriedade extremamente significativa.

Neste estudo, o dióxido de titânio (TiO_2), os quais possuem modificações superficiais, como o rutilo hidrofóbico (≈ 20 nm) apresentou excelente dispersão e o anastásio hidrofílico (≈ 10 nm) obteve uma distribuição uniforme com pequenas aglomerações de partículas na resina ASA (acrilonitrila, estireno e acrilato de butila). No entanto, para os pigmentos não-modificados com dimensões micron (≈ 300 nm), independente da estrutura cristalina, observou-se densas aglomerações de partículas, além do aumento no seu tamanho e na distância entre estas partículas incorporadas (QI; XIANG; ZHANG, 2017).

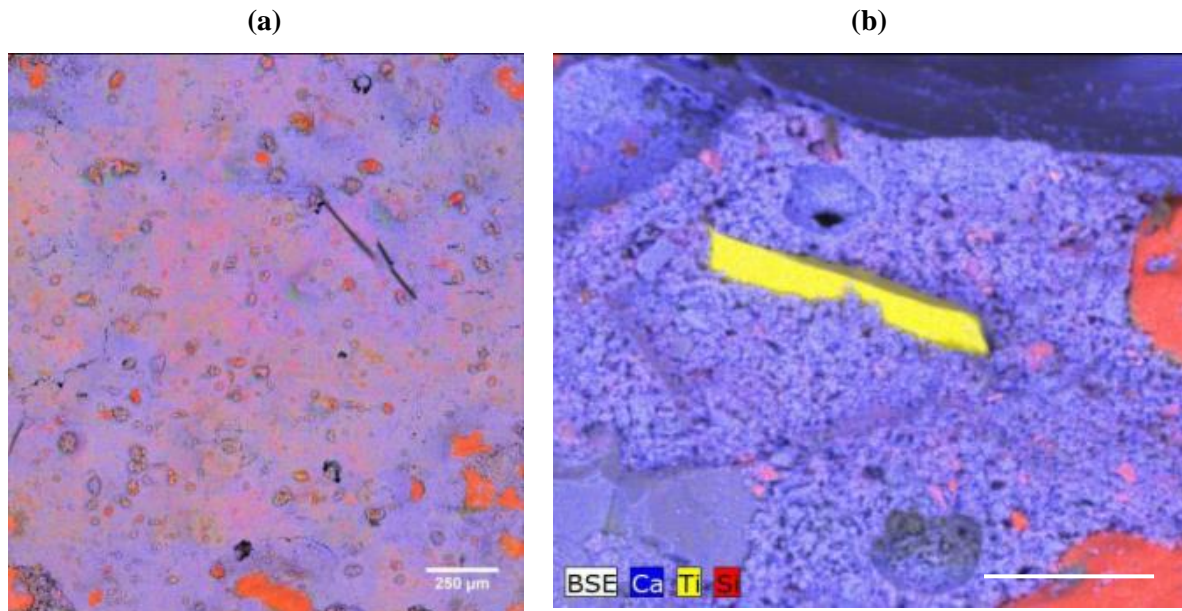
Em Werle (2015) foram analisados dois tipos comerciais de dióxido de titânio anastásio hidrofílico. As imagens com MEV permitiram a visualização do estado de aglomeração de nanopartículas, que apesar das suas dimensões individuais (entre 25 e 55 nm), apresentam elevada energia de atração entre elas. Preuss (2016) complementa que menores tamanhos de partículas, com dimensões unitárias nanométricas, possuem maior área superficial e consequentemente ocorre maior interação da carga com o polímero. Desta forma, os processos de absorção e espalhamento da radiação são mais eficientes do que em partículas de dimensões convencionais, no entanto, em razão do estado de aglomeração reduz-se a exposição à radiação das partículas sobrepostas (WERLE, 2015).

Estes pigmentos, com teores de 5% em relação à massa, foram adicionados ao cimento e aplicados sobre substratos de fibrocimento para a confecção de argamassas autolimpantes. A observação dos revestimentos no MEV permitiu identificar a segregação dos aglomerados de TiO_2 devido ao processo de mistura utilizado na produção da pasta e o pH alcalino do substrato cimentício favorece a dispersão de partículas. Por causa disso, houve maior dificuldade na identificação de titânio (TiO_2) nas superfícies das amostras na Figura 2.12 (a) com os parâmetros adotados no MEV/EDS da pesquisa de Werle (2015), sendo necessário a observação na seção transversal ou com uma maior ampliação como na Figura 2.12 (b).

A agitação magnética, dentre as possibilidades para desfazer a aglomeração, é considerada pouco eficiente por Pereira (2010), a qual ainda pode danificar a superfície das partículas e o resultado dos ultrassons não é permanente, porque a suspensão ao permanecer em repouso provoca uma nova aglomeração de partículas. Uma alternativa proposta é a adição de solventes e dispersantes, porém o excesso na utilização destes aditivos pode alterar as características morfológicas das partículas.

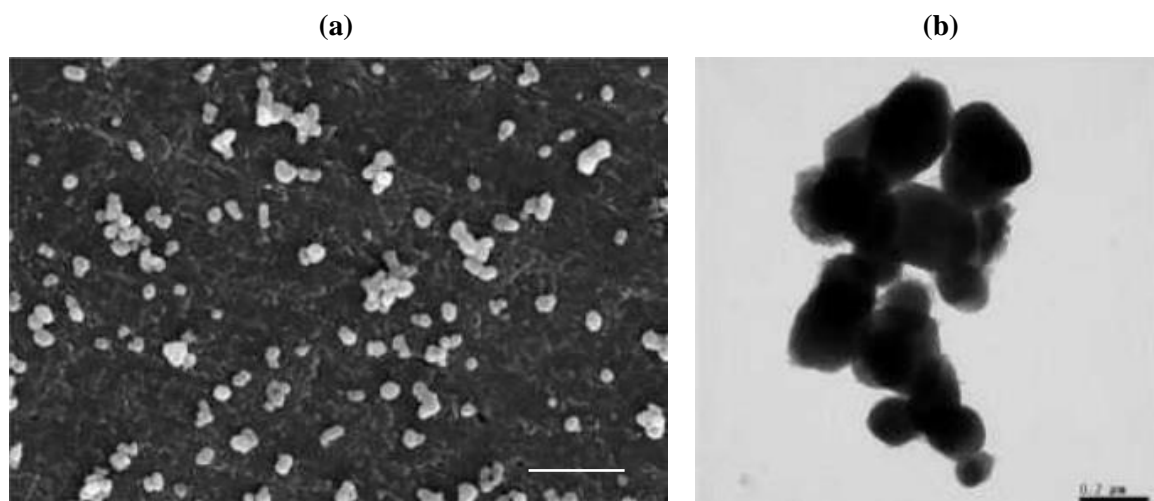
Os rutilos comerciais em escala micrométrica avaliados por Preuss (2016) das Figuras 2.13 (a) (b) são formados por agregados de poucas partículas. Neste caso, o processo de umectação e dispersão em resinas poliméricas são facilitadas.

Figura 2.12 – Mapeamento da área por EDS da argamassa branca com 5% de adição de TiO_2 nas escalas de (a) 250 μm e (b) 60 μm



Fonte: Werle (2015).

Figura 2.13 – Imagens microscópicas do pigmento TiO_2 rutilo R902 (a) por MEV na escala de 1 μm e (b) por MET na escala de 0,2 μm

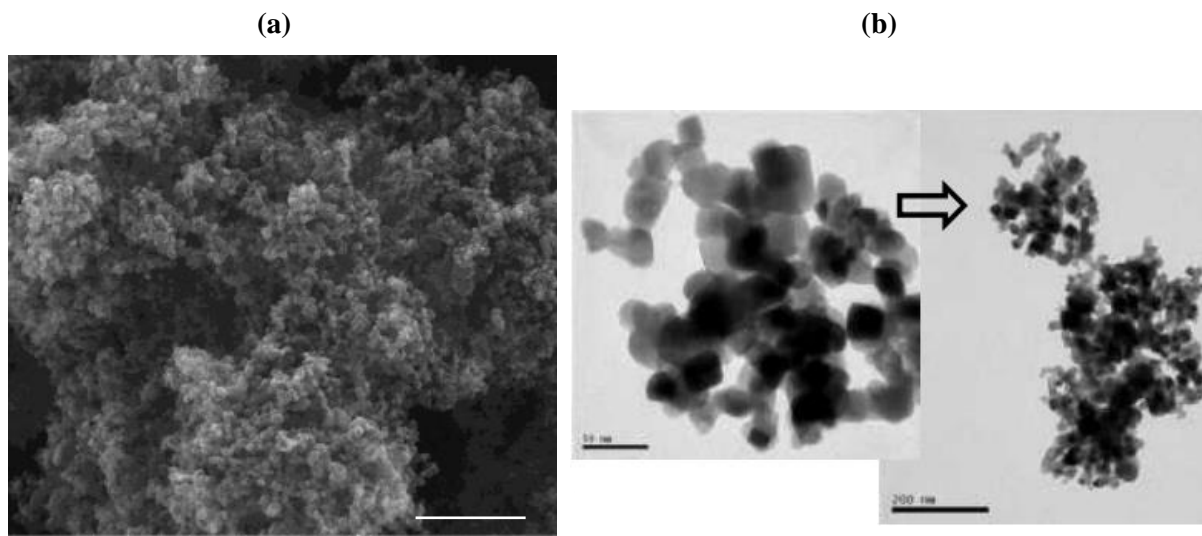


Fonte: Preuss (2016).

Os pigmentos TiO_2 P25, composto pela combinação das duas estruturas cristalinas (rutilo e anastásio), em Werle (2015) e Preuss (2016) possuem o maior diâmetro médio (3,50 μm e 3,62 μm , respectivamente) em relação ao tamanho da partícula/agregado detectado na técnica por granulometria a laser, o qual é influenciado pela distribuição de tamanhos variados das duas

fases cristalinas. A análise morfológica nas Figuras 2.14 (a) (b) evidencia a disposição dos pigmentos na forma de agregados e aglomerados de partículas individuais nanométricas formando “grandes cachos de uvas” como exemplificado por Preuss (2016). A dispersão destas partículas em água é difícil, mais do que em solventes orgânicos, sendo recomendável a adição de tensoativos.

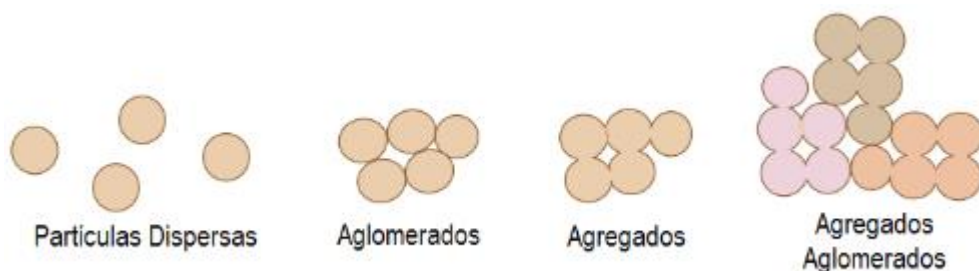
Figura 2.14 – Imagens microscópicas do pigmento TiO₂ P25 na escala de 0,2 µm (a) por MEV em Werle e (b) por MET em Preuss



Fonte: Werle (2015) e Preuss (2016).

Pereira (2010) diferencia na Figura 2.15 as partículas aglomeradas como as unidas por ligações fracas, enquanto as agregadas são de caráter química, e, portanto, mais fortes, e desta forma nenhum dos métodos descritos de segregação são recomendados.

Figura 2.15 – Diferença entre partículas aglomeradas e agregadas



Fonte: Pereira (2010).

2.3.2.5 Tipos de pigmentos

Orel *et al.* (2012) frisam que o tipo de pigmento usado é o principal aspecto que afeta a qualidade da tinta, como também a estabilidade na dispersão dos pigmentos no estado líquido da tinta, no curso da secagem, até a sua solidificação torna-se um parâmetro importante. As

cargas (como talco, cal, argila etc.) são um tipo especial de pigmento que têm como objetivo fortalecer a sua estrutura, fornecer espessura ao filme de tinta ou simplesmente aumentar o volume da tinta com o intuito de reduzir o custo da produção por serem relativamente baratos.

Um dos pigmentos mais utilizados é o dióxido de titânio (TiO_2), um óxido metálico, o qual é branco, estável, inerte, não tóxico, barato e, portanto, extremamente popular (LEVINSON; BERDAHL; AKBARI, 2005).

Na fase cristalina denominada rutilo, na sua forma pura, tem menor *band gap* do que na fase anastásio, isto é, precisa de menos energia (3,2 eV) para tornar os elétrons livres e promovê-los à uma banda de condução (OREL *et al.*, 2012). No entanto, a abundância de elétrons livres torna-os suscetíveis à corrosão e desgaste ao longo do tempo (DWIVEDI *et al.*, 2020). Desta forma, o rutilo apresenta-se em um tom branco “amarelado”, porque perde sua refletividade na região entre o visível e o ultravioleta, em comprimentos de onda inferiores a 400 nm, onde a absorção é muito elevada, e exibe uma transição brusca para uma zona com pouca absorção, a partir do visível (LEVINSON; BERDAHL; AKBARI, 2005b). Por este motivo Lim (2020) caracteriza-o como altamente “transparente” a esta radiação e ao infravermelho próximo, porque não absorve nessas regiões e os valores superam os 80% de refletividade solar.

Além disto, o dióxido de titânio (TiO_2) rutilo também tem maior índice refrativo ($\eta = 2,73$) do que na fase anastásio ($\eta = 2,55$) (OREL *et al.*, 2012) e por isso promove maior espalhamento da luz visível e o seu poder de dispersão é mais eficiente no tamanho de partícula ideal próximo de 0,2 μm (LEVINSON; BERDAHL; AKBARI, 2005b).

Ladchumanandasivam (2007a) indica que não apenas as duas fases cristalinas do dióxido de titânio (TiO_2) como também os elementos inorgânicos possuem elevado índice de refração, superior a dois ($\eta > 2$), os quais dispersam melhor e têm maior poder de opacidade do que os orgânicos ($\eta \approx 1,5$). Portanto, caso não haja diferença entre os índices refrativos do pigmento orgânico e no caso considerando-se o segundo meio o aglutinante ($\eta \approx 1,5$), o espalhamento não ocorre para Dwivedi *et al.* (2020) e a radiação infravermelha é transmitida até atingir o substrato.

Então, Levinson, Berdahl e Akbari (2005) indicam como propriedades espectrais radiativas do dióxido de titânio (TiO_2) a forte dispersão e fraca absorção, seja na região visível por causa da sua coloração esbranquiçada, mas especialmente no infravermelho próximo.

No entanto, além dos motivos estéticos, não é viável aplicá-los em todas as fachadas e coberturas devido aos problemas relacionados a ofuscamento e brilho excessivo causado pelo componente especular da radiação refletida nas superfícies brancas segundo Lim (2020), assim como também a manutenção da sua cor necessitar de limpeza constante.

Então, um revestimento pigmentado frio para Levinson *et al.* (2007) normalmente exhibe forte absorção e/ou retrodifusão no espectro visível para ocultar e assim colorir o substrato e fraca absorção no infravermelho próximo por causa da adição de pigmentos coloridos frios. Portanto, estes pigmentos apresentam um perfil de refletância particular e similar aos colorantes de mesma cor, na região visível, porém exibem maior refletância no infravermelho próximo, onde concentra-se a maior parte da energia térmica solar (LIM, 2020).

Dentre alguns, Orel *et al.* (2012) destacam os sulfetos, como os sulfosselenetos de cádmio, óxidos metálicos, como de ferro (Fe^{3+}) e cromo (Cr^{3+}), e alguns orgânicos que apresentam ótima estabilidade externa, baixa toxicidade e desempenho aceitável na região infravermelha próxima a um custo moderado. No entanto, Dwivedi *et al.* (2020) recomendam a utilização de mais de um óxido, como o de ferro, cromo, zircônio e do trióxido de antimônio para melhorar as suas propriedades refletivas, apesar dos seus elevados índices de refração.

Os elementos orgânicos, que são compostos com carbono, estão em maior número na natureza, em relação aos inorgânicos, e possuem coloração mais intensa, por isso de acordo com Pedrosa (1982) constituem as substâncias corantes. Porém, materiais orgânicos reguladores no infravermelho próximo são raros, como a ftalocianina de cobre halogenado, compostos azo e alguns derivados de perileno. A durabilidade não é tão boa quanto os seus equivalentes inorgânicos e a diferença no índice de refração no meio em que se encontram é geralmente muito baixa. Por isso, Dwivedi *et al.* (2020) recomendam a sua utilização apenas como material de base numa superfície multicamadas reguladora de calor.

Neste sentido, Orel *et al.* (2012) apresentam outra classe de pigmentos coloridos, formados a partir do dióxido de titânio (TiO_2) na fase rutilo, através de reações de estado sólido, dopado com cromóforos (Cr^{3+} e Ni^{3+}) na presença de átomos neutralizadores de cargas, o antimônio (Sb^{5+}), o que produz, respectivamente, os titanatos de óxido de cromo $[(\text{Ti}, \text{Cr}, \text{Sb})\text{O}_2]$ e de níquel $[(\text{Ti}, \text{Ni}, \text{Sb})\text{O}_2]$. Levinson, Berdahl e Akbari (2005) aplicaram-nos sobre substratos branco e preto, os quais apresentaram cores que variam de laranja a amarelo e de marrom a verde, respectivamente, para o cromo e no níquel de amarelo apagado a verde amarelado. Apesar das suas colorações, apresentam valores moderados a muito altos de refletância no

infravermelho próximo, praticamente igual ao TiO_2 de estrutura rutilo branco, e dispersam fortemente nesta região.

Outros pigmentos, os quais também possuem boa refletividade no infravermelho próximo são os metálicos coloridos como os flocos de alumínio e mica (DWIVEDI *et al.*, 2020). Estes apresentam-se não revestidos ou então flocos ou esferas de vidro revestidos de prata, os quais possuem alto brilho e aparência cintilante. Em virtude da orientação destas partículas e a distribuição minuciosa de tamanhos variados, equivalentes a 5 μm , permite-se alcançar o máximo contraste entre elas, o que resulta em ótima reflexão da luz solar (OREL *et al.*, 2012).

Os flocos de mica foram revestidos com dióxido de titânio rutilo (TiO_2) por Levinson, Berdahl e Akbari (2005), cuja coloração é perolada, com fraca absorção e alta dispersão no infravermelho próximo, cujos valores de refletância entre 88% a 90% excederam o do próprio fundo branco em que foi aplicado.

Os flocos de alumínio não revestidos também foram misturados por Orel *et al.* (2012) com hidrato de óxido de ferro sintético marrom (FeOOH), que fracamente absorve no infravermelho próximo, o que lhe atribuiu a coloração amarela. Outro tipo de tinta colorida refletiva utiliza microesferas ocas de vidro ou cerâmicas não revestidas, as quais possuem baixa condutividade térmica, e os expansores à base de alumínio, como o caulim, feldspato e mica. Eles são diluídos no aglutinante seja à base d'água ou solvente, e juntos aos pigmentos refletivos permitem aumentar a refletividade na região infravermelha (OREL *et al.*, 2012).

No entanto, a desvantagem dos dois sistemas de tintas citados acima deve-se à baixa emissividade térmica inerente aos metais, os quais estão representados pelos flocos e esferas, o que inviabiliza a sua utilização como revestimento frio. Então, por causa da distribuição dos flocos por todo o revestimento, o que lhe confere a baixa emissividade térmica, a seletividade espectral não depende mais da sua espessura, por isso é denominado por Orel *et al.* (2012) como tinta TISS (*Thickness Insensitive Spectrally Selective*), ou tinta espectralmente seletiva insensível à espessura.

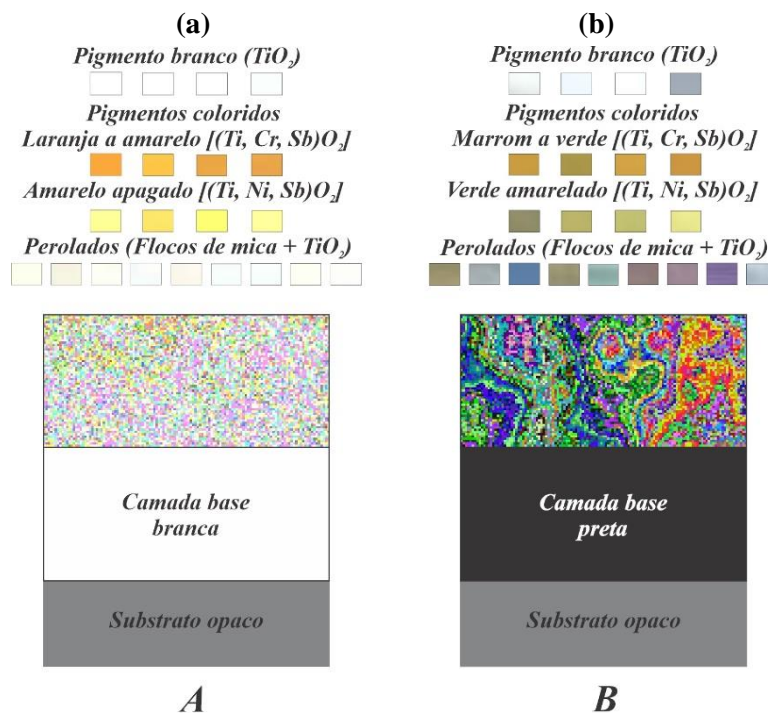
De forma a convertê-las em tintas frias, Orel *et al.* (2012) aplicaram sobre estas uma camada adicional de laca ou verniz transparente, o qual constitui-se de aglutinante de resina polimérica, preferencialmente PVdF (*Polyvinylidene difluoride*), difluoreto de polivinilideno, absorvedores de ultravioleta (UV) e aditivos reológicos. Assim sendo, a camada superior torna-se responsável pelo aumento da emitância térmica da tinta, a qual era cerca de 0,20 e agora chega a valores

acima de 0,90 em todo o revestimento, e ainda pode-se alcançar o valor unitário ($\varepsilon = 1$) caso mantenha-se a espessura entre 10 e 20 μm .

Constitui-se num processo barato, de fácil aplicação, de acordo com Orel *et al.* (2012), e também auxilia na melhoria da estabilidade ambiental da tinta, a qual relaciona o seu tempo de vida útil quando exposta às intempéries ambientais.

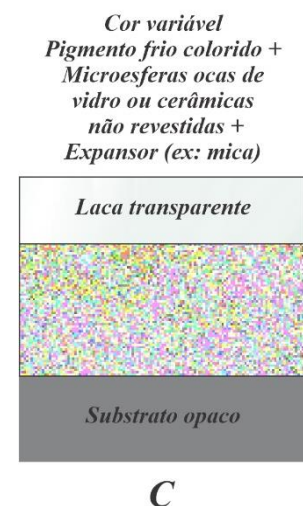
De acordo com o que foi visto, as Figuras 2.16 (a) e (b) representam os componentes da configuração de superfícies frias com camada base branca e preta, respectivamente, por Levinson *et al.* (2007) e a Figura 2.16 (c) mostra a composição de camadas em Orel *et al.* (2012) para a obtenção de uma superfície fria. Estão representados nas duas primeiras composições, A e B, apenas os pigmentos frios, os quais obtiveram como resultado baixa absorção como também forte retrodifusão ao infravermelho próximo, conforme tabela classificatória realizada por Levinson *et al.* (2007). Dentre os que atingiram moderada retrodifusão, destacam-se os óxidos de ferro (Fe_2O_3), vermelho e marrom, e de cromo modificado (Cr_2O_3), verde, e os sulfosselenetos de cádmio [$\text{Cd}(\text{S}, \text{Se})$], laranja e amarelo e os com fraca os orgânicos como a ftalocianina azul e verde, dióxido de zinco e perileno preto.

Figura 2.16 (a) – Composição de tintas frias sobre substrato opaco e camada base (a) branca e (b) preta



Fonte: Adaptado de Levinson, Berdahl e Akbari (2005) e Levinson *et al.* (2007)

Figura 2.16 (c) – Composição de tintas frias entre substrato opaco e laca transparente



Fonte: A autora.

Portanto, as tintas frias constituem-se em uma das tecnologias passivas de resfriamento promissoras na redução do calor pelo envelope do edifício e também na diminuição da

necessidade de utilização dos sistemas de refrigeração artificial e devem ser utilizadas com o intuito de mitigar os efeitos do aquecimento global (LIM, 2020).

Nas subseções seguintes, estão mostrados experimentos em campo e estudos de casos, os quais comprovaram a redução na temperatura da superfície dos telhados e fachadas com a utilização de revestimentos frios, o que estende-se ao resfriamento das temperaturas internas, porém destaca Lim (2020) que a redução não é tão drástica em cores mais escuras do que na branca, por exemplo.

2.3.2.6 Desempenho térmico

Synnefa, Santamouris e Livada (2006) analisaram revestimentos frios brancos e cinzas prateados (com flocos de alumínio) disponíveis no mercado grego, sobre substratos de concreto brancos para a utilização em superfícies no ambiente construído, como em telhados e fachadas. O revestimento frio branco diminuiu em 4°C e 2°C durante o dia e a noite, respectivamente, a temperatura de uma telha de concreto branca no verão de 2004 como permaneceu mais quente apenas 2°C e mais fria em até 5,9°C do que o ar ambiente, durante os mesmos períodos. A partir disto, os autores concluíram que as diferenças no comportamento térmico entre amostras do mesmo tipo de material ou mesma cor ocorrem em virtude principalmente da refletância solar.

Em um estudo similar, Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007) constataram a relação direta entre a diminuição da temperatura de pico da superfície com o aumento da refletância solar em decorrência da adição de pigmentos refletivos à radiação infravermelha próxima. Dentre os dez pares de tintas coloridas, frias e convencionais pigmentadas, as quais foram produzidas com base acrílica, também aplicadas sobre o mesmo substrato de Synnefa, Santamouris e Livada (2006), observou-se o maior acréscimo da refletância solar em 22% para a amostras preta fria com a correspondente diferença na temperatura superficial em relação à convencional de 10,2°C na estação de verão de 2005.

O experimento em campo com a utilização de tintas fria e convencional, na cor marrom, as quais foram aplicadas nas fachadas leste e oeste de protótipos (na escala 1/12) construídos de concreto foi realizado por Doya, Bozonnet e Allard (2012), onde instalaram-nos na Universidade La Roche, na França. A redução da temperatura superficial nas fachadas frias em 1,5°C foi verificada em referência ao protótipo com revestimento convencional, o que gerou um resultado menos significativo do que o observado nas amostras de concreto de Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007).

Portanto, das pesquisas realizadas na Grécia, que foram baseadas em medições nas 24hrs do dia, permite-se concluir a partir dos experimentos em campo que a refletância solar se apresenta como o principal parâmetro que afeta a temperatura superficial durante o dia, enquanto no período noturno a liberação do calor de volta ao ambiente externo depende da propriedade da emitância térmica, cujos valores correlacionaram-se à temperatura superficial média à noite (SYNNEFA; SANTAMOURIS; LIVADA, 2006); (SYNNEFA; SANTAMOURIS; APOSTOLAKIS, 2007).

As tintas convencionais nas cores amarela, apesar do tom claro, não são eficientes para reduzir a temperatura superficial assim como a marrom apresenta-se muito mais aquecida em relação à face superior do substrato cinza claro, que corresponde a uma telha de fibrocimento ondulada não pintada ($\rho_{total} = 47,3\%$) no experimento de Uemoto, Sato e John (2010), as quais foram expostas à radiação infravermelha emitida por uma lâmpada de 250 W.

No entanto, os valores de temperaturas superficiais mais baixos foram alcançados nas telhas de fibrocimento pintadas com tintas frias de cores correspondentes, as quais foram produzidas por uma indústria com pigmentos coloridos inorgânicos complexos, às convencionais. Por causa do aumento significante na curva de refletância no infravermelho próximo em 31,8% e 40,1% nas cores amarela e marrom, respectivamente, com variação de luminosidade ligeiramente superior ($\Delta L^* = +1,0$ e $+0,3$), o que representa para Uemoto, Sato e John (2010) uma alternativa para melhorar as propriedades térmicas em materiais à base de cimento, como os utilizados em casas de baixo custo no Brasil.

Na pesquisa de Dornelles *et al.* (2010), também avaliou-se a propriedade refletiva das tintas frias, estas disponíveis no mercado ao contrário das fabricadas em laboratório por Uemoto, Sato e John (2010), em relação às convencionais de mesma cor. Estas apresentaram desempenho pífio para com o estudo citado, considerando-se o aumento da refletância solar no infravermelho próximo para as cores amarela e marrom de apenas 8,0% e 1,2%, respectivamente, o que resultou no acréscimo em apenas 4,4% e 0,8% na refletância total.

O hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , ou popularmente conhecido como cal, é utilizado como principal componente por Santamouris *et al.* (2008) na fabricação de um revestimento mais barato e também por causa da sua brancura, a resistência à sujidade e por ser um material ecologicamente correto, além de permitir a circulação de ar, no entanto não apresenta resistência ao risco e por causa disso adicionou-se aglutinante acrílico para reduzir esse efeito.

Então, a amostra branca produzida com cal hidratada sobre substrato de concreto branco apresentou 88% de refletância no visível e infravermelho próximo, maior em cerca de 15% em relação à branca fria padrão. Então, a redução da temperatura superficial observada foi entre 1,0°C e 5,0°C durante o dia, com o pico observado às 14h, e à noite permanece 1,0°C mais fria, apesar de possuir valor de emitância térmica ($\epsilon = 0,85$) um pouco menor do que a padrão ($\epsilon = 0,89$) (SANTAMOURIS *et al.*, 2008).

Outros trabalhos, entre os quais obtiveram boas propriedades óticas com a utilização da cal como substituição ao revestimento frio tradicional, destaca-se o de Kolokotsa *et al.* (2012). Ele foi produzido numa camada inferior com aglutinante à base de cal hidratada e o acabamento de tinta calcimina, à base de água, cal e terras minerais naturais, sobre substratos de azulejos, cujos valores de refletância solar variam entre 88 e 91%. No Brasil, cita-se as tintas de base aquosa de Werle, John e Loh (2014) com a adição de cal dolomítica hidratada em dois tipos de superfícies, bloco cerâmico vermelho e fibrocimento, claro e escuro, os quais obtiveram valores de 56% a 83% de refletância solar, dependendo da cor do substrato e da quantidade de demãos.

Destaca-se que a utilização de no máximo 3 demãos ocasiona o aumento da refletância solar, porém torna-se necessário a aplicação de mais em substratos mais escuros para alcançar um melhor valor, porém não é um parâmetro que afeta os valores de emitância térmica das amostras (WERLE; LOH; JOHN, 2014). Como qualquer outro tipo de material branco, Werle, Loh e John (2014) concluem que os pontos desfavoráveis da cal são a vida útil do revestimento e o desempenho, que trata da sua propriedade refletiva ao longo do tempo, referente à lixiviação por causa de chuvas ácidas e a biodeterioração, os quais dependem do local de exposição.

A investigação de desempenho térmico de tintas brancas com a adição de microesferas cerâmicas (MEC), disponíveis comercialmente no Brasil, foi realizada por Dornelles *et al.* (2011) em relação a uma tinta branca acrílica convencional. Ela apresentou maior valor de refletância solar total ($\rho = 89,8\%$) do que todas as sete tintas brancas com as microesferas, cujos valores superaram os 78% de refletância. Mesmo assim, todas as amostras são caracterizadas como eficientes para a reflexão da radiação solar e a variação de temperatura entre todas, quando expostas ao Sol, foi de no máximo 5°C.

Ikematsu (2007) também avaliou o desempenho térmico de tintas brancas, convencional e as refletivas com microesferas de vidro ocas e cerâmicas para as fachadas, as quais foram pintadas com duas demãos sobre as mesmas telhas de fibrocimento cinza relatadas em Uemoto, Sato e John (2010) e também expostas à radiação infravermelha. As tintas com cargas especiais

apresentam curvas de refletância espectral muito semelhantes, com maiores valores no infravermelho próximo correspondentes a 67,1% e 78% para a com vidro e a cerâmica, respectivamente, em oposição aos 62,2% da tinta convencional, enquanto as variações entre as temperaturas máximas mantêm-se apenas por volta de 3,3°C a 4,7°C.

Os resultados divergentes de Ikematsu (2007) e Dornelles *et al.* (2011) para as tintas brancas refletivas com cargas especiais, em relação às convencionais, podem ser ocasionados pelo tipo de carga utilizada e os teores incorporados na composição da tinta ou até mesmo a presença de outros componentes, excetuando-se as microesferas, serem responsáveis pelo aumento da refletância solar, o que exige-se uma análise química esmiuçada para essa investigação.

De forma complementar, Dornelles *et al.* (2011) realizaram a simulação computacional no software EnergyPlus com o intuito de avaliar o efeito térmico destas tintas na cobertura plana de uma edificação residencial térrea de baixo custo, cujo material base escolhido foi a telha de fibrocimento de cor cinza clara do trabalho de Uemoto, Sato e John (2010). Após a pintura com a tinta branca convencional, o que representou um aumento em 42,6% na refletância solar, observou-se que as horas-dia de desconforto por calor, as quais no cenário inicial era de 11,9°Ch/dia e 9,9°Ch/dia, respectivamente, para as cidades de São Raimundo Nonato e Belém, representativas das zonas bioclimáticas 07 (quente seco) e 08 (quente úmido) brasileiras, foram zeradas, assim como para o restante das tintas refletivas com microesferas cerâmicas o desconforto térmico por calor foi drasticamente reduzido para valores quase nulos (DORNELLES *et al.*, 2011).

Revel *et al.* (2013) (2014a) investigaram a adição de pigmentos, como os óxidos metálicos, para a melhoria das características refletivas em tintas acrílicas comercialmente disponíveis. Na primeira pesquisa, os óxidos de titânio (TiO₂) e de alumínio (Al₂O₃) com partículas de tamanho nano, na forma de pó, foram diluídas em água e utilizado como aditivo por Revel *et al.* (2013), em tinta na tonalidade verde média.

Os autores observaram uma melhoria nas propriedades refletivas nas tintas frias em relação à comercial ($\rho_{\text{total}} = 15,6\%$ e $\rho_{\text{IV}} = 24\%$), especialmente a misturada com titânio (TiO₂), cujo aumento na refletância solar e no infravermelho foi de 7,4% e 8,7%, respectivamente, porém houve mudança de matiz com a alteração significativa dos eixos cromáticos a*b*. O segundo pigmento, o alumina (Al₂O₃) conseguiu alcançar uma ótima combinação de cor com uma pequena diferença de cor ($\Delta E = 3,3$), mas o aumento da refletância no infravermelho foi de apenas 3,6% e no total de 2% (REVEL *et al.*, 2013).

No segundo estudo, com o intuito de minimizar a diferença de cor (ΔE) entre a tinta comercial e a fria, Revel *et al.* (2014a) desenvolveram, e ajustou-se ao sistema de cores, um matiz médio, a partir da combinação dos pigmentos de cromita (FeCr_2O_4) e óxido de cromo (Cr_2O_3), de cores preta e verde. Eles foram misturados à tinta acrílica verde escura com refletância solar e no infravermelho próximo de 25% e 30%, respectivamente, nos quais elevaram-se os valores, após a adição dos pigmentos, para 42% e 62% na tinta fria com uma diferença insignificante de cor ($\Delta E = 2,69$). As formulações das tintas acrílicas verdes para fachadas e as cinzas em membranas betuminosas de telhados não apresentaram diferenças na emitância térmica em relação aos seus padrões, cujos valores são de 0,89 ou 0,90 em Revel *et al.* (2014).

Zinzi (2016) produziu tintas à base acrílica com fíler de quartzo, adicionando-as com pigmentos convencionais e refletivos no infravermelho próximo, para a utilização em fachadas de alvenaria, tipicamente utilizadas como camada de revestimento em edificações na Itália. O intuito foi avaliar as suas propriedades térmicas radiantes, as quais foram aplicadas no experimento em substrato de alumínio com duas demãos, cuja espessura seca foi 125 μm .

No primeiro grupo, as de tons pastéis (azul, verde, amarelo, laranja e vermelho escuro) foram obtidas a partir de um fundo branco, e observou-se os altos valores de refletância de 56% a 73% na banda do infravermelho próximo, os quais superaram os da faixa visível, entre 30% e 44% para as tintas convencionais devido ao comportamento seletivo desses produtos. Eles possuem dióxido de titânio (TiO_2) na sua composição, e constata-se que foi o mesmo resultado verificado nos trabalhos para as tintas convencionais brancas com base acrílica de Dornelles *et al.* (2010) (2011) e Dornelles, Caram e Sichieri (2014).

De modo geral, as tintas pastéis frias apresentaram 10% de aumento na refletância solar e no infravermelho próximo, em relação às convencionais, e cerca de 20% a mais para a cor vermelha escura, porque segundo Zinzi (2016) a contribuição dos pigmentos frios no aumento da refletância solar é mais relevante em cores mais escuras.

A afirmação anterior é ratificada no segundo grupo de tintas, constituído de cores escuras (bege cinza, marrom acinzentado, cinza âmbar, cinza escuro e marrom chocolate), fabricadas a partir de um fundo preto, em que a refletância solar é praticamente constante em toda a região espectral solar para as convencionais e nas frias apresenta aumento expressivo de 36% a 38% no infravermelho próximo, o que gerou como consequência o aumento de 15% a 16% na refletância solar (ZINZI, 2016).

Dornelles, Caram e Sichieri (2014) analisaram o desempenho térmico de tintas frias importadas de um fabricante grego, nas quais as mais escuras, cinza escura e preta, têm os maiores acréscimos na refletância solar para o infravermelho próximo de 11,9% e 29,4%, respectivamente, com relação às convencionais nacionais de cores análogas. Por causa disso, observou-se a redução em cerca de 3,0°C e 5,0°C nas temperaturas médias, nesta ordem, entre as superfícies de mesma cor.

Portanto, Ferrari *et al.* (2015) afirmam que para os materiais coloridos frios, não apenas a refletância solar é importante como também a relação entre a fração de refletância no infravermelho próximo e no visível do espectro solar. Por exemplo, a tinta cinza fria em Dornelles, Caram e Sichieri (2014) possui uma tonalidade mais escura, logo sua refletância no espectro visível é menor ($\rho_{VIS} = 9,4\%$) do que na convencional ($\rho_{VIS} = 28,8\%$), o que influenciou na redução da refletância total em 4,8% da amostra fria. Todavia a sua temperatura superficial manteve-se abaixo da convencional em todo o período de medição entre 12h30 e 15h no dia 13 de março de 2012.

Em relação à emitância infravermelha hemisférica, as medições desta propriedade térmica foram realizadas em substratos não-metálicos nos experimentos de Zinzi (2016), cujos valores variam entre 0,87 e 0,90, com uma diferença ligeiramente menor de 2 a 3% para as amostras frias. Em Revel *et al.* (2014) e Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007), respectivamente, não foram encontradas diferenças na emitância entre as tintas coloridas frias em relação às convencionais correspondentes em cores ou não foi considerada relevante ($\epsilon = \pm 0,02$) em decorrência da utilização dos pigmentos frios. Em pesquisa semelhante, a de Silva (2017) apresentou uma diferença de -0,01 a -0,04 nos valores de emitância térmica com tintas de acabamento acetinado ou fosco, o qual possui maior proporção de pigmentos, para as frias. Então, ou a diferença nos valores da emitância térmica entre as amostras frias e pigmentadas convencionais é nula ou irrisória, sendo os valores ligeiramente menores constatados nas frias.

De acordo com Zinzi (2016) o alto valor de refletividade dos materiais frios no infravermelho próximo no comprimento de onda em cerca de 2,5 μm também permanece elevado na região de onda média (de 4 a 5 μm). Dornelles, Caram e Sichieri (2014) complementam que certos componentes, os quais refletem mais no infravermelho próximo, possam ter maior dificuldade em liberar o calor para esses mesmos comprimentos de onda, isto é, o que resulta em menor emissividade térmica. Zinzi (2016) ressalta ainda que as pequenas variações nas medições de

emitância infravermelha não interferem para a análise do desempenho térmico dos materiais, logo o seu impacto é insignificante.

2.3.3 Telhas frias

As telhas, por exemplo, cerâmicas, metálicas, de pedra natural ou concreto, apresentam como vantagens, de acordo com Synnefa e Santamouris (2012), a segurança ao fogo e durabilidade mecânica, além de oferecer geralmente melhoria na circulação do ar tanto na sua face superior como inferior e cita-se o aumento do peso para a estrutura do telhado como a desvantagem.

As cerâmicas são instaladas em mais de 90% dos telhados tradicionais em cidades de países mediterrâneos, como na Itália, em que há maior necessidade de produção energética para resfriamento (PISELLO, 2015). Os pigmentos existentes nelas, os quais possuem estruturas minerais em espinélio ou rutilo, de acordo com Revel *et al.* (2013) geralmente absorvem de forma moderada a radiação infravermelha próxima e também por causa da suavidade na sua superfície não se submetem às interreflexões sucessivas que implicam em aumento da absorvância solar, do que ocorre nas telhas de concreto e asfálticas, por exemplo.

Ferrari *et al.* (2015) citam ainda como outra vantagem a maior resistência ao intemperismo e envelhecimento natural das telhas cerâmicas, especialmente as esmaltadas, do que os materiais poliméricos possuem, os quais sofrem danos quando expostos à radiação ultravioleta, mas que atualmente dominam o mercado dos materiais frios de construção. Na indústria cerâmica, este tipo de telha é composto pela base ou suporte, o engobe, que tem função impermeabilizante e oculta a cor do suporte cerâmico, e o vidrado ou esmalte (NASCIMENTO, 2018).

Dentre as funções do esmalte, ele protege o engobe, utilizado como camada base entre o substrato da telha e o revestimento esmaltado, e logo após a aplicação, sofrem o processo de queima, que melhoram a resistência ao stress mecânico e intemperismo das telhas cerâmicas (FERRARI *et al.*, 2013). Assim como, Revel *et al.* (2013) citam que os pigmentos como os óxidos complexos inorgânicos, presentes nos esmaltes, tornam os materiais cerâmicos resistentes aos ataques químicos e ao envelhecimento.

O acabamento fosco do esmalte tem melhor desempenho refletivo do que o brilhante, o que se explica pela formação das fases cristalinas dos pigmentos, que refletem melhor a radiação solar do que as partículas amorfas no esmalte com brilho (FERRARI; MUSCIO; SILIGARDI, 2016). No entanto, Ferrari *et al.* (2013) divergem nessa conclusão, porque em estudo anterior, verificou-se o pior resultado para a refletância solar do esmalte fosco e os melhores

desempenhos para o esmalte branco brilhante seguido do transparente, com resultado muito próximo. Portanto, sugere-se a utilização do esmalte transparente para a fabricação de materiais não-brancos com a escolha de pigmentos seletivos apropriados adicionados a ele.

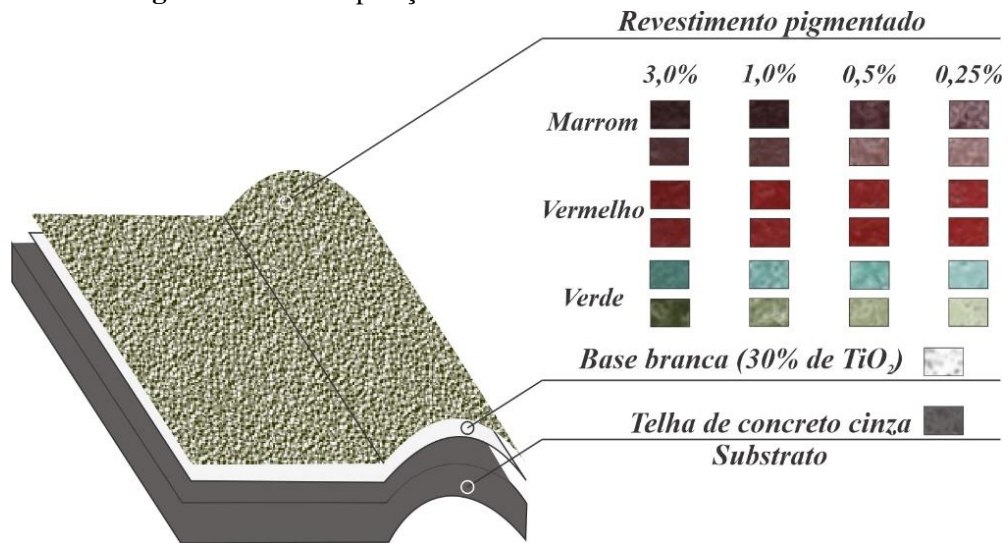
Para a utilização do revestimento cerâmico em fachadas, Revel *et al.* (2013) citam as principais propriedades, as quais devem ser consideradas como (i) a estética, relacionada à coloração, e (ii) a eficiência energética, que depende do quanto a radiação solar incidente é refletida. Por isso, Revel *et al.* (2014a) escolheram como parâmetros de comparação a refletância solar e a luminosidade da cor nos azulejos cerâmicos frios, os quais avaliam as melhorias nas propriedades, em relação aos materiais convencionais de mesma cor e textura, por exemplo.

2.3.3.1 Desempenho térmico

As telhas de concreto cimentícias cinzas não revestidas são comercializadas nos Estados Unidos e possuem baixo valor de refletância solar ($\rho = 15\%$). Dessa forma, com a intenção de otimizar a sua capacidade refletiva, Levinson *et al.* (2007) sugerem aplicar um revestimento frio pigmentado sobre elas, entre 25 a 100 μm , que possua espalhamento moderado a forte. A utilização de uma camada única aplicada diretamente sobre a telha obteve valores entre 35% e 60% de refletância no infravermelho próximo, as quais correspondem à cor preta e branca, respectivamente, a qual é composta de dióxido de titânio (TiO_2) rutilo que fortemente dispersa esse tipo de radiação.

Logo após, a sugestão de uma camada base acrílica branca com 100 μm de espessura, que alcançou valor tão alto quanto 85% de refletância, sob uma colorida, cujos pigmentos orgânicos opacos foram selecionados, não foi bem-sucedida, porque o fundo branco contribuiu com menos de 5% no aumento da refletância solar tendo em vista a baixa transmitância no infravermelho próximo destas partículas coloridas (LEVINSON *et al.*, 2007).

Dessa forma, com o intuito de otimizar a refletância solar na composição de um sistema pigmentado sobre uma base branca, Levinson *et al.* (2010) escolheram pigmentos frios, nas cores marrom, vermelho e verde, que possuam transparência seletiva ao infravermelho próximo para a produção em larga escala de telhas de concreto, cuja refletância solar inicial é de 18% em fábrica. A técnica original propõe a aplicação em spray de duas camadas de revestimento frio nas telhas, inicialmente pintadas com a base branca composta de dióxido de titânio (TiO_2) rutilo com 30% de concentração, em quatro diferentes proporções em volume de pigmentação, o que resultou em 24 tipos de acabamentos coloridos (Figura 2.17).

Figura 2.17 – Composição de camadas em telha de concreto fria

Fonte: Adaptado de Levinson *et al.* (2010).

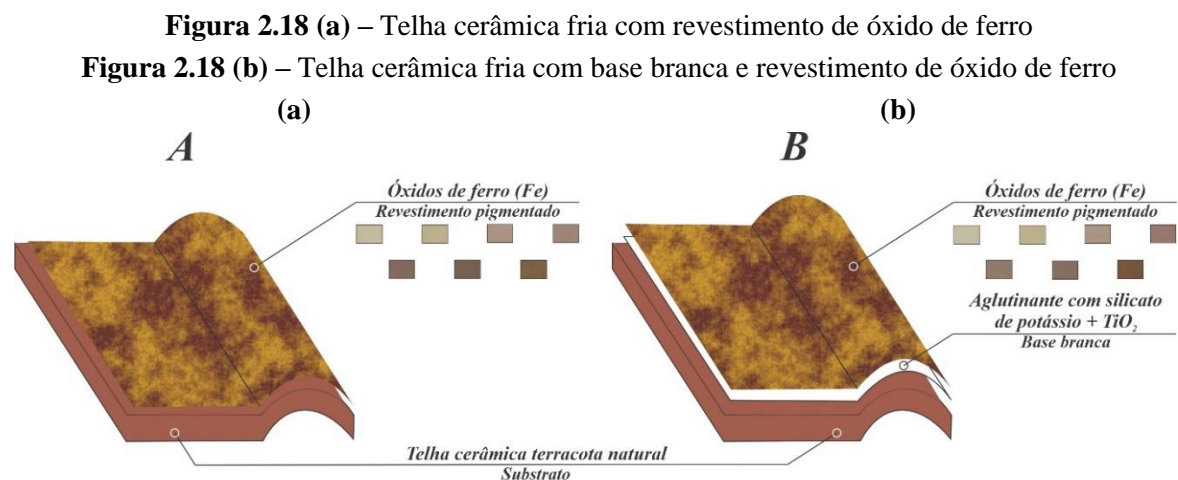
No curso do experimento, verificou-se que mais da metade dos protótipos, isto é, 13 telhas obtiveram valor igual ou superior a 40% de refletância solar, cujo melhor resultado foi apenas com a base branca ($\rho = 79\%$), seguida da verde clara ($\rho = 57\%$), como a colorida mais refletiva e que possui a maior luminosidade em cor ($L^* = 76$), e por último a marrom escuro ($\rho = 26\%$), a com menos brilho ($L^* = 29$), cujas concentrações em pigmentos são de 0,25% e 3%, de forma respectiva (LEVINSON *et al.*, 2010).

Levinson, Akbari e Reilly (2007) realizaram um experimento em um pátio na cidade de Riverside, Califórnia, nos quais modelos em escala de 1/10, construídos de madeira com cobertura de duas águas, as quais foram revestidas com telhas de concreto logo acima de uma folha de alumínio, com a intenção de avaliar o desempenho térmico de revestimentos coloridos na cobertura.

As telhas foram cobertas com seis pares de revestimentos, os convencionais e os frios transparentes ao infravermelho próximo, nas seguintes cores: terracota, marrom, cinza, verde, estes com apenas uma camada sobre o substrato de concreto cinza, e o azul e o preto, sobre uma base opaca branca altamente refletiva. Todos os revestimentos frios obtiveram reduções da temperatura de pico da superfície do telhado entre 5 e 14K e alcançaram valores de refletância solar superiores a 40% e a diferença entre os pares mais significativa foi para a cor mais escura, a preta ($\Delta\rho = 37\%$) e a menor para a terracota ($\Delta\rho = 15\%$) (LEVINSON; AKBARI; REILLY, 2007).

Em Pisello *et al.* (2013), o trabalho desenvolveu revestimentos frios sobre substratos de telhas cerâmicas terracotas naturais, nas quais foram aplicadas uma camada de pigmento de óxidos de ferro, nas cores amarelo, vermelho e marrom, misturados em diferentes proporções e representa o tipo de telha de duas camadas (substrato-revestimento) conforme mostra a figura 2.18 (a). Na outra metade das amostras também as revestiram com uma camada base feita de aglutinante de silicato de potássio estabilizado branco opaco, o qual contém dióxido de titânio (TiO_2) sob a pigmentada colorida como esquematizado na figura 2.18 (b).

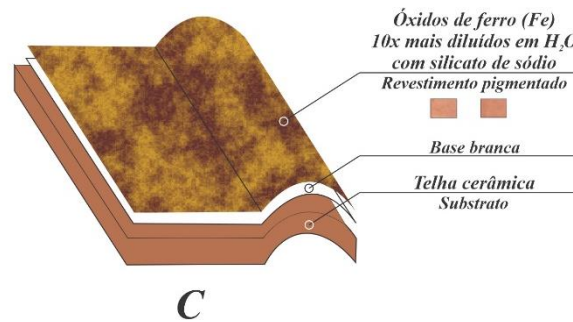
Este engobe branco como base representou melhoria em termos de refletância solar de 1% a 4% e a amostra, cuja combinação de pigmentos reproduziu uma aparência visual equivalente à cor terracota do substrato, apresentou refletância solar de 56% o que representa um fator de aumento de até 31% em relação às tradicionais, cujos valores variam de 25% a 40%, e caracteriza-se como um sistema de telha de três camadas (substrato-base-revestimento) em Pisello *et al.* (2013). As telhas cerâmicas frias pigmentadas com óxido de ferro amarelo, vermelho e marrom de Pisello *et al.* (2013) das Figuras 2.18 (a) (b) apresentam valores de emitância térmica de 0,88 a 0,90 e não há uma diferença substancial entre os valores.



Fonte: Adaptado de Pisello *et al.* (2013)

Pisello, Cotana e Brinchi (2014) aplicaram a técnica artística conhecida como *velatura* no revestimento colorido, cujos pigmentos foram relativamente diluídos, cerca de dez vezes em relação à amostra com aparência terracota de Pisello *et al.* (2013), com o intuito de alterar a aparência visual da telha. Contudo, mantendo-se o desempenho em termos de refletividade da base branca, a partir da qual elaborou-se o terceiro tipo de telha cerâmica fria, representada pela figura 2.18 (c), a de três camadas com revestimento pigmentado diluído, cuja refletância no infravermelho próximo alcançou valor próximo a 75% e 58% no solar.

Figura 2.18 (c) – Telha cerâmica fria com base branca e revestimento de óxido de ferro diluído



Fonte: Adaptado de Pisello, Cotana e Brinchi (2014).

A telha cerâmica fria pigmentada de Pisello et al. (2013) com aparência terracota similar à telha original possui emissividade térmica de 0,89. Em Pisello, Cotana e Brinchi (2014) o valor manteve-se apesar da alteração do aglutinante de silicato de potássio para o de sódio com a mesma proporção de pigmentos de óxido de ferro. Os valores subiram para 0,90 e 0,91 com a aplicação da camada pigmentada, mais diluída, com uma e duas demãos aplicadas, respectivamente, como na Figura 2.18 (c).

Dessa forma, o desempenho termoenergético dos protótipos da telha C da figura 2.18 (c) foi avaliado através de um modelo de simulação dinâmica, para um ano todo, em relação às telhas existentes em um edifício residencial unifamiliar de três andares localizado no subúrbio de Perugia, Itália. Pisello, Cotana e Brinchi (2014) observaram a redução no número de horas, cuja temperatura operativa dentro do ático supera os 26°C ($T_{op} > 26^{\circ} C$) para condições de verão em 18% ao mesmo tempo que no inverno, aumentou-se em apenas 1% a hora em que esta temperatura foi inferior a 20°C ($T_{op} < 20^{\circ} C$) após a utilização das telhas frias.

Pisello (2015) obteve resultados similares em um modelo de simulação dinâmica que previu um decréscimo na necessidade de resfriamento em até 51% com penalidades para aquecer no inverno inferior a 2% com a utilização das telhas cerâmicas frias das tipologias B e C, as quais estão esquematizadas na figura 2.18 (a) e (b). O estudo citado foi realizado em 2013 num edifício residencial de quatro pavimentos, no centro histórico de Perugia, onde o monitoramento ocorreu no apartamento duplex, que possui um piso inferior e o ático, cujos valores obtidos serviram de dados de entrada para a calibração e validação do modelo.

A fabricação de engobe branco, o qual garante opacidade e possui um bom grau de refletância solar, foi realizado por Ferrari *et al.* (2013) com o intuito de produzir uma camada base para alcançar alta refletância solar em telhas, dentre os quais o melhor desempenho foi obtido com

a aplicação por spray em duas camadas (200 μm) nos substratos cerâmicos, branco e vermelho, com refletância solar de 48% e 37%, nesta ordem, em que ambos elevaram-se para 90% o valor. Ele foi produzido à base de silicato de zircônio (ZrSiO_4), com 10% em peso, um pigmento branco relativamente barato e tradicionalmente utilizado nas formulações da indústria cerâmica, e possui menor índice de refração ($\eta = 1,94$) em comparação ao dióxido de titânio (TiO_2).

Assim como sugerem Levinson *et al.* (2007), é necessário a criação de um sistema com duas camadas (base + revestimento) sobre um substrato absorvedor no infravermelho próximo, como o caso das telhas cerâmicas coloridas. Dessa forma, utilizou-se o engobe branco de Ferrari *et al.* (2013) como camada base em 32 formulações de revestimentos coloridos, os quais combinaram 04 tipos de esmaltes e 08 cores de pigmentos, sobre substratos brancos (FERRARI *et al.*, 2015).

Dentre aqueles os quais obtiveram melhor capacidade refletiva, destacam-se branca no esmalte branco brilhante ($\rho = 86,9\%$) com duas demãos, 400 μm , e entre os coloridos, citam-se o bege ($\rho = 75,3\%$) no esmalte transparente e o cinza ($\rho = 61,8\%$) no esmalte à base de vidro reciclado, ambos com 200 μm de espessura por causa de uma única aplicação. Portanto, Ferrari *et al.* (2015) sugerem a adoção de telhas cerâmicas compostas por um revestimento com mistura de pigmentos, como os entre bege, vermelho e marrom.

No entanto, Ferrari, Muscio e Siligardi (2016) destacam o encarecimento que o silicato de zircônio (ZrSiO_4) do engobe proporciona aos custos finais na produção da telha esmaltada fria na indústria cerâmica. À vista disto, os autores utilizaram o engobe branco à base de silicato de zircônio (ZrSiO_4) em menor porcentagem (7% em peso) e avaliaram mais opções de revestimento, 14 tipos de pigmentos em um grupos de 04 cores, e com acabamento final brilhante ou fosco, cuja camada do esmalte possui maior espessura (300 μm) do que o aplicado em Ferrari *et al.* (2015).

Dessa forma, observaram que as amostras coloridas frias com refletância solar superior a 50% foram todas aquelas da coloração amarela e apenas uma da vermelha, cujo material para esmaltes com acabamento fosco foi utilizado com 85% em peso misturado à 15% de silicato de zircônio (ZrSiO_4), o que contribuiu para melhorar a refletância solar, porém altera-se a aparência visual da telha (FERRARI; MUSCIO; SILIGARDI, 2016).

Revel *et al.* (2013) (2014a) utilizaram um procedimento de aplicação em duas camadas (base-esmalte) sobre substratos cerâmicos absorvedores de radiação solar, os quais foram

inicialmente cobertos com uma base branca, a qual possui valor de refletância solar superior a 70% no infravermelho próximo, e com acabamento esmaltado, de coloração marrom escura e preta, respectivamente, para revestir azulejos cerâmicos.

No primeiro estudo, o revestimento esmaltado foi elaborado com material padrão de esmalte misturado a pigmentos inorgânicos, óxidos de alumínio (Al_2O_3) ou de titânio (TiO_2) nano estruturados, em concentrações que variam de 100% a 50% do conteúdo do matiz líquido. O protótipo com melhor resultado, o que se deve à inclusão adicional de 5% de dióxido de titânio (TiO_2) no acabamento, tem espessura de 100 μm e obteve refletância solar total e no infravermelho próximo de 35,2% e 52,9%, respectivamente, o que representa um aumento de 6,9% quanto ao azulejo tradicional correspondente em cor, porém ligeiramente mais escuro com a variação da luminosidade inferior a um ($\Delta L^* = -0,3$), mantendo-se abaixo do limite de tolerância (REVEL *et al.*, 2013).

Agora no segundo, o pigmento utilizado no esmalte foi o óxido de cromo e ferro, a cromita (FeCr_2O_4), com estruturas minerais de hematita e eskolaíta, que parcialmente transmitem no infravermelho próximo. O processo de queima do revestimento ocorreu na temperatura abaixo do padrão ($T = 1.200^\circ\text{C}$), em 1.020°C , o que favorece a estabilidade térmica do pigmento, porém não garante a economia de tempo e energia além de encarecer o processo tradicional da fabricação, porque há a necessidade de dupla queima, com uma anterior, logo após a aplicação da base. Em razão disto e por causa da transmissibilidade dos pigmentos coloridos escolhidos, alcançou um incremento médio na refletância solar e infravermelha de 17% e 28%, nesta ordem, em relação à padrão, com uma pequena diferença nas coordenadas $L^*a^*b^*$ da cor ($\Delta E = 2,60$) (REVEL *et al.*, 2014a).

Os valores de emitância térmica nas tintas de Revel *et al.* (2014) são maiores do que verificado nos acabamentos frios esmaltados pretos ($\varepsilon = 0,82$) para aplicação em substratos cerâmicos, os quais também não apresentaram variação significativa com o convencional preto padrão, cujo pigmento é composto por elementos metálicos como o ferro, cromo, níquel e cobalto, sendo alguns destes presentes nos refletivos.

Revel *et al.* (2013) (2014a) combinam as ótimas propriedades refletivas dos materiais cerâmicos esmaltados frios à excelente durabilidade, resistência ao intemperismo e o apelo estético, que apenas os materiais coloridos oferecem, além da manutenção da sua superfície mais fria no que diz respeito ao material tradicional.

Em relação ao Brasil, duas telhas de fibrocimento frias brancas disponibilizadas no mercado nacional foram avaliadas por Couto (2019). Devido à aplicação do revestimento refletivo, elas apresentaram excelente desempenho térmico e as maiores luminosidades ($L^* = 92,71$ e $99,32$) dentre os parâmetros de cor, a qual indica o quanto de branco numa escala de 0 a 100 possui na amostra. Elas também exibiram aumento de 34% e 50% na refletância no infravermelho próximo, respectivamente, em comparação às cinzas do mesmo fabricante, como também apresentaram as menores temperaturas superficiais ($T_{\text{sup}} = 31,1^\circ\text{C}$ e $26,45^\circ\text{C}$) e flutuações térmicas ($\Delta T = 5,6^\circ\text{C}$ e $3,95^\circ\text{C}$), dentre toda a amostragem experimental composta de quarenta telhas, de fibrocimento e cerâmicas com acabamentos natural, resinado e esmaltado.

2.3.4 Estudos de caso

As variáveis, as quais influem na avaliação de desempenho térmico para os estudos de casos de acordo com Zinzi e Bozonnet (2012) são as condições climáticas locais, o uso da edificação, sua geometria, nível de isolamento e a tecnologia da construção.

2.3.4.1 Em cobertura

Dentre alguns estudos de casos, em que houve monitoramento antes e depois da substituição por um material refletivo, dentre os telhados planos, destaca-se a aplicação de uma membrana elastomérica impermeável branca, que possui 89% de refletância solar no infravermelho próximo, em uma área de 410 m^2 de cobertura em uma escola localizada em uma densa região urbana no centro de Atenas, na Grécia. Com base no monitoramento experimental, notou-se considerável redução na temperatura superficial de 25°C na cobertura e na temperatura do ar entre $1,5$ e $2,0^\circ\text{C}$, mensurada adjacente à cobertura, no segundo piso durante o verão de 2009 (SYNNEFA; SALIARI; SANTAMOURIS, 2012).

Outro estudo avaliou a mudança de uma membrana betuminosa com 7% de refletância solar por uma aplicação branca de 75% sobre um prédio industrial, entre julho a setembro de 2012, em Roma, na Itália, o que permitiu homogeneizar as temperaturas na superfície, com significativo decréscimo em 20°C e por volta de 10°C , respectivamente, nas superfícies externa e interna e também houve redução na temperatura do ar interno entre 2°C e 4°C no mezanino durante o verão (PISELLO; SANTAMOURIS; COTANA, 2013).

Em relação às telhas cerâmicas, as marrons escuras foram substituídas por frias quase brancas em uma residência de três pavimentos na cidade de Perugia, Itália, a qual obteve redução do pico da temperatura operativa interna em $4,7^\circ\text{C}$ no ático, desocupado e adjacente à cobertura e

do superaquecimento da superfície externa entre 15°C e 18°C no mês de julho, mais quente. Enquanto em janeiro, cujas perdas de calor não são desejadas no período do inverno, foram de 1,3°C e entre 2,0°C e 3,0°C, respectivamente (PISELLO; COTANA, 2014), o que constitui um resultado negativo irrisório, inferior a um terço, se comparado às benesses da estação de verão.

A redução da temperatura na superfície inferior da cobertura entre 6°C e 9°C é menos acentuada do que a verificada nas faces superiores, porém destaca-se a sua relevância, porque contribui na diminuição do pico da temperatura superficial do forro em 2,5°C no verão, o que demonstra de acordo com Pisello e Cotana (2014) no caso de uma cobertura não isolada, como as verificadas nos estudos de caso, que os benefícios do telhado frio também podem ser perceptíveis nos pisos inferiores.

Bozonnet, Doya e Allard (2011) avaliaram um edifício multifamiliar de quatro pavimentos no distrito de Saint-Eloi na cidade de Poitiers, França, antes e depois da aplicação de um revestimento frio com valor de refletância solar de 88% na cobertura ligeiramente inclinada, sob a qual possui isolamento térmico (10 cm) assim como também no ático (20 cm), ambos compostos de lã mineral. Constatou-se no monitoramento, durante o verão de 2009, que as flutuações da temperatura superficial obtiveram menor amplitude térmica ($\Delta T_{med} = 19,8^{\circ}\text{C}$), após a aplicação do revestimento frio, em oposição à variação de 30,2°C observada na cobertura betuminosa e a diminuição em 8,4°C na temperatura média operativa no ático.

Todavia, nas medições internas realizadas no apartamento duplex, logo abaixo da cobertura, não é verificada reduções de temperatura do ar no cômodo em razão do duplo isolamento térmico da cobertura e do ático tendo em vista que não houve diferenças evidentes nas temperaturas médias operativas internas, que por vezes inclusive observou-se ganho de 1°C na máxima durante o verão (BOZONNET; DOYA; ALLARD, 2011), o que corrobora a afirmação de Pisello e Cotana (2014) sobre coberturas frias não-isoladas termicamente.

Outro edifício residencial unifamiliar, com tipologia de alvenaria comum, também na cidade de Perugia, Itália, foi avaliado por Pisello, Rossi e Cotana (2014). A sua configuração inicial era com telhas de tijolos marrom velho com engobe marrom escuro ($\rho = 19\%$) e posteriormente, após a substituição por outras mais refletivas, com telhas de tijolos coloridas claras ($\rho = 77\%$), as quais foram avaliadas no período entre junho de 2010 a 2012.

Os autores verificaram a redução das temperaturas médias superficial de pico no telhado de 15°C a 20°C e operativa do ar interna, em relação à externa de bulbo seco, por volta de 3°C no

verão como também as telhas se apresentaram em média 1°C mais frias no inverno. Segundo Pisello, Rossi e Cotana (2014) a refletância solar não é eficiente em alterar o desempenho térmico nesta estação, assim como variações insignificantes são verificadas no período noturno, ambos mais relacionados às condições climáticas externas.

Para Pisello, Rossi e Cotana (2014), as estratégias de telhado frio são efetivas tanto em condições flutuantes, as quais foram monitoradas no ático das edificações, como em contextos com alta variabilidade térmica sazonal, isto é, entre o verão e inverno, como no clima temperado na região central da Itália, o qual é mais quente do que em alguns locais no Mediterrâneo, em que busca-se a eficiência energética das edificações através das reduções no uso de energia para resfriamento nos períodos quentes (PISELLO; COTANA, 2014).

Levinson e Akbari (2010) propuseram uma metodologia para edificações não-residenciais, a qual permite avaliar de forma abrangente os benefícios alcançados por meio da extensa implementação dos materiais frios. Por exemplo, para o distrito escolar na cidade de Sacramento, Califórnia realizou-se um estudo preliminar, o qual previu a substituição de revestimentos escuros para brancos frios em todas as 85 escolas da cidade, cuja área total supera mais de 450.000 m² nas coberturas. A economia de energia estimada, através dos dados de código postal e área de telhado acondicionada, foi de mais de \$670.000 em um ano, já descontadas as penalidades de aquecimento devido à menor absorção solar dessas superfícies no período frio (GILBERT; MANDEL; LEVINSON, 2016).

2.3.4.2 *Em cobertura e fachada*

Revel *et al.* (2014b) produziram protótipos de escala média na cidade de Algete, próximo a Madrid na Espanha, cujas dimensões são de 2,4 x 3 x 2,4 m, com fachadas e cobertura de baixa inclinação (2,2%) feitas com uma camada de estuque interna, com espaço de ar entre a placa externa de OSB, sem isolamento térmico, as quais ancoram-se sobre uma estrutura de aço interna erguida sobre uma laje de concreto monolítico para a avaliação experimental do desempenho térmico dos materiais frios desenvolvidos em Revel *et al.* (2014a).

A produção de tintas frias para membranas de telhado foi realizada com revestimento à base de resina acrílica poliuretana modificada branca, que garante adesão ao tecido betuminoso, com a adição de nanopartículas de dióxido de silício (SiO₂) e óxido de zinco (ZnO) para melhorar a impermeabilidade à água e a resistência biológica, respectivamente, por tratar-se de cobertura plana. A mistura de pigmentos frios escolhidos foram o aluminato de cobalto (CoAl₂O₄), azul,

a cromita (FeCr_2O_4), preta, e o óxido misto de níquel, antimônio e titânio $[(\text{NiSbTi})\text{O}_2]$, amarelo, o que resultou em um matiz cinza, e quando aplicado sobre o substrato betuminoso, o resultado foi o aumento na refletância solar e no infravermelho próximo de 17% e 29%, respectivamente, e uma maior luminosidade ($\Delta L^* = +7,94$) em relação à uma membrana cinza escura disponível no mercado (REVEL *et al.*, 2014a).

No período entre 15 de junho e 10 de setembro de 2012, as membranas cinzas, comercial e fria, foram aplicadas por Revel *et al.* (2014b) e testadas ao mesmo tempo nos modelos em escala números 03 e 04, nesta ordem, em que observou-se para a membrana fria a redução média do pico do fluxo de calor em $11,7 \text{ W/m}^2$, o que corresponde a 24% em relação à comercial, como também os picos das temperaturas externas e internas diminuíram em $4,7^\circ\text{C}$ e $2,5^\circ\text{C}$, respectivamente.

No mesmo experimento de Revel *et al.* (2014b), a fachada Sul foi testada com a aplicação dos azulejos cerâmicos preto e a tinta acrílica verde produzidos em Revel *et al.* (2014a) nos protótipos, os quais foram cobertos pela membrana convencional cinza, só que em intervalos de tempo diferentes. Também na primeira parte dos ensaios, só que nos protótipos com numerações 01 e 02, aplicaram-se os azulejos, e na segunda, no período referente de 08 a 30 de maio de 2013, as tintas acrílicas verdes foram utilizadas nos de números 03 e 05, seguindo a ordem sempre do material convencional e depois frio. No quadro 2.1 estão apresentados os materiais aplicados na cobertura e fachada Sul em cada célula teste e o respectivo período de medição.

Quadro 2.1 – Materiais de revestimento aplicados nas coberturas e fachadas das células-testes

Período	Modelo	01	02	03	04	05
15 de junho a 10 de setembro de 2012	Cobertura	Membrana cinza convencional	Membrana cinza convencional	Membrana cinza convencional	Membrana cinza fria	-
	Fachada Sul	Azulejo cerâmico preto convencional	Azulejo cerâmico preto frio	Tinta clara convencional	Tinta clara convencional	-
08 de maio a 30 de maio de 2013	Cobertura	-	-	Membrana cinza convencional	-	Membrana cinza convencional
	Fachada Sul	-	-	Tinta clara convencional	-	Tinta verde fria

Fonte: Adaptado de Revel *et al.* (2014b).

As comparações dos materiais frios para com os convencionais constatadas por Revel *et al.* (2014b) indicaram a diminuição média, respectivamente, para os picos do fluxo de calor de 8,0

W/m² e 10,2 W/m² na fachada Sul, o que representa uma queda de 28% e uma relativa de 50% bem como reduções nas temperaturas de pico das fachadas externa e interna de 2,8°C e 1,1°C para o primeiro e de 4,0°C e 2,4°C no segundo. Dessa forma, observa-se que o aumento da refletância solar tem grande impacto na condução do fluxo de calor para o ambiente interno e uma redução significativa na temperatura da fachada.

Em outro estudo, a análise do desempenho térmico combinado dos materiais frios aplicados simultaneamente na cobertura e fachada foi realizada por Pisello *et al.* (2015) no protótipo com volume de 12 m³ no campus da Universidade de Perugia, Itália. O monitoramento experimental foi conduzido na célula teste, edificada com técnicas construtivas recentes, cujas condições de contorno da envoltória são reais e dinâmicas, durante o verão de 2014.

O cenário padrão constitui-se do protótipo coberto com uma membrana preta betuminosa e as fachadas envolvidas com uma pintura tradicional vermelha. Posteriormente, a membrana foi substituída por uma branca à prova d'água à base de poliuretano com alta elasticidade e na última etapa, realizada a pintura da fachada Sul com uma tinta não orgânica quase branca, composta principalmente por silicato de potássio (Na₂SiO₃) e pequena porcentagem de resina, a qual caracteriza-se pela alta permeabilidade ao vapor. Destaca-se que em ambos os materiais frios, o potencial de resfriamento foi otimizado em laboratório com a adição de 12% de dióxido de titânio (TiO₂) e 4% de microesferas cerâmicas ocas (PISELLO *et al.*, 2015).

Em comparação com o cenário padrão, as reduções nas temperaturas superficiais foram verificadas no telhado frio e na fachada fria Sul, para as faces externa e interna, respectivamente, de até 19,8°C e 3,4°C no primeiro e de até 9,9°C e 4,4°C para a segunda. Além disto, para as mesmas condições de temperatura do ar externo equivalente, verificou-se redução máxima de 3,1°C na temperatura operativa interna, sendo 2,6°C a contribuição direta do telhado frio para o efeito do resfriamento passivo, o que constitui uma solução mais efetiva do que a fachada fria enquanto solução combinada (PISELLO *et al.*, 2015).

Portanto, Pisello *et al.* (2015) concluíram que a contribuição da fachada fria é relativamente limitada, em relação ao telhado, em termos de diminuição da temperatura operacional, porém alcança resultados significantes nas reduções superficiais da temperatura. No entanto, pela análise do efeito combinado dos materiais frios pelo software CFD (*Computational Fluid Dynamics*) realizada por Revel *et al.* (2014b), verificou-se, em termos de temperatura operativa interna, a redução nos valores de pico de 0,8°C e 0,3°C, respectivamente, para os azulejos frios

da fachada e na membrana fria da cobertura, por causa da maior proporção da superfície vertical, levando em consideração as quatro fachadas no modelo, em relação à horizontal.

Apesar do benefício dos materiais frios nos telhados, onde o maior efeito é alcançado por unidade de área, o potencial da sua utilização em fachadas foi demonstrada por Revel *et al.* (2014b) com melhorias significantes, especialmente para edifícios altos, em que os panos verticais cobrem grande parte do envelope da edificação, e em climas amenos. Portanto, a sua contribuição à redução da demanda energética não deve ser negligenciada, especialmente em regiões com clima quente.

2.4 Conclusão

Os revestimentos frios possuem baixa absorvância (isto é, alta refletância da radiação solar) e aquecem menos que uma superfície convencional com o mesmo acabamento de acordo com a definição do Consórcio Brasileiro de Superfícies Frias como alta emitância térmica, propriedade relacionada a perda de calor na forma de radiação infravermelha de onda longa.

A dispersão da luz é o principal mecanismo de acordo com Lim (2020) para o resfriamento nas superfícies frias, a qual está relacionada ao tamanho, forma e distribuição das suas partículas. Desta forma, partículas de formato esférico como os pigmentos que possuam tamanho mínimo de 300 nm (0,3 μm) e preferencialmente entre 500 nm e 2.000 nm (0,5 μm e 2 μm) dispersam de forma mais efetiva os comprimentos de onda da radiação solar (LIM, 2020) como explicado pela teoria do espalhamento de Mie em Yamasoe e Corrêa (2016).

Contudo, quanto menores os tamanhos destas partículas, que possuem maiores áreas superficiais e mais energia de atração entre elas, como também em maiores concentrações tendem a deixá-las aglomeradas e sobrepostas. Desta forma, a menor exposição das partículas aglomeradas aos processos de absorção e espalhamento da radiação reduz a eficiência para a dispersão da luz.

Através do contato da radiação com partículas dispersas num filme pigmentado bem fino, Levinson, Berdahl e Akbari (2005a) determinaram as propriedades dos pigmentos como a absorção e o espalhamento da luz no sentido oposto à superfície por meio de coeficientes. Os autores também constataram no experimento que a absorvância/refletância solar têm maior impacto para o balanço térmico das superfícies do que o espalhamento decorrente do fenômeno da dispersão da luz.

Além da dimensão das partículas, concentração e distribuição delas no revestimento, a refletividade na região do infravermelho próximo, onde concentra a maior parte da energia solar, depende da composição química e da diferença no índice de refração entre o pigmento e o aglutinante no qual está imerso.

Neste sentido, os pigmentos inorgânicos de tamanho nanométrico refletem mais no espectro infravermelho próximo e espalham melhor a radiação por causa dos seus maiores índices de refração ($\eta > 2$) em relação à resina ($\eta \approx 1$) e têm maior poder de opacidade do que os orgânicos.

O pigmento inorgânico colorido apesar do coeficiente de forte absorção e/ou espalhamento no espectro visível, tem fraca absorção no infravermelho próximo. Como exemplo, citam-se os óxidos metálicos como o dióxido de titânio (TiO_2), o qual é um pigmento branco, estável, inerte, não tóxico, barato e extremamente popular.

Nas avaliações de desempenho térmico, em decorrência da adição destes pigmentos refletivos à radiação infravermelha próxima verificou-se o aumento da refletância solar, sendo os maiores ganhos de refletância em materiais frios de cores mais escuras, e a consequente redução na temperatura da sua superfície em relação a uma convencional. Enquanto as diferenças nos valores da emitância térmica entre os materiais frios e os pigmentados convencionais são nulas ou irrisórias, sendo os valores ligeiramente menores constatados nas superfícies frias. Foram observados elevados valores de refletância solar para todas as superfícies brancas, em parte devido a sua coloração, seja para os materiais convencionais, os com adição de cal (óxido de cálcio CaO) ou microesferas cerâmicas e de vidro.

Nos estudos de caso, em coberturas não isoladas, também foi constatada a redução da temperatura na face interna da cobertura e na temperatura do ar adjacente à cobertura, em relação à externa de bulbo seco, nos períodos de verão. Os benefícios da fachada fria Sul (no hemisfério Norte) são limitados, em relação ao telhado, por causa da menor contribuição em termos de redução na temperatura operativa do ar, mas significativa na diminuição da superficial.

Além do maior efeito alcançado por unidade de área no telhado por receber maior intensidade durante o tempo de exposição solar, o telhado frio também é mais efetivo como solução combinada. Contudo, o potencial em fachadas frias foi demonstrado por simulações com melhorias significantes, especialmente para edifícios altos, por causa da maior proporção da superfície vertical em relação à horizontal, e em climas amenos.

Então, os benefícios da aplicação de materiais frios na envoltória das edificações foram observados em superfícies sem isolamento térmico, monitoradas em condições de estado transiente, o qual leva em consideração a passagem de calor por unidade de tempo, e regiões com climas de alta variabilidade térmica sazonal (entre o verão e inverno).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa é delimitada pelo método experimental, cujas medições foram realizadas em laboratório e em campo em uma diversidade de materiais da construção civil para coberturas e fachadas de forma a avaliar o desempenho óptico-físico e térmico dos revestimentos frios. Após a seleção dos materiais e preparo das amostras, a metodologia foi dividida em quatro partes com as medições: (i) dos parâmetros de cor; (ii) das propriedades físicas e ópticas (refletância solar e emitância térmica) e (iii) das temperaturas superficiais além da (iv) observação das micrografias nas superfícies das amostras.

3.1 Seleção dos materiais

A seleção da amostragem foi realizada através de pesquisa dos materiais de revestimento da construção civil no mercado nacional, os quais indicaram nas suas especificações técnicas apresentarem altos valores de reflexão solar e emitância térmica, cujas informações quantitativas estão especificadas na Tabela 3.1. Ou então esses materiais possuem a indicação “térmica” ou “refletiva” (“refletora” e/ou “reflexiva”) com menção à redução de temperatura, que proporciona conforto térmico, ou benefício energético pela redução de gastos com equipamentos de refrigeração ao utilizá-los. Também, outras informações foram compiladas na Tabela 3.1 como o índice de refletância solar (SRI) e os valores de reduções para as temperaturas internas e superficiais a partir das informações dos fabricantes.

Tabela 3.1 – Especificações técnicas de alguns materiais de construção avaliados

Código	Nomenclatura	Fabricante	ρ (%)	ϵ	SRI (%)	$\downarrow T_{int}$	$\downarrow T_{sup}$
TFC-01	ThermoComfort	A	-	-	-	Em 5°C	-
TFC-02	TopComfort	-	73	0,93	91	Até 4°C	11,3°C
ML-01	- Top Reflective	-	86	0,9	-	-	-
T-01	-thermic	B	99 ¹	-	99	Até 35%	Até 50%
T-03	-thermic Extreme	B	90	-	100,9	Até 35%	Até 50%
T-04	- Tinta térmica	B	-	-	87	-	-
T-05	-thermic 1	-	87	-	110	De 8°C a 10°C	33,1°C
T-06	-thermo	C	90	-	-	Até 30%	-
T-07	-therm	-	88,07	-	-	Até 9°C	-
T-08	Termo-	-	80 a 90	-	-	-	-
T-09	-therm	-	≈ 90	-	-	Até 8°C	-
A-01	-	-	86,2	0,946	-	-	-

¹Refere-se apenas à região do ultravioleta A e B

No entanto, há equívoco na informação de muitos fabricantes que afirmam que as tintas e os materiais elastoméricos refletivos são isolantes térmicos. Logo, o isolamento térmico representa a resistência à passagem do calor por condução através dos componentes construtivos e relaciona-se de forma diretamente proporcional à espessura e de forma inversa à condutividade térmica do material (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Portanto, apesar da baixa condutividade térmica dos componentes da tinta, a sua espessura é muito fina, não excedendo poucos milímetros, e não é suficiente para reduzir a transmissão de calor por condução.

A seguir, todos os materiais avaliados na pesquisa estão descritos (Quadro 3.1) e suas informações estão subdivididas por tipo de material (telhas de concreto ou de fibrocimento, impermeabilizantes líquidos, tintas e aditivo em pó) e local de aplicação (cobertura ou cobertura/fachada). Os nomes comerciais foram omitidos e substituídos pelas nomenclaturas dos materiais, as quais indicam os termos “*Comfort*” ou “*Reflective*” ou então o prefixo termo- ou sufixos em inglês -therm(o) ou - thermic assim como para os fabricantes, categorizados por letras.

Quadro 3.1 – Materiais de construção avaliados na pesquisa (Continua)

Tipo de material: Telhas de concreto				
Aplicação: Cobertura				
Amostra	Código	Nomenclatura	Fabricante	Cor (nomenclatura)
01	TC-01-B	- Prime	A	Branco (alva)
02	TC-01-M	- Prime	A	Marfim (mediterrâneo)
03	TC-01-C	- Prime	A	Cinza (ebony)
04	TC-01-V	- Prime	A	Vermelho (tinto)
Tipo de material: Telhas de fibrocimento				
Aplicação: Cobertura				
05	TFC-01	ThermoComfort	A	Branco
06	TFC-02	TopComfort	- ¹	Branco
07	TFC-03	TopComfort	- ¹	Branco
Tipo de material: Manta Líquida Impermeabilizante				
Aplicação: Cobertura				
08	ML-01	- Top Reflective	- ¹	Branco
09	ML-02	-	B	Branco
Aplicações: Cobertura e Fachada				

¹refere-se a diversos tipos de fabricantes diferentes, os quais não estão tipificados por letras

Quadro 3.1 – Materiais de construção avaliados na pesquisa (Conclusão)

10	ML-03	-	C	Branco
Tipo de material: Tinta				
Aplicação: Cobertura				
11	T-01	-thermic	B	Branco
12	T-02-B	- Telha Térmica	D	Branco
13	T-02-P	- Telha Térmica	D	Bege (pérola)
14	T-02-C	- Telha Térmica	D	Cinza
15	T-02-V	- Telha Térmica	D	Vermelho (cerâmica ônix)
Aplicações: Cobertura e Fachada				
16	T-03	-thermic Extreme	B	Branco
17	T-04	- tinta térmica	B	Branco
18	T-05	-thermic 1	- ¹	Branco
19	T-06	-thermo	C	Branco
20	T-07	-therm	- ¹	Branco
21	T-08	Termo-	- ¹	Branco
22	T-09	-therm	- ¹	Branco
Tipo de material: Aditivo em pó para tinta				
Aplicações: Cobertura e Fachada				
23	A-01	-	- ¹	Branco

Fonte: A autora.

3.2 Preparo das amostras

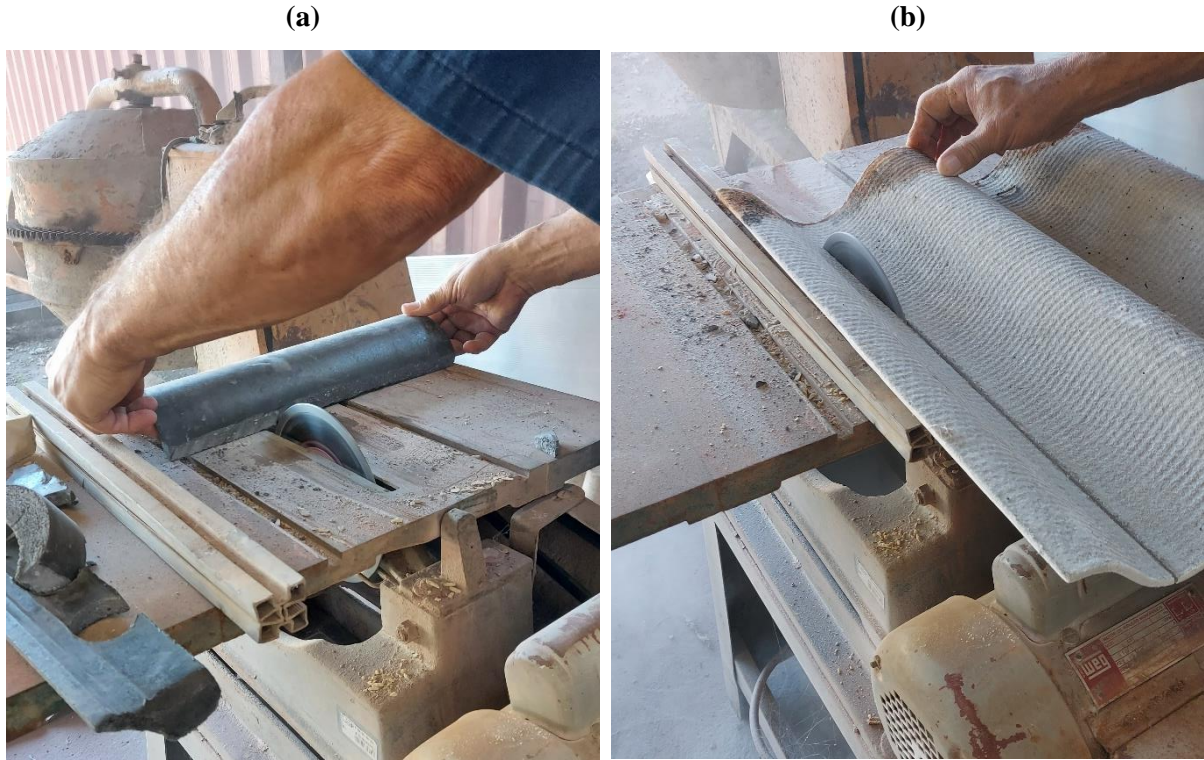
Foram realizados cortes em duas dimensões diferentes para a realização dos experimentos nas telhas e na placa cimentícia utilizada como substrato para a aplicação dos materiais líquidos. Anterior à etapa da pintura, foi realizada a adição do pó refletivo em pó às tintas convencionais para a fabricação das tintas aditivadas.

3.2.1 Telhas

Nas telhas, os cortes foram realizados em uma serra circular no Laboratório de Construção Civil (LCC) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU/USP). As telhas de concreto foram cortadas na porção central do cume, de menor espessura, na Figura 3.1 (a) e as de fibrocimento na Figura 3.1 (b), das quais foram retirados pedaços em três dimensões diferentes para adequar-se aos equipamentos. Os menores possuem lado de 2 cm e os médios com 4 cm foram cortados na sua concavidade para retirar os pedaços mais planos para as medições no microscópio eletrônico de varredura e espectrofotômetro, respectivamente (Figura 3.2). Destaca-se que foi

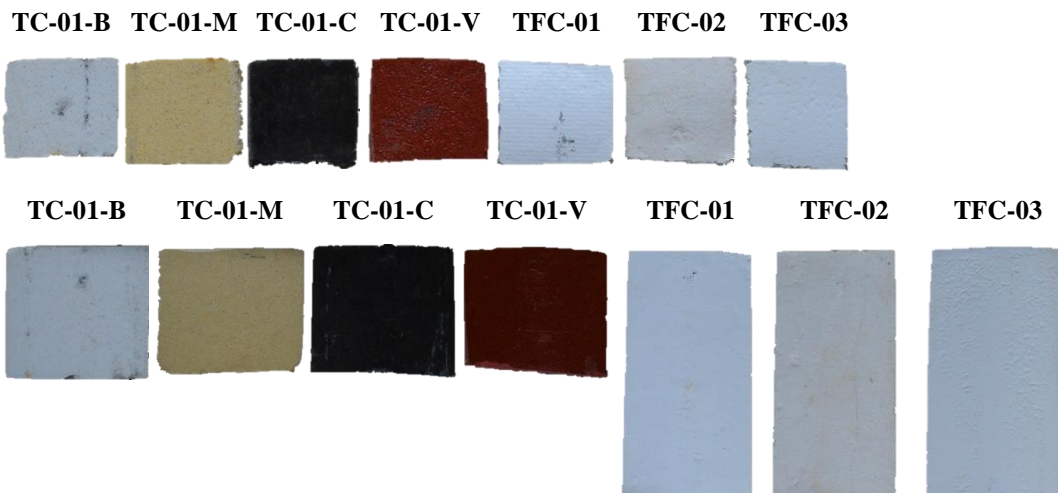
possível a retirada de um pedaço maior plano de 4 x 9 cm no tamanho médio das telhas de fibrocimento.

Figura 3.1 – Corte na serra circular das telhas (a) de concreto e (b) fibrocimento



Fonte: A autora.

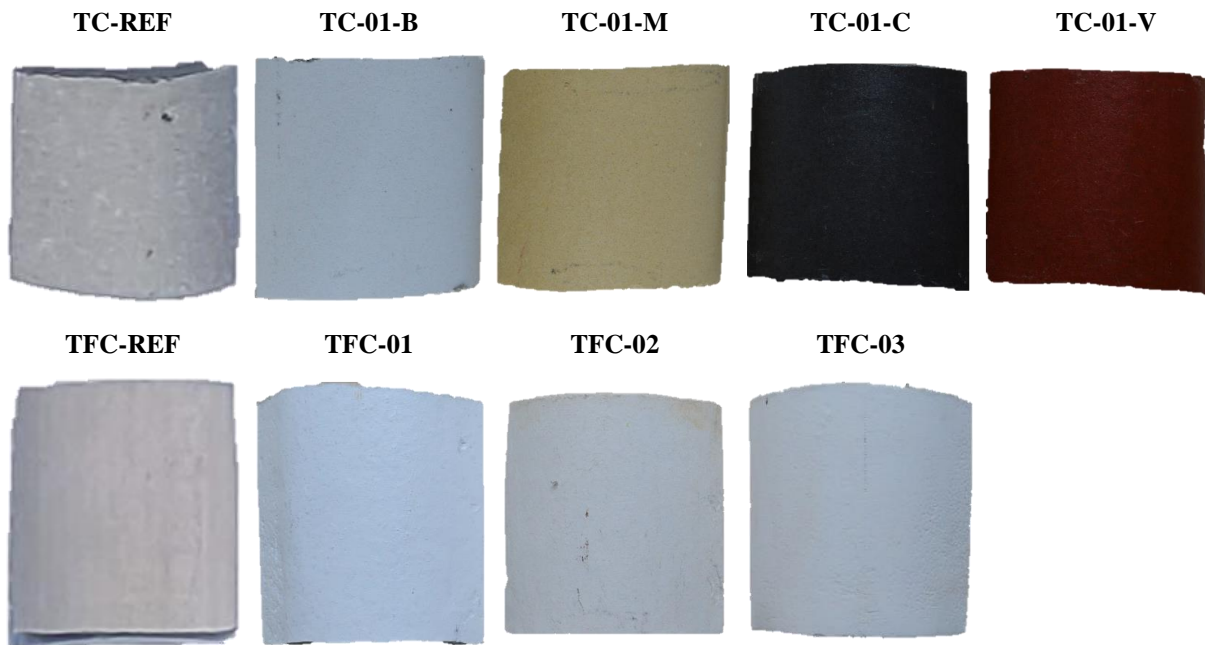
Figura 3.2 – Amostras de tamanhos menores e médios das telhas de concreto e fibrocimento



Fonte: A autora.

Os pedaços maiores, com lado de 9 cm, possuem curvatura mais acentuada, porém acomodam-se ao cabeçote de 50 mm do emissômetro portátil para superfícies onduladas e foi utilizado para as medições dos parâmetros de cor e temperatura superficial em campo (Figura 3.3). O resultado dos cortes de todas as amostras pode ser observado nas Figuras 3.2 e 3.3.

Figura 3.3 – Amostras de tamanhos maiores das telhas de concreto e fibrocimento



Fonte: A autora.

Também se cortou telhas de concreto (TC-REF) e fibrocimento (TFC-REF) cinzas, não revestidas, de tamanhos maiores como referência de telhas convencionais. Então, as amostras das telhas de concreto possuem código **TC** e o **TFC** refere-se às telhas de fibrocimento. As amostras da mesma linha e fabricante possuem a mesma numeração e diferem-se apenas pela letra final, que está relacionada à inicial da sua cor.

3.2.2 Materiais líquidos

3.2.2.1 Incorporação do aditivo refletivo às tintas convencionais

O aditivo em pó foi incorporado, de acordo com as instruções do seu fabricante, a tintas acrílicas à base de água com acabamento semibrilho do fabricante D, o mesmo das tintas térmicas para telhas (Quadro 3.1). Foram adquiridas latas (900 ml) de tintas nas cores branca (T-01-B-REF), pérola (T-01-P-REF), cinza (T-01-C-REF) e vermelha (T-01-V-REF), as quais foram escolhidas em razão da similaridade com as tonalidades já presentes em outros materiais selecionados.

A dosagem recomendada pelo fabricante é a mistura de 1 parte de aditivo para 4 partes de tinta em volume. Contudo, a quantidade total de aditivo em pó é limitada para a produção das quatro tintas refletivas. Então, estipulou-se a mistura em volume de 100 ml de aditivo em pó para cada 400 ml de tinta acrílica.

De acordo com a sugestão do manual do fabricante, num primeiro momento, apenas metade do volume da tinta (200 ml) foi derramado em um recipiente e posteriormente a metade em volume do aditivo em pó (50 ml), os quais foram mensurados com um béquer, e depois misturados manualmente com um misturador de tintas (Figura 3.4). Para terminar, repetiu-se o mesmo procedimento para o volume restante da tinta (200 ml) e do aditivo em pó (50 ml), o qual foi realizado para todas as tintas selecionadas.

Figura 3.4 – Processo de incorporação e mistura da tinta acrílica ao pó aditivo refletivo



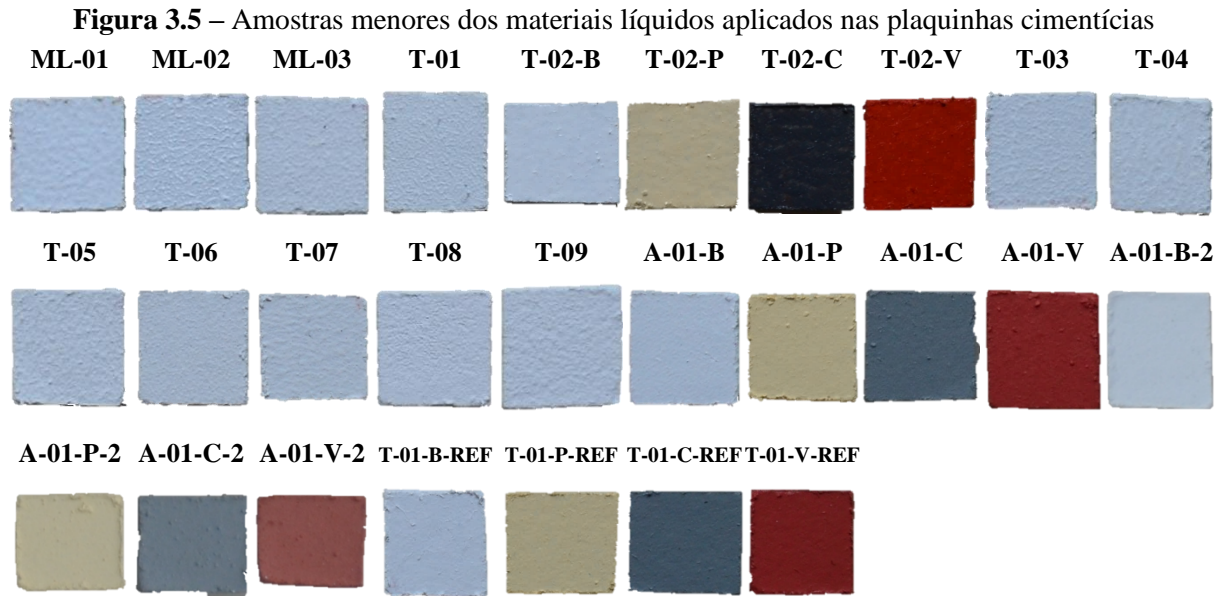
Fonte: A autora.

3.2.2.2 Corte e pintura

Uma placa cimentícia (1,20 x 2,40 m) para *steel frame*, da marca Brasilit/Eternit, de 6 mm de espessura, cuja superfície é plana, impermeabilizada e com borda reta, a qual pode receber acabamento em pintura foi escolhida como substrato para a aplicação dos materiais líquidos como as mantas impermeabilizantes e as tintas térmicas, assim como as acrílicas convencionais antes e após a mistura com o aditivo em pó.

Portanto, foram realizados cortes quadrados com dimensões de 2 cm (Figura 3.5) e 10 cm de lado (Figura 3.6) com a serra manual do Laboratório de Construção Civil (LCC), sendo o menor para a utilização no microscópio eletrônico de varredura e o maior nas medições das propriedades ópticas físicas como também para os parâmetros de cor e temperatura superficial.

Após o corte, as superfícies cimentícias estavam secas, limpas e isentas de gorduras, poeiras e partículas soltas ou qualquer produto que impedisse a aderência aos produtos líquidos, cujo procedimento de pintura foi realizado com rolinho de espuma com intervalo entre demãos de uma hora e trinta minutos (1h30min).



Fonte: A autora.

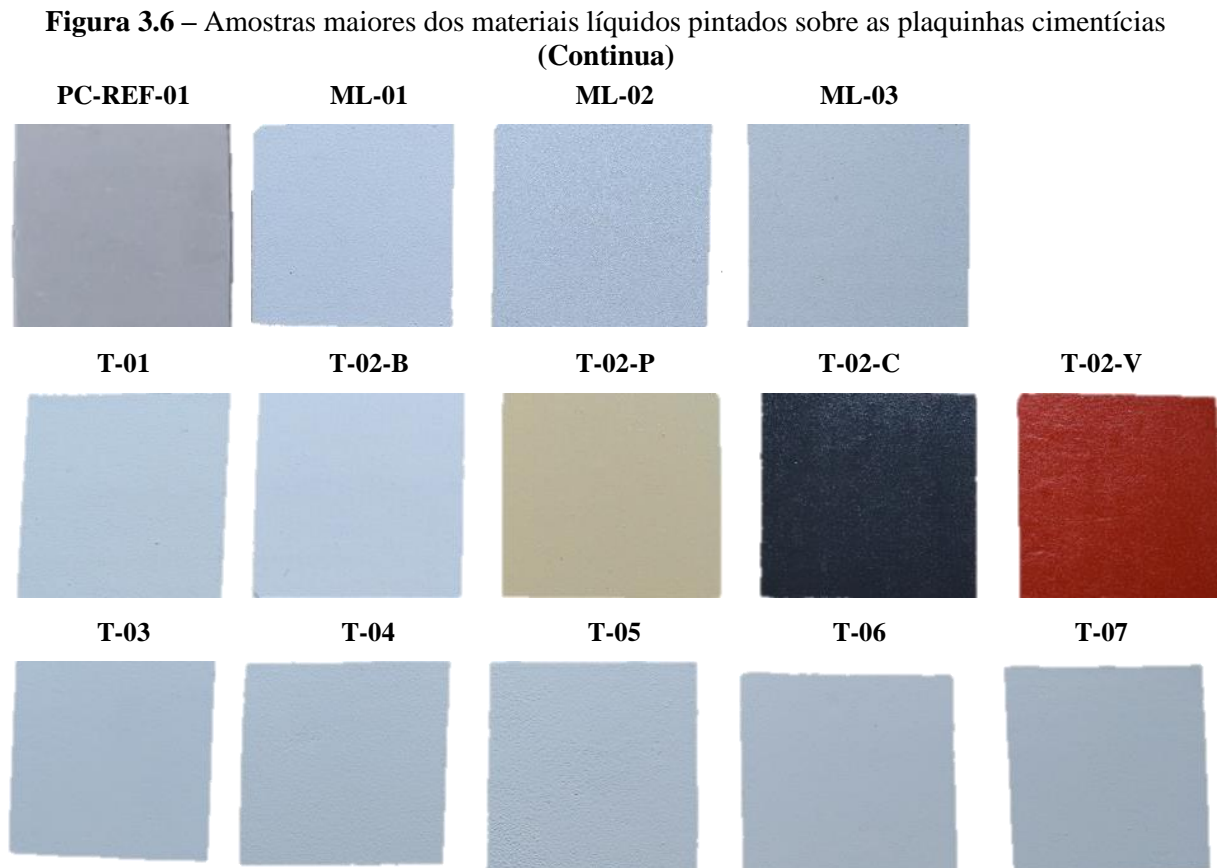
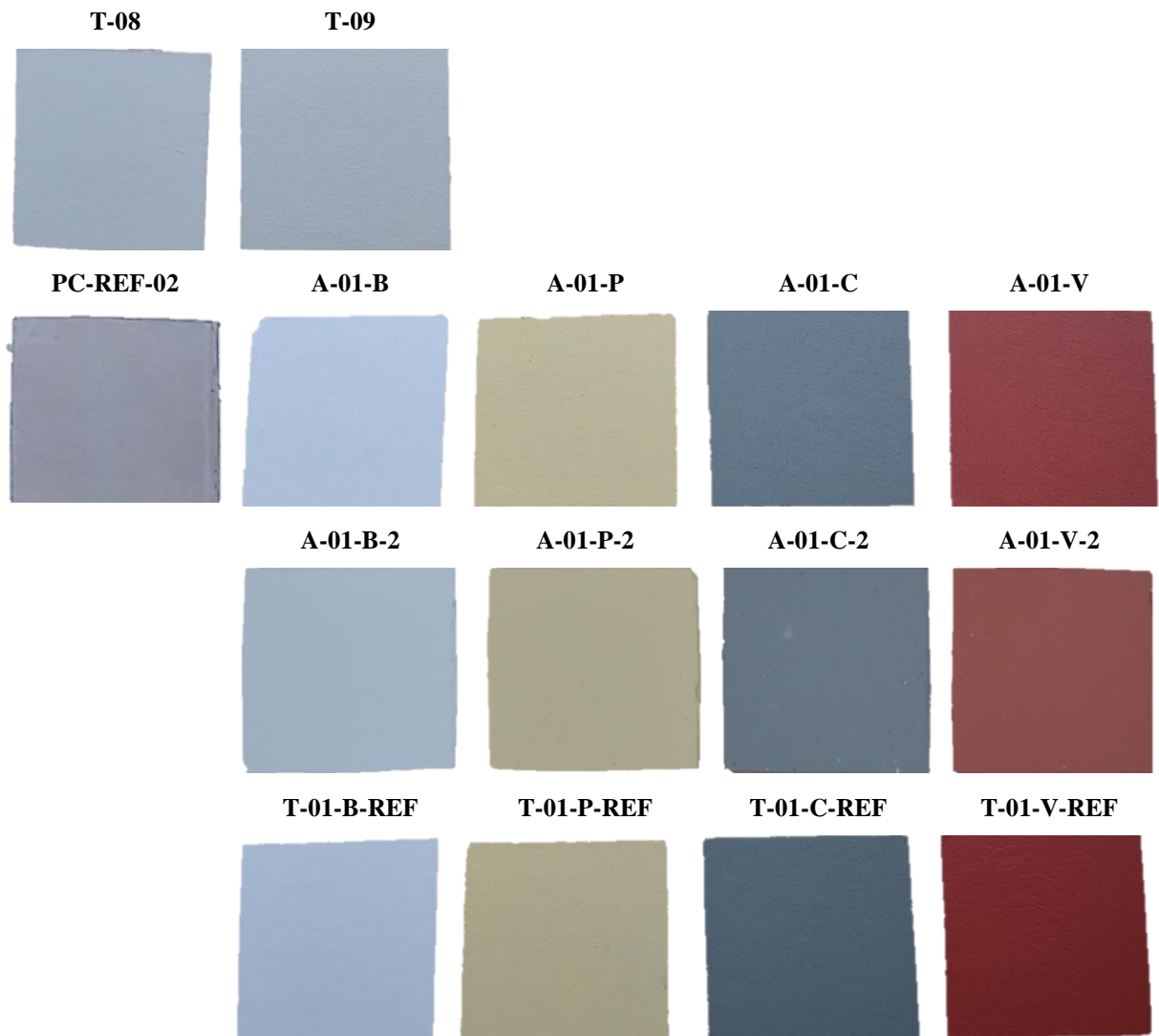


Figura 3.6 – Amostras maiores dos materiais líquidos pintados sobre as plaquinhas cimentícias
(Conclusão)



Fonte: A autora.

O número de demãos e a proporção de diluição com água dos materiais foram realizados de acordo com as instruções de cada fabricante, cujas informações estão resumidas na Tabela 3.2. Nas especificações dos materiais que indicavam apenas a espessura final em 250 e 500 μm da tinta seca, foram aplicadas uma e duas demãos, nesta ordem, e pela observação nas suas consistências, optou-se em utilizá-los na sua composição pura, isto é, sem diluição.

As mantas líquidas impermeabilizantes têm **ML** no código das suas amostras enquanto as iniciadas com **T** são relativas às tintas refletivas (ou térmicas). Nas tintas térmicas de cores branca (T-02-B) e pérola (T-02-P) para telhas, em razão das consistências muito líquidas, não foi suficiente a aplicação das três demãos diluídas para obter-se a capacidade total de cobertura do substrato, logo, optou-se em aplicar mais três demãos puras.

Tabela 3.2 – Número de demãos aplicadas e proporção de diluição nas mantas líquidas e tintas

Nº	Código	Nomenclatura	Nº de demãos	Diluição
Tipo de material: Manta Líquida Impermeabilizante				
08	ML-01	- Top Reflective	03	1ª em 10% de água e nas 2ª e 3ª Puro
09	ML-02	-	02	Pura
10	ML-03	-	02	Pura
Tipo de material: Tinta				
11	T-01	-thermic	01	Pura
12	T-02-B	- Telha Térmica	06	1ª em 50% de água e nas 2ª e 3ª em 15% de água
13	T-02-P	- Telha Térmica		
14	T-02-C	- Telha Térmica	03	1ª em 50% de água e nas 2ª e 3ª em 15% de água
15	T-02-V	- Telha Térmica		
16	T-03	-thermic Extreme	01	Pura
17	T-04	- tinta térmica	02	Pura
18	T-05	-thermic 1	03	Em 20% de água
19	T-06	-thermo	02	Pura
20	T-07	-therm	03	Em 10% de água
21	T-08	Termo-	03	Em 15% de água
22	T-09	-therm	04	Pura

Fonte: A autora.

Na tabela 3.3 estão apresentadas as informações acerca das tintas convencionais selecionadas (código **-REF**), cujo número de demãos e a diluição também foram aplicadas para elas próprias misturadas ao aditivo em pó, as tintas aditivadas (código **A-01** e a inicial da letra indicando a sua coloração).

Tabela 3.3 – Número de demãos aplicadas e proporção de diluição nas tintas aditivadas e convencionais

Nº	Código	Nº de demãos	Diluição	Nº	Código	Nº de demãos	Diluição
Tipo de material: Tinta aditivada				Tipo de material: Tinta convencional			
23	A-01-B	03	Em 30% de água	27	T-01-B-REF	03	Em 30% de água
24	A-01-P	03	Em 30% de água	28	T-01-P-REF	03	Em 30% de água
25	A-01-C	03	Em 30% de água	29	T-01-C-REF	03	Em 30% de água
26	A-01-V	03	Em 30% de água	30	T-01-V-REF	03	Em 30% de água
31	A-01-B-2	03	Em 30% de água				
32	A-01-P-2	03	Em 30% de água				
33	A-01-C-2	03	Em 30% de água				
34	A-01-V-2	03	Em 30% de água				

Fonte: A autora.

Nas amostras 23 a 26 foram aplicadas duas demãos das tintas aditivadas e na terceira e última demão aplicou-se a tinta convencional (sem aditivo) correspondente em cor, porque de acordo com o fabricante do pó aditivo, assim obtém-se um acabamento liso como revestimento final

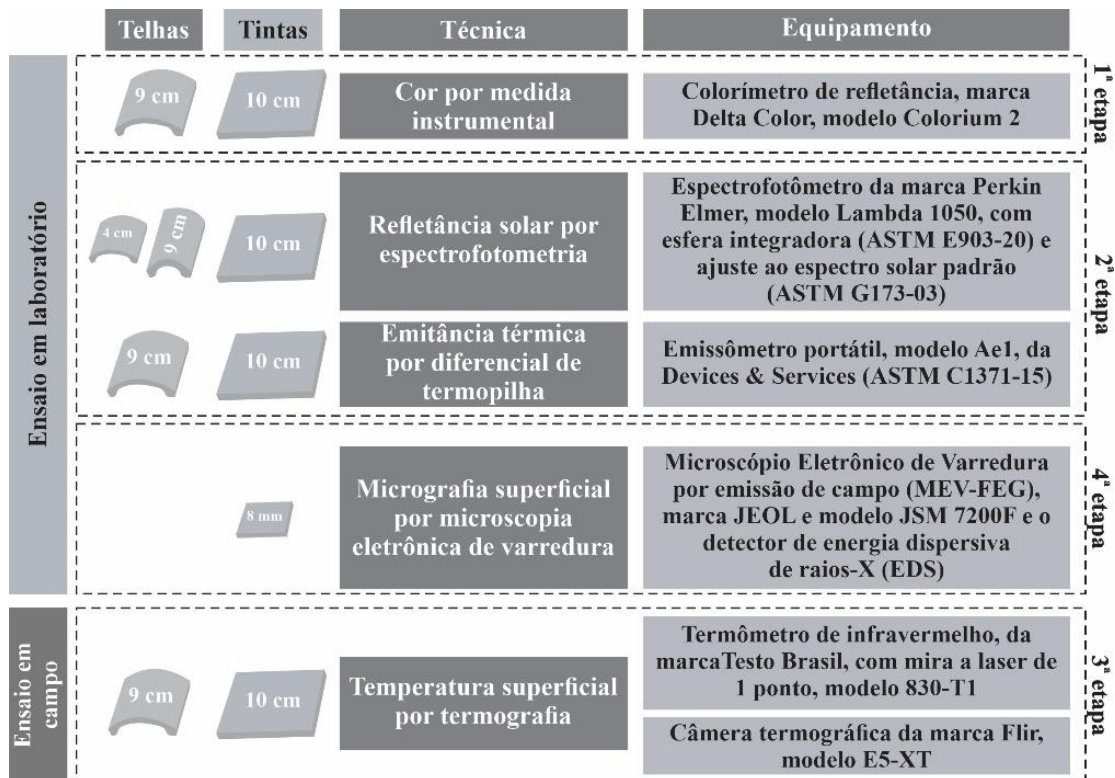
da superfície. Todavia, os resultados das propriedades radiantes sofrem alterações de acordo com o acabamento, e por isso nas análises adicionou-se as amostras 31 a 34 (numeral **-2** no final do código), porém aplicou-se nas plaquinhas as três demãos somente com a aditivada, apesar da diferença perceptível no acabamento superficial.

Logo, a amostragem final é composta por trinta materiais frios, sendo (i) 07 telhas (04 de concreto e 03 de fibrocimento), (ii) 03 mantas impermeabilizantes (ML), (iii) 12 tintas térmicas (T) e (iv) 08 tintas aditivadas (A), após a utilização do pó refletivo. Eles apresentam variedade na constituição apesar de maioritariamente na mesma coloração branca. Os materiais de referência, os quais apresentam a indicação **-REF** no final do código, compõe-se por telha de concreto (TC-REF) e de fibrocimento (TFC-REF) cinzas, não revestidas, o substrato cimentício sem pintura (PC-REF) e quatro tintas acrílicas convencionais, sendo a branca (T-01-B-REF), pérola (T-01-P-REF), cinza (T-01-C-REF) e vermelha (T-01-V-REF).

3.3 Métodos empregados

O protocolo experimental foi dividido em quatro etapas, para possibilitar a avaliação do desempenho térmico de revestimentos frios para uso em coberturas e fachadas (Figura 3.7).

Figura 3.7 – Fluxograma do tamanho das amostras, métodos e equipamentos utilizados



Fonte: A autora.

3.3.1 Parâmetros de cor

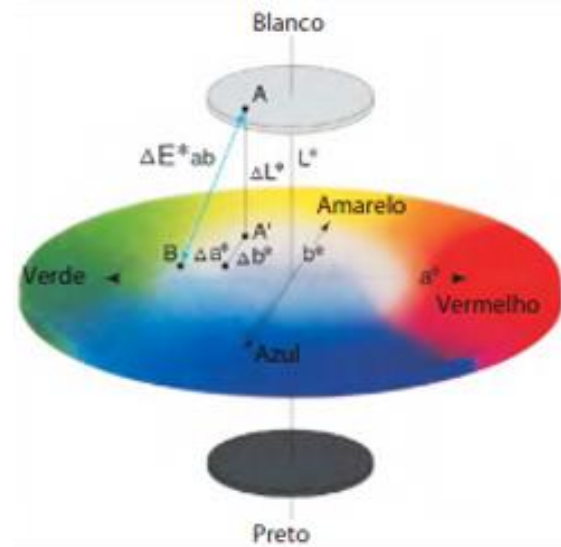
Os parâmetros de cor das amostras dos materiais foram medidos pelo instrumento colorímetro de refletância, marca Delta Color, modelo *Colorium 2* (Figura 3.8) e a técnica utilizada a colorimetria através do software Lab7 (DELTA COLOR, 2011a).

Figura 3.8 – Colorímetro de refletância *Colorium 2*



Fonte: Delta Color (2011a).

Figura 3.9 – Especificação de cor no espaço de cor $L^*a^*b^*$



Fonte: Minolta (2007).

Os padrões estabelecidos pelo equipamento, a partir das referências da Comissão Internacional de Iluminação (CIE), são a fonte de luz com lâmpadas de LED de alta eficiência, cuja distribuição de energia é representada pelo iluminante D65, o observador padrão de 10° e o sistema cromático CIE Lab, em que se relacionam as três características colorimétricas por meio de coordenadas geométricas (L^* , a^* e b^*), o qual constitui-se numa escala de cor eficaz em descrever diferenças visuais entre cores.

A geometria óptica selecionada é a direcional 45/0°, na qual o feixe de luz é direcionado para a amostra à 45° e o observador, representado pelos três filtros na faixa visível RGB (*red, green and blue*), referentes às três cores primárias (vermelho, verde e azul), localizam-se na normal ao plano da amostra. Portanto, esta disposição permite a captação pelos filtros apenas da componente difusa da radiação refletida pela amostra, e exclui-se a especular, porque objetiva-se medir apenas a aparência da superfície e não o seu brilho.

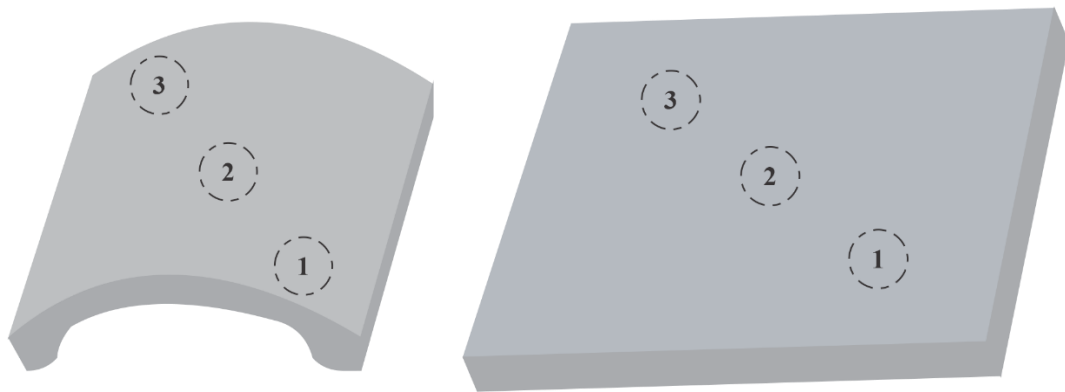
Então, a luz que atravessa cada um dos filtros, correspondentes aos cones vermelho, verde e azul da visão humana, é captada por fotodetectores. Os sensores são ativados e geram um sinal, análogo a um estímulo visual, proporcional à quantidade de luz transmitida em cada filtro das

cores primárias. Os valores são convertidos nas coordenadas da escala matriz X, Y e Z com relação aos coeficientes tristimulus \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} (coordenadas de cromaticidade), que correspondem à sensibilidade da visão humana para o observador padrão 10° da CIE.

A cor foi representada por meio de códigos numéricos no sistema CIE Lab, cujo valor referente à luminosidade, está simbolizado por L^* no eixo vertical, com o gradiente do preto (0) ao branco (100), cujo ponto médio (50) é a cor cinza. O matiz, radiado a partir do eixo central, é indicado pela interseção dos dois eixos a^* (vermelho-verde) e b^* (amarelo-azul), com os respectivos valores positivos (+) no vermelho e amarelo (Figura 3.9).

Foram realizadas três leituras em pontos distintos das amostras sólidas, com as telhas e as placas cimentícias (Figura 3.10), sendo calculada a média aritmética das medições.

Figura 3.10 – Identificação dos pontos medidos nas telhas e placas cimentícias



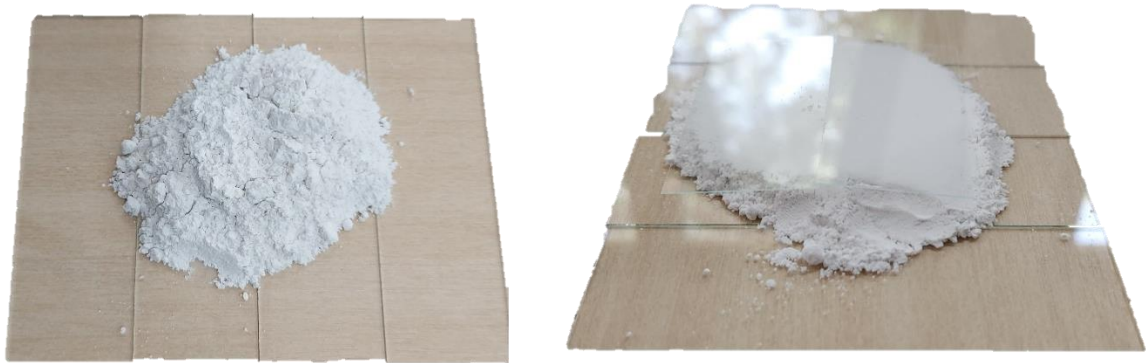
Fonte: A autora.

Também, utilizou-se um procedimento alternativo de medição com o material em pó, o aditivo refletivo, o qual foi sugerido pelo fabricante Delta Color, e descrito em Silva, Loh e Sato (2013). Logo, o material pulverulento foi depositado sobre lâminas, com aproximadamente 1,5 mm de espessura, e as lamínulas, mais finas ainda, posicionadas por cima, de forma que o colorímetro não entrasse em contato direto com o pó, danificando-o (Figura 3.11), realizando-se também três repetições nesta medição.

Além de tudo, a estimativa da correspondência de cor entre as amostras do mesmo material foi feita pelo cálculo da distância entre dois pontos A e B, relativos às amostras de cores similares, no espaço tridimensional definido pelas coordenadas cromáticas L^* , a^* e b^* (e expressos em termos de ΔL^* , Δa^* e Δb^*) como exemplificado na Figura 3.9. Então, foi calculada a diferença de cor total (ΔE_{ab}^*) CIELAB 1976 (Equação 3.1).

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \dots [3.1]$$

Figura 3.11 – Disposição do pó refletivo sobre as lâminas e entre as lamínulas para a medição de cor



Fonte: A autora.

Nesta pesquisa, foram adotados os valores inferiores a uma unidade ($\Delta E_{ab}^* < 01$) como cores correspondentes, visto que as diferenças não são distinguíveis pelo olho humano para Revel *et al.* (2013) e Cozza *et al.* (2015), enquanto a superior a cinco unidades ($\Delta E_{ab}^* > 05$) não é considerada aceitável em correspondência de cor para aplicações comerciais e industriais (ASTM, 2016), isto é, os pares são considerados diferentes.

3.3.2 Propriedades óptica-físicas

Os métodos e instrumentos escolhidos para a medição das propriedades radiantes superficiais (refletância solar e emitância térmica) estão entre os mencionados na norma ANSI/CRRC S100 (CRRC, 2021).

3.3.2.1. Refletância solar com espectrofotômetro

As medições de refletância solar das amostras foram realizadas por espectrofotômetro da marca Perkin Elmer, modelo Lambda 1050, com esfera integradora de 150 mm de diâmetro (Figura 3.12) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que fornece as curvas espectrais de refletância solar seguindo as recomendações da norma ASTM E903-20 (ASTM, 2020a).

Na calibração do equipamento utilizou-se uma amostra de referência, a qual possui na teoria 100% de refletância, a qual fornece curva base sobre a qual os valores colhidos de refletâncias absolutas das amostras, medidos a cada 5 nm, foram dispostos de forma gráfica, dentro da região do espectro onde possui as maiores taxas de energia proveniente da radiação solar de acordo com a norma ASTM G173-03 (ASTM, 2020b), dividindo-o em três sub-regiões: (i) o ultravioleta (300 a 380 nm), (ii) o visível (380 a 780 nm) e (iii) o infravermelho próximo (780 a 2500 nm).

Figura 3.12 – Espectrofotômetro Perkin Elmer (modelo Lambda 1050)



Fonte: Marinoski et al. (2013).

No entanto, torna-se necessário realizar um ajuste das refletâncias ao espectro solar padrão, por causa da intensidade constante de luz emitida pela lâmpada do espectrofotômetro durante os ensaios. Essa incidência energética proveniente da fonte de iluminação artificial não representa as variações acentuadas das taxas de radiação solar incidente durante o dia nas superfícies em razão das condições atmosféricas e latitude, por exemplo. Por isso, com o intuito de corrigir as distorções e retratar o real comportamento óptico das amostras, foi utilizado o espectro solar padrão, que considera a radiação hemisférica solar global, utilizado como referência na norma G173-03 (ASTM, 2020b) como função de ponderação para ajustar os valores absolutos medidos pelo espectrofotômetro com os valores da irradiância solar global, para cada comprimento de onda, de acordo com o procedimento adotado por Dornelles (2008), o qual está descrito a seguir.

O cálculo do valor relativo da irradiância solar global para cada comprimento de onda (IR_{λ}) (Equação 3.2) foi realizado de modo a fornecer uma curva de intensidade relativa para o espectro solar padrão.

$$IR_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}}{I_{máx}} \cdot 100 (\%) \quad \dots [3.2]$$

Em que:

- IR_{λ} é a intensidade relativa da irradiância solar global (%), por comprimento de onda (λ);
- I_{λ} é a irradiância solar global (W/m^2), para cada comprimento de onda (λ);

- $I_{\text{máx}}$ é a irradiância solar global máxima do espectro solar padrão (W/m^2).

Então, a partir da intensidade relativa em cada comprimento de onda e do valor absoluto de refletância (ρ_λ) obtido no ensaio espectrofotométrico, calculou-se conforme a equação 3.3 a refletância relativa para cada comprimento de onda (ρ_{rel_λ}), obtendo-se também uma curva de refletância relativa.

$$\rho_{rel_\lambda} = IR_\lambda \cdot \rho_\lambda (\%) \quad \dots [3.3]$$

Em que:

- ρ_{rel_λ} é a refletância relativa (%), por comprimento de onda (λ);
- ρ_λ é a refletância medida no espectrofotômetro (de 0 a 1), para cada comprimento de onda (λ);

Os valores relativos médios da irradiância solar global (IR_{med}) e da refletância ($\rho_{rel_{\text{med}}}$) para cada amostra foram calculados através da integração das áreas das curvas relativas do gráfico sobre a área total máxima. Por último, a partir desses valores médios, obteve-se o valor de refletância ajustado ao espectro solar padrão (ρ_{ajust}) através da equação 3.4 para cada amostra dentro dos intervalos correspondentes às três sub-regiões espectrais (ultravioleta, visível e infravermelho próximo) de forma separada e para o espectro solar total.

$$\rho_{\text{ajust}} = \frac{\rho_{rel_{\text{med}}}}{IR_{\text{med}}} (\%) \quad \dots [3.4]$$

Em que:

- ρ_{ajust} é a refletância ajustada ao espectro solar padrão (%);
- $\rho_{rel_{\text{med}}}$ é o valor médio das refletâncias relativas da amostra (%);
- IR_{med} é o valor médio das intensidades relativas da irradiância solar global (%).

3.3.2.2 Emitância térmica com emissômetro portátil

A emitância térmica foi medida pelo emissômetro portátil, modelo AE1, da Devices & Services (Figura 3.13), pertencente ao Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O equipamento possui um dissipador de calor, que aquece a amostra e a mantém a uma temperatura constante, e o detector, cujo tempo de exposição a ele dura noventa segundos (90s).

Figura 3.13 – Emissômetro portátil com voltímetro digital da Devices& Services

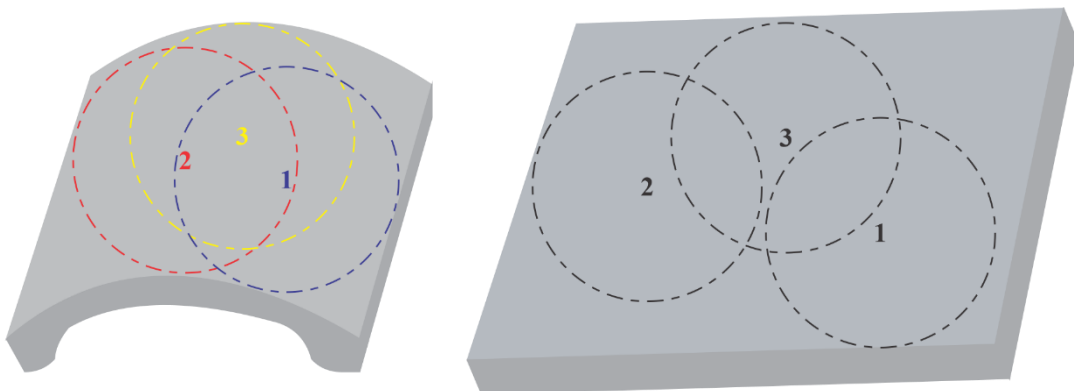


Fonte: Akbari, Levinson e Berdahl (2012).

O emissômetro portátil identifica a radiação térmica emitida pela amostra em comprimentos de onda entre 3 e 30 μm e previamente foi calibrado com dois padrões, um com alto valor de emitância ($\epsilon = 0,88$) e outro com valor muito baixo ($\epsilon = 0,06$). Em relação às referências, determina-se de forma comparativa um valor constante de emitância hemisférica total, linear à saída de tensão no visor do multímetro, para a amostra desconhecida.

Desta forma, o valor de emitância térmica varia entre zero e um ($0,00 < \epsilon_T < 1,00$) com precisão de dois dígitos e margem de erro $\pm 0,01$ por causa da incerteza na medição relacionada ao emissômetro portátil. Conforme recomendação da norma ASTM C1371-15 (ASTM, 2015), foram realizadas três medições para cada amostra, sendo o valor final obtido da média aritmética simples das três leituras (Figura 3.14).

Figura 3.14 – Identificação dos pontos medidos nas telhas e placas cimentícias



Fonte: A autora.

3.3.3 Temperatura superficial

As amostras foram expostas às 09 horas e 30 minutos da manhã, no dia 26 de abril de 2022, em uma área aberta, próxima ao Laboratório de Conforto Ambiental (IAU-USP), voltadas ao Norte geográfico em condições de céu claro com máxima exposição à radiação solar na cidade de São Carlos, SP (22°S, 47,5°O, 819m). Para tanto, elas foram posicionadas sobre uma bancada experimental com uma base de isopor, isoladas termicamente uma das outras, o que evitou as trocas de calor por convecção e radiação na parte inferior do experimento (Figura 3.15). Os equipamentos escolhidos para as medições das temperaturas superficiais são o termômetro de infravermelho, da marca Testo Brasil, com mira a laser de 1 ponto, modelo 830-T1 e a câmera termográfica da marca Flir, modelo E5-XT (Figura 3.16).

Figura 3.15 – Disposição de todos os materiais pelas bases de isopor

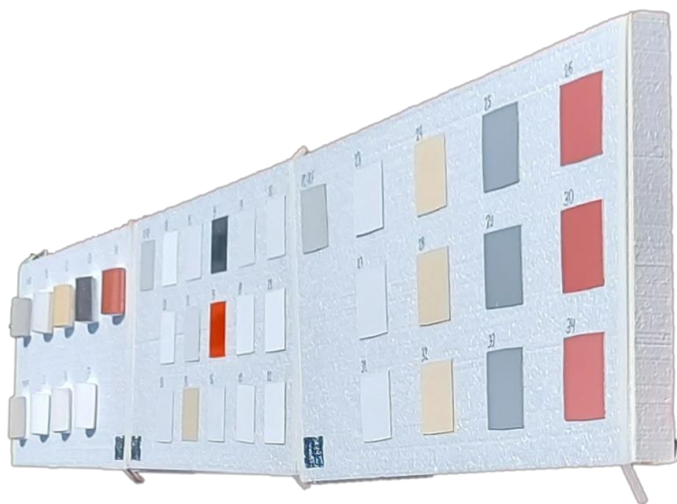


Figura 3.16 – Termômetro de infravermelho Testo Brasil e câmera termográfica da Flir



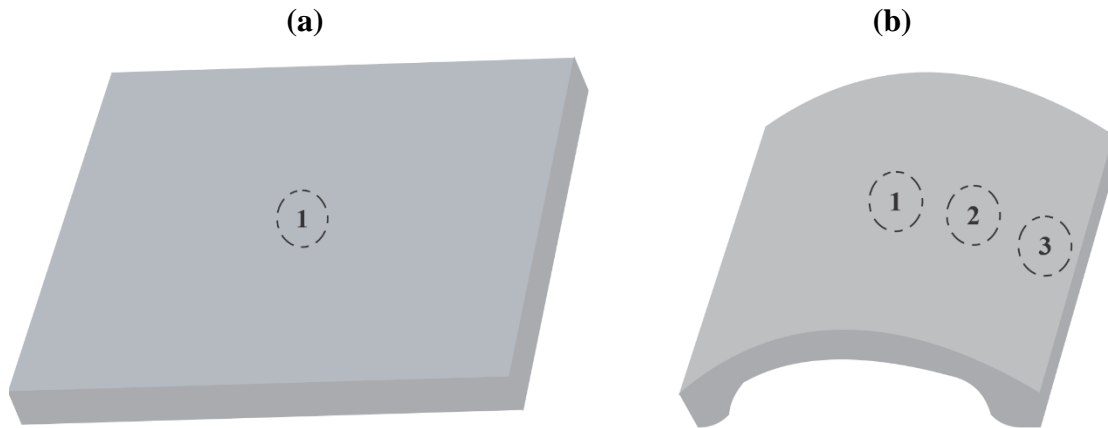
Fonte: A autora.

As medições com o termômetro de infravermelho tiveram início às 11 horas, em intervalos de 12 minutos, e foram realizadas na parte central das placas cimentícias representada pela Figura 3.17 (a), até as 14 horas, num ciclo de medição de 3 horas consecutivas, totalizando 16 medidas. Como a radiação solar incide de forma distinta em pontos diferentes nas superfícies onduladas, as temperaturas superficiais sofrem alterações em alguns pontos em razão do formato das telhas. Então, para as telhas frias e as de referência, conforme a Figura 3.17 (b) foram selecionados 03 pontos diferentes nas suas superfícies para a medição da temperatura, e o seu valor final foi então obtido através da média aritmética entre as três temperaturas medidas.

Após a aferição das temperaturas superficiais em cada amostra pelo termômetro de infravermelho, foram registradas imagens termográficas por grupo de materiais: (a) as telhas

(Isopor 01), (b) as mantas líquidas e tintas (Isopor 02) e (c) as tintas aditivadas e de referências (Isopor 03), nesta ordem, como representado na Figura 3.18.

Figura 3.17 – Identificação do(s) ponto(s) medido(s) **(a)** nas placas cimentícias e **(b)** telhas



Fonte: A autora.

O registro por termografia foi realizado com a câmera termográfica e a operadora estava posicionada sobre uma cadeira segurando o equipamento na posição perpendicular ao isopor, numa distância de 1,50 m do ponto do laser até a face superior do isopor, de forma a permitir a visualização de todas as amostras por cada grupo de materiais.

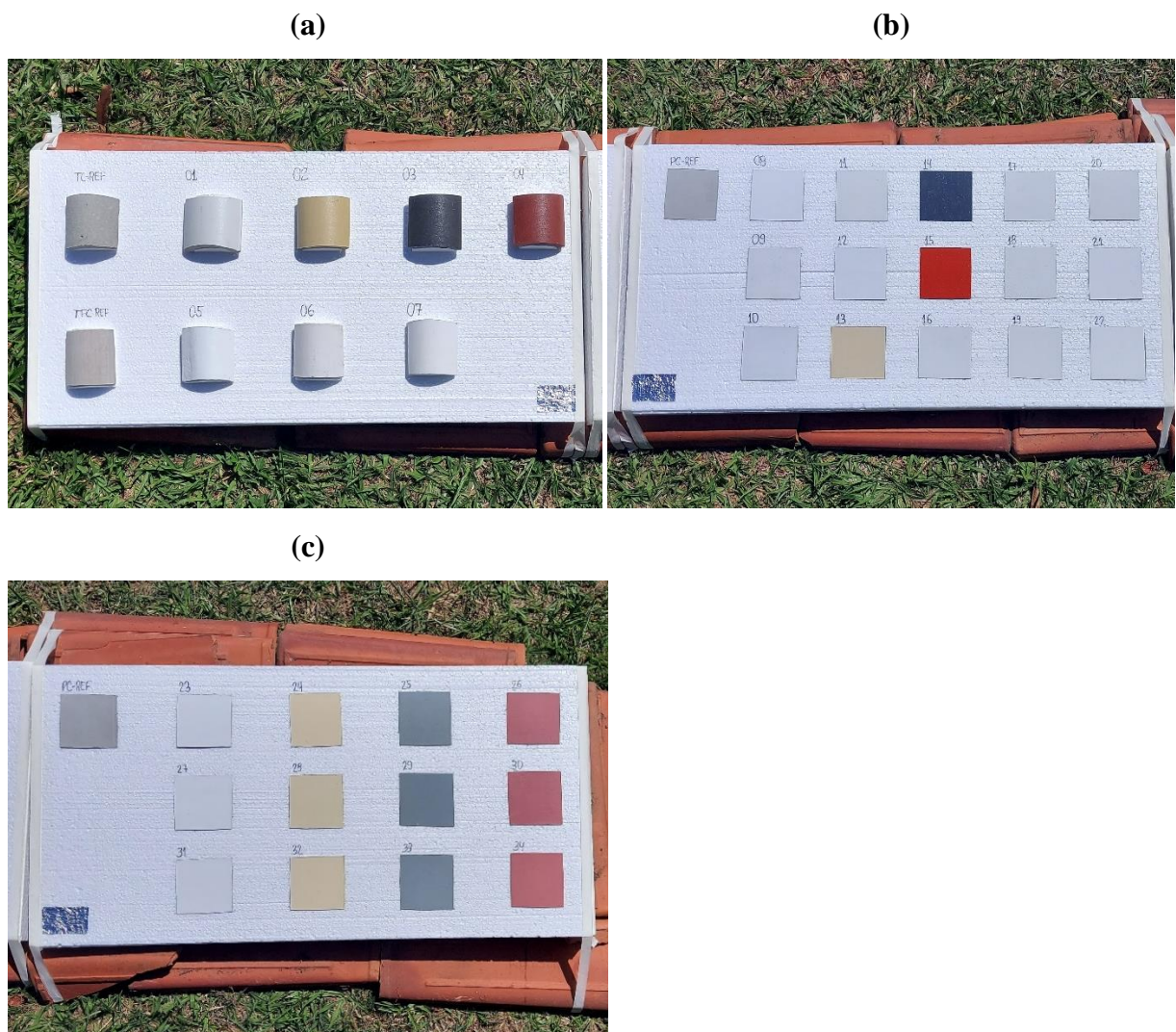
O horário dos registros foi definido a cada 30 minutos, iniciando-se também às 11 horas, totalizando 07 imagens para cada isopor, de forma a não coincidir com os horários de medição do termômetro de infravermelho. Neste mesmo intervalo de tempo, foram feitos registros da abóbada celeste com uma lente olho de peixe modelo AF DX *Fisheye*-NIKKOR 10.5 mm f/2.8G ED acoplada à câmera digital NIKON® modelo D5100, posicionada sobre um tripé a 1,30 m do chão, distando 2,00 m da bancada experimental.

Na área gramada, onde ocorreu o experimento, observa-se a disposição dos materiais sobre as placas de isopor, a cadeira de suporte para tirar as fotos térmicas e do tripé sustentando a máquina digital (Figura 3.19). Então, as fotos hemisféricas do céu foram utilizadas para registrar as condições do céu no horário das medições e a sua identificação como céu claro, encoberto ou parcialmente encoberto segundo a NBR 15.215-2 (2022) que trata dos procedimentos de cálculo para a distribuição espacial de luz natural.

Além do mais, foram obtidas as variáveis climáticas de umidade e temperatura relativa do ar pela sonda HMP 35C, modelo Vaisala, e a radiação solar global incidente pelo piranômetro modelo SP Lite (Kipp e Zonen). Os equipamentos foram ligados ao sistema de aquisição de

dados composto por data logger CR10X, marca Campbell Scientific Brasil, que armazena os dados medidos e os registra a cada minuto no software PC400, por onde calcula-se a média dos valores a cada 30 minutos. Este sistema foi instalado junto à estação de envelhecimento natural das telhas na pesquisa de Araújo (2022), dentro do campus da Universidade de São Paulo, na cidade de São Carlos (SP), próximo ao local do experimento, de forma a caracterizar as condições climáticas externas.

Figura 3.18 – Disposição das amostras por grupo de materiais, sendo (a) as telhas, (b) as mantas líquidas e tintas e (c) as tintas aditivadas e de referências



Fonte: A autora.

As imagens termográficas foram tratadas no software FLIR Tools® para realizar a medição da temperatura superficial das amostras. Para isso, foram sobrescritas formas geométricas nas imagens em cima de cada amostra para a obtenção dos valores médio, máximo e mínimo. Então, optou-se em escolher os círculos para as telhas e quadrados sobre as placas cimentícias com 40

mm² e 50 mm² de área, respectivamente, de forma a evitar as transferências de calor decorrente do efeito das bordas (Figura 3.20).

Figura 3.19 – Posição dos elementos no experimento com as amostras expostas ao Sol dispostas sobre as bancadas de isopor, a cadeira e o tripé com a máquina fotográfica



Fonte: A autora.

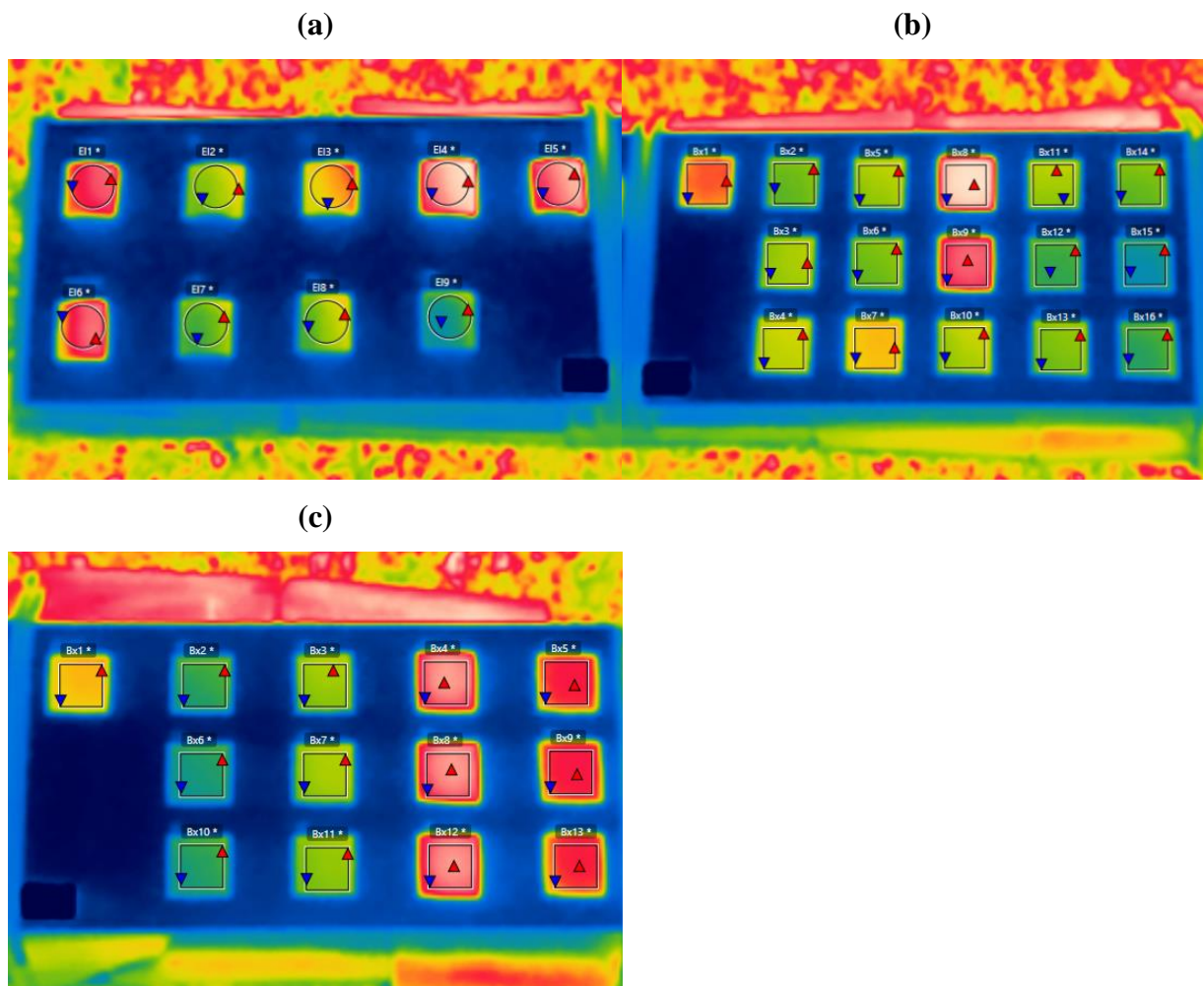
De início, os dados de entrada na câmera térmica foram configurados em 20°C para temperatura do ar e a temperatura aparente refletida, um parâmetro utilizado para compensar a radiação refletida no objeto, e em 0,95 para a emitância térmica. Posteriormente, todos os dados foram modificados no software com os dados de temperatura do ar obtidos no sistema de armazenamento em Araújo (2022) de acordo com o horário de cada imagem tirada e os de emitância térmica medidos pelo emissômetro portátil para todos os materiais.

Para a determinação da temperatura refletida, a pesquisa utilizou o método simplificado de Marinoski *et al.* (2010) ao fixar uma fita aluminizada, na porção inferior direita/esquerda das placas de isopor junto às amostras na Figura 3.18 (a) (b) e (c). Contudo, pelas configurações iniciais da câmera, o valor de temperatura média na fita, um objeto de baixa emitância, foi muito baixo. Neste caso, adotou-se o artifício sugerido para ajustar simplificadaamente a temperatura refletida ao igualar o seu valor ao da temperatura do ar.

Com o intuito de padronizar as imagens, configurou-se a paleta de cor em *rainbow* com o modo de imagem *thermal* e os mesmos limites de temperatura definidos em todas as imagens a partir

dos valores máximo e mínimo registrados. Na Figura 3.21 (a) e (b) estão mostrados alguns registros térmicos antes e depois do tratamento, respectivamente, das imagens para a avaliação qualitativa. Portanto, as diferenças na radiação de infravermelho emitida pelas amostras foram comparadas quando expostas nas mesmas condições de contorno, observando-se a distribuição dos gradientes de temperatura.

Figura 3.20 – Forma de obtenção dos valores das temperaturas para cada amostra nas imagens térmicas das (a) telhas, (b) mantas líquidas e tintas e (c) tintas aditivadas e de referências

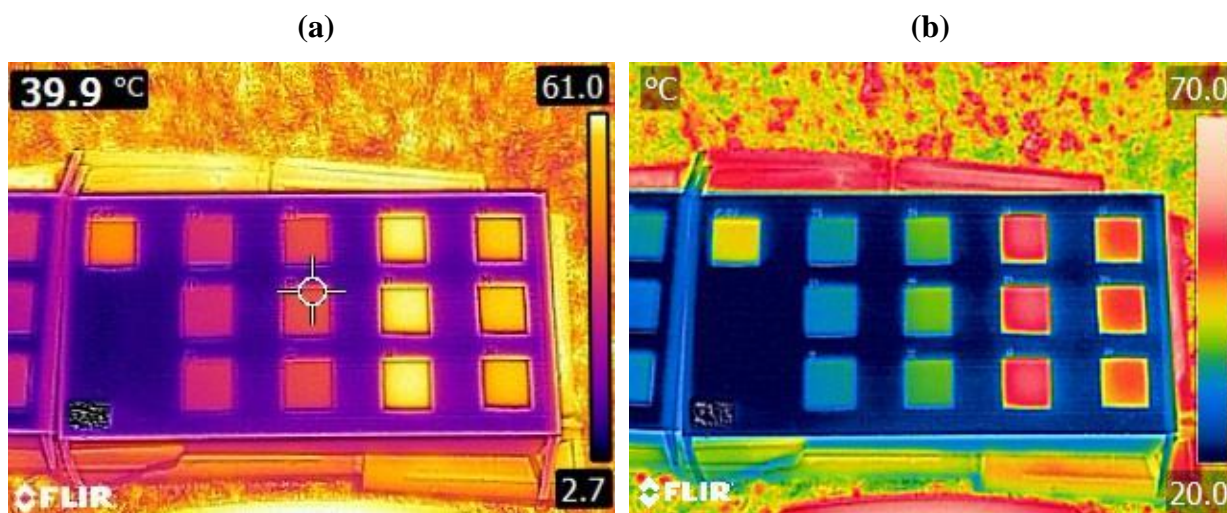


Fonte: A autora.

Algumas desvantagens observadas com o termômetro de infravermelho foram o lapso temporal durante a medição do primeiro até o último material e a dificuldade na mira do laser no(s) ponto(s) determinado(s) nas amostras assim como o manuseio do equipamento à mesma distância para todas. Além do mais, os dados de entrada estipulados como a emitância térmica e a temperatura do ar são válidos para todos os materiais e mediu-se apenas um ponto para cada amostra, com exceção às telhas, o que contrasta com a área de medição delimitada nas imagens da câmera termográfica. Em razão desses motivos, os resultados das temperaturas superficiais

que foram analisados e discutidos são aqueles obtidos por termografia e os do termômetro de infravermelho estão disponibilizados no Apêndice A.

Figura 3.21 – Exemplo de imagem térmica no isopor das tintas aditivadas e de referências (a) tiradas no momento da medição e (b) após o tratamento no software FLIR Tools®



Fonte: A autora.

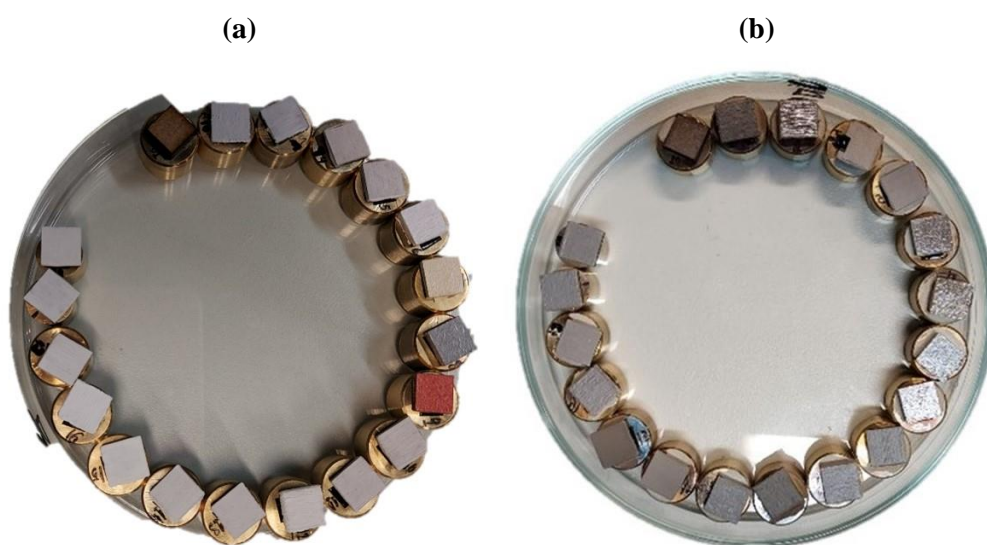
3.3.4 Micrografia da superfície

A superfície das amostras foi visualizada em alta resolução através do Microscópio Eletrônico de Varredura por emissão de campo (MEV-FEG), marca JEOL e modelo JSM 7200F do Instituto de Química de São Carlos (IQSC/USP). Não foi possível a utilização das menores amostras (2 cm de lado) produzidas inicialmente por causa da dimensão da base do porta amostras do equipamento. Desta forma, para realizar o encaixe adequado, produziu-se amostras com dimensão de 0,8 cm de lado. Então, para garantir a precisão cortou-se em uma máquina a laser uma placa de MDF (*Medium Density Fiberboard*), composta de fibra de madeira de média densidade, com 3 mm de espessura, cujos quadradinhos foram posteriormente pintados.

Por causa da inviabilidade do corte das telhas nestas dimensões sem danificar a sua superfície, elas foram retiradas desta análise. Assim como, entre os materiais líquidos, foram excluídas as tintas de referência e as aditivadas, todas coloridas, porque priorizou-se no início a observação, especialmente do elemento químico titânio, proveniente do pigmento presentes nos materiais brancos. Além do mais, estabeleceu-se um limite de recursos financeiros para este ensaio, por não saber a princípio quantas amostras seriam possíveis analisar por hora cobrada na utilização do equipamento.

Portanto, são apresentadas na Figura 3.22 as dezenove amostras, em sentido anti-horário, a partir da amostra da placa de mdf sem pintura, denominada como referência (REF-00), antes e depois do processo de recobrimento em carbono. Este procedimento, prévio a observação, realizado por evaporação em vácuo é necessário, porque as amostras analisadas não são condutoras. Apesar do carbono não ser um bom emissor de elétrons, este elemento fornece um caminho condutor sobre as amostras mesmo em camadas muito finas de modo a fornecer imagens com boa resolução (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Figura 3.22 – Amostras analisadas no MEV/EDS em sentido anti-horário a partir da placa de MDF (a) antes e (b) depois do recobrimento em carbono



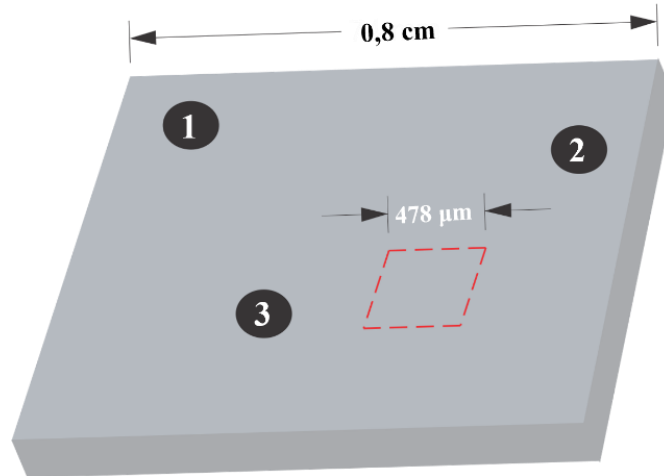
Fonte: A autora.

Acoplado ao microscópio, o detector de energia dispersiva de raios-x (EDS), da marca BRUKER modelo XFLASH 6-60 foi utilizado para emitir o feixe de elétrons, com potência aplicada em 20 kV, e logo após a sua interação com a superfície das amostras, os sinais emitidos pelos elétrons secundários (SEM) foram coletados. Desta forma, foram realizadas medições em três diferentes regiões na superfície de cada amostra, segundo Werle (2015), cuja área é cerca de 64 mm² aproximadamente (Figura 3.23). Este sistema de microanálise permite identificar a distribuição dos elementos químicos através de um espectro composicional e quantificá-los com uma margem de erro (\pm), os quais foram produzidos no software EDX Esprit 2.3. da BRUKER.

As micrografias retiradas para a análise visual, com o objetivo de realizar comparações entre as amostras, possuem dimensões com 478 μ m de lado (Figura 3.23), o que corresponde a apenas 0,2284 mm² da área por causa da ampliação em 250 vezes. Este nível de aumento foi definido a partir da visualização da amostra da tinta branca T-07, porque segundo consta nas informações

iniciais dos fabricantes teria a maior concentração de titânio (Ti), o elemento químico de maior interesse, e a escolha da região a ser analisada foi numa área mais representativa da superfície de cada amostra.

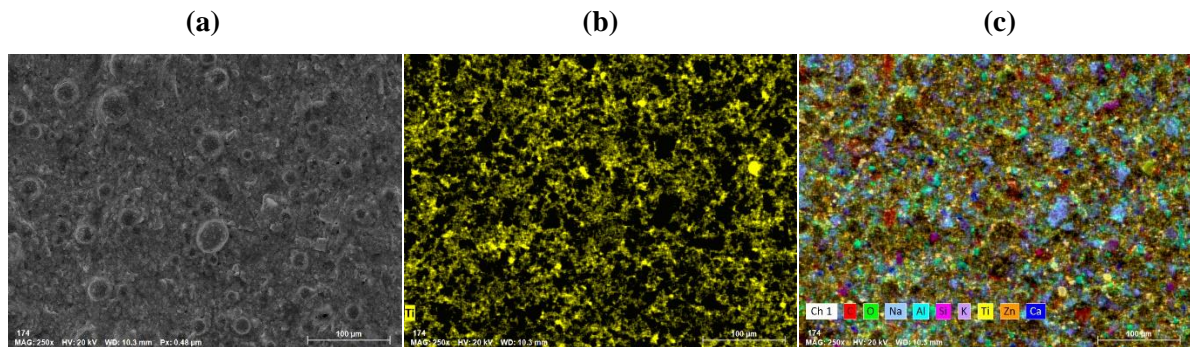
Figura 3.23 – Identificação de 03 pontos aleatórios coletados por EDS na placa de MDF e a dimensão da área visualizada (após ampliação de 250x) nas micrografias



Fonte: A autora.

Então, na análise qualitativa da superfície foram visualizados os aspectos morfológicos (como rugosidade ou lisura) pela imagem preto e branco de alta resolução fornecida pelo MEV e observada a distribuição e a localização dos elementos químicos, anteriormente mapeados pelo EDS, nos mapas coloridos elementares individuais e sobrepostos produzidos também pelo software da BRUKER (Figura 3.24).

Figura 3.24 – Imagem microscópica (ampliação 250x) da amostra T-07 (a) em preto e branco; (b) colorida elementar individual (elemento Ti) e (c) colorida elementar sobreposta com todos os elementos químicos mapeados



Fonte: A autora.

Dessa forma, os elementos químicos foram relacionados às matérias-primas de que eles são constituídos a partir das informações extraídas da Ficha de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) de cada material analisado. Portanto, os elementos químicos como o carbono e

oxigênio, que constituem os compostos orgânicos, e relacionam-se em grande parte à resina, o titânio, referente ao pigmento branco, e outros de interesse foram analisados.

Também foi realizada uma análise complementar, a semiquantitativa (sem padrões) acerca da composição química do pó aditivo, que foi realizada pelo espectrômetro por fluorescência de Raio-X da marca PANalytical, modelo MiniPaI4 também no Instituto de Química de São Carlos (IQSC/USP).

3.4 Análise estatística

A análise estatística foi conduzida de forma a indicar, dentre os materiais a serem avaliados, que apresentam melhor desempenho nas propriedades ópticas, visando a indicação de recomendações técnicas de aplicações futuras na envoltória de edificações.

Efetuaram-se medições dos parâmetros de cor, emitância térmica e a quantificação de elementos químicos na superfície por EDS. Para esta análise, restringiu-se a escolha apenas do eixo de luminosidade L^* dentre os parâmetros de cor, por tratar-se da quantidade de branco. As medições foram efetuadas com três repetições em cada material. Para a análise de variância (ANOVA) utilizou-se um delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com 38 e 37 tratamentos (materiais), respectivamente e três repetições. Ressalta-se que não foi possível a medição do aditivo em pó (A-01) para a emitância térmica. Esse procedimento foi adotado para comprovar se existe diferença significativa destes parâmetros entre os materiais, permitindo agrupar os materiais com características semelhantes.

Contudo, os tratamentos para o EDS foram realizados em apenas 19 amostras, sendo uma deles o substrato (MDF) sem pintura como referência. Dos materiais avaliados na pesquisa, foram excluídas as telhas e as tintas aditivadas coloridas e as convencionais correspondentes em cor, totalizando 18 amostras.

Os dados foram previamente submetidos aos testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos erros) e T de Cochran (homogeneidade de variância), os quais foram satisfatórios a 5% de significância. A análise estatística foi complementada pela aplicação do teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de significância estatística. Esse teste permitiu agrupar as médias dos parâmetros dos materiais que foram consideradas similares entre si. Os agrupamentos obtidos foram apresentados por meio de gráficos de dispersão confeccionados no programa Excel. A ANOVA e teste de Scott-Knott foram efetuados utilizando-se os scripts disponíveis no software livre RBio (Bhering, 2017).

Procedeu-se às análises de correlação de Pearson e de regressão linear para avaliar o grau de dependência entre as variáveis, bem como a relação linear entre os dois parâmetros. Primeiro, foi realizada entre a variável independente L^* (luminosidade) medida pelo colorímetro, e a quantidade de luz refletida pela amostra na região visível (ρ_{VIS}) e no espectro total (ρ_{solar}), as quais foram obtidas pelo espectrofotômetro. Procedeu-se a correlação entre a refletância nos espectros visível (ρ_{VIS}) e infravermelho próximo (ρ_{IV}), e solar (ρ_{solar}) como variáveis independentes com a temperatura superficial máxima registrada pela câmera termográfica em cada amostra. Para avaliar a influência conjunta da refletância visível e infravermelho na temperatura dos materiais efetuou-se a análise de regressão linear múltipla. Por fim, efetuou-se análise de correlação com o intuito de averiguar a influência dos cinco principais elementos químicos distribuídos na superfície das amostras, especialmente o titânio (Ti) nas propriedades radiantes (refletância solar e emitância térmica), além da refletância apenas no espectro infravermelho (ρ_{IV}). As análises de correlação foram efetuadas com os scripts disponíveis no software livre RBio (Bhering, 2017). As análises de regressão linear simples e múltipla foram efetuadas em ambiente Excel, usando-se o suplemento Real Statistics Resource Pack (versão 7.6) (Zaiontz, 2022).

4 RESULTADOS

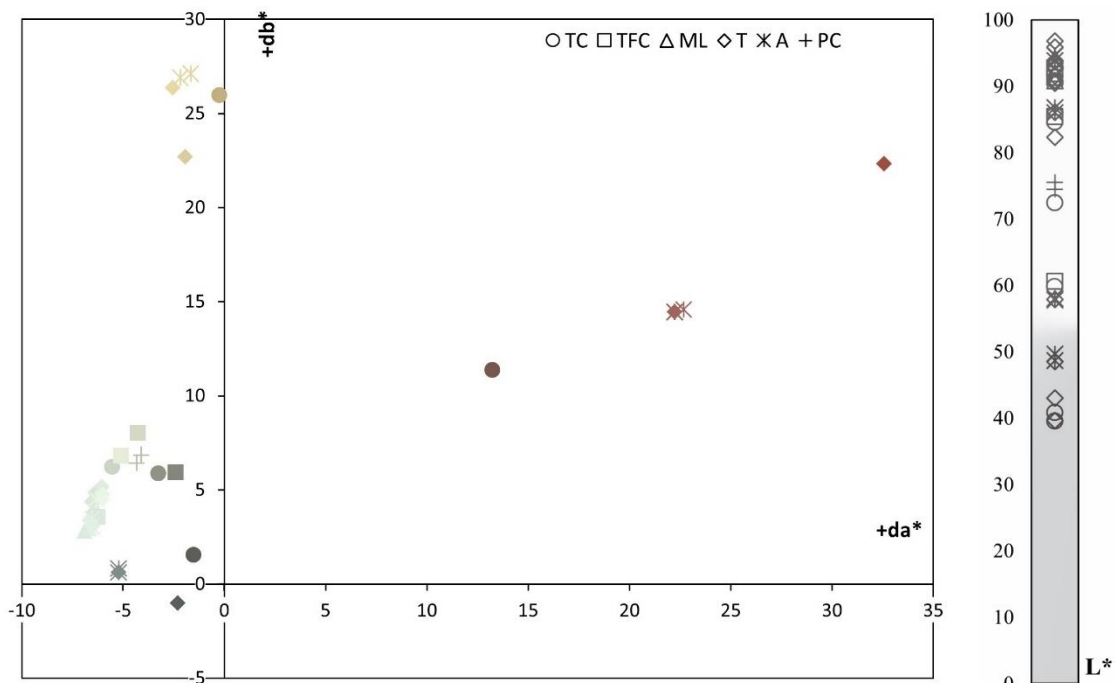
Os resultados para as medições realizadas em laboratório e em campo estão apresentados e foram analisados de forma individual para cada propriedade. Ao final, com base nos dados quantitativos, foram realizados tratamentos estatísticos de variáveis individuais como também a correlação entre parâmetros a fim de estabelecer a causa e efeito dos fenômenos físicos envolvidos.

4.1 Análise e tratamento dos dados

4.1.1. Parâmetros de cor

Na Figura 4.1 está representado o arranjo gráfico das cores das amostras, assim como os parâmetros cromáticos do sistema CIELAB, medidos pelo colorímetro, estão apresentados para os materiais frios (Tabela 4.1) e os de referência (Tabela 4.2). A análise foi realizada para observar as diferenças entre a coloração de telhas, mantas líquidas e tintas que aparentemente possuem a mesma cor.

Figura 4.1 – Coordenadas cromáticas (a^*b^*) e eixo de luminosidade (L^*) para os materiais frios e de referência, simbolizados por grupo de materiais

































Fonte: A autora.

Nas telhas de concreto, a branca é a mais luminosa, seguida pelas telhas marfim, vermelha e por último a cinza, com menos claridade, todavia a diferença é mínima em relação à vermelha ($\Delta L^* = -1,23$). As telhas branca, cinza e marfim, no tocante à tonalidade, estão no quadrante










dos eixos verde (- a*) e amarelo (+ b*), com o maior valor de b* (+ 25,97) na telha marfim, o que constata a maior presença de amarelo na sua composição. Em seguida, tem-se a telha vermelha (b* = + 11,36), porém no eixo positivo + a* (vermelho), sendo a única, dentre as telhas, com a temperatura de cor quente (Figura 4.2).

Tabela 4.1 – Parâmetros cromáticos CIELAB dos materiais frios

Cor	N°	Código	L*	a*	b*	Cor	N°	Código	L*	a*	b*
	01	TC-01-B	84.59	- 5.52	6.22		16	T-03	90.83	- 6.49	3.76
	02	TC-01-M	72.42	- 0.23	25.97		17	T-04	91.53	- 6.54	4.36
	03	TC-01-C	39.57	- 1.52	1.54		18	T-05	92.73	- 6.05	5.16
	04	TC-01-V	40.80	13.25	11.36		19	T-06	92.85	- 6.18	4.66
	05	TFC-01	91.31	- 6.24	3.54		20	T-07	92.60	- 6.21	4.56
	06	TFC-02	85.42	- 4.27	8.01		21	T-08	96.80	- 6.00	4.53
	07	TFC-03	92.74	- 5.08	6.81		22	T-09	95.91	- 5.99	4.77
	08	ML-01	94.19	- 6.64	2.94		23	A-01-B	94.65	- 6.53	3.48
	09	ML-02	91.96	- 6.90	2.81		24	A-01-P	86.02	- 2.18	26.89
	10	ML-03	90.85	- 6.25	3.79		25	A-01-C	57.77	- 5.20	0.83
	11	T-01	90.44	- 6.36	4.86		26	A-01-V	48.64	22.66	14.58
	12	T-02-B	93.67	- 6.63	3.40		31	A-01-B-2	93.82	- 6.53	3.05
	13	T-02-P	82.29	- 1.92	22.69		32	A-01-P-2	86.78	- 1.67	27.09
	14	T-02-C	39.64	- 2.31	- 1.01		33	A-01-C-2	58.00	- 5.22	0.62
	15	T-02-V	43.00	32.58	22.32		34	A-01-V-2	49.63	22.24	14.45

Fonte: A autora.

Tabela 4.2 – Parâmetros cromáticos CIELAB dos materiais de referência

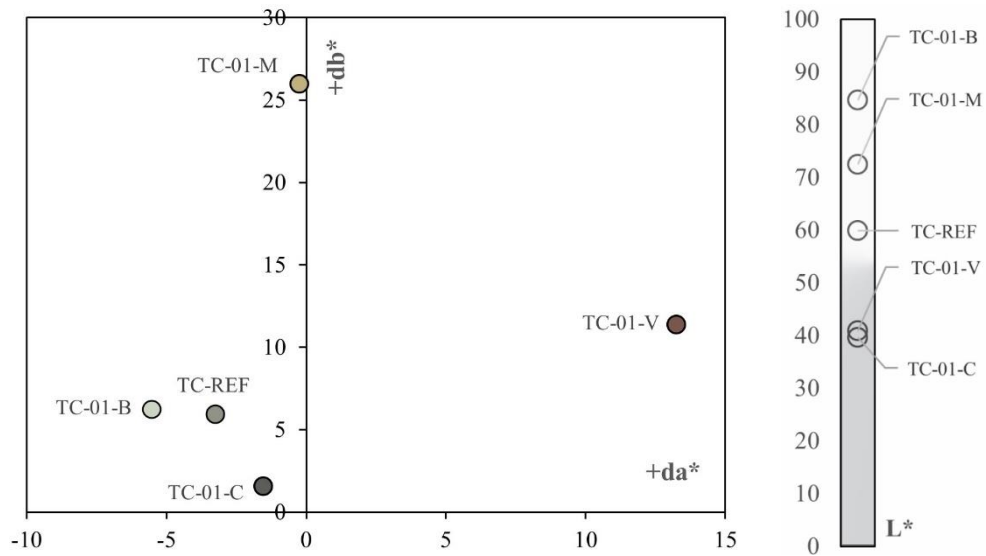
Cor	N°	Código	L*	a*	b*	Cor	N°	Código	L*	a*	b*
	27	T-01-B-REF	93.84	- 6.79	2.55		35	A-01	95.65	- 6.31	4.50
	28	T-01-P-REF	86.11	- 2.53	26.37		36	TC-REF	59.80	- 3.25	5.89
	29	T-01-C-REF	57.88	- 5.35	0.62		37	TFC-REF	60.60	- 2.38	5.92
	30	T-01-V-REF	48.49	22.16	14.20		38	PC-REF-01	75.51	- 4.32	6.43
							38	PC-REF-02	74.49	- 4.10	6.84

Fonte: A autora.

A telha de fibrocimento branca TFC-02 é a única que possui luminosidade com valor inferior a 90 (85,42), logo, possui menos branco, seguida pelas telhas TFC-01 e TFC-03, nesta ordem, e,

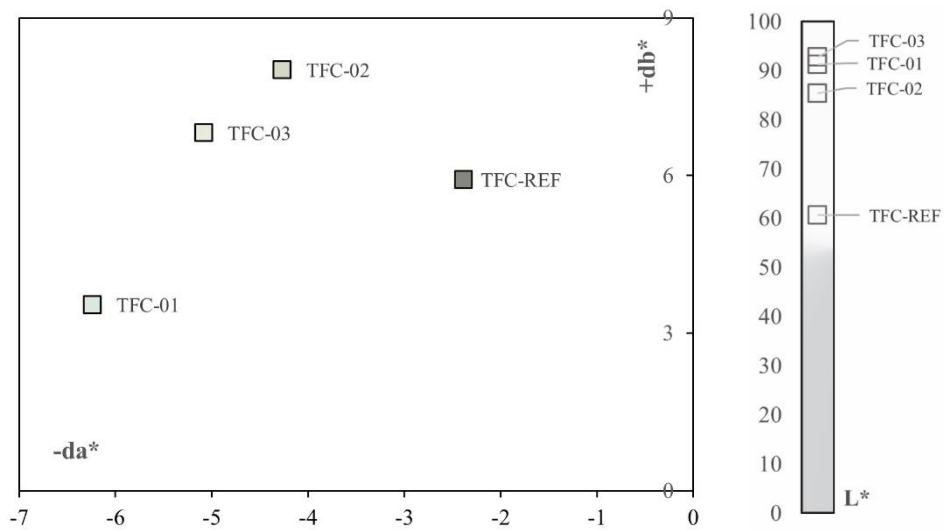
portanto, a mais luminosa entre elas. Nas mantas líquidas, brancas, todas possuem valores maiores do que 90 no eixo da luminosidade, sendo a ML-01 a mais clara (94,19), depois a manta ML-02 e ML-03, respectivamente. Nestas tonalidades de brancos, à medida em que se constata a maior quantidade de amarelo (+ b*) nas telhas de fibrocimento TFC-02, TFC-03 e TFC-01 e nas mantas líquidas ML-03, ML-01 e ML-02, nesta ordem, tem-se menores quantidades de verde (- a*) nas suas composições de tons (Figura 4.3) (Figura 4.4).

Figura 4.2 – Coordenadas cromáticas (a*b*) e eixo de luminosidade (L*) para as telhas de concreto frias e de referência



Fonte: A autora.

Figura 4.3 – Coordenadas cromáticas (a*b*) e eixo de luminosidade (L*) para as telhas de fibrocimento frias e de referência

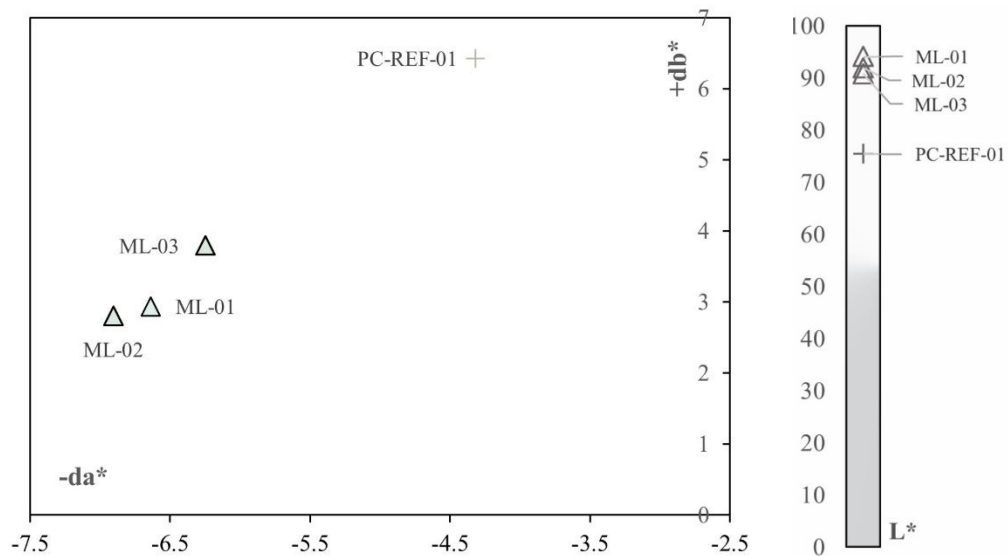


Fonte: A autora.

Todas as tintas frias brancas possuem valores maiores do que 90 no eixo vertical L* aproximando-se do limite superior 100 (branco absoluto), sendo a tinta T-08 (96,80) a mais

luminosa, e de forma decrescente chega-se à tinta T-01 (90,44), a menos clara. As suas coordenadas cromáticas a^* e b^* praticamente sobrepõem-se e, portanto, para melhorar a visualização no gráfico, foi realizada uma aproximação em menor escala (Figura 4.5). Desta forma, assim como observado nas mantas líquidas e telhas de fibrocimento, também brancas, as tintas apresentam na sua composição uma combinação de verde ($-a^*$) e amarelo ($+b^*$) nas suas tonalidades.

Figura 4.4 – Coordenadas cromáticas (a^*b^*) e eixo de luminosidade (L^*) para mantas líquidas frias e a placa cimentícia



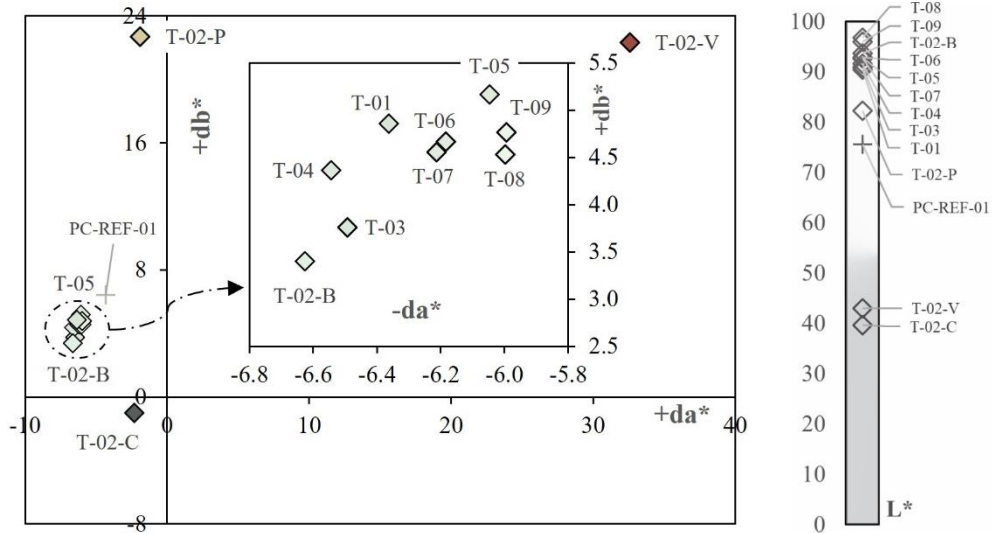
Fonte: A autora.

Dentre as coloridas, o valor de luminosidade, referente à quantidade de branco, decresce com o escurecimento dos nuances, desde o tom pérola (T-02-P), passando pelo vermelho (T-02-V) até o cinza (T-02-C), o qual possui o menor brilho (39,64). Nas tonalidades, os pontos das suas coordenadas estão afastados, sendo as tintas pérola T-02-P e vermelha T-02-V com mais amarelo na composição ($+b^*$), e complementadas com verde ($-a^*$) e vermelho ($+a^*$), respectivamente. A tinta cinza T-02-C possui, dentre todos os materiais, temperatura de cor fria na sua composição, pois é a única que possui valores negativos nos eixos b^* (azul) e a^* (verde) (Figura 4.5).

Na figura 4.6 observa-se que apesar da adição do pó refletivo (A-01), com alto valor de claridade (95,65), os níveis de luminosidade (L^*) nas tintas aditivadas brancas, pérolas, cinzas e vermelhas não aumentaram de forma significativo tanto em relação às suas tintas de referência de cores correspondente como no que se refere à quantidade de demãos (01 ou 02). Nos eixos cromáticos a^*b^* , os pontos das coordenadas das tintas aditivadas e de referências estão muito próximos, quase sobrepostos, entre cores correspondentes. O pó aditivo refletivo (A-01), que

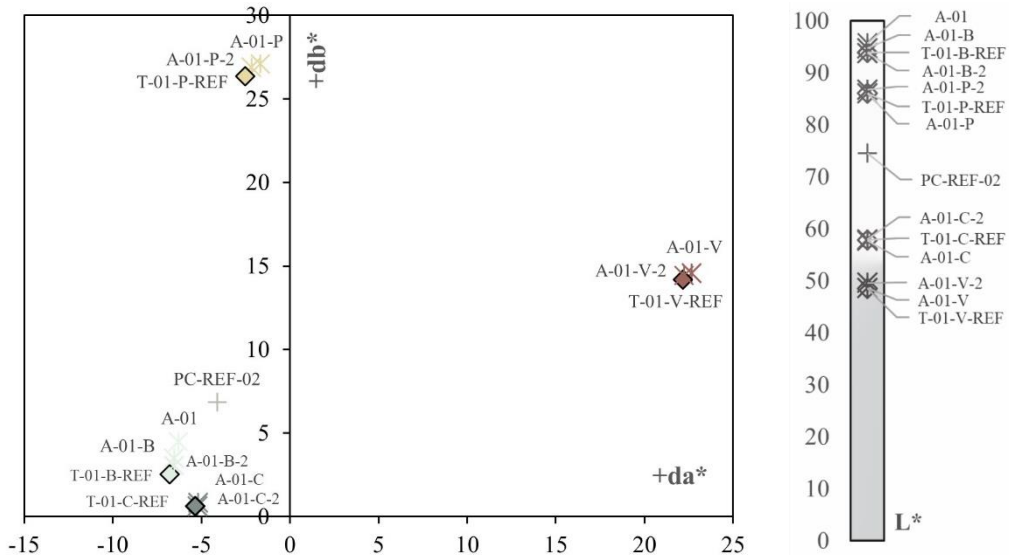
foi adicionado, possui valor positivo no eixo b^* (+ 4,50) e por isto adiciona mais amarelo na composição de cor para todas as tintas aditivadas, em relação às referências de mesma cor, porém o mesmo acréscimo não foi observado com o verde ($a^* = - 6,31$).

Figura 4.5 – Coordenadas cromáticas (a^*b^*) e eixo de luminosidade (L^*) para as tintas frias e placa cimentícia



Fonte: A autora.

Figura 4.6 – Coordenadas cromáticas (a^*b^*) e eixo de luminosidade (L^*) para as tintas aditivadas e de referências e a placa cimentícia







Fonte: A autora.

A comparação de cor foi realizada em pares conforme o critério de cores correspondentes ($\Delta E_{ab^*} < 01$) ou não-correspondentes ($\Delta E_{ab^*} > 05$) descrito no método. Desta forma, excluíram-se as telhas de concreto, visto que todas possuem nuances diferentes entre si e as mantas líquidas, porque as variações de cor não estão dentro dos limites estabelecidos.

Nas telhas de fibrocimento brancas (Tabela 4.3), nota-se diferença total de cor (ΔE_{ab}^*) considerável entre os pares TFC-01 e TFC-02 e também TFC-02 e TFC-03 devido à maior variação no eixo de luminosidade ΔL^* por causa da menor quantidade de branco na amostra TFC-02 ($L^* = 85,42$), e, portanto, são pares não-correspondentes em cores.

Tabela 4.3 – Diferença entre os parâmetros cromáticos CIELAB nas telhas de fibrocimento brancas não-correspondentes em cor











Material	Telhas de fibrocimento				Variação dos parâmetros cromáticos				Significado	
	Cor	Código	Cor	Código	Cor	ΔL^*	Δa^*	Δb^*		ΔE_{ab}^*
Branca	TFC-01		TFC-02			5.89	- 1.97	- 4.47	7.65	(+) Mais claro
Branca	TFC-02		TFC-03			- 7.33	0.82	1.20	7.47	(-) Mais escuro

Fonte: A autora.

Das tintas brancas sem correspondência de cor (Tabela 4.4), a maior variação, dentre os parâmetros de cor, nos pares T-04 e T-08 é na luminosidade. As maiores diferenças neste eixo ($-\Delta L^*$) também são observadas para as tintas T-01 e T-03 em relação às tintas T-08 e T-09, porque são mais escuras, ou seja, têm menor brilho.

Portanto, os pares das telhas de fibrocimento e tintas brancas não são considerados aceitáveis em correspondência de cor para aplicações comerciais e industriais de acordo com o critério adotado por causa da maior alteração no parâmetro de luminosidade (ΔL^*).

Tabela 4.4 – Diferença entre os parâmetros cromáticos CIELAB nas tintas brancas não-correspondentes em cor











Material	Tintas				Variação dos parâmetros cromáticos				Significado	
	Cor	Código	Cor	Código	Cor	ΔL^*	Δa^*	Δb^*		ΔE_{ab}^*
Branca	T-01		T-08			- 6.37	- 0.37	0.33	6.39	(-) Mais escuro
Branca	T-01		T-09			- 5.48	- 0.37	0.09	5.49	(-) Mais escuro
Branca	T-03		T-08			- 5.98	- 0.50	- 0.77	6.05	(-) Mais escuro
Branca	T-03		T-09			- 5.09	- 0.5	- 1.01	5.21	(-) Mais escuro
Branca	T-04		T-08			- 5.27	- 0.55	- 0.16	5.30	(-) Mais escuro

Fonte: A autora.

Os pares das tintas brancas T-03 e T-04; T-06 e T-07; T-08 e T-09 são correspondentes em cores (Tabela 4.5). Apesar disso, o eixo de luminosidade é o parâmetro que mais se alterou, sendo a tinta T-03 levemente mais escura ($-\Delta L^*$) do que a T-04 e as tintas T-06 e T-08 são mais claras ($+\Delta L^*$), ou seja, possuem mais branco nas suas composições de cores em relação às tintas T-07 e T-09, respectivamente. A tinta T-05 também apresenta correspondência de cor

com as tintas T-06 e T-07, porém a maior diferença, dentre os parâmetros, é verificada no eixo cromático b^* ($+\Delta b^*$), sendo, portanto, a amostra T-05 um pouco mais amarelada do que as outras duas.









Tabela 4.5 – Diferença entre os parâmetros cromáticos CIELAB nas tintas brancas correspondentes em cor

Material		Tintas			Variação dos parâmetros cromáticos				Significado
Cor	Código	Cor	Código	Cor	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE_{ab}^*	-
Branca	T-03		T-04		- 0.71	0.05	- 0.60	0.93	(-) Mais escuro
Branca	T-05		T-06		- 0.12	0.14	0.50	0.53	(+) Amarelado
Branca	T-05		T-07		0.13	0.17	0.61	0.64	(+) Amarelado
Branca	T-06		T-07		0.25	0.03	0.11	0.28	(+) Mais claro
Branca	T-08		T-09		0.89	0.00	- 0.24	0.92	(+) Mais claro

Fonte: A autora.

Entre as tintas aditivadas, apesar da diferença de demão (Tabela 4.6), todas são correspondentes em cor, exceto o par de vermelhas. Desta forma, as tintas aditivadas bege, cinza e vermelha com uma demão são mais escuras ($-\Delta L^*$) do que com duas demãos, exceto a branca A-01-B, que é mais clara ($\Delta L = + 0,83$). Portanto, a luminosidade L^* é o parâmetro mais relevante, apesar da pequena variação, do que os eixos cromáticos $\Delta a^*\Delta b^*$ para a diferença de cor. Relembrando-se, todas as amostras das tintas aditivadas foram aplicadas com três demãos, alterando-se apenas o seu acabamento (última demão), sendo realizada com a tinta convencional correspondente em cor (revestimento liso) ou com a própria aditivada, conforme explicado anteriormente.













Tabela 4.6 – Diferença entre os parâmetros cromáticos CIELAB nas tintas aditivadas (02 demão) (03 demãos) correspondentes em cor

Material		Tinta aditivada (02 demãos)		Tinta aditivada (03 demãos)		Variação dos parâmetros cromáticos			Significado
Cor	Código	Cor	Código	Cor	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE_{ab}^*	-
Branca	A-01-B		A-01-B-2		0.83	0.00	0.43	0.93	(+) Mais claro
Bege	A-01-P		A-01-B-2		- 0.76	- 0.51	- 0.21	0.94	(-) Mais escuro
Cinza	A-01-C		A-01-B-2		- 0.23	0.02	0.20	0.31	(-) Mais escuro
Vermelha	A-01-V		A-01-B-2		- 0.99	0.42	0.14	1.09	(-) Mais escuro

Fonte: A autora.

As tintas de referência bege, cinza e vermelha são correspondentes em cor em relação às suas respectivas aditivadas com duas demãos (Tabela 4.7). Contudo, apenas o par de brancos não é correspondente devido ao aumento da luminosidade ($+\Delta L^*$), após a mistura do pó branco refletivo, o que também deixou a tinta aditivada branca mais amarelada ($+\Delta b^*$). A tinta aditivada vermelha aumentou o seu brilho ($\Delta L = +0,15$), em menor quantidade, e verificou-se o leve escurecimento ($-\Delta L^*$) nas tintas aditivadas bege e cinza. Logo, as tintas coloridas aditivadas, apesar da correspondência em cor, sofreram mais alterações nos eixos de tonalidade $\Delta a^*\Delta b^*$ dentre os parâmetros de cor.













Tabela 4.7 – Diferença entre os parâmetros cromáticos CIELAB nas tintas aditivadas (01 demão) com as de referência correspondentes em cor

Material	Tinta aditivada (02 demãos)		Tintas de referência		Variação dos parâmetros cromáticos				Significado	
	Cor	Código	Cor	Código	Cor	ΔL^*	Δa^*	Δb^*		ΔE_{ab}^*
Branca	A-01-B		T-01-B-REF			0.81	0.26	0.93	1.26	(+) Mais claro (+) Amarelado
Bege	A-01-P		T-01-P-REF			-0.09	0.35	0.52	0.63	(+) Amarelado
Cinza	A-01-C		T-01-C-REF			-0.11	0.15	0.21	0.28	(+) Amarelado
Vermelha	A-01-V		T-01-V-REF			0.15	0.50	0.38	0.65	(+) Avermelhado

Fonte: A autora.

A tinta vermelha aditivada com duas demãos aumentou consideravelmente a sua luminosidade ($\Delta L = +1,14$), tornando-a não mais correspondente em cor, em relação ao seu par de referência, o que também foi observado na bege (A-01-P-2), porém os parâmetros alterados foram os da tonalidade $\Delta a^*\Delta b^*$ (Tabela 4.8). Portanto, além desta, as tintas branca e cinza também foram modificadas nos seus tons, tornando-se mais amarelada e avermelhada, nesta ordem, mesmo assim correspondem em cores às suas referências.

Tabela 4.8 – Diferença entre os parâmetros cromáticos CIELAB nas tintas aditivadas (03 demãos) com as de referência correspondentes em cor

Material	Tinta aditivada (03 demãos)		Tintas de referência		Variação dos parâmetros cromáticos				Significado	
	Cor	Código	Cor	Código	Cor	ΔL^*	Δa^*	Δb^*		ΔE_{ab}^*
Branca	A-01-B-2		T-01-B-REF			0.02	0.26	0.50	0.57	(+) Amarelado
Bege	A-01-P-2		T-01-P-REF			0.67	0.86	0.72	1.31	(+) Avermelhado
Cinza	A-01-C-2		T-01-C-REF			0.12	0.14	0.00	0.18	(+) Avermelhado
Vermelha	A-01-V-2		T-01-V-REF			1.14	0.08	0.25	1.17	(+) Mais claro

Fonte: A autora.

Resumidamente, a luminosidade (ΔL) foi o parâmetro de cor que mais se alterou ao comparar-se tintas aditivadas com 02 e 03 demãos de cores correspondentes. Contudo, entre as aditivadas (de 02 ou 03 demãos) em relação às suas referências, observa-se mais variações nos eixos das tonalidades ($\Delta a^* \Delta b^*$). No geral, as diferenças totais de cores na pesquisa possuem valores muito baixos comparado ao estudo de Revel *et al.* (2013), cujas diferenças encontradas são ΔE_{ab}^* em 12,5 e 21,0 de cor.

Estes valores referem-se à tinta acrílica verde como referência, antes e após a adição de óxido metálico (TiO_2) como um aditivo refletivo, o qual foi diluído em água numa concentração de 3,3% de peso por volume. Além do mais, por tratar-se de um pó branco, as maiores variações encontradas para as tintas aditivadas são o aumento na luminosidade (+ 8,5 e + 13,7) e no eixo cromático a^* (- 9,1 e - 15,9), tornando-as mais esverdeadas.

4.1.2 Propriedades óptica-físicas

4.1.2.1 Refletância solar com espectrofotômetro

Nas tabelas 4.9 e 4.10 estão apresentados os valores de refletância espectral, medidos no espectrofotômetro, e posteriormente ajustados ao espectro solar padrão em três sub-regiões: ultravioleta UV (300 a 380 nm), visível VIS (380 a 780 nm) e infravermelho próximo IV (780 a 2.500 nm) e na solar total (300 a 2.500 nm) para os materiais frios e de referência, respectivamente. A medição das telhas de referência de concreto e fibrocimento não foi realizada, porque o formato curvo não se adequou à esfera integradora.

Os resultados de refletância estão apresentados com três casas decimais conforme indicação nos manuais dos programas de classificação dos produtos de telhados e fachadas frias do CRRC (2022a) (2022b). A incerteza para a medição do equipamento espectrofotômetro com esfera integradora é cerca de $\pm 0,02$ absoluto segundo Pereira *et al.* (2015).

As curvas de refletância espectral obtidas nas medições espectrofotométricas detalham o comportamento refletivo das amostras a cada comprimento de onda (Figura 4.7) (Figura 4.8) (Figura 4.9). Com o intuito em realizar uma análise comparativa e para a melhor visualização gráfica, optou-se em separá-las pelo mesmo tipo de material e fabricante, considerando-se a utilização do mesmo processo de produção e/ou matéria prima. Apenas nas Figura 4.7 (b) e Figura 4.8 (d) estão representados o mesmo tipo de material na cor branca, porém de fabricantes diferentes, para as telhas de fibrocimento e o restante dos materiais líquidos, respectivamente.

Tabela 4.9 – Refletância espectral e solar dos materiais frios

N°	Código	Refletância espectral			Solar total	N°	Código	Refletância espectral			Solar total
		UV	VIS	IV				UV	VIS	IV	
1	TC-01-B	0.469	0.740	0.710	0.720	16	T-03	0.061	0.794	0.686	0.729
2	TC-01-M	0.231	0.547	0.589	0.558	17	T-04	0.097	0.825	0.714	0.758
3	TC-01-C	0.081	0.087	0.084	0.085	18	T-05	0.165	0.877	0.856	0.851
4	TC-01-V	0.072	0.163	0.290	0.218	19	T-06	0.084	0.859	0.779	0.805
5	TFC-01	0.106	0.885	0.831	0.843	20	T-07	0.085	0.852	0.798	0.810
6	TFC-02	0.106	0.794	0.798	0.786	21	T-08	0.137	0.949	0.927	0.921
7	TFC-03	0.181	0.934	0.928	0.915	22	T-09	0.094	0.924	0.867	0.880
8	ML-01	0.073	0.884	0.787	0.822	23	A-01-B	0.106	0.877	0.780	0.815
9	ML-02	0.077	0.807	0.704	0.744	24	A-01-P	0.140	0.729	0.731	0.716
10	ML-03	0.089	0.791	0.693	0.731	25	A-01-C	0.129	0.291	0.196	0.244
11	T-01	0.098	0.820	0.722	0.759	26	A-01-V	0.083	0.305	0.588	0.428
12	T-02-B	0.095	0.876	0.758	0.805	31	A-01-B-2	0.146	0.901	0.805	0.841
13	T-02-P	0.094	0.660	0.644	0.640	32	A-01-P-2	0.088	0.735	0.754	0.729
14	T-02-C	0.078	0.108	0.113	0.110	33	A-01-C-2	0.082	0.296	0.201	0.248
15	T-02-V	0.061	0.273	0.476	0.360	34	A-01-V-2	0.072	0.325	0.592	0.440

Fonte: A autora.

Tabela 4.10 – Refletância espectral e solar dos materiais de referência

N°	Código	Refletância espectral			Solar total
		UV	VIS	IV	
27	T-01-B-REF	0.110	0.901	0.794	0.835
28	T-01-P-REF	0.110	0.719	0.703	0.698
29	T-01-C-REF	0.097	0.293	0.191	0.242
30	T-01-V-REF	0.101	0.301	0.554	0.411
38	PC-REF-01	0.416	0.526	0.503	0.513
38	PC-REF-02	0.393	0.498	0.481	0.488

Fonte: A autora.

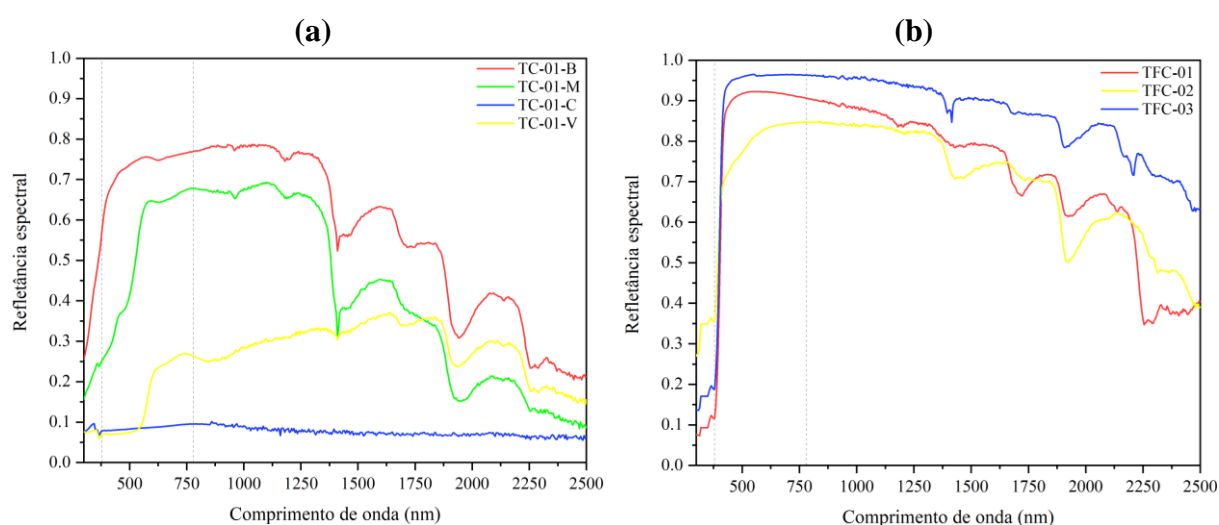
As telhas de concreto branca e marfim possuem os maiores valores de refletância em todas as regiões espectrais enquanto as mais escuras, a cinza e a vermelha possuem os piores desempenhos refletivos no ultravioleta e no visível, como espera-se em tonalidades escuras (Tabela 4.9). No entanto, a curva da cinza é constante e sempre inferior à 10% de refletância ao passo que a marfim apresenta aumento gradativo, o que melhora o seu desempenho refletivo no infravermelho próximo. Nota-se que nesta região espectral, a partir de 1.845 nm, na Figura 4.7 (a) as curvas das telhas branca, marfim e vermelha apresentam o mesmo comportamento.

Apenas as telhas frias branca e marfim possuem valores de refletância no infravermelho e solar superiores aos encontrados nas telhas coloridas convencionais avaliadas em Araújo (2022). Nesta pesquisa, nem a telha vermelha fria ($\rho_{\text{total}} = 21,8\%$) alcançou valores próximos aos encontrados nas vermelhas frias ($\rho_{\text{total}} = 33\%$ a 43%) de Levinson *et al.* (2010) como a cinza escuro fria possui valor aquém no infravermelho próximo ($\rho_{\text{IV}} = 8,4\%$) do revestimento frio preto ($\rho_{\text{IV}} = 35\%$) de Levinson *et al.* (2007), o qual foi aplicado diretamente na telha de concreto.

A telha de fibrocimento TFC-03 é a que possui o melhor desempenho refletivo em todas as regiões espectrais, superior a 90% no visível e infravermelho próximo, o que representa 91,5% no total, e logo depois refletância solar de 84,3% para a TFC-01 e 78,6% na TFC-02 (Tabela 4.9). Pela figura 4.7 (b), observa-se que elas refletem mais no visível do que no infravermelho, assim como nas avaliadas por Couto (2019), e a partir desta região suas curvas decaem.

As telhas de concreto possuem na sua camada superficial uma resina, o que lhes confere um acabamento liso e homogêneo, portanto são menos rugosas e porosas do que as de fibrocimento. A telha de concreto branca possui menor valor de refletância no visível, infravermelho próximo e total do que as de fibrocimento brancas. Portanto, as interreflexões provocadas pela radiação difusa na superfície rugosa destas telhas de fibrocimento não provocaram um efeito significativo na absorção de energia.

Figura 4.7 – Curvas espectrais de refletância (a) das telhas de concreto do fabricante A e (b) das telhas de fibrocimento brancas de fabricantes diferentes



Fonte: A autora.

Todas as curvas espectrais dos materiais líquidos do fabricante B têm comportamentos similares na Figura 4.8 (a). As curvaturas das tintas brancas T-01 e T-04 estão muito próximas entre si e

superior às demais, o que se explica pelos valores de refletância muito próximos em todas as regiões e no solar (Tabela 4.9). A tinta T-03 tem o pior desempenho refletivo desde o ultravioleta, no visível, sendo a única inferior a 80% de refletância, e no infravermelho até cerca de 1.670 nm, quando a curva da manta ML-02 declina, porém ainda mantém maiores valores de refletância do que a tinta T-03 (Tabela 4.9).

De acordo com o fabricante B, a tinta T-03 com a designação “Extreme” seria uma versão aprimorada da capacidade refletiva da tinta T-01, porém não foi verificado nos resultados (Tabela 4.9). Apesar disso, a variação é de apenas 3,6% e 3% na refletância espectral no infravermelho e solar, nesta ordem, entre estas duas tintas.

Similar à anterior, as curvas da manta ML-03 e tinta T-06 também possuem comportamento refletivo similar, especialmente no infravermelho, mas estão mais afastadas pela Figura 4.8 (b) em comparação aos materiais do fabricante B. A manta ML-03 tem maior refletância no ultravioleta e menor no visível e infravermelho próximo do que a tinta T-06, a qual possui também maior refletância solar. As maiores diferenças entre elas são de 4,8% de refletância no infravermelho e 7,4% na solar (Tabela 4.9).

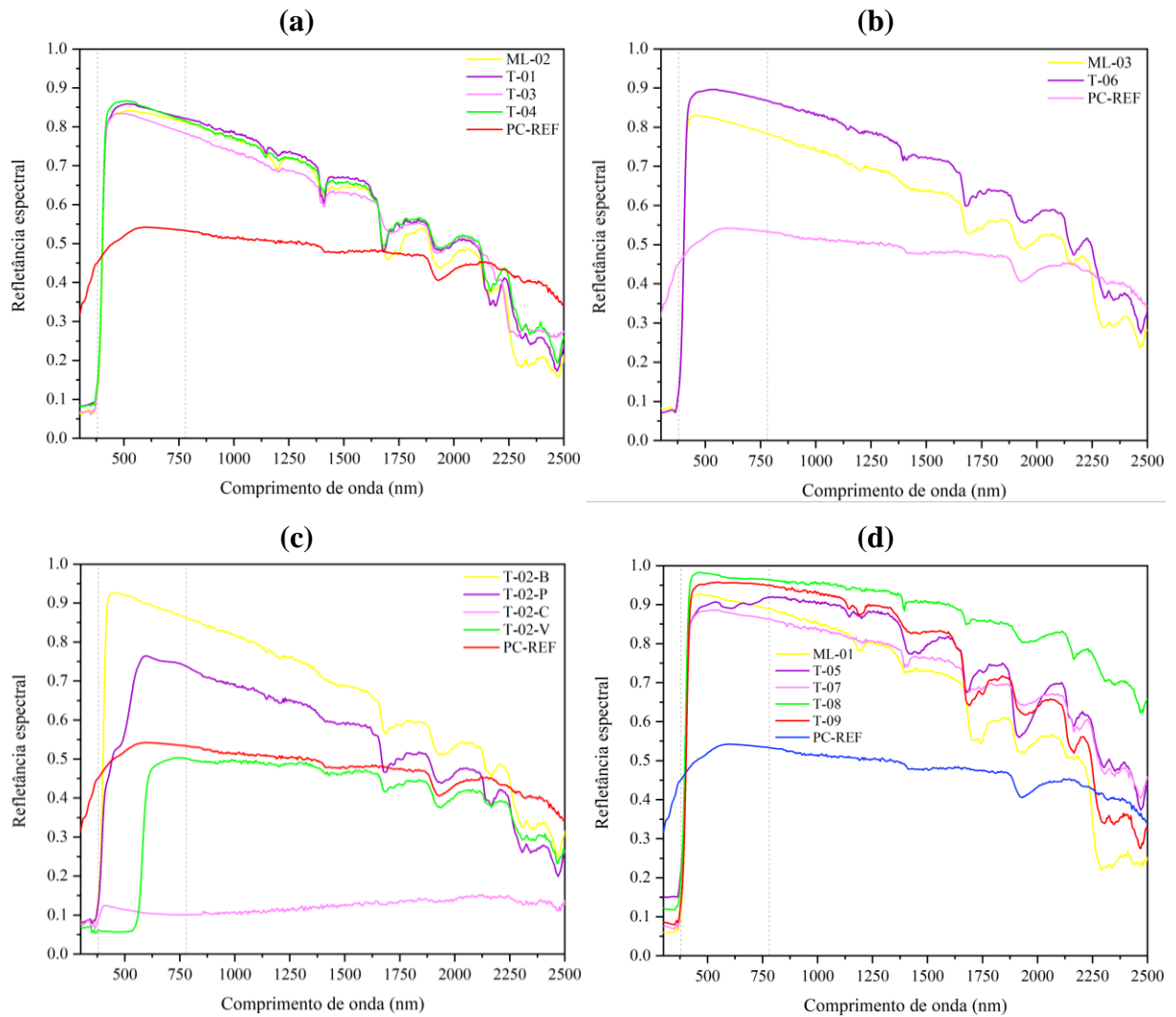
As tintas branca e pérola para aplicação em cobertura possuem comportamento espectral semelhante e aspecto descendente desde 600 nm no visível. A curva da tinta vermelha difere dessas, porém aproxima-se no comprimento de onda em cerca de 1.650 nm e chega a ultrapassar a pérola em 2.130 nm ao passo que a cinza se mantém quase constante e sempre abaixo de 15% no valor de refletância. Pela figura 4.8 (c), ambas estão em todo o espectro abaixo da curva da placa cimentícia de referência PC-REF-01 sem pintura.

Apesar da grande variação de 64,5% da refletância no infravermelho próximo entre as tintas, a maior diferença é de 76,8% no visível (Tabela 4.9), por causa da diversidade de cores analisadas, e uma região onde concentra-se boa parte da energia térmica solar.

Na figura 4.8 (d) de mantas e tintas brancas, porém de fabricantes diferentes, observa-se que não há padrões similares entre as curvas, especialmente no infravermelho próximo. A manta ML-01 possui boa reflexão no visível (88,4%), no entanto, sua curva decai significativamente, sendo o pior desempenho refletivo no infravermelho próximo (78,7%), acompanhada pela tinta T-07 ($\rho_{IV} = 79,8\%$), a qual possui também os piores valores de refletância no visível (85,2%) e para o solar (81,0%).

A tinta T-08 é a mais refletiva, exceto no ultravioleta, no visível (94,9%) e a única que possui valores de refletância acima de 90% no infravermelho (92,7%) e solar total (92,1%), dentre todos os materiais líquidos analisados. Os valores de refletância no infravermelho próximo das tintas T-09 (86,7%) e T-05 (85,6%) são próximos. Não obstante, a curvatura da tinta T-09 permanece acima no visível e no infravermelho próximo até cerca de 1.670 nm, o que contribui para o seu melhor desempenho refletivo solar (88,0%) em relação à T-05 (85,1%).

Figura 4.8 – Curvas espectrais de refletância das mantas líquidas e tintas (a) do fabricante B; (b) do fabricante C; (c) do fabricante D e (d) brancas de fabricantes diferentes



Fonte: A autora.

Pelas figuras 4.9 (b) (d), nota-se a maior amplitude entre as curvas das tintas aditivadas e de referência para as tintas de cor pérola e vermelha. O melhor desempenho refletivo é das tintas aditivadas com duas demãos, uma demão e de referência, nesta ordem. As maiores variações no espectro visível são de 2,4% e 1,6% para a vermelha e pérola, respectivamente, logo observa-se as maiores diferenças no parâmetro de luminosidade da cor em +1,14 e +0,67, nesta ordem.

No entanto, a tinta pérola possui maior diferença refletiva no espectro infravermelho ($\Delta\rho_{IV} = 5,1\%$) e total ($\Delta\rho_{solar} = 3,1\%$) do que no observado para a vermelha ($\Delta\rho_{IV} = 3,8\%$) ($\Delta\rho_{solar} = 2,9\%$).

Portanto, estas duas tintas aditivadas obtiveram aumentos superiores aos valores de refletância de Revel *et al.* (2013) ao utilizar o pigmento alumina (Al_2O_3) como um aditivo na melhoria das características refletivas de tintas comerciais, porém o acréscimo foi inferior ao alcançado com o titânio (TiO_2). Destaca-se a utilização do aditivo em pó composto por dióxido de titânio (TiO_2) ou óxido de alumínio (Al_2O_3) por Revel *et al.* (2013) são os mesmos óxidos presentes no pó aditivo avaliado nesta pesquisa.

Para as tintas branca e cinza, a maior variação no espectro visível está entre a tinta aditivada com duas demãos em relação à de uma demão. Entre as brancas ($\Delta\rho_{VIS} = 2,4\%$), o parâmetro L^* variou negativamente ($\Delta L^* = -0,83$), isto é, ocorreu o escurecimento da cor branca de forma sutil ao passo que a cinza teve a menor variação no visível ($\Delta\rho_{VIS} = 0,5\%$) como no parâmetro de claridade ($\Delta L^* = 0,23$) dentre todas.

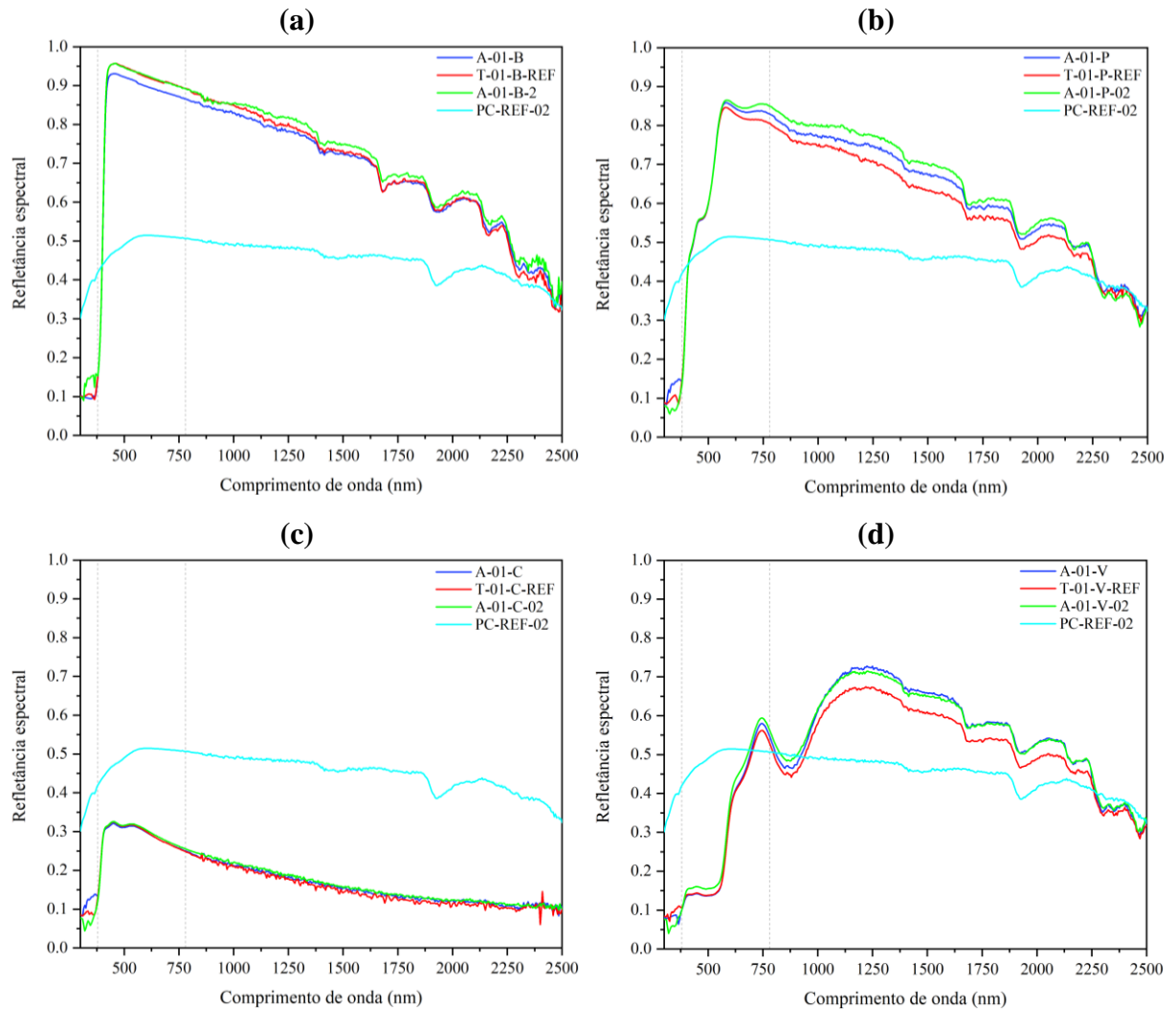
A curva da tinta aditivada branca com uma demão possui menor refletância em todas as regiões espectrais e permanece abaixo até o comprimento de onda de 1.650 nm no infravermelho. Enquanto as curvas das tintas de referência e aditivada com duas demãos sobrepõem-se no espectro visível até cerca de 975 nm no infravermelho, quando a aditivada a ultrapassa discretamente na Figura 4.9 (a). Portanto, elas possuem o mesmo valor de refletância no visível e a diferença da refletância no infravermelho próximo ($\Delta\rho_{IV} = 1,1\%$) e total ($\Delta\rho_{solar} = 0,6\%$) entre elas são pequenas. Apesar da classificação da tinta de referência branca como convencional, ela possui boa concentração de dióxido de titânio (TiO_2) na sua composição química de acordo com o fabricante.

Entre as tintas cinzas, o afastamento das curvas no visível e infravermelho próximo é ainda menor do que observado nas brancas pela Figura 4.9 (c). A variação dos valores de refletância entre a aditivada com duas demãos é de 0,3% no visível, 1,0% no infravermelho próximo e 0,6% na solar em relação à de referência, sendo a menor contribuição do aditivo refletivo para a reflexão solar assim como para a branca.

A tinta aditivada cinza, apesar de um pouco mais clara que a vermelha, foi a que obteve menor aumento no infravermelho próximo, o que diverge dos maiores acréscimos observados nesta região espectral em revestimentos frios mais escuros como o preto em Synnefa, Santamouris e

Apostolakis (2007), nas tintas cinza escura e preta de Dornelles, Caram e Sichieri (2014) e preta de Cozza *et al.* (2015).

Figura 4.9 – Curvas espectrais de refletância das tintas aditivadas e de referência do fabricante D (a) brancas; (b) pérolas; (c) cinzas e (d) vermelhas



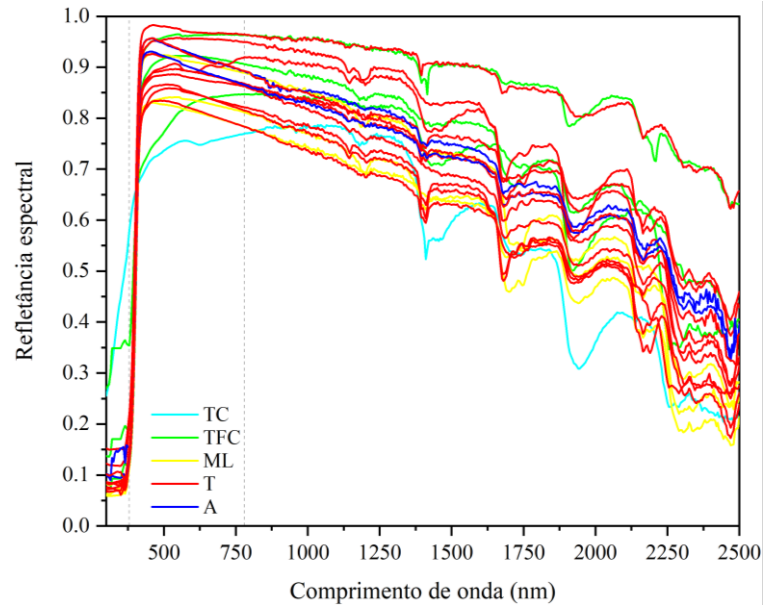
Fonte: A autora.

As diferenças na refletância das regiões espectrais – visível e infravermelho próximo – onde concentram a maior parte da energia térmica e na refletância solar total entre os materiais líquidos brancos ($\rho_{\text{solar}} = 72,9\%$ a $92,1\%$) são bem superiores ao encontrado em Dornelles *et al.* (2011), cujas tintas analisadas ($\rho_{\text{solar}} = 78,3\%$ a $85,3\%$) são nacionais brancas com microesferas cerâmicas.

Na Figura 4.10 observa-se patamares horizontais nas amostras brancas para a reflexão no visível devido ao potencial de refletir em quase todos os comprimentos de onda. Contudo, os valores de 79% a 95% na refletância variam de forma acentuada por causa da diferença nos parâmetros (luminosidade, tonalidade e saturação) entre essas cores brancas enquanto no infravermelho

próximo as curvas possuem aspecto descendente e não se verifica homogeneidade especialmente entre os materiais diferentes.

Figura 4.10 – Curvas espectrais de refletância de todas as amostras brancas avaliadas, divididas por grupo de materiais



Fonte: A autora.

4.1.2.2 Emitância térmica com emissômetro portátil

Os valores médios de emitância térmica medidos pelo emissômetro portátil para todas as amostras frias e de referência avaliadas na pesquisa estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 4.11 e 4.12. O valor numérico está em unidade adimensional e indicado com duas casas decimais como determinado pelos manuais do CRRC (2022a) (2022b).

Tabela 4.11 – Emitância térmica dos materiais frios

N°	Código	ϵ	N°	Código	ϵ	N°	Código	ϵ
1	TC-01-B	0.91	11	T-01	0.88	21	T-08	0.87
2	TC-01-M	0.92	12	T-02-B	0.86	22	T-09	0.89
3	TC-01-C	0.91	13	T-02-P	0.87	23	A-01-B	0.86
4	TC-01-V	0.92	14	T-02-C	0.87	24	A-01-P	0.87
5	TFC-01	0.87	15	T-02-V	0.87	25	A-01-C	0.87
6	TFC-02	0.88	16	T-03	0.88	26	A-01-V	0.87
7	TFC-03	0.87	17	T-04	0.88	31	A-01-B-2	0.86
8	ML-01	0.91	18	T-05	0.90	32	A-01-P-2	0.87
9	ML-02	0.91	19	T-06	0.88	33	A-01-C-2	0.88
10	ML-03	0.88	20	T-07	0.87	34	A-01-V-2	0.87

Fonte: A autora.

Tabela 4.12 – Emitância térmica dos materiais de referência

N°	Código	ϵ	N°	Código	ϵ
27	T-01-B-REF	0.85	36	TC-REF	0.89
28	T-01-P-REF	0.86	37	TFC-REF	0.90
29	T-01-C-REF	0.86	38	PC-REF-01	0.88
30	T-01-V-REF	0.86	38	PC-REF-02	0.88

Fonte: A autora.

A princípio, a análise levou em conta a comparação entre os materiais de mesma constituição superficial, isto é, entre os grupos de materiais. As emitâncias térmicas nas telhas refletivas de concreto (0,91 a 0,92) e as de fibrocimento (0,87 a 0,88) apresentam entre si ínfimas variações de apenas $\pm 0,01$. Entre seus grupos, a telha de referência de concreto é a que possui o menor valor de emitância ($\epsilon = 0,89$), o que coincide com as avaliadas em Araújo (2022), assim como a de fibrocimento é a de maior valor ($\epsilon = 0,90$).

Foi verificado em Werle, Loh e John (2014) que os valores de emitância térmica de tinta à base de cal pintada sobre substratos cerâmico ($\epsilon = 0,927$) e de fibrocimento claro ($\epsilon = 0,954$) e escuro ($\epsilon = 0,966$) não foram afetados pelos diferentes números de demãos aplicadas (01, 02 e 03). Portanto, a diferença no número de demãos de pintura entre as amostras desta pesquisa não foi levada em consideração a ser discutida. Ademais, todos os materiais líquidos foram aplicados sobre a mesma base, a placa cimentícia de referência PC-REF ($\epsilon = 0,88$).

Apenas as mantas ML-01 e ML-02 possuem valores acima de 0,90 ($\epsilon = 0,91$) e a ML-03 um pouco menor ($\epsilon = 0,88$) e, portanto, com uma diferença de $\pm 0,03$. No geral, entre as tintas frias (de 0,86 a 0,90), a variação é de 0,04 absoluto, a mesma encontrada entre os revestimentos frios brancos estudados por Synnefa, Santamouris e Livada (2006), porém estes possuem valores ligeiramente maiores (de 0,89 a 0,93).

O acabamento superficial não se mostrou um aspecto relevante tendo em vista que entre as tintas aditivadas de mesma cor, que possuem diferença apenas na demão final, apresentaram o mesmo valor de emitância térmica, exceto o par de cinzas. Todas as tintas aditivadas apresentaram valor de emitância $+0,01$ do que as suas respectivas tintas de referência. A maior variação de $+0,02$ ocorreu apenas na tinta aditivada cinza A-01-C-2 ($\epsilon = 0,88$) devido ao aumento gradativo do seu valor de emitância em relação à referência T-01-C-REF ($\epsilon = 0,86$).

As variações estão de acordo com a literatura quando comparam-se as tintas coloridas frias em relação às tradicionais correspondentes em cores (SYNNEFA; SANTAMOURIS; APOSTOLAKIS, 2007) (REVEL *et al.*, 2014a) (ZINZI, 2016) (SILVA, 2017). No entanto, os

autores destacam a alteração como insignificante em razão do uso dos pigmentos refletivos no infravermelho nas tintas frias.

A maior variação de emitância térmica foi encontrada em Dornelles, Caram e Sichieri (2014) entre tintas convencionais (de 0,90 a 0,91) e as frias (de 0,81 a 0,89), sendo os menores valores referentes às tintas importadas de um fabricante grego, mas apesar disso são classificadas como boas emissoras de calor.

As ínfimas diferenças na emitância térmica dos materiais frios em relação aos convencionais dezoa segundo Revel *et al.* (2014) da melhoria significativa do índice SRI (entre +7 e +26) para todos os materiais frios analisados por eles.

Portanto, na literatura, as tintas refletivas apesar de possuírem alta emitância, seus valores tendem a ser menores do que as convencionais. Apesar dos resultados encontrados nesta pesquisa com os maiores valores de emitância nas tintas aditivadas (incorporadas com o pó aditivo refletivo) em relação às tintas convencionais, contudo esta diferença está dentro da incerteza de medição do equipamento ($\pm 0,01$).































4.1.3 Temperatura superficial

Os valores de temperaturas máxima e mínima, registrados na câmera termográfica, assim como a média calculada durante o período de medição para os materiais frios (Tabela 4.13) e os de referência (Tabela 4.14) estão apresentados.

O monitoramento da temperatura do ar de bulbo seco (TBS) e a intensidade da radiação solar foi iniciado a partir das 09h30, período em que as amostras foram expostas em campo, e estão representadas na Figura 4.11. Além destes parâmetros climáticos, também foi analisada a umidade relativa do ar (UR) e os valores médios de todas essas variáveis estão exibidos na Tabela 4.15.









Nota-se na Figura 4.11 que há períodos com aumentos e reduções da radiação solar devido ao aparecimento das nuvens, sendo o menor valor registrado de 388 W/m^2 às 10h30, ao passo que a temperatura do ar se eleva gradativamente durante todo o período monitorado. Foi verificada condição de céu claro às 9h30 como no período das 11h até às 12 horas, momento de radiância solar (782 W/m^2) máxima, quando ocorre a mudança para céu parcialmente encoberto até o final das medições de acordo com as imagens hemisféricas (Figura 4.12).

Tabela 4.13 – Temperaturas máxima e mínima registradas em (°C) e a temperatura média calculada em (°C) dos materiais frios (**Continua**)

Cor	N°	Código	Mín.	Méd.	Máx.	Cor	N°	Código	Mín.	Médio	Máx.
	01	TC-01-B	33.3	37.5	43.2		16	T-03	32.6	39.3	43.3
	02	TC-01-M	35.9	41.6	48.1		17	T-04	31.9	38.9	43.4
	03	TC-01-C	43.1	55.6	64.5		18	T-05	30.1	34.6	38.2
	04	TC-01-V	40.9	52.2	60.6		19	T-06	31.8	37.5	41.3
	05	TFC-01	31.2	35.6	42.1		20	T-07	31.6	37.2	41.5
	06	TFC-02	32.0	37.6	43.9		21	T-08	29.0	32.1	36.3
	07	TFC-03	30.0	33.6	39.2		22	T-09	30.6	34.6	38.7
	08	ML-01	31.4	36.7	40.8		23	A-01-B	30.2	36.8	41.4
	09	ML-02	32.3	38.4	42.2		24	A-01-P	32.2	40.4	45.3
	10	ML-03	33.1	39.8	44.2		25	A-01-C	40.2	56.5	64.4
	11	T-01	32.5	39.2	44.0		26	A-01-V	37.6	50.2	56.9
	12	T-02-B	31.2	37.3	41.4		31	A-01-B-2	30.2	36.4	40.8
	13	T-02-P	34.8	43.4	48.1		32	A-01-P-2	32.4	40.0	44.4
	14	T-02-C	44.4	62.3	71.1		33	A-01-C-2	40.8	56.6	64.6
	15	T-02-V	40.0	53.9	61.0		34	A-01-V-2	38.3	50.2	57.0

Fonte: A autora.

Tabela 4.14 – Temperaturas máxima e mínima registradas em (°C) e a temperatura média calculada em (°C) dos materiais de referência

Cor	N°	Código	Mín.	Médio	Máx.	Cor	N°	Código	Mín.	Médio	Máx.
	27	T-01-B-REF	29.3	35.8	40.0		36	TC-REF	38.6	48.9	55.8
	28	T-01-P-REF	32.5	40.9	45.5		37	TFC-REF	35.0	49.1	56.3
	29	T-01-C-REF	41.0	56.7	64.9		38	PC-REF-01	36.3	46.8	52.4
	30	T-01-V-REF	38.3	51.0	57.7		38	PC-REF-02	35.2	46.2	52.2

Fonte: A autora.

A evolução temporal (das 11h às 14h) das temperaturas superficiais médias das amostras, expostas ao Sol, e da temperatura do ar de bulbo seco (TBS) está apresentada nos gráficos das telhas (Figura 4.13), mantas líquidas e tintas (Figura 4.14) e das tintas aditivadas e referências (Figura 4.15). A representação dos materiais, que foram agrupados nos mesmos isopores, foi realizada tendo em vista que diferenças no comportamento térmico entre amostras do mesmo

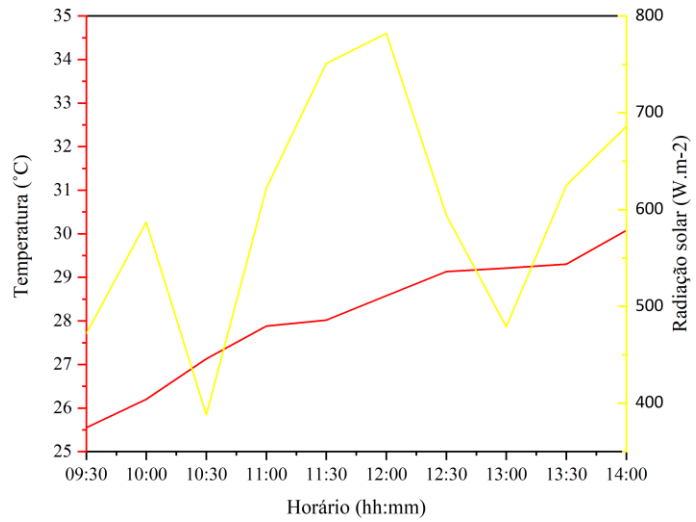
tipo de material ou cor foram observadas em revestimentos de Synnefa, Santamouris e Livada (2006) por causa da refletância espectral.

Tabela 4.15 – Parâmetros climáticos monitorados

Parâmetros climáticos	TBS (°C)	UR (%)	Radiação (W.m ⁻²)
09h30	25.55	57.03	472
10h00	26.20	55.75	587
10h30	27.13	53.50	388
11h00	27.88	48.36	622
11h30	28.02	49.75	751
12h00	28.58	44.68	782
12h30	29.13	41.03	594
13h00	29.21	41.43	479
13h30	29.30	39.78	625
14h00	30.08	35.58	686

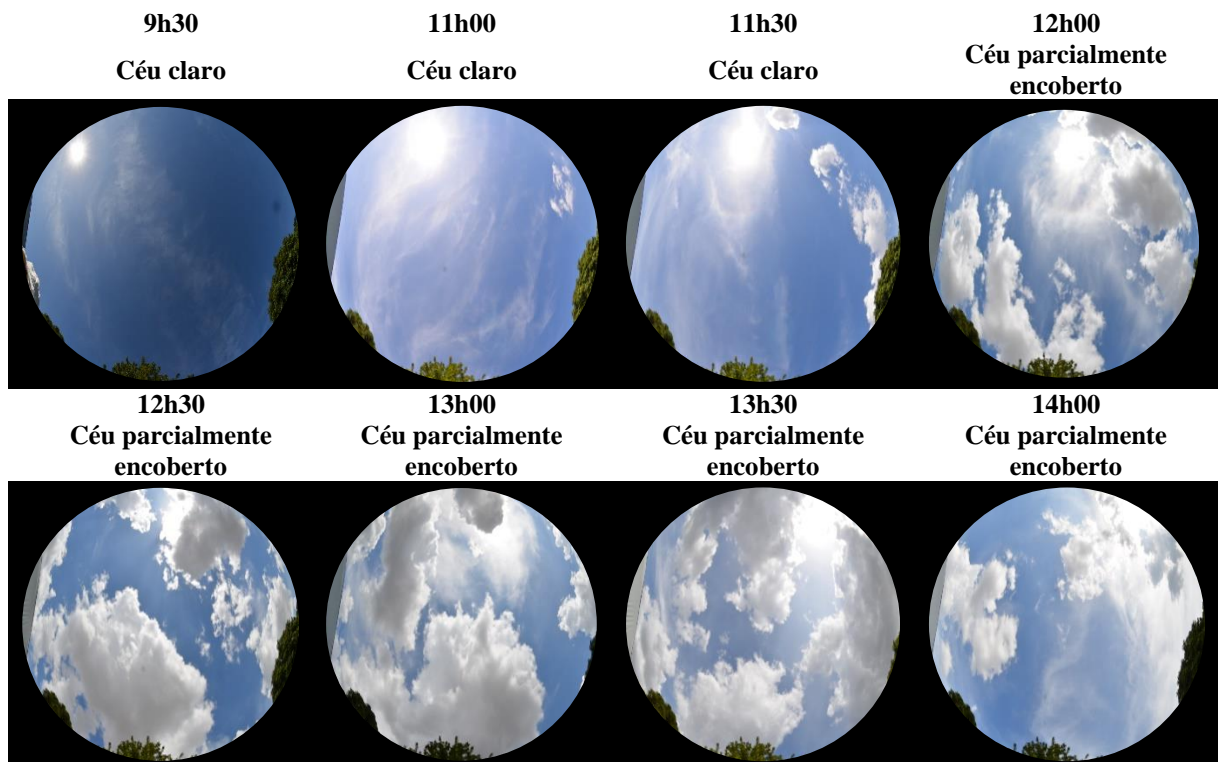
Fonte: A autora.

Figura 4.11 – Evolução temporal da radiação solar e temperatura de bulbo seco (TBS)



Fonte: A autora.

Figura 4.12 – Os registros da abóbada celeste, no dia do experimento, com uma lente olho de peixe acoplado à câmera digital no início do experimento e a cada tempo de medição

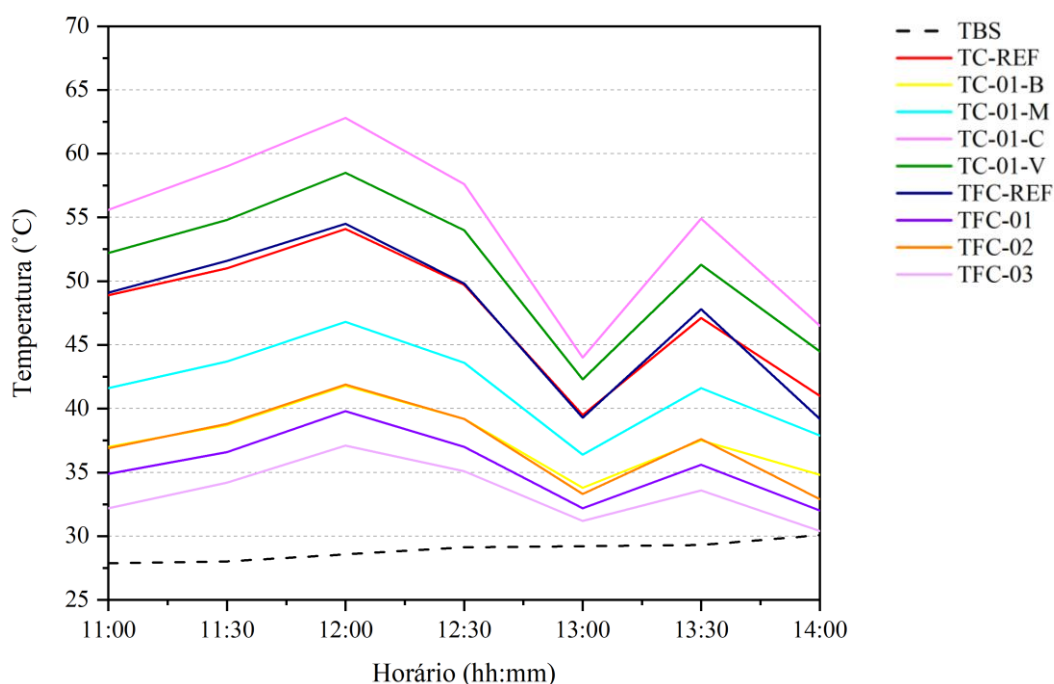


Fonte: A autora.

Em todos os gráficos citados, as linhas apresentam quedas e posteriores aumentos nas temperaturas superficiais devido às oscilações da radiação solar. Então, as maiores temperaturas superficiais são atingidas às 12h como consequência do pico de radiação global registrado e não ao final das medições (14h), quando são observadas as temperaturas mínimas. As exceções são as telhas de concreto, cujas menores temperaturas ocorreram às 13h, e o motivo deve-se ao seu tipo de material e a sua maior espessura em relação aos demais. Então, por causa das suas características, elas armazenam mais calor na sua massa, retendo-o por mais tempo.

As telhas de concreto cinza e vermelha, apesar do revestimento refletivo, estão mais aquecidas em 8,7°C e 4,4°C do que a telha de referência, não revestida, nesta ordem, e a marfim e branca permanecem menos quentes em 7,3°C e 12,3°C às 12 horas, respectivamente, quando se constata a máxima incidência da radiação solar. As temperaturas das telhas de concreto branca e fibrocimento branca TFC-02 praticamente estão sobrepostas, exceto às 14 horas, em que se observa o aumento em quase 2°C da telha de concreto (Figura 4.13).

Figura 4.13 – Temperaturas de bulbo seco (TBS) e superficiais das telhas de concreto e de fibrocimento



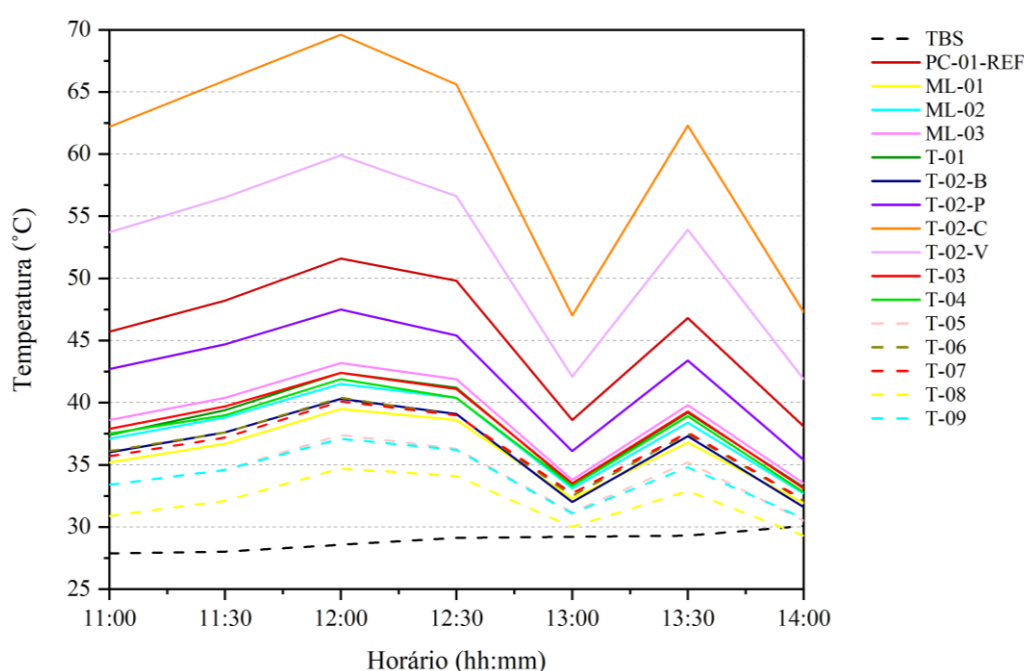
Fonte: A autora.

As telhas de fibrocimento brancas TFC-03, TFC-01 e TFC-02 são as mais frias do conjunto de telhas avaliadas, nesta ordem, com os respectivos valores mínimos aferidos de 30,0°C; 31,2°C e 32,0°C. Elas apresentaram, respectivamente, consideráveis reduções nos valores médios de temperatura em 15,5°C; 13,5°C e 11,5°C em relação à telha de referência TFC-REF (Tabela

4.14), cujos resultados são similares aos encontradas nas telhas de fibrocimento brancas refletivas de Couto (2019), cujo período de medição (11h às 14h) foi o mesmo.

Nas tintas, as maiores temperaturas são verificadas nas coloridas, cinza, vermelha, a placa cimentícia sem pintura (cinza) e a pérola, nesta ordem, cuja diferença média é cerca de 19°C (Figura 4.14). Portanto, os materiais de diferentes cores quando expostos à radiação solar apresentam comportamento térmico diverso, porém é consistente às suas propriedades ópticas como observado por Rosso *et al.* (2017).

Figura 4.14 – Temperaturas de bulbo seco (TBS) e superficiais das mantas líquidas, tintas e placa cimentícia



Fonte: A autora.

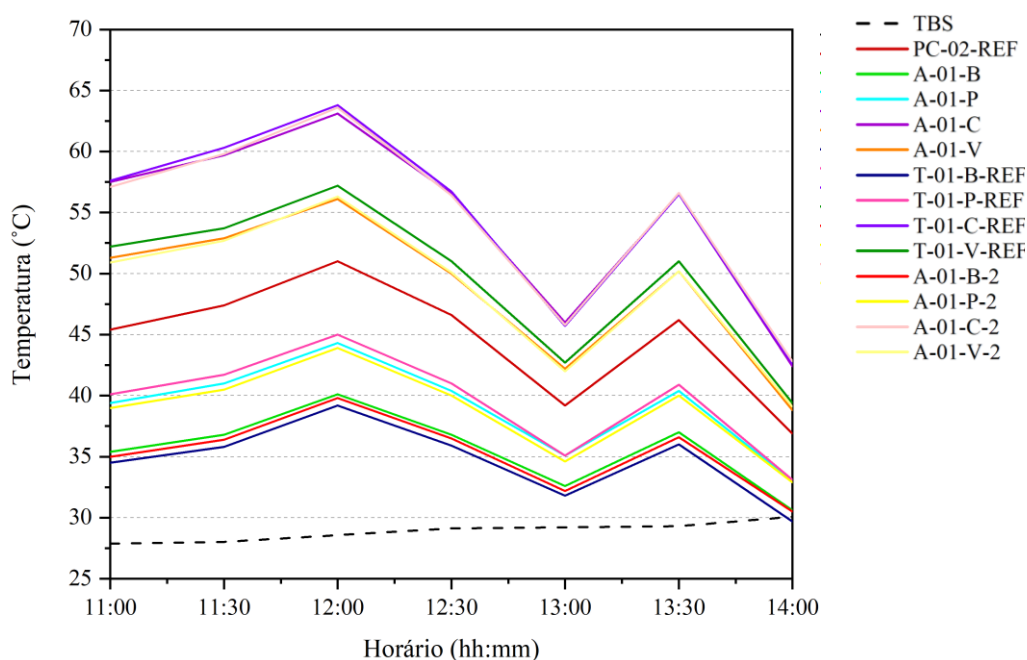
As amostras brancas, mais aquecidas, são a manta ML-03, seguida pelos materiais do fabricante A (ML-02; T-01; T-03 e T-04) com valor máximo registrado em 44,2°C. Das tintas com menores temperaturas, tem-se as tintas T-05 e T-09, as quais possuem valores médios iguais (34,6°C) durante todo o período medido, contudo a mais fria, inferior em 2,5°C, é a tinta T-08, inclusive em quase 1,0°C abaixo em relação à temperatura do ar às 14 horas (Figura 4.14).

Portanto, a variação dos materiais líquidos brancos (mantas e tintas) está entre 29,0°C e 44,2°C (15,2°C) como também foi observado que as tintas brancas com microesferas cerâmicas (MEC) de Dornelles et al. (2011) variaram de 33,09°C a 43,84°C (10,75°C) num período das 12h30 às 15 horas no dia 05 de outubro de 2010. Então, as diferenças de temperaturas registradas indicam

que apenas a cor (branca) da superfície não é um fator determinante do quanto uma superfície reflete ou absorve energia solar.

Dentre as tintas de referência, todas apresentaram maiores temperaturas, em relação às tintas aditivadas de cores correspondentes, exceto a branca (Figura 4.15). Além disso, a branca de referência T-01-B-REF apresentou as maiores reduções das temperaturas máxima, média e mínima em 1,4°C; 1,0°C e 0,9°C, respectivamente. Essa tinta, assim como a T-08, apresentou temperatura superficial inferior à do ar às 14 horas.

Figura 4.15 – Temperaturas de bulbo seco (TBS) e superficiais da placa cimentícia e tintas de referência e aditivadas



Fonte: A autora.

Das tintas aditivadas com acabamento rugoso, apenas a pérola (A-01-P-2) foi a que obteve as menores temperaturas superficiais, exceto para o valor mínimo, no seu conjunto. Apesar disso, diminuiu sua temperatura média e máxima em 0,9°C e 1,1°C, nesta ordem, em relação à sua referência (T-01-P-REF).

Todas as tintas vermelhas e cinzas possuem temperaturas superiores à placa cimentícia (cinza) PC-REF-02 sem pintura. A cinza (A-01-C) e a vermelha (A-01-V) de acabamento liso apresentaram, respectivamente, as menores reduções nas temperaturas máxima, média e mínima com valores iguais ou inferiores à 0,8°C em relação às suas tintas de referências.

Então, os resultados das tintas aditivadas mais escuras, vermelha e cinza, são destoantes das maiores reduções na temperatura superficial verificadas nas amostras frias mais escuras em

relação às convencionais correspondentes em cor do revestimento preto ($\Delta T = 10,2^{\circ}\text{C}$) de Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007) e na cinza escura ($\Delta T \approx 3^{\circ}\text{C}$) e preta ($\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$) de Dornelles, Caram e Sichieri (2014).

Pela visualização das imagens termográficas (Quadro 4.1), observa-se as mudanças nas temperaturas superficiais das amostras testadas ao Sol, das 11 horas até às 14 horas, cujos limites nas temperaturas máxima e mínima definidos são de 20°C a 70°C de forma a permitir a comparação visual por cores. Os aumentos nas temperaturas superficiais são gradativos das 11 horas às 12 horas, quando os limites máximos em 65°C , 68°C e 67°C são registrados em todos os conjuntos de amostra, nesta ordem. A partir deste momento, contudo, as reduções mais significativas são observadas até às 13 horas como efeito da diminuição em cerca de 300 W/m^2 na radiação, o que ocasionou os menores valores superiores registrados de 49°C para as telhas (Isopor 01) e 50°C nas mantas líquidas e tintas (Isopor 02).

Logo após, apesar do leve acréscimo na radiância solar, não houve aumento nas temperaturas das amostras, sendo às 14 horas, ao final das medições, o menor valor registrado em 49°C novamente para as telhas (Isopor 01) e nas tintas aditivadas e referências (Isopor 03).

Portanto, os ganhos e as perdas de calor nos materiais ao longo do período de exposição ao Sol é efeito da parcela da radiação por eles absorvida/refletida, o que comprova o impacto da absorvância solar no ganho de calor das superfícies e, conseqüentemente, para o aumento da temperatura interna dos ambientes.

Quadro 4.1 – Imagens termográficas das amostras, por grupo de material (Isopor) a cada período de medição (**Continua**)

Telhas de concreto e de fibrocimento

Tintas e mantas líquidas

Tintas aditivadas e de referências

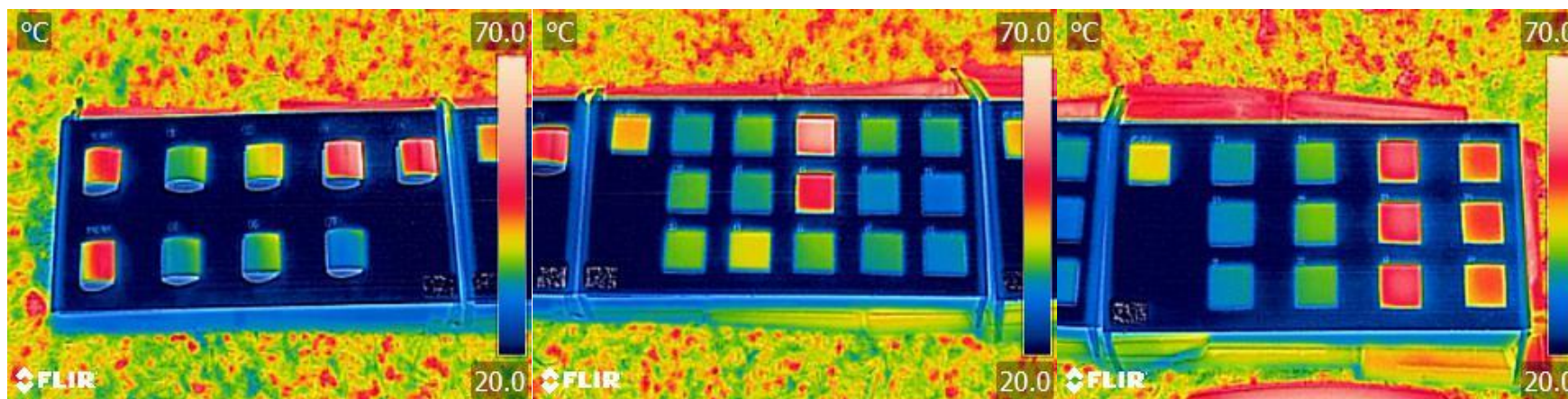
ISOPOR 01

ISOPOR 02

ISOPOR 03



ÀS 11 HORAS



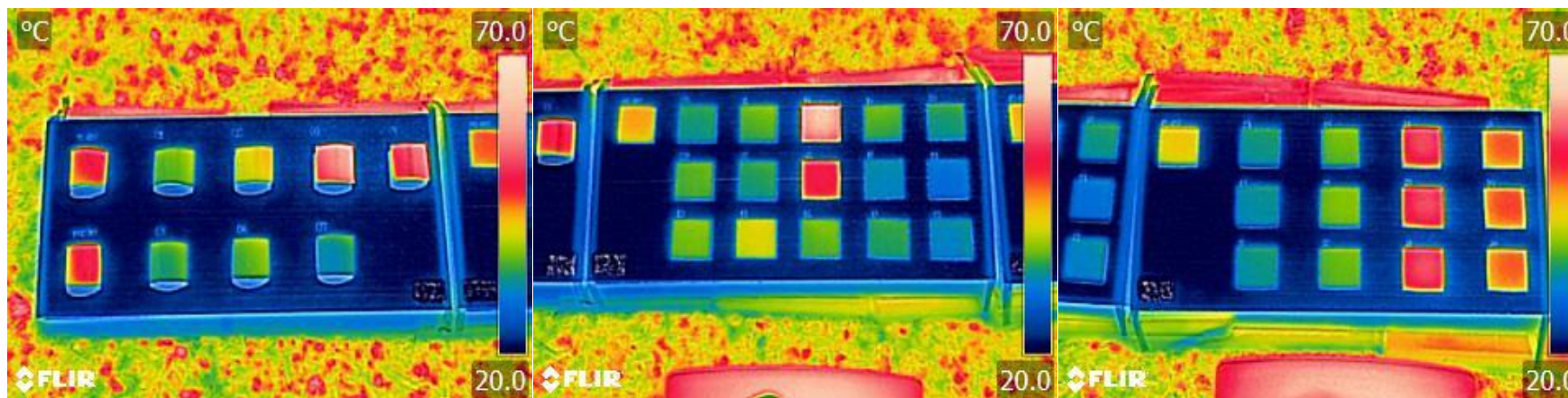
Quadro 4.1 – Imagens termográficas das amostras, por grupo de material (Isopor) a cada período de medição (*Continua*)

ISOPOR 01

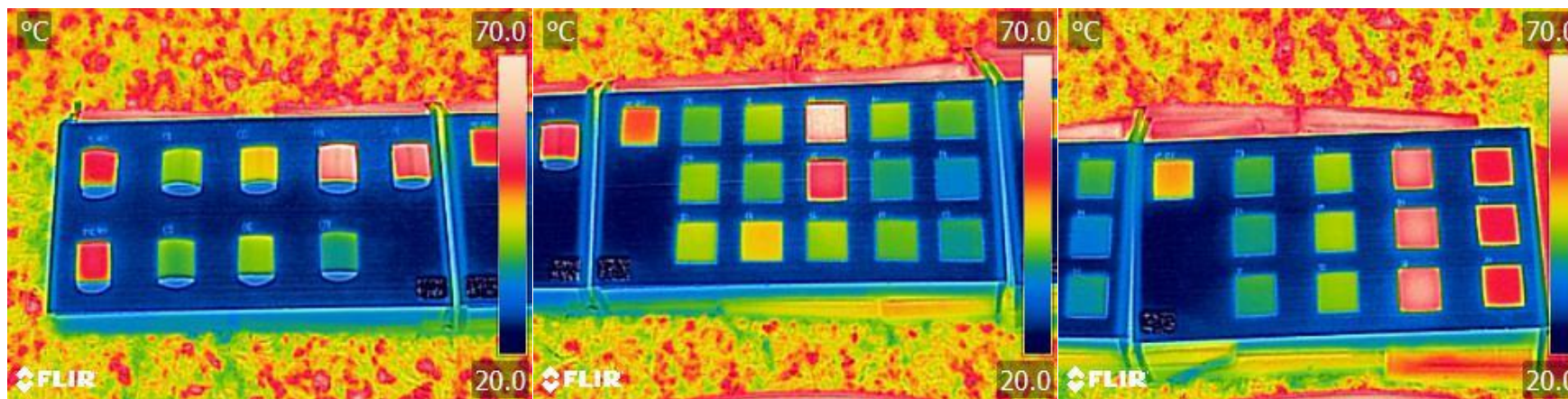
ISOPOR 02

ISOPOR 03

ÀS 11 HORAS E 30 MINUTOS



ÀS 12 HORAS



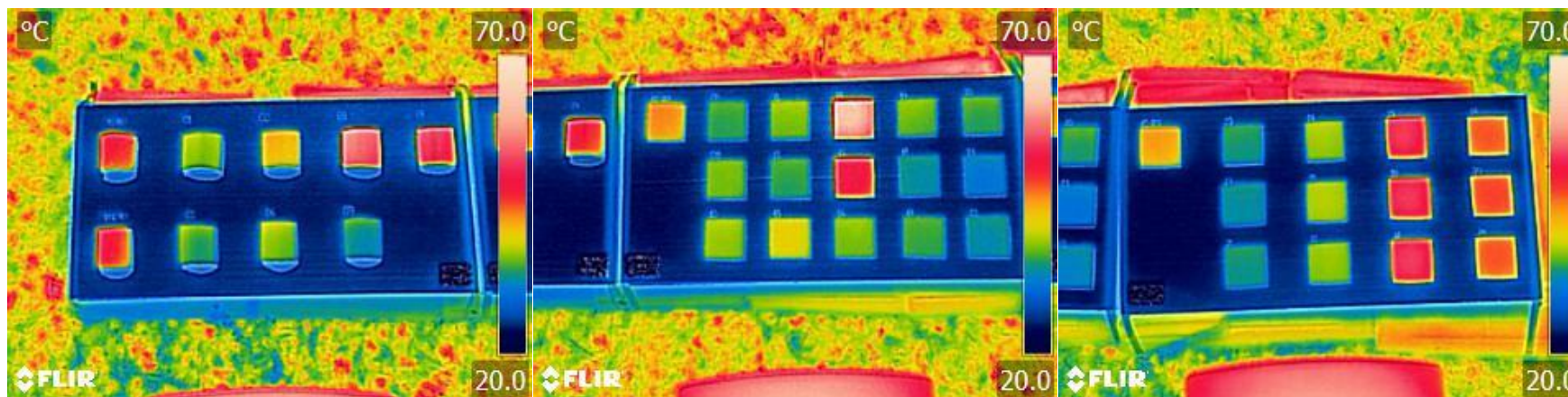
Quadro 4.1 – Imagens termográficas das amostras, por grupo de material (Isopor) a cada período de medição (*Continua*)

ISOPOR 01

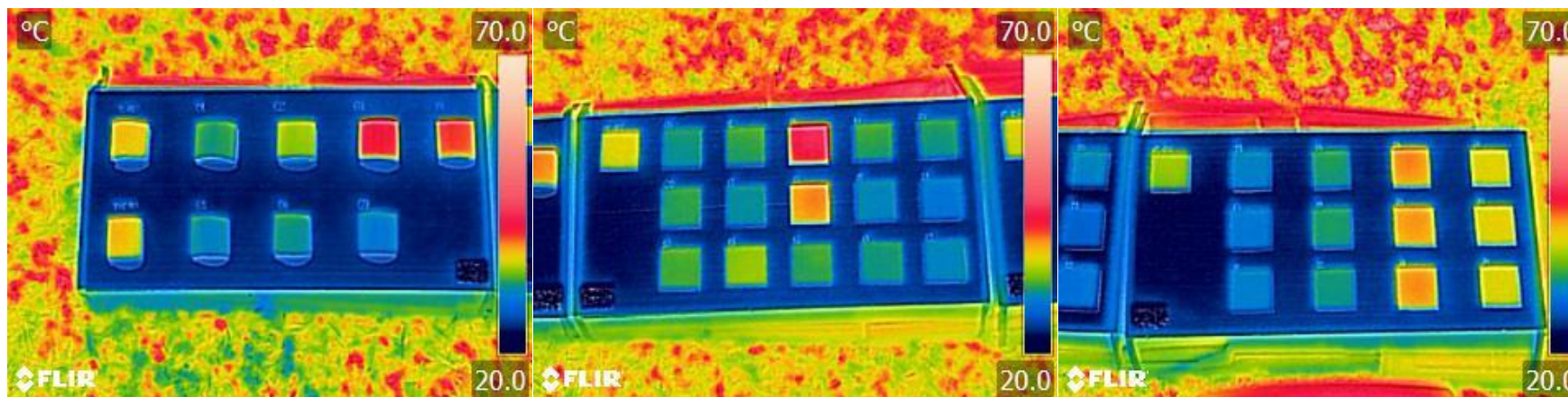
ISOPOR 02

ISOPOR 03

ÀS 12 HORAS E 30 MINUTOS



ÀS 13 HORAS



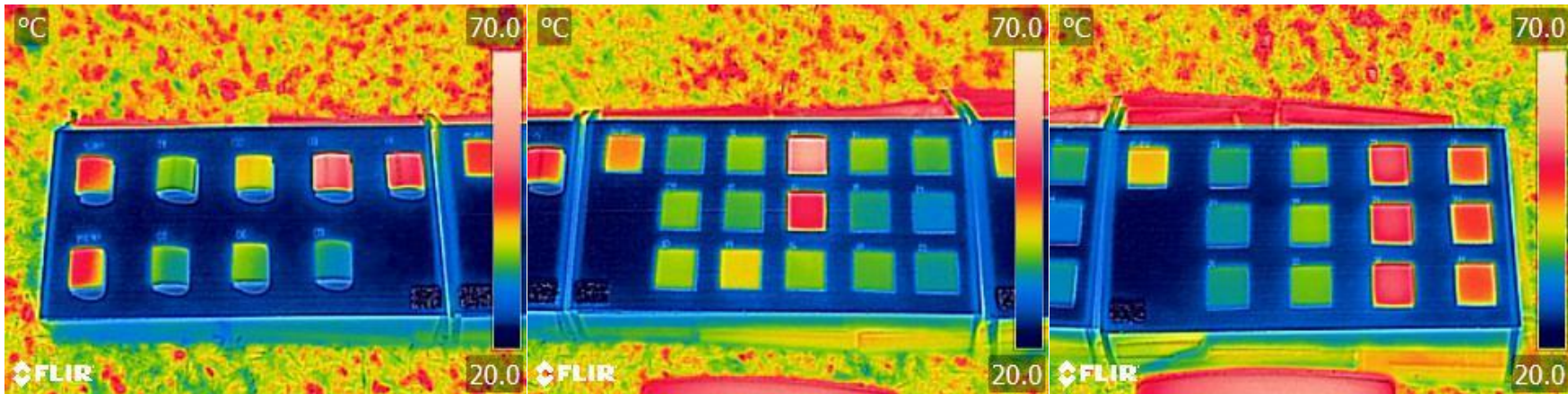
Quadro 4.1 – Imagens termográficas das amostras, por grupo de material (Isopor) a cada período de medição (**Conclusão**)

ISOPOR 01

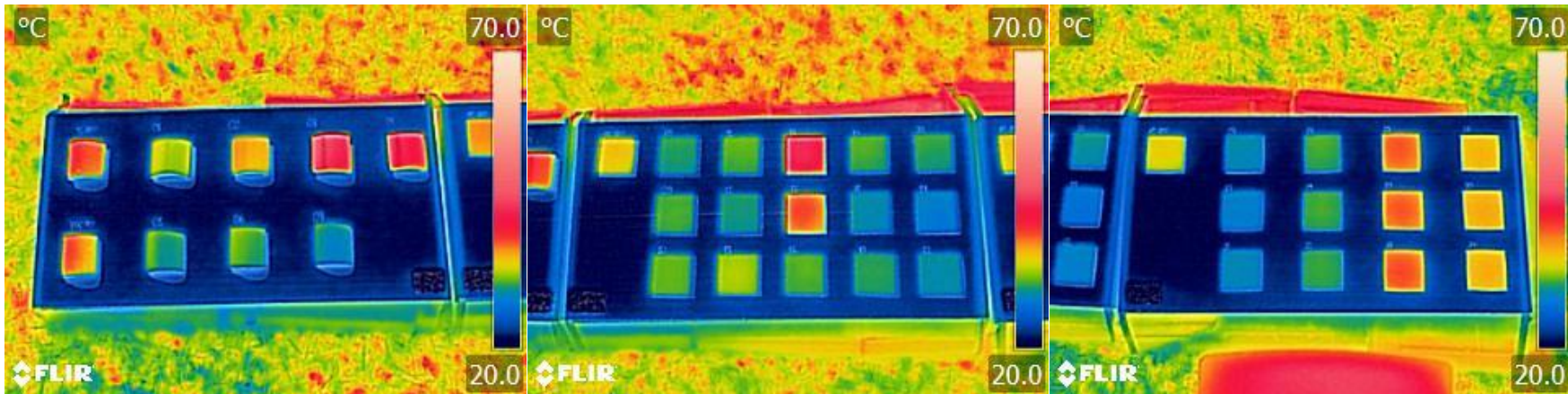
ISOPOR 02

ISOPOR 03

ÀS 13 HORAS E 30 MINUTOS



ÀS 14 HORAS



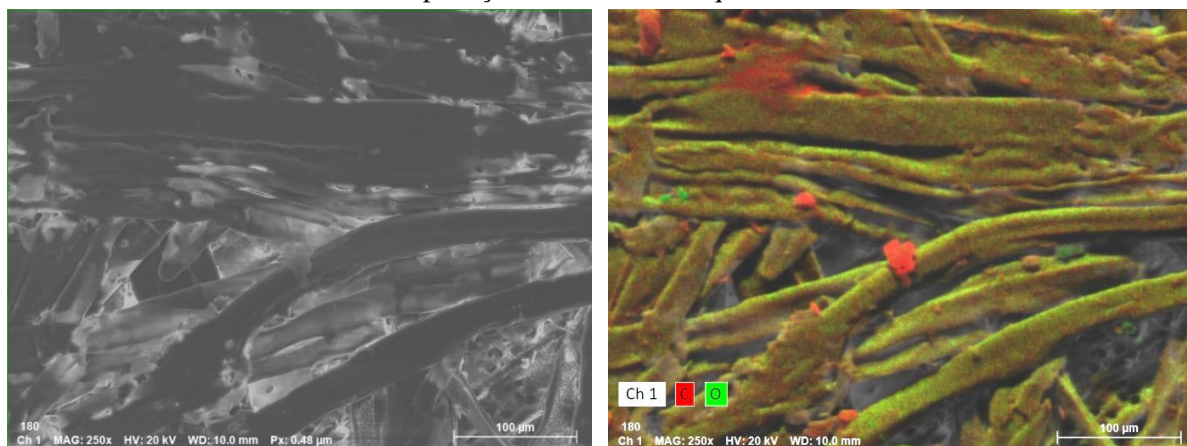
Fonte: A autora.

4.1.4 Micrografia da superfície

A seguir, estão identificados os elementos químicos detectados pelo EDS, por ordem crescente de número atômico, dos materiais avaliados e a sua margem de erro (Tabela 4.16). Os valores são correspondentes à média aritmética dos três pontos coletados pelo feixe do EDS em cada amostra.

O substrato utilizado para a aplicação dos materiais líquidos é de MDF (REF-00), logo, uma placa de fibras, não orientadas de madeira. Pela imagem microscópica, o material apresenta uma trama de fibras em várias direções compostas por oxigênio (O) e alguns pontos bem definidos de carbono (C) (Figura 4.16). Além do mais, após o mapeamento realizado pelo EDS na Tabela 4.16 comprova-se a presença apenas de elementos orgânicos, o carbono e oxigênio para a amostra REF-00.

Figura 4.16 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) da base de MDF usada como substrato para a aplicação dos materiais líquidos



Fonte: A autora.

Assim sendo, apesar das diferenças no número de demãos, a profundidade de penetração do feixe do raio-X é cerca de 2 μm , inferior à espessura dos materiais pintados, após a secagem. Então, a quantificação dos elementos orgânicos carbono (C) e oxigênio (O) das amostras pintadas são referentes apenas à composição química das tintas, em maior parte à resina. Além do mais, o oxigênio também está relacionado aos óxidos já que são compostos binários constituídos de dois elementos químicos, o oxigênio ligado a outro elemento, geralmente inorgânico.

Por causa da avaliação dos materiais elastoméricos disponíveis no mercado, não se tem conhecimento acerca de quais matérias-primas foram utilizadas pelos fabricantes. Desta forma, mediante a Ficha de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) dos materiais, que

disponibilizam a composição e informações sobre os ingredientes, alguns dados foram obtidos como o nome químico e a concentração. A informação mais relevante refere-se ao CAS, cujo registro de um composto químico ou polímero descrito na literatura, possui um número de registro único no banco de dados do *Chemical Abstracts Service* [<https://commonchemistry.cas.org/>], uma divisão da Sociedade Americana Química. Portanto, o nome e a fórmula química de cada produto descrito na ficha técnica foram identificados, porém nem todas as informações estão completas ou sequer todas as matérias-primas utilizadas são divulgadas.

Então, a associação entre as matérias-primas (pigmento, carga especial, dispersante) de interesse na análise química dos materiais foi realizada com os elementos químicos identificados por EDS e presentes nas superfícies das amostras através da análise quantitativa e qualitativa (Tabela 4.17). As informações na tabela 4.17 acerca das concentrações na ficha técnica FISPQ refere-se ao composto químico e do EDS remete ao elemento químico inorgânico, o qual está presente no composto químico mencionado.

Assim como na avaliação de refletância solar, a análise química dos materiais foi realizada por tipo de fabricante. Os materiais de diferentes fabricantes foram agrupados por semelhança na relação entre elementos químicos para realizar a observação por comparação. Dessa forma, foram analisadas em conjunto a manta líquida ML-01 e as tintas T-08 e T-09 que são as amostras com as maiores quantidades de cálcio e as tintas T-05 e T-07 possuem elevadas concentrações de silício detectadas pelo EDS (Tabela 4.16).

As imagens em preto e branco obtidas do microscópio eletrônico de varredura mostram as características da superfície como rugosidade ou lisura e porventura algumas regiões ou pontos delimitados. Nas coloridas estão identificados os elementos químicos, as quais indicam a sua localização na área da amostra mapeada. A fim de facilitar a observação, alguns mapas de elementos químicos individuais foram sobrepostos no software Adobe Photoshop (versão 23.0.0). A análise visual qualitativa detalhada e as observações descritas nas micrografias das amostras dentro de cada conjunto analisado estão expostas no Apêndice B.

Tabela 4.16 – Porcentagem (%) dos elementos químicos presentes na superfície das amostras analisadas por MEV/EDS (Continua)

Elemento químico (número atômico)	MDF	Mantas líquidas				Tintas										Tintas aditivadas			
	00	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	27	31
	REF-00	ML-01	ML-02	ML-03	T-01	T-02-B	T-02-P	T-02-C	T-02-V	T-03	T-04	T-05	T-06	T-07	T-08	T-09	A-01-B	T-01-B-REF	A-01-B-2
C (06)	60.46	37.02	60.66	62.67	53.70	59.29	57.05	73.17	81.82	47.31	59.20	42.81	46.29	44.04	26.09	39.60	42.94	44.53	40.99
Erro (±)	8.67	5.95	10.08	10.56	9.43	9.88	9.33	10.45	11.47	8.25	10.58	7.20	8.18	7.62	4.11	6.17	7.18	7.04	6.78
O (08)	39.54	36.22	25.62	23.69	24.91	22.25	22.98	17.54	15.00	31.94	22.26	36.14	28.49	29.94	38.86	31.97	29.20	28.39	29.34
Erro (±)	6.15	6.15	4.53	4.71	4.45	4.12	4.11	2.87	2.47	5.60	4.18	5.95	5.23	5.22	6.32	5.37	5.14	4.74	5.07
Na (11)	-	0.10	0.21	-	0.20	0.26	0.20	0.16	0.17	0.17	0.14	0.29	0.18	0.55	-	0.17	0.39	0.31	0.52
Erro (±)		0.06	0.08		0.08	0.10	0.08	0.06	0.06	0.08	0.07	0.10	0.08	0.21		0.08	0.12	0.10	0.15
Mg (12)	-	1.48	-	2.32	-	-	-	-	-	0.16	0.54	-	0.95	-	0.83	0.91	0.25	0.25	0.19
Erro (±)		0.29		0.45						0.06	0.13		0.20		0.18	0.18	0.08	0.07	0.07
Al (13)	-	0.60	2.16	0.15	6.20	0.38	1.00	0.20	-	5.82	3.76	0.35	2.89	5.21	2.11	0.39	2.06	2.07	2.39
Erro (±)		0.12	0.34	0.05	0.96	0.08	0.17	0.04		0.92	0.63	0.08	0.48	0.81	0.33	0.08	0.34	0.32	0.38
Si (14)	-	1.00	2.33	0.13	6.88	0.47	1.02	0.26	0.15	6.42	4.06	15.93	3.82	5.11	2.27	0.45	2.78	2.29	3.79
Erro (±)		0.15	0.31	0.04	0.96	0.08	0.15	0.04	0.03	0.90	0.60	2.04	0.55	0.71	0.30	0.08	0.38	0.30	0.50
P (15)	-	0.08	-	-	0.05	-	-	-	-	0.01	-	-	0.06	-	-	-	-	-	-
Erro (±)		0.04			0.03					0.01			0.03						
S (16)	-	0.06	0.16	0.14	0.09	0.15	0.14	0.16	0.17	0.08	0.11	0.21	0.07	-	-	-	0.16	0.15	0.17
Erro (±)		0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.06	0.03				0.05	0.04	0.05

Tabela 4.16 – Porcentagem (%) dos elementos químicos presentes na superfície das amostras analisadas por MEV/EDS (Conclusão)

Elemento químico (número atômico)	00	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	27	31
	REF-00	ML-01	ML-02	ML-03	T-01	T-02-B	T-02-P	T-02-C	T-02-V	T-03	T-04	T-05	T-06	T-07	T-08	T-09	A-01-B	T-01-B-REF	A-01-B-2
K (19)	-	-	0.80	-	2.37	-	-	-	-	2.21	1.28	0.12	0.51	1.55	0.13	-	0.17	0.17	0.35
Erro (±)			0.10		0.27					0.25	0.16	0.05	0.08	0.18	0.08		0.04	0.04	0.06
Ca (20)	-	16.69	3.24	5.31	0.08	0.15	0.16	0.05	0.12	1.01	3.35	0.35	3.11	0.22	21.00	10.46	2.17	2.12	2.20
Erro (±)		1.52	0.33	0.55	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03	0.13	0.38	0.07	0.34	0.06	1.86	0.95	0.23	0.21	0.23
Ti (22)	-	6.75	4.82	5.59	5.52	17.05	16.69	8.47	1.18	4.70	5.29	3.80	13.63	10.48	8.70	16.04	19.89	19.72	20.05
Erro (±)		0.70	0.51	0.61	0.62	1.71	1.61	0.80	0.14	0.52	0.59	0.41	1.41	1.05	0.82	1.46	1.91	1.76	1.89
Fe (26)	-	-	-	-	-	-	0.75	-	1.39	0.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erro (±)							0.13		0.18	0.07									
Zn (30)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.88	-	-	-	-	-
Erro (±)														0.45					
Total	100	99.99	100	100	100	99.99	100	100	100	100	100	100	100	99.99	100	99.99	100	100	100

Fonte: A autora.

A relação dos elementos orgânicos, que constituem maioritariamente a composição química de todas as amostras, com a observação das micrografias constata-se que o aumento da quantidade de carbono (C) verificado no EDS resulta em superfícies mais lisas nas imagens preto e brancas das amostras pintadas sem a presença ou com poucos pontos ou áreas rugosas. Enquanto as amostras com maior concentração de oxigênio (O), devido a adição de óxidos, ocasiona regiões concentradas de oxigênio ao redor dos elementos inorgânicos, os quais fazem ligação química com o oxigênio, e por causa disto são observadas regiões rugosas nestas micrografias.

Os elementos fósforo (P) e enxofre (S), da família dos não-metais, também podem ser considerados orgânicos quando formam uma ligação covalente ao carbono (C). Eles foram detectados nas amostras em quantidades ínfimas (inferiores a 1%), especialmente o enxofre, que constituem os conservantes como o 2-Octil-2G-isotiazole-3-ona informado em diversos materiais (Tabela 4.16).

A presença do cálcio (Ca) não deve ser proveniente apenas do fenômeno de carbonatação, como consequência do contato do revestimento com o gás carbônico (CO_2) do ar, como ocorreu nas amostras produzidas por Werle (2015) tendo em vista que o processo de pintura de todas as amostras foram realizadas no mesmo ambiente.

Ademais, a variação percentual do cálcio entre os materiais é muito grande desde concentrações inferiores a 1% como superior a 20% (Tabela 4.16). Logo, a detecção do cálcio está relacionada ao carbonato de cálcio (CaCO_3) ou calcita, um pó branco fino utilizado como pigmento especificado na tinta T-08 ou seu subproduto, o óxido de cálcio (CaO), conhecido como cal virgem, obtido através do processo de calcinação, o qual também é utilizado nos processos de pintura.

Na tinta T-08 o elemento cálcio está distribuído uniformemente pela micrografia e nos outros materiais, que possuem também as maiores concentrações deste elemento são a manta ML-01 e a tinta T-09, porém a presença da matéria-prima proveniente do cálcio não foi indicada nas suas fichas. Ainda assim, apesar de estarem em grandes concentrações, a distribuição do cálcio fica concentrada em pontos isolados de grandes dimensões nas micrografias destes materiais, o que pode confirmar a inclusão de carbonato de cálcio ou a própria cal (Tabela 4.17).

O pigmento dióxido de titânio (TiO_2) está presente na composição química de todas as amostras, mesmo naqueles materiais como a manta líquida ML-01 e nos do fabricante C (manta líquida ML-03 e tinta T-06), em que não há essa informação nas suas fichas técnicas. O titânio

(Ti), elemento inorgânico, foi detectado por EDS em todas as amostras avaliadas com variação de pouco mais de 1% até quase 20% (Tabela 4.16). Há também a adição de um baixo percentual ($\leq 3\%$) de óxido de ferro (Fe_2O_3) de forma a colorir a tinta vermelha T-02-V para cobertura. O dióxido de silício (SiO_2) ou sílica, outro óxido metálico, está especificado para a tinta T-09.

De forma geral, o titânio distribui-se de forma homogênea por toda a imagem, independentemente da concentração presente na amostra, e nunca se sobrepõe a outros elementos inorgânicos presentes em outros óxidos, como ferro, silício ou cálcio (Tabela 4.17). Além do mais, a adição do pó aditivo refletivo, que possui grande quantidade de titânio na sua composição, na tinta branca de referência T-01-B-REF aumentou de forma ínfima a concentração desse elemento na produção das tintas brancas aditivadas (Tabela 4.16), o que ocasionou o aparecimento de pontos de aglomeração do titânio.

Outro pigmento especificado pelo fabricante D nas suas tintas brancas para cobertura T-02-B e na referência T-01-B-REF é o caulim ou caulino ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$), um alumino silicato hidratado, o qual apresenta ótimo poder de cobertura. Esses dois elementos químicos, alumínio e silício, foram detectados em todas as amostras avaliadas, exceto o alumínio para a tinta vermelha para cobertura T-02-V (Tabela 4.16).

Então, a constatação do caulino foi verificada por meio da sobreposição dos elementos químicos silício e alumínio nas tintas brancas T-01-B-REF e T-02-B mesmo que em quantidades bem inferiores as descritas nas suas fichas técnicas (Tabela 4.17). Há a indicação da utilização desta matéria-prima por causa da sobreposição também verificada nas tintas cinza e pérola, esta sendo em maior concentração que as demais.

Como cargas especiais adicionadas às tintas, está presente na composição da tinta T-08 o silicato de alumínio (Al_2SiO_5), um mineral inorgânico composto por alumínio (Al) e silício (Si), o qual oferece acabamento superficial uniforme aos revestimentos. Portanto, o alumínio, um metal, possui propriedades reflexivas e o silício contribui com excelente isolamento e por causa disso são utilizados na fabricação das microesferas cerâmicas.

Desta forma, foi verificada na micrografia da tinta T-08 a sobreposição destes elementos (alumínio e silício) mesmo em menores concentrações do que apresentadas na sua ficha. Esta sobreposição pode ser observada em outros materiais como por exemplo aos do fabricante B, a manta ML-01 e a tinta T-07, contudo sem que haja especificação pelo fabricante pode-se indicar

que seja relativo ao caulim (alumino silicato hidratado) ou mesmo às microesferas cerâmicas (MEC) (Tabela 4.17).

Conforme a especificação da tinta T-04 tem-se a adição de microesferas de vidro compostas pela dolomita. Ela é um mineral formado por carbonato de cálcio e magnésio [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], cujas características são a estabilidade físico-química, mecânica e baixa condutividade térmica, e fazem parte da produção de materiais refratários e vidros planos.

Contudo, a sobreposição dos elementos cálcio e magnésio na tinta T-04 está em menor evidência na sua micrografia como em menores quantidades do que a indicada na matéria-prima pela sua ficha técnica. Esta sobreposição também foi observada nas micrografias para a manta líquida ML-03 e a tinta T-06 que são do fabricante C, o qual não disponibilizou nenhuma informação acerca dos seus componentes químicos.

Dentre os solventes descritos estão o aguarrás mineral (de 0,5% a 1%) e a amônia aquosa H_5NO (de 0,5% a 1%) para a tinta T-08 e a própria água (H_2O) (de 1% a 5%) com percentuais baixos na manta líquida ML-02. Em alguns materiais, está indicado o poliacrilato de sódio $(\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2)_x.\text{Na}$ como o dispersante, estando este elemento químico, o sódio (Na), presente em todas as amostras na proporção indicada (entre 0,1% e 1%), exceto na manta líquida ML-03 e na tinta T-08. Sua função, assim como os solventes, é auxiliar na segregação das partículas aglomeradas, porém sua utilização em excesso pode alterar as características morfológicas dos pigmentos.

Assim como os materiais dos fabricante B e as tintas T-05 e T-07, as com maiores concentrações de silício, possuem o sódio como elemento químico responsável pela dispersão das partículas (Tabela 4.17). A sua distribuição é de maneira uniforme nestas micrografias, porém a sua presença não é detectada onde estão os pontos marcados com sobreposição de Ti, que podem representar partículas aglomeradas ou agregadas deste elemento. Por fim, para a visualização das micrografias e as suas respectivas análises qualitativas aprofundadas estão demonstradas no apêndice B.

Tabela 4.17 – Descrição dos elementos químicos relativos às matérias-primas (pigmento, carga especial, dispersante) presentes nas superfícies das amostras e as concentrações apresentadas na ficha técnica e as detectadas para cada elemento no EDS (**Continua**)

Nº	Código	FISPQ Pigmento (nº CAS) Carga especial (nº CAS)	FISPQ Fórmula química (%)	EDS Elemento químico (%)	Observação do elemento químico inorgânico no MEV
09	ML-02	TiO ₂ rutilo (1317-80-2)	5 a 10	4.82	Distribuição uniforme (junto ao C)
		Carga especial (nº CAS não declarado)	2 a 10	-	Cal (distribuição uniforme de Ca) ou caulim/MEC (sobreposição de Si + Al)
		Óxido de zinco ZnO (1314-13-2)	1 a 5	-	-
11	T-01	TiO ₂ rutilo (1317-80-2)	5 a 10	5.52	Distribuição uniforme (junto ao C)
		Carga especial (nº CAS não declarado)	30 a 40	-	Caulim/MEC (sobreposição de Si + Al)
16	T-03	TiO ₂ rutilo (1317-80-2)	5 a 10	4.70	Distribuição em “teia” (nos espaços vazios está o Ca)
		Carga especial (nº CAS não declarado)	30 a 40	-	Caulim/MEC (sobreposição de Si + Al)
17	T-04	TiO ₂ rutilo (1317-80-2)	5 a 10	5.29	Distribuição em “teia” (nos espaços vazios está o Ca)
		Dolomita CH ₂ O ₃ . ^{1/2} Ca ^{1/2} Mg (16389-88-1)	30 a 40	3.35/ 0.54	Dolomita (sobreposição de Ca + Mg)
	Fabricante B	Dispersante (nº CAS) Poliacrilato de sódio (C ₃ H ₄ O ₂) _x .xNa (9003-04-7)	0.1 a 1	0.21 (ML-02) 0.20 (T-01) 0.17 (T-03) 0.14 (T-04)	Distribuição uniforme (porém não se encontra sob os pontos aglomerados de Ti)
	Fabricante C				
10	ML-03	-	-	-	Dolomita (sobreposição de Ca + Mg)
19	T-06	-	-	-	Dolomita (sobreposição de Ca + Mg)
	Fabricante D				
12	T-02-B	Titânia O ₂ Ti (13463-67-7)	10 a 25	17.05	Distribuição um pouco irregular (onde não há C + O)
		Caulino Al ₂ O ₃ .mSiO ₂ .nH ₂ O (1332-58-7)	≤ 3	0.38/ 0.47	Caulim (sobreposição de Si + Al) ou elementos residuais ao TiO ₂
13	T-02-P	Titânia O ₂ Ti (13463-67-7)	≤ 10	16.69	Distribuição mais uniforme
14	T-02-C	Titânia O ₂ Ti (13463-67-7)	≤ 10	8.47	Distribuição um pouco irregular

Tabela 4.17 – Descrição dos elementos químicos relativos às matérias-primas (pigmento, carga especial, dispersante) presentes nas superfícies das amostras e as concentrações apresentadas na ficha técnica e as detectadas para cada elemento no EDS (**Conclusão**)

15	T-02-V	Titânia O ₂ Ti (13463-67-7)	≤ 3	1.18	Distribuição uniforme (onde não há C + O)
		Óxido de ferro Fe ₂ O ₃ (1309-37-1)	≤ 3	1.39	Distribuição uniforme (onde não há C + O)
Fabricante D					
27	T-01-B-REF	Titânia O ₂ Ti (13463-67-7)	10 a 25	19.72	Distribuição uniforme (junto ao C)
		Caulino Al ₂ O ₃ .mSiO ₂ .nH ₂ O (1332-58-7)	≤ 10	2.07/ 2.29	Caulim (sobreposição de Si + Al)
23	A-01-B	-	-	-	Distribuição uniforme (junto ao C) com mais pontos de aglomeração de Ti Sobreposição de Ca + Si (junto ao Na) nas regiões de “bolhas” que apareceram nas micrografias após a adição do pó refletivo
31	A-01-B-2	-	-	-	
Fabricantes diferentes (% de Ca)					
08	ML-01	-	-	-	Concentração de Ca em poucos pontos de grandes dimensões Caulim/MEC (sobreposição de Si + Al)
21	T-08	Titânia O ₂ Ti (13463-67-7)	5 a 10	8.70	Distribuição uniforme
		Carbonato de cálcio precipitado CH ₂ O ₃ .Ca (471-34-1)	10 a 20	21.00	Distribuição uniforme (onde não há Ti)
		Silicatos de alumínio SiAl ₂ O ₅ (1327-36-2)	15 a 30	2.27/ 2.11	Microesferas cerâmicas (MEC) (sobreposição de Si + Al)
22	T-09	Titânia O ₂ Ti (13463-67-7)	10 a 20	16.04	Distribuição uniforme (mais pontos de aglomeração) onde não há Ca (em pontos mais concentrados)
		Dióxido de silício SiO ₂ (112926-00-8)	7 a 15	0.45	Concentração em poucos pontos de grandes dimensões
Fabricantes diferentes (% de Si)					
18	T-05	TiO ₂ rutilo (1317-80-2)	5 a 10	3.80	Distribuição entre os espaços vazios da “teia” de Si Distribuição uniforme em “teia”
		Carga especial (nº CAS não declarado)	30 a 40	15.93 (Si)	
20	T-07	Titânia O ₂ Ti (13463-67-7)	10 a 25	10.48	Distribuição em “teia” e entre seus espaços vazios há a sobreposição de Si + Al (caulim/MEC)
		TiO ₂ rutilo (1317-80-2)	5 a 10		
Fabricantes diferentes (% de Si)		Dispersante (nº CAS) Poliacrilato de sódio (C ₃ H ₄ O ₂) _x .xNa (9003-04-7)	0.1 a 1	0.29 (T-05) 0.55 (T-07)	Distribuição uniforme (porém não se encontra sob os pontos aglomerados de Ti)

Fonte: A autora.

4.2 Análise estatística

Os resultados da ANOVA indicaram que há diferença significativa entre as médias dos valores de luminosidade L^* (Tabela 4.18) e emitância térmica (Tabela 4.19) dos materiais, com probabilidade de significância estatística menor que 0,001%.

O colorímetro não mede a cor de forma absoluta e sim pelas diferenças (Δ) de cor entre a amostra e os padrões de referência branco e preto usados na calibração. Portanto, a chance de repetição do mesmo resultado no equipamento, conhecido como repetibilidade, é inferior ao valor médio em 10% da diferença de cor ($< 0,10 \Delta E^*_{ab}$ médio) de 10 medições da amostra branca padrão (DELTA COLOR, 2011b), o qual é irrisório, comparado às diferenças de luminosidades nos materiais analisados. Logo, as diferenças de cor estão relacionadas à composição dos materiais.

Tabela 4.18 – Análise de variância (ANOVA) para a luminosidade de cor dos materiais avaliados

Fonte de variação (FV)	Graus de liberdade (GL)	Soma de quadrados (SQ)	Quadrado médio (QM)	Fc*	Pr > Fc**
Materiais	36	41591	1155,3	2384,9	1,84E-100
Resíduo	74	36	0,48		
Total	110	41627			

Coeficiente de variação (CV) = 0,89%

*Fc: teste F

**Pr > Fc: probabilidade estatística segundo o teste F

Fonte: Bhering (2017).

A diferença da emitância térmica entre os materiais é menor, porque os valores são muito próximos entre si. Contudo, não é inerente apenas à precisão da medição ($\pm 0,01$) no emissômetro portátil, devendo-se provavelmente estar associada à composição superficial, como a presença de elementos químicos metálicos e não metálicos presentes nos materiais, a qual foi averiguada em momento posterior.

Como condição inerente aos preceitos da análise de variância e correlação, realizou-se a análise química apenas para os elementos presentes em todos os materiais. Dessa forma, foi restrita apenas para os elementos carbono, oxigênio, silício, cálcio e titânio, porque estão presentes em todas as amostras analisadas, os quais juntos totalizam aproximadamente 90% da constituição química das amostras.

Tabela 4.19 – Análise de variância (ANOVA) para a emitância térmica dos materiais avaliados

Fonte de variação (FV)	Graus de liberdade (GL)	Soma de quadrados (SQ)	Quadrado médio (QM)	Fc*	Pr > Fc**
Materiais	37	0,035166	0,00095044	39,529	1.17E-36
Resíduo	76	0,001827	0,00002404		
Total	113	0,036993			

Coeficiente de variação (CV) = 0,56%

*Fc: teste F

**Pr > Fc: probabilidade estatística segundo o teste F

Fonte: Bhering (2017).

A análise de variância (Anova) indicou que houve diferença na composição química dos materiais em relação aos cinco elementos químicos presentes em todos os materiais avaliados (Tabela 4.20), cuja probabilidade de significância estatística é menor que 0,1% para todos. Dessa forma, foi possível a aplicação do teste de agrupamento de médias de Scott-Knott para avaliar-se a formação ou não de grupos homogêneos de materiais quanto a sua composição química.

Tabela 4.20 – Análise de variância (ANOVA) para os elementos químicos dos materiais avaliados

Fonte de variação (FV)	Graus de liberdade (GL)	Quadrado médio (QM) para cada elemento químico				
		C	O	Si	Ca	Ti
Materiais	17	556,70 ***	121,56 ***	43,36 ***	109,00 ***	120,22 ***
Resíduo	36	0,19	0,20	0,03	0,06	0,15
Total	53					

Coeficiente de variação (CV) 0,86% 1,61% 4,93% 5,87% 3,68%

Nível de significância pelo teste t:

***: significativo a 0,1%

Fonte: Bhering (2017).

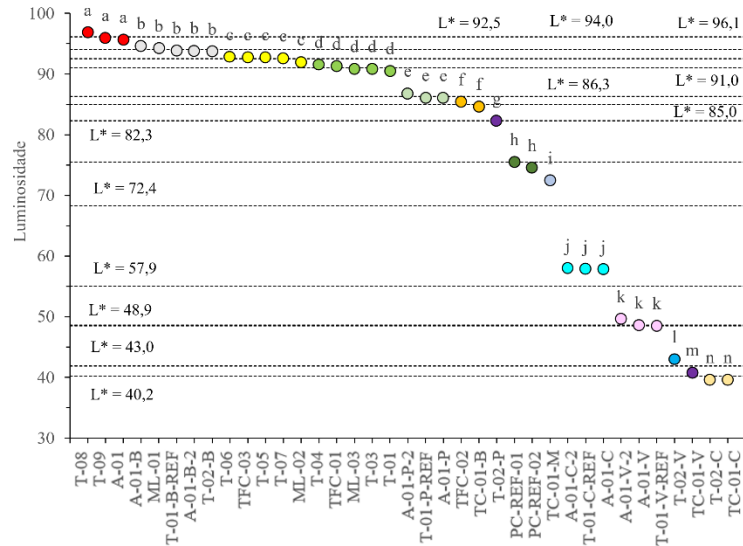
O teste de Scott-Knott possibilitou a formação de 14 grupos de materiais, os quais são considerados estatisticamente iguais entre si para a luminosidade L* de cor (Figura 4.17). Tem-se que 18 dos 37 materiais, portanto praticamente a metade, pertencem aos grupos “a” até “d” e são os mais luminosos, cujos valores médios de luminosidade são iguais ou superiores a 91. Dentre eles, constata-se a presença de todos os materiais líquidos de coloração branca e das telhas brancas de fibrocimento TFC-01 e TFC-03.

Tanto as tintas de referência e as aditivadas correspondentes em cores, as brancas (grupo “b”), beges (grupo “e”), cinzas (grupo “j”) e vermelhas (grupo “k”) possuem valores de luminosidade iguais entre si na análise estatística, porque estão agrupadas juntas. As tintas beges do grupo

“e” são mais claras, isto é, mais luminosas do que as telhas brancas de fibrocimento TFC-02 e de concreto TC-01-B (grupo “f”). Então, existe variação no parâmetro L^* mesmo entre os materiais brancos, os quais estão arranjados em cinco grupos diferentes e os seus valores médios são em ordem decrescente 96,1; 94,0; 92,5; 91,0 e 85,0.

O valor de luminosidade L^* não é estatisticamente igual entre a tinta acrílica para telha cor pérola (grupo “g”) e a telha de concreto marfim (grupo “i”), sendo a maior diferença em 9,9 no valor médio entre materiais diferentes coloridos com tonalidades próximas, o que se verifica também entre os vermelhos (grupos “l” e “m”), porém a variação das médias é de apenas 2,2 entre os grupos. Apenas as cinzas (grupo “n”) são iguais entre si e possuem valor médio de 40,2 no seu grupo, sendo as mais escuras, isto é, as menos luminosas, avaliadas na pesquisa.

Figura 4.17 – Agrupamento de médias de Scott-Knott para a luminosidade L^* dos materiais avaliados



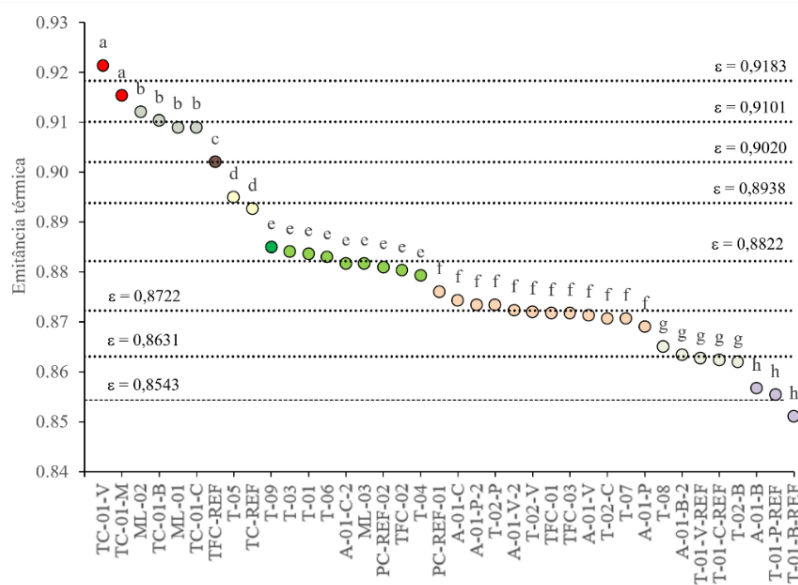
Fonte: A autora.

Para a emitância térmica, o teste de agrupamento de médias de Scott-Knott indicou a formação de 08 grupos com diferentes materiais, mas que são estatisticamente iguais entre si (Figura 4.18). Destaca-se que dentre os 38 materiais avaliados, houve a formação de dois grupos com 21 materiais, os quais pertencem aos grupos “e” e “f”, cujos valores médios de emitância térmica são de 0,882 e 0,872, respectivamente, para cada grupo. Nestes grupos estão as tintas refletivas brancas T-09 ($\epsilon = 0,885$) e a T-04 ($\epsilon = 0,879$) como a tinta aditivada pérola A-01-P ($\epsilon = 0,869$) e o substrato cimentício PC-REF-01 ($\epsilon = 0,876$).

Por outro lado, as telhas de concreto TC-01-V ($\epsilon = 0,921$) e TC-01-M ($\epsilon = 0,915$), pertencentes ao grupo “a”, apresentaram os maiores valores de emitância térmica enquanto as tintas aditivada

A-01-B ($\varepsilon = 0,857$) e de referência T-01-P-REF ($\varepsilon = 0,855$) e T-01-B-REF ($\varepsilon = 0,851$), pertencentes ao grupo “h”, os menores.

Figura 4.18 – Agrupamento de médias de Scott-Knott para a emitância térmica dos materiais avaliados

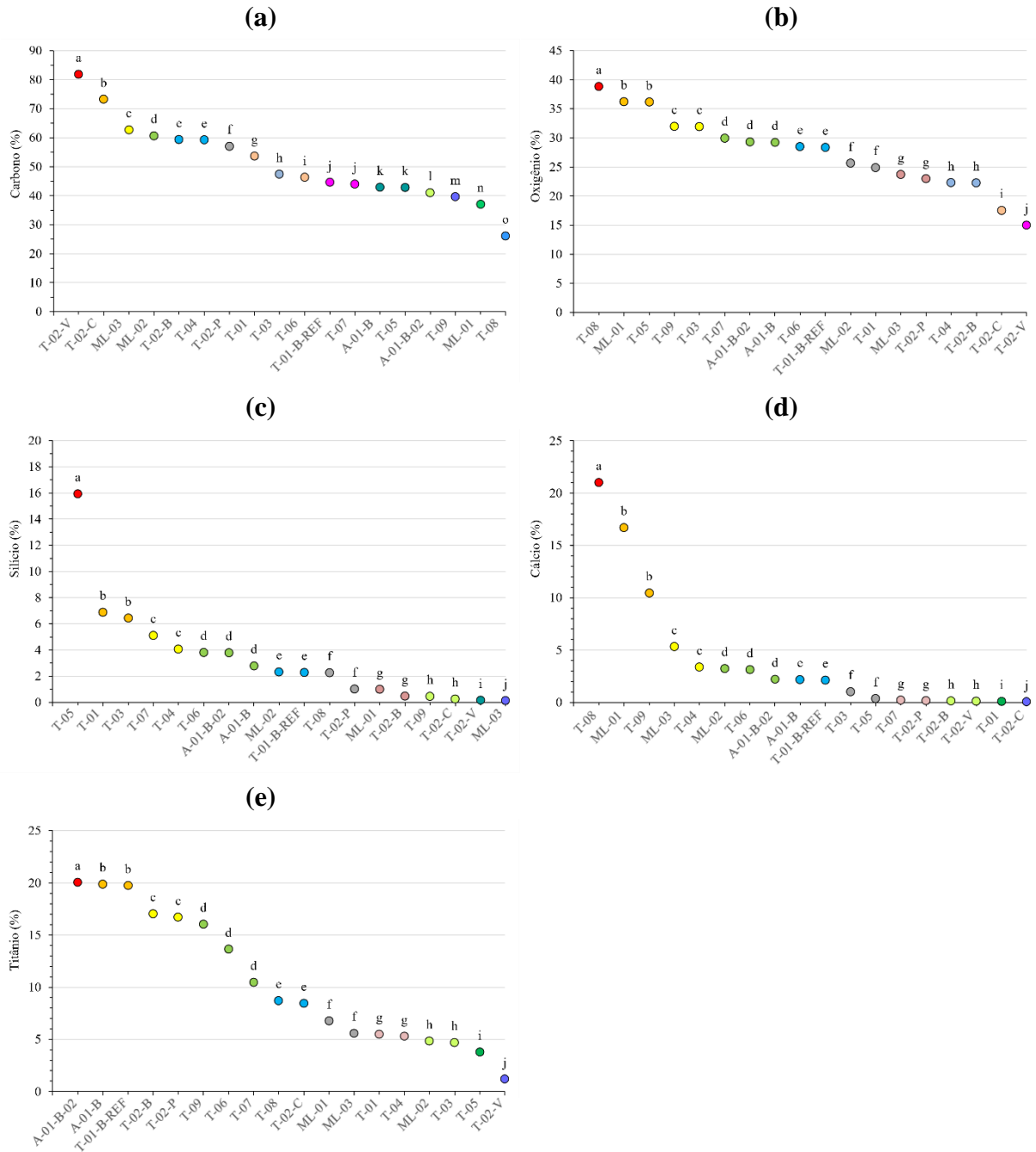


Fonte: A autora.

Segundo Perin (2009) os valores de emitância térmica apresentados na literatura podem não ser válidos para as superfícies reais de interesse, pois a emitância térmica é fortemente dependente da temperatura e das características da superfície, como rugosidade, oxidação, dentre outros. No caso de tintas, pode-se citar a dependência ao tipo de substrato, da carga de corantes e metais, por exemplo. Contudo, de acordo com Santamouris, Synnefa e Karlessi (2011), esta propriedade térmica relaciona-se à natureza da superfície do material e mesmo tratando-se de superfícies metálicas revestidas com material polimérico, por exemplo, elas apresentam elevados valores de emitância térmica, mas quase não são afetados pela adição de pigmentos e cargas. Para o presente estudo, a análise de correlação entre a emitância térmica e a composição química dos materiais foi discutida posteriormente.

Os gráficos de agrupamento de médias de Scott-Knott (Figura 4.19) indicou que alguns materiais apresentaram médias em percentuais de elementos químicos similares entre si. Na Figura 4.19 (a) apenas os grupos “e”, “j” e “k” possuem dois materiais em cada um, logo, as tintas T-02-B e T-04; T-01-B-REF e T-07; A-01-B e T-05 são pares de tintas com valores médios similares entre si para o elemento carbono na composição química. Observa-se na Figura 4.19 (b) também que as mesmas tintas T-04 e T-02-B (grupo “h”) também possuem médias estatisticamente iguais para o elemento oxigênio.

Figura 4.19 – Agrupamento de médias de Scott-Knott dos elementos químicos dos materiais avaliados, sendo para o (a) carbono; (b) oxigênio; (c) silício; (d) cálcio e (e) titânio



Fonte: A autora.

As tintas T-02-V (grupo “a” e “j”) e T-02-C (grupos “b” e “i”) são as que possuem as maiores porcentagens de carbono e menores em oxigênio, nesta ordem enquanto a tinta T-08 é a que possui menor quantidade de carbono (grupo “o”) e a maior de oxigênio (grupo “a”) e cálcio (grupo “a”).

A tinta T-05 (grupo “a”) destaca-se na Figura 4.19 (c) por possuir a maior concentração do elemento silício (Si), dentre todos, a qual é seguida pelas tintas T-01 e T-03 (grupo “b”) do

fabricante B. Também do mesmo fabricante, a manta ML-02 e tinta T-01 (grupo “f”) possuem valores médios similares para o elemento oxigênio (O) na Figura 4.19 (b).

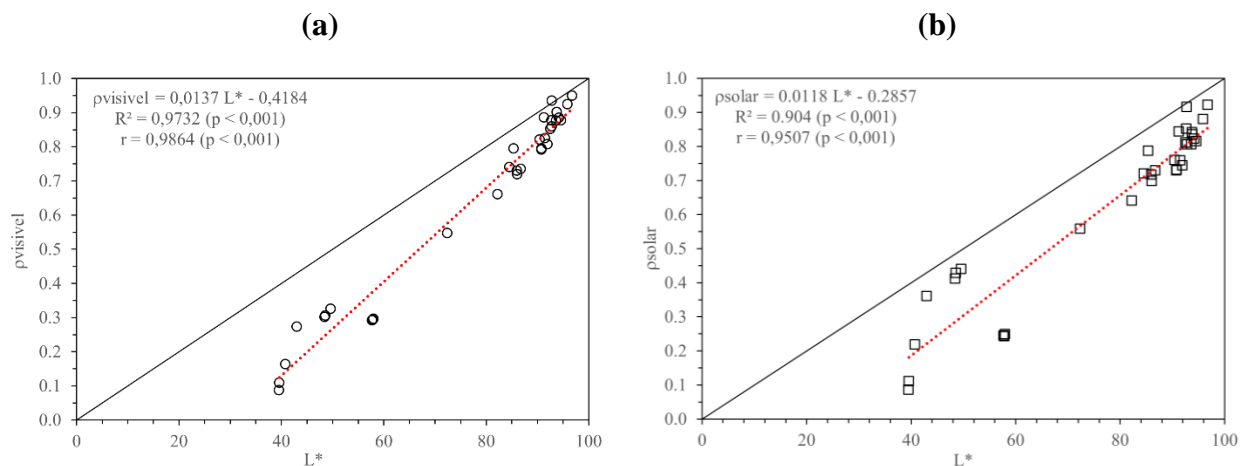
As tintas aditivadas brancas (A-01-B e A-01-B-2), que se diferem apenas pelo acabamento, possuem médias estatisticamente iguais para os elementos oxigênio (O) junto à tinta T-07 (grupo “d”) e para o silício (Si) com a tinta T-06 (grupo “d”), cujos valores são sempre superiores à sua tinta T-01-B-REF de referência.

Nas Figuras 4.18 (d) e (e), o par de tinta branca aditivada A-01-B e de referência T-01-B-REF possuem valores médios estatisticamente iguais nos grupos “e” e “b” para os elementos químicos cálcio (Ca) e titânio (Ti), nesta ordem. Estes valores são inferiores aos encontrados na tinta aditivada A-01-B-2 pertencente, nesta ordem, aos grupos “d” e “a” sendo a maior porcentagem de titânio dentre todas as amostras. Enquanto nos materiais do fabricante B são verificadas as menores quantidades como nas tintas T-01 e T-04 (grupo “g”) e a manta ML-02 e tinta T-03 (grupo “h”) para o titânio.

Para os materiais do fabricante D, apenas a tinta branca T-02-B e vermelha T-02-V possuem médias estatisticamente iguais no elemento cálcio (grupo “h”) e para a branca T-02-B e pérola T-02-P (grupo “c”) para o titânio.

Na avaliação da dependência e relação entre parâmetros de medições diferentes, foi realizada a correlação de Pearson entre a luminosidade, parâmetro de cor que indica o quanto de branco há na cor, com os valores de refletância na região visível e solar (Figura 4.20).

Figura 4.20 – Correlação entre a luminosidade L^* e (a) a refletância visível e (b) a refletância solar para todos os materiais



Fonte: A autora.

Na análise, observa-se que houve correlação positiva, com coeficientes de correlação (r) iguais a 0,9864 ($p < 0,001$) e 0,9507 ($p < 0,001$), respectivamente, o que indica haver elevada relação entre os valores de refletância visível e solar com a luminosidade. Ou seja, à medida em que se eleva o valor de L^* dos materiais nota-se correspondente acréscimo nos valores de refletância visível e solar.

Os coeficientes de correlação (r) e de determinação (R^2) apresentam valores de p muito menores do que 0,05 ($p < 0,001$), o que confere elevada significância estatística deles. Para valores de L^* maiores que 40, os aumentos de 1% na luminosidade L^* dos materiais avaliados elevam a refletância visível em 0,0137 e a solar em 0,0118 pela Figura 4.20 (a) e (b), respectivamente.

Silva *et al.* (2015) avaliaram as propriedades ópticas e térmicas de revestimentos cerâmicos usados em fachadas visando determinar o índice de refletância solar (SRI). Os autores encontraram que revestimentos com cores mais claras ($> L^*$) apresentam maior refletância solar do que os mais escuros ($< L^*$). Logo, no presente estudo, existe relação linear significativa entre a luminosidade L^* e os valores de refletância visível e solar, cujos coeficientes de determinação são R^2 de 0,9732 ($p < 0,001$) e 0,904 ($p < 0,001$), para a refletância espectral visível e solar, respectivamente. O coeficiente de 0,904 é maior, mas possui valor bem próximo ao encontrado nas películas de tintas refletivas ($R^2 = 0,8793$) de Ikematsu (2007) e nas telhas cerâmicas e de fibrocimento ($R^2 = 0,87$) de Couto (2019). Portanto, por meio do estudo aprofundado dos parâmetros de cor, especialmente a luminosidade, pode-se compreender o fenômeno da refletância visível em uma superfície.

Silva *et al.* (2015) observaram também que embora algumas cores que refletem mais na região do visível, não necessariamente têm maior refletância na região do infravermelho, o que explica as diferenças na refletância solar de alguns materiais. Para Levinson *et al.* (2007), a adição nos materiais frios de alguns raros pigmentos orgânicos e inorgânicos como os sulfetos e óxidos metálicos e cargas especiais como flocos de alumínio e mica deve-se à fraca absorção, ou seja, a maior reflexão ao infravermelho próximo dos denominados pigmentos frios. Desta forma, a investigação acerca dos componentes químicos, especialmente pigmentos e cargas especiais, das tintas foi realizada para estabelecer se existe relação com a refletância no infravermelho próximo.

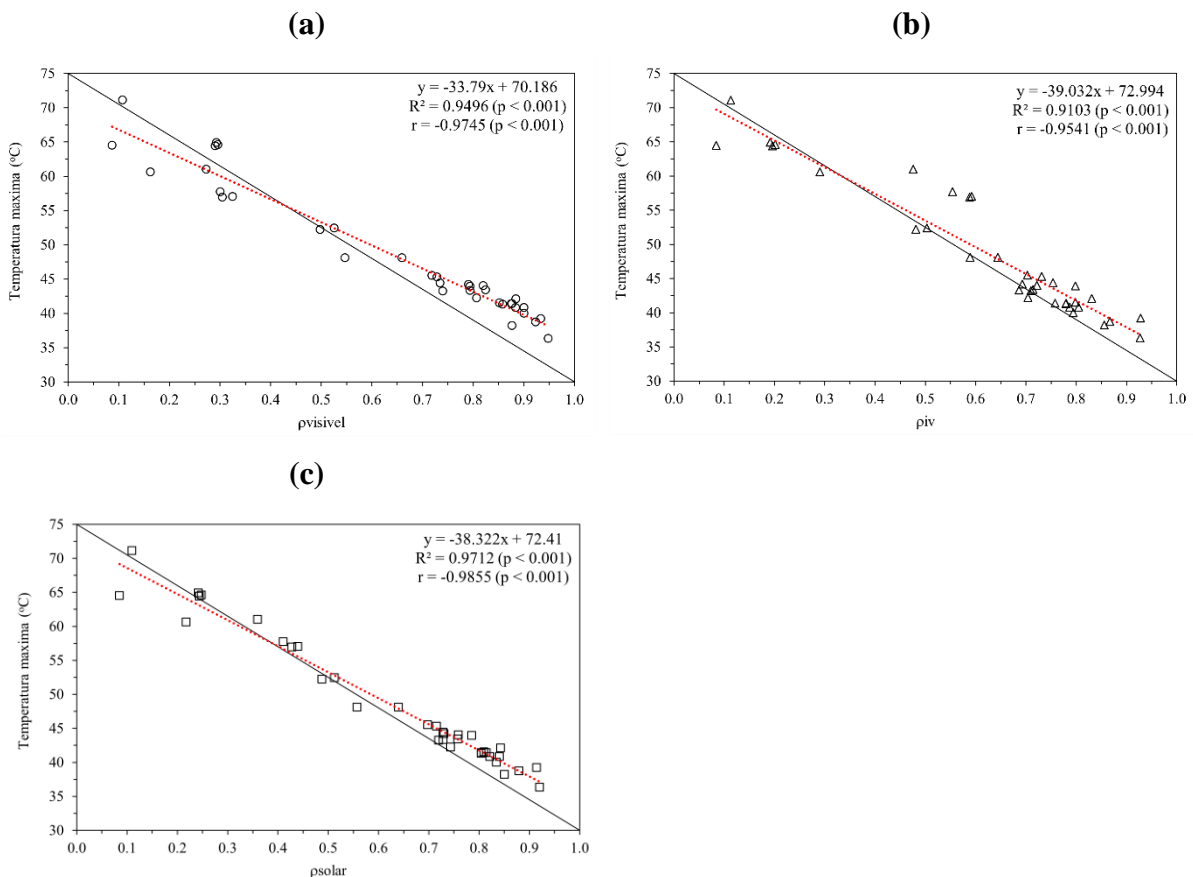
Nos estudos de Synnefa, Santamouris e Livada (2006) e Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007) foi verificado que a refletância solar, que representa a parcela da radiação total incidente a qual é refletida pela superfície, afeta o desempenho térmico dos materiais durante o dia.

Contudo, à noite, sem a presença da radiação solar, o parâmetro que mais afeta é a emitância térmica. Todavia, as medições de temperatura superficial na pesquisa ocorreram durante o dia (11 horas às 14 horas) no período de maior exposição à radiação solar.

Neste caso, realizou-se a correlação apenas entre a refletância visível, no infravermelho próximo e solar com a temperatura máxima registrada no período citado para todas as amostras expostas ao Sol.

Os gráficos de dispersão apresentam os resultados das relações entre as variáveis por meio das equações de regressão linear (Figura 4.21). Os coeficientes de correlação de Pearson (r) indicam que existem correlações elevadas, porém negativas entre a temperatura máxima e as refletâncias no visível (0,9745), infravermelho próximo (0,9541) e solar (0,9855). Ou seja, conforme aumenta-se a refletância espectral e solar, o valor da temperatura superficial diminui. Os coeficientes de correlação (r) e de determinação (R^2) apresentam valores de p muito menores do que 0,05 ($p < 0,001$), o que confere elevada significância estatística deles.

Figura 4.21 – Correlação entre a refletância (a) visível (b) no infravermelho próximo e (c) total com a temperatura máxima registrada nos materiais avaliados



Fonte: A autora.

Para cada relação analisada, o R^2 tem valor próximo a 1 (0,9496; 0,9103 e 0,9712), nesta ordem, o que indica que a regressão se ajustou bem (tendência linear) e de fato existe uma regressão linear entre a temperatura e a refletância no visível, infravermelho próximo e solar, sendo o melhor modelo observado para o último (solar). Os coeficientes de determinação positivos e elevados de 0,92 e 0,93 também foram constatados, respectivamente, nos revestimentos frios e padrões correspondentes em cor de Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007) e nas tintas frias não-brancas utilizadas como revestimentos de pavimentos de Xie *et al.* (2019).

Analisando-se a equação de regressão linear obtida na Figura 4.21 (c) observa-se que um aumento de 10% na refletância solar pode reduzir a temperatura dos materiais avaliados em aproximadamente 3,83°C. Synnefa, Santamouris e Livada (2006) observaram o grande potencial de redução nas temperaturas superficiais dos revestimentos frios e sugerem a sua aplicação no ambiente urbano em razão do desempenho térmico superior a outros materiais.

Assim, para avaliar a influência conjunta da refletância visível e infravermelho na temperatura dos materiais, efetuou-se a análise de regressão linear múltipla seguindo recomendação de Xie *et al.* (2019). Dessa análise obteve-se a equação 4.1 abaixo.

$$Temperatura_{m\acute{a}x} = 72,134 - 21,8423 \cdot \rho_{VIS} - 15,3211 \cdot \rho_{IV} \quad \dots [4.1]$$

Segundo os resultados da regressão linear múltipla, todos os coeficientes da equação (ρ_{VIS}) e (ρ_{IV}) são significativos ($p < 0,001$) do ponto de vista estatístico, conferindo à equação elevada confiabilidade. Conforme o modelo obtido, o aumento da refletância na região do visível promove maior redução na temperatura dos materiais em relação a refletância na região do infravermelho próximo. De fato, um aumento de 10% na refletância proporcionou redução de 2,18°C (visível) e de 1,53°C (infravermelho), o que conjuntamente promove uma redução total de 3,71°C na temperatura dos materiais. O modelo de regressão linear múltipla apresentou R^2 de 0,9711 ($p < 0,001$), conferindo elevada confiabilidade estatística ao modelo.

Na comparação deste modelo de regressão múltipla com o modelo simples de refletância solar e temperatura ($R^2 = 0,9712$), verifica-se que ambos possuem excelente previsão superior a 95%. A estimativa da redução da temperatura máxima dos materiais com base apenas na radiação solar (3,83°C) foi superior à obtida com a regressão linear múltipla (3,71°C). Contudo, no estudo de Xi *et al.* (2019), a regressão múltipla apresentou resultado superior ao modelo simples (solar), tendo-se excluído o infravermelho próximo de ondas longas (acima de 1.100 nm) da análise. Para os autores, esta região espectral não tem impacto significativo na redução da

temperatura de revestimentos refletivos. Dessa forma, eles sugerem o desenvolvimento de revestimentos frios, a fim de efeito térmico, aqueles com maior refletância ao infravermelho próximo de onda curtas (700 a 1.100 nm).

A contribuição da refletância na região espectral ultravioleta não foi significativa, sendo, portanto, excluída das análises simples e múltipla, porque não tem relação direta com a temperatura superficial conforme observado em Xie *et al.* (2019), todavia seu impacto ambiental e nos humanos não pode ser negligenciado.

A relação das propriedades radiantes (refletância solar e emitância térmica) quanto a concentração dos elementos químicos predominantes encontrados foi realizada em todas as amostras avaliadas, exceto a referência (MDF). Portanto, foram avaliados 18 pares de dados correspondente aos valores médios das propriedades de todas as variáveis correlacionadas (elementos químicos, ρ_{IV} , ρ_{SOLAR} e ϵ) (Tabela 4.21).

Tabela 4.21 – Matriz de correlação entre a emitância térmica e a refletância no infravermelho próximo e solar com os elementos químicos dos materiais avaliados

	ρ_{IV}		ρ_{SOLAR}		ϵ	
	ρ_{IV}	1,000				
	ρ_{SOLAR}	0,984	***	1,000		
	ϵ	0,051	ns	0,064	ns	1,000
Elementos Químicos	C	- 0,792	***	- 0,805	***	0,017 ns
	O	0,749	***	0,748	***	0,210 ns
	Si	0,320	ns	0,308	ns	0,229 °
	Ca	0,414	°	0,387	ns	0,213 ns
	Ti	0,271	ns	0,314	ns	- 0,605 ***

Níveis de significância pelo teste t:
 ns: não significativo;
 °: significativo a 10%
 *: significativo a 5%
 **: significativo a 1%
 ***: significativo a 0,1%

Fonte: Bhering (2017).

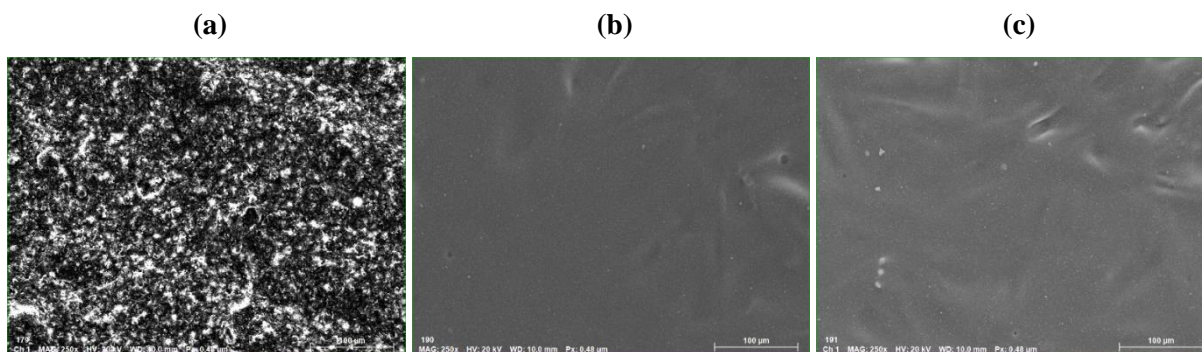
A refletância no infravermelho próximo e solar apresentou correlação forte negativa e positiva, respectivamente, para os elementos químicos carbono e oxigênio, e significativa a 0,1% de probabilidade. Portanto, à medida que a proporção de carbono diminui e a de oxigênio aumenta, verifica-se o aumento da refletância no infravermelho próximo e solar. Esta relação é explicada por causa da maior quantidade de pigmentos, que são óxidos que possuem na sua fórmula química o oxigênio incorporado, e são responsáveis pela interação com a radiação solar, refletindo-a em grande parte, e conseqüentemente a tinta tem na sua composição menor volume em resina, predominantemente composta por carbono.

Como exemplo, destaca-se a tinta branca T-08 que possui a menor quantidade de carbono (26,09%) detectada pelo EDS e a maior em oxigênio também (38,86%), a qual dentre todas as amostras analisadas é a que possui a maior refletância no infravermelho próximo (92,7%) e solar (92,1%).

De forma inversa, as tintas com maior quantidade de carbono e menor em oxigênio são verificadas para as amostras de tintas coloridas cinza T-02-C e vermelha T-02-V para telhas. Ou seja, são as tintas com menor volume de pigmento em relação a resina e por causa disso possuem alto brilho superficial e são classificadas como de acabamento brilhante. Neste caso, elas possuem as menores refletâncias solares, mas o que também é influenciado pela região visível tendo em vista que elas não são cores claras.

Para demonstrar a diferença visual entre a proporção de carbono e oxigênio na superfície, comparou-se as micrografias da tinta T-08, cuja superfície é rugosa de forma uniforme em toda imagem como as coloridas T-02-C e T-02-V são as mais lisas observadas em todas as amostras analisadas (Figura 4.22).

Figura 4.22 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) em preto e branco para as amostras de tintas (a) T-08; (b) T-02-C e (c) T-02-V



Fonte: A autora.

Esta relação com os elementos carbono e oxigênio presentes nas tintas pode-se estender às observações feitas em Dornelles (2008). Na pesquisa da autora, a maior parte das tintas acrílicas de acabamento semibrilho apresentaram absorvância maior, isto é, menor refletância solar do que as tintas de mesmas cores do mesmo fabricante com acabamento fosco, sendo as maiores diferenças observadas no infravermelho próximo.

Desta forma, comparou-se as tintas brancas do mesmo fabricante D, a tinta T-02-B para telhas de alto brilho e a de referência T-01-B-REF com acabamento semibrilho. A tinta branca com semibrilho tem maior refletância no infravermelho próximo e solar e possui menor quantidade

de carbono e maior de oxigênio em relação à de alto brilho, o que é coerente com os resultados estatísticos encontrados. Portanto, assim como o verificado por Dornelles (2008) as tintas com acabamento alto brilho não refletem mais radiação solar do que as de semibrilho e estas não refletem mais do que as foscas.

Contudo, a relação entre a quantidade de resina, que tem mais carbono, e a de pigmentos, que possuem o oxigênio na sua fórmula química, não é o único fator que influencia na refletância solar das superfícies. Ademais, outros aspectos como a concentração de elementos inorgânicos, silício, cálcio e titânio, os quais foram quantificados no EDS e a forma de distribuição pela imagem destes elementos, observada nas micrografias e detalhada no apêndice B, também influenciam nas propriedades refletivas dos materiais.

Todavia, para estes elementos químicos inorgânicos, não foi encontrado nível de significância estatística com a refletância, exceto entre o cálcio e a refletância no infravermelho, mas a correlação é positiva e fraca (0,414) e significativa a 10% pelo teste t (Tabela 4.21). Esta relação foi observada na tinta T-08 com a maior refletância no infravermelho dentre todos os materiais analisados, a qual possui a maior concentração de cálcio (21%). Também, na tinta produzida com cal hidratada (CaO) por Santamouris *et al.* (2008) apresentou 88% de refletância no visível e infravermelho próximo, maior em relação à branca fria padrão.

Pelos materiais avaliados nesta pesquisa, contudo, não foi encontrada relação estatística significativa entre a concentração de elementos químicos inorgânicos, como titânio e silício presentes nos óxidos metálicos e conhecidos como pigmentos frios, com a refletância no infravermelho próximo e solar.

Entretanto, ao comparar-se entre os próprios materiais dos fabricantes B (Quadro B.1) e C (Quadro B.2), notou-se que quanto maior a refletância no infravermelho próximo e solar, maior também a concentração de titânio, sendo também observados menos pontos de aglomeração do pigmento nas micrografias destes materiais. Entretanto, como não foi encontrada significância estatística deste elemento químico na avaliação de todas as amostras, e sim por grupo de material, as observações não são estendidas a todos os materiais.

A relação entre a emitância térmica e a refletância não é significativa estatisticamente, assim como entre a emitância com o carbono e oxigênio, não-metais, e cálcio, um metal alcalino-terroso. A emitância térmica apresentou correlação negativa e de força moderada com o elemento químico titânio (-0,605), um metal de transição, e significativa a 0,1%. Esse resultado

indica que quanto menor o conteúdo de titânio no material, a emitância térmica aumenta e vice-versa. Contudo, em relação ao silício, a emitância demonstrou correlação positiva e fraca (0,229) com significância a 10% de probabilidade. Portanto, verifica-se que o aumento da proporção de silício no material eleva também o valor de emitância (Tabela 4.21).

Apesar de apenas 10% de significância estatística, um dos mais elevados valores de emitância térmica ($\epsilon = 0,90$) é o da tinta T-05, a qual possui a maior quantidade de silício em 15,93% e o menor percentual de titânio (3,80%) em materiais brancos, esta relação significativa a 0,1% (Tabela 4.21).

Todos os menores coeficientes de emitância térmica referem-se aos materiais líquidos brancos do fabricante D. A tinta branca de referência T-01-B-REF possui um pouco menos de titânio e apresenta emitância inferior ($\epsilon = 0,85$) do que às demais aditivadas brancas ($\epsilon = 0,86$). Nestas, após a adição do pó refletivo, elevou-se a concentração de silício (Tabela 4.16) como também o elemento químico pelo mapeamento nas micrografias encontra-se mais em evidência na superfície, o que pode inferir no maior valor de emitância delas (Quadro B.4).

A tinta branca T-02-B com maior quantidade de titânio possui emitância térmica um pouco menor ($\epsilon = 0,86$) do que as outras tintas coloridas da mesma linha e fabricante ($\epsilon = 0,87$). Mesmo com a diminuição gradual e considerável do percentual de titânio presente na superfície das tintas nas cores bege até a vermelha, nota-se que o valor da emitância não se altera entre elas. Então, mesmo com valores elevados de emitância térmica, porém um pouco menores o que é coerente para com os materiais frios, observa-se que mesmo com a redução drástica na quantidade de carga metálica, a propriedade térmica não é tão afetada pela concentração de pigmentos como afirmam Santamouris, Synnefa e Karlessi (2011).

Além da influência pela concentração de pigmentos, foram analisados a sua distribuição pela micrografia geral do mapeamento dos elementos químicos nas superfícies para as mantas líquidas ML-01 e ML-02. No entanto, por estes parâmetros, não se encontrou explicação para os seus maiores valores de emitância térmica ($\epsilon = 0,91$) dentre todas as amostras analisadas. Portanto, outras características como a rugosidade, oxidação, temperatura, dentre outros, como afirma Perin (2009) devem ser analisadas para compreender qual aspecto apresenta maior influência no comportamento radiativo dos materiais.

4.3 Conclusões

As telhas de concreto frias não apresentaram desempenho refletivo tão bom como o observado nas desenvolvidas por Levinson *et al.* (2010), exceto às de cores branca e pérola, porém deve-se em grande parte à sua coloração mais clara (maior refletância no visível). As telhas brancas de fibrocimento apresentaram melhores desempenhos refletivos tanto na região visível como no infravermelho próximo do que a de concreto de mesma cor.

A variação significativa no parâmetro de cor (ΔE) referentes aos mesmos materiais de cores brancas, não correspondentes em cor pelo critério adotado, é referente ao eixo de luminosidade (L^*), e comprovou-se com a análise estatística através do coeficiente de correlação (r) positivo e elevado a relação deste parâmetro com a refletância visível. Tanto que nas tintas aditivadas coloridas, os maiores aumentos na refletância visível são daquelas com as maiores variações positivas no parâmetro de luminosidade ($+\Delta L^*$), sendo a vermelha, a menos luminosa dentre todas, seguida pela pérola e cinza por causa da adição de um pó branco refletivo.

Pela observação dos gráficos de refletância ao longo do espectro solar, nota-se que os materiais líquidos brancos de mesmo fabricante apresentam curvas refletivas com padrão semelhante a despeito dos de diferentes fabricantes. Apesar da diferença significativa no visível (15,8%), em razão das diferenças de luminosidade (L^*) entre elas, destaca-se como maior variação a região infravermelha próxima (24,1%).

As curvas refletivas nos materiais brancos a partir do infravermelho próximo possuem aspecto descendente. Portanto, os valores de refletância nesta região espectral diminuem, contudo, a correlação entre o parâmetro L^* de cor mantém o seu coeficiente (r) positivo e elevado com a refletância solar total. Então, indica-se que a quantidade de branco, isto é, a luminosidade da cor impacta sim na refletância total, tanto que de forma geral os materiais de cores brancas, com alta luminosidade, são associados visualmente à pouca absorção de radiação.

Os menores acréscimos de refletância no infravermelho próximo, após a adição do pó branco refletivo, foram verificados nas tintas aditivadas cinza e branca, a mais luminosa dentre todas. Enquanto os aumentos mais significantes foram, nesta ordem, na pérola e vermelha, a menos clara no parâmetro de luminosidade (L^*) dentre todas, assim como foi observado para os revestimentos frios mais escuros que obtém os maiores acréscimos de refletância conforme a literatura.

Das análises estatísticas, as relações significantes estatisticamente foram entre os elementos químicos carbono e oxigênio com as refletâncias no infravermelho próximo e solar. Desta

forma, as tintas com menos carbono, isto é, menor conteúdo de resina orgânica e maior quantidade de oxigênio, proveniente também dos óxidos metálicos, são mais refletivas. Portanto, a menor quantidade de carbono e maior em oxigênio relaciona-se com a concentração de volume de pigmento e carga pelo volume da tinta seca, numa divisão a qual regula os diferentes níveis de brilho e determinam nas tintas o acabamento superficial sendo brilhante, semibrilho ou fosco por exemplo.

Contudo, observando-se apenas concentrações de titânio ou silício, os elementos químicos inorgânicos que compõem os pigmentos frios, não implicam que em maiores concentrações resultam maiores refletâncias no infravermelho próximo e solar tendo em vista que não apresentaram nível de significância estatística. Todavia, na avaliação das micrografias por grupo de fabricante foram identificados materiais com menor conteúdo de titânio e/ou menos pontos aglomerados do elemento detectados na amostra como os de menores refletâncias na comparação com outros do mesmo fabricante.

Então, de forma geral, pelos materiais elastoméricos avaliados quimicamente na pesquisa assim como na observação das tintas em Dornelles (2008), pode-se concluir que as tintas com alto brilho superficial não refletem mais do que semi-brilhantes e estas não mais do que as foscas.

Conforme Zinzi (2016) e Dornelles, Caram e Sichieri (2014) os componentes mais refletivos no infravermelho próximo dos materiais frios retêm mais calor, dificultando a sua liberação na forma de radiação infravermelha de onda média, isto é, como radiação térmica, o que indica que eles possuem menores valores de emitância térmica em relação aos convencionais.

Apenas as telhas de fibrocimento frias possuem menores valores de emitância térmica do que a telha convencional com variação máxima absoluta de -0,03. Neste sentido, as tintas frias nacionais avaliadas na pesquisa possuem menores emitâncias térmicas do que as da literatura internacional, exceto às produzidas pelo fabricante grego verificadas em Dornelles, Caram e Sichieri (2014).

As telhas de concreto e as tintas aditivadas, em relação às suas referências de mesma cor, apresentaram maiores valores na propriedade de emitância térmica de até +0,03 e +0,02, nesta ordem. Apesar disso, todos os materiais avaliados são indicados como bons emissores de calor na forma de radiação térmica tendo em vista que eles não são metálicos.

De modo que estas variações irrisórias, sejam positivas ou negativas, entre os materiais para a propriedade da emitância térmica não influenciam tanto no seu desempenho térmico de acordo

com Zinzi (2016). Desta forma, evidencia-se a refletância solar como principal propriedade térmica para obter-se o efeito de resfriamento nas superfícies, o que é destacado em Xue *et al.* (2015) e também em Revel *et al.* (2014).

Para verificar se a concentração de óxidos metálicos, como silício e titânio, nos materiais elastoméricos influencia na propriedade da emitância térmica, as análises de correlação foram realizadas. Neste sentido, apresentaram coeficientes de correlação negativa e força moderada entre a emitância térmica e o elemento químico titânio, metal de transição, e positiva fraca com o silício, um semimetal.

Dessa forma, estas correlações estatísticas esclarecem um dos maiores valores de emitância térmica ($\varepsilon = 0,90$) verificado para a tinta T-05 entre todas as amostras medidas. No entanto, ao comparar-se materiais da mesma linha e fabricante com diferenças percentuais consideráveis do elemento titânio, por exemplo, o valor de emitância não sofre alteração.

Então, pelas análises da concentração de elementos químicos metálicos em materiais elastoméricos e a sua distribuição pela superfície nos materiais avaliados, não se pode concluir que estes são aspectos determinantes para a avaliação da emitância térmica como declaram Santamouris, Synnefa e Karlessi (2011). Além do mais, o silício, um semimetal apresentou correlação positiva, colaborando com o aumento da emitância térmica e não ao contrário como espera-se de um elemento metálico.

A absorção e perda de calor foi analisada através das quedas e aumentos nas linhas das temperaturas superficiais registradas nos gráficos de evolução temporal como pelas imagens termográficas. Por causa do período de céu parcialmente encoberto registrado em parte das medições, o pico da radiação solar às 12 horas coincidiu com os valores máximos registrados na câmera termográfica para todos os materiais e os menores verificados às 14 horas em razão da presença das nuvens.

Mesmo com o revestimento refletivo, as telhas de concreto mais escuras aqueceram-se mais do que a sua telha de referência não revestida. As telhas brancas de fibrocimento permanecem mais frias dentre todo o conjunto de telhas, porque possuem as maiores refletâncias solares. As reduções nos valores de temperatura são bem mais pronunciadas em relação à sua referência não revestida do que nas de concreto, as quais armazenam mais calor na sua massa ao longo do tempo de exposição e como consequência tem-se os menores valores de temperatura registrados às 13 horas.

As tintas frias coloridas possuem maiores amplitudes térmicas médias ($18,9^{\circ}\text{C}$) entre elas em razão das diferenças nas suas propriedades ópticas de refletância solar conforme Rosso *et al.* (2017). Ademais, entre tintas de mesma cor, as brancas, o impacto nas diferenças das temperaturas superficiais de pico ($7,9^{\circ}\text{C}$) é menos acentuado apesar da grande variação de refletância solar (19,2%).

A tinta branca de referência obteve os menores valores máximo, médio e mínimo, portanto, a adição do pó refletivo por si só não foi fator determinante para a redução da temperatura superficial do revestimento. Tampouco as tintas aditivadas de cores mais escuras obtiveram as maiores reduções na temperatura, em relação às suas referências de mesmas cores, como foi verificado na literatura. A tinta aditivada pérola foi a que obteve as menores reduções na temperatura, porém na ordem de apenas 1°C .

As relações entre as refletâncias espectrais, exceto o ultravioleta, com a temperatura superficial máxima possuem coeficientes de correlação negativos e fortes, contudo, o melhor modelo de regressão linear é da refletância solar, seguido pelo visível e infravermelho próximo. De fato, comprova-se na regressão múltipla que as previsões na redução da temperatura superficial pelo espectro visível são mais pronunciadas do que no infravermelho próximo.

Porém, Xie *et al.* (2019) destacam a importância em separar os comprimentos de onda na região do infravermelho próximo para a análise do desempenho térmico. Desta forma, comprovou-se por meio desse estudo o maior impacto térmico do infravermelho próximo de ondas curtas (700 a 1.110 nm) para as reduções da temperatura do que a própria região visível.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa realizou a avaliação das propriedades radiativas, conceito este determinado pelo Cool Roof Rating Council (CRRC, 2021) ao tratar da refletância solar e emitância térmica. Além do mais, os materiais foram caracterizados quanto aos seus parâmetros de cor pelo sistema L*ab, avaliados pelas suas temperaturas superficiais quando expostos à radiação solar e pela presença dos elementos químicos na superfície das amostras, cujas medições foram utilizadas na correlação com as propriedades radiantes. Desta forma, as considerações finais estão sintetizadas a seguir:

- O melhor desempenho refletivo solar é consequência das maiores refletâncias visíveis em materiais mais claros, como os brancos e beges, sendo observado inclusive um decréscimo na refletância infravermelha. Os materiais brancos possuem variações menos acentuadas nas suas temperaturas em relação às diferenças nas suas refletância solares. Apesar disso, elas possuem as menores temperaturas superficiais no período de exposição solar, seguidas pelos materiais convencionais de referência e por último os materiais frios coloridos, os cinzas e vermelhos;
- Materiais coloridos como os vermelhos avaliados na pesquisa refletem mais no infravermelho próximo do que na região visível, porém não é significativo para o aumento da refletância solar. Mesmo após a adição do pó branco refletivo, não se verificou melhoria significativa em termos refletivos em relação à tinta de referência, especialmente a branca, seguida pela cinza. Portanto, os materiais frios mais escuros analisados não tiveram impacto considerável no desempenho térmico tampouco o pó aditivo refletivo foi eficaz na redução das temperaturas superficiais em tintas convencionais mais escuras;
- As maiores concentrações de titânio ou silício, proveniente dos óxidos metálicos, não implicaram maiores refletâncias no infravermelho próximo ou solar de acordo com as análises de correlação e como esperam-se dos pigmentos frios. Contudo, a relação significativa encontrada foi com o carbono e oxigênio, o que indica que as maiores refletâncias estão relacionadas com a proporção entre resina e pigmentos, o que se refere ao acabamento superficial das tintas;
- Apenas alguns materiais frios, como as telhas de fibrocimento, apresentaram menores valores de emitância térmica do que à sua referência de material convencional enquanto

maiores valores são verificados nas telhas de concreto e tintas aditivadas, todos com variações muito pequenas. À despeito disso, são materiais com elevada emitância térmica, isto é, são bons emissores de calor na forma de radiação térmica, contudo esta propriedade é menos relevante para o desempenho térmico do que a refletância solar;

- Os materiais com maiores refletâncias solares apresentaram os menores valores de temperatura superficiais, confirmado na análise de correlação, e pela regressão múltipla o espectro visível foi o previsor de maior redução. Portanto, superfícies de cores mais claras esquentam menos, em maior grau, por causa da sua maior refletância no visível.

Então, apesar do melhor desempenho térmico em superfícies de cores mais claras, a escolha do revestimento não deve ser realizada apenas por este critério de cor. Primeiramente, a distinção mesmo entre cores brancas deve ser realizada já que apenas visualmente pelo olho humano não é uma forma precisa. Portanto, indica-se a avaliação dos parâmetros de cor por métodos científicos, especialmente a escolha pelo parâmetro de luminosidade (L^*), que quanto maior, maior a sua refletância visível.

Contudo, no estudo de Araújo (2022), observou-se que em razão do acúmulo de sujeira e ação das intempéries, a telha fria branca foi a que sofreu maior perda percentual de refletância solar ao longo do tempo de exposição. Então, para a recuperação da sua propriedade óptica inicial, indica-se como uma solução a limpeza superficial periódica. Tanto que a norma brasileira NBR 15.575-1 (2021) atualizada como o código de eficiência energética no estado da Califórnia (2019a) (2019b), como exemplo internacional, recomendam a avaliação da refletância solar envelhecida, após 03 anos de exposição, sabendo-se que os efeitos das intempéries alteram as propriedades radiativas iniciais das superfícies.

No Brasil, tratando-se de materiais frios, não há jurisdição nacional ou regional mesmo por zonas climáticas que certifique requisitos mínimos ou máximos para as propriedades radiativas e os classifiquem então como materiais frios. Portanto, a avaliação do desempenho radiativo dos ditos materiais frios analisados na pesquisa foram realizados de acordo com os métodos definidos pelos manuais do CRRC, contudo, a pesquisa não pôde certificá-los como materiais frios em virtude da falta de normativa nacional prescritiva.

Além do mais, existem opções de revestimentos frios coloridos para a utilização nas superfícies. Na literatura, há estudos comprovando a maior refletância no infravermelho próximo de pigmentos frios coloridos do que os convencionais tanto na sua forma em pó, em películas como

em tintas aplicadas nas superfícies. Dessa forma, eles reduzem a absorção de calor na superfície e então impacta na redução das temperaturas superficiais, o que auxilia em termos de desempenho térmico.

No entanto, a concentração dos elementos químicos inorgânicos, como os provenientes dos óxidos metálicos, na pesquisa não indicou relação com a refletância no infravermelho próximo dos materiais avaliados. Além do mais, a análise de correlação das concentrações de elementos químicos inorgânicos só foi significativa e de coeficiente moderado apenas entre o titânio e a emitância térmica, contudo a carga de elementos metálicos na superfície não foi considerada um aspecto determinante nesta propriedade para os materiais avaliados.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Desta forma, como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se os seguintes pontos:

- Realizar o estudo de outros pigmentos frios na sua forma em pó para a caracterização quanto à morfologia, tamanho e área superficial de partícula, estrutura cristalina e dimensão dos cristais, além da refletância nos espectros ultravioleta, visível e infravermelho próximo;
- Analisar as propriedades radiativas de tintas com a adição de pigmentos frios em diferentes composições de óxidos metálicos, puros e misturados, e diferenças nas concentrações entre pigmentos e resina, isto é, tintas com diferentes acabamentos superficiais;
- Avaliar a propriedade de refletância solar envelhecida, especialmente de materiais frios brancos, após três anos de exposição e os efeitos da degradação superficial;
- Mensurar as temperaturas superficiais durante o período noturno e investigar se existe relação com os valores de emitância térmica;
- Analisar a diferença na emitância térmica de materiais frios elastoméricos aplicados em diferentes substratos com níveis diferentes de rugosidade e oxidação;
- Avaliar o impacto nas diferenças entre a refletância no infravermelho de ondas curtas e o de ondas médias para a redução da temperatura superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARI, H.; LEVINSON, R.; BERDAHL, P. ASTM standards for measuring solar reflectance and infrared emittance of construction materials and comparing their steady-state surface temperatures. *In: AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY EFFICIENT ECONOMY SUMMER STUDY*, 1996, Pacific Grove. **Proceedings [...]**. Pacific Grove American Council for an Energy-Efficient Economy, 1996, p. 1–9.

AKBARI, H.; LEVINSON, R.; BERDAHL, P. Cool materials rating instrumentation and testing. *In: KOLOKOTSA, D.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H. (org.). Advances in the development of cool materials for the built environment*. Sharjah: Bentham Science Publishers, 2012. p. 174–194.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1371-15**: Standard test method for determination of emittance of materials near room temperature using portable emissometers. West Conshohocken: ASTM, 2015.

_____. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C168-22**: Standard terminology relating to thermal insulation. West Conshohocken: ASTM, 2022.

_____. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2244-16**: Standard practice for calculation of color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates. West West Conshohocken: ASTM, 2016.

_____. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E903-12**: Standard test method for solar absorptance, reflectance and transmittance of materials using integrating spheres. West Conshohocken: ASTM, 2020a.

_____. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E772-15**: Standard terminology of solar energy conversion. West Conshohocken: ASTM, 2021.

_____. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G173-03**: Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface. West Conshohocken: ASTM, 2020b.

ARAÚJO, A. C. H. **Absortância solar e o envelhecimento natural de telhas expostas ao tempo**. Orientadora: Kelen Almeida Dornelles. 2022. 208 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

ASHRAE. Heat transfer. *In: OWEN, M. (org.) SI. ASHRAE Handbook Series: Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), 2017. p. 4.1-4.36.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.215-2**: Iluminação natural - procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural e para a distribuição espacial da luz natural. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-1**: Desempenho térmico de edificações - definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-3**: Desempenho térmico de edificações - zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-1**: Edificações habitacionais - desempenho: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-4**: Edificações habitacionais - desempenho: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-5**: Edificações habitacionais - desempenho: requisitos para os sistemas de coberturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

BEES. Building Energy Efficiency Standards. **Energy efficient cool roofs**: low-rise residential. Sacramento: California Title 24, 2019a.

_____. Building Energy Efficiency Standards. **Energy efficient cool roofs: nonresidential buildings, high-rise residential, hotels and motels.** Sacramento: California Title 24, 2019b.

BHERING, L.L. RBio: a tool for biometric and statistical analysis using The R platform. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 17, p. 187-190, jun. 2017.

BOZONNET, E.; DOYA, M.; ALLARD, F. Cool roofs impact on building thermal response: a French case study. **Energy and Buildings**, Amsterdã, v. 43, n. 11, p. 3006–3012, 2011.

CRRC. COOL ROOF RATING COUNCIL. **CRRC-1 Roof product rating program manual.** Portland: CRRC, 2022a.

_____. COOL ROOF RATING COUNCIL. **CRRC-2 Wall product rating program manual.** Portland: CRRC, 2022b.

_____. COOL ROOF RATING COUNCIL. **Roof Rating Program: CRRC Product Label Guidance.** Disponível em: <<https://coolroofs.org/programs/roof-rating-program/using-the-label>>. Acesso em: 17 mai. 2023.

_____. COOL ROOF RATING COUNCIL. **Rated Roof Products.** Disponível em: <<https://coolroofs.org/directory/roof>>. Acesso em: 31 mai. 2023.

_____. COOL ROOF RATING COUNCIL. **Rated Wall Products.** Disponível em: <<https://coolroofs.org/directory/wall>>. Acesso em: 31 mai. 2023.

_____. COOL ROOF RATING COUNCIL. **Standard test methods for determining radiative properties of materials.** Portland: ANSI/CRRC, 2021.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental.** 2 ed. Rio de Janeiro: Revan, 2009. ISBN 978-85-7106-397-6.

COUTO, L. S. B. **Alta II: uma alternativa aos métodos de medição de refletância solar para telhas cerâmicas e de fibrocimento.** Orientadora: Kelen Almeida Dornelles. 2019. 163 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

COZZA, E. S.; ALLOISIO, M.; COMITE, A.; TANNA, G.; VICINI, S. NIR-reflecting properties of new paints for energy-efficient buildings. **Solar Energy**, Amsterdã, v. 116, p. 108–116, 2015.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicações e preparação de amostras (materiais poliméricos, metálicos e semicondutores).** Porto Alegre: EDIPUCRS. 2007. 60p.

DELTA COLOR. **Colorium: Colorímetros.** 2011a. Disponível em: https://www.deltacolorbrasil.com/colorimetro_colorium.html. Acesso em: 12 jan. 2021.

_____. **Colorímetro x Espectrofotômetro.** 2011b. Disponível em: <<https://www.deltacolorbrasil.com/espectrofotometroXcolorimetro.html>>. Acesso em: 21 nov. 2022.

DIAS, A. A. C.; ANDRADE NETO, A. V.; MILTÃO, M. S. R. A atmosfera terrestre: composição e estrutura. **Caderno de Física da UEFS**, Feira de Santana, v. 5, n. 1/2, p. 21-40, 2007.

DORNELLES, K.; CARAM, R. M.; RORIZ, M.; RORIZ, V. Thermal performance of cool paints produced in Brazil for roof paint and their effect on buildings designed for hot climates. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT*, 3., 2010, Rhode Island. **Proceedings [...]**. Rhode Island: PALENC, 2010. p. 1-12.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M.; RORIZ, V. F.; CARAM, R. M. Thermal performance of white solar-reflective paints for cool roofs and the influence on the thermal comfort and building energy use in hot climates. *In: SOLAR WORLD CONGRESS*, 2011, Kassel. **Proceedings [...]**. Kassel: ISES, 2011. p. 1–12.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA.** Orientador: Dr. Maurício Roriz. 2008. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M.; RORIZ, V.; CARAM, R. Desempenho térmico de tintas brancas com microesferas cerâmicas para uso em coberturas de edifícios. *In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO E*

AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., E ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO E AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2011, Búzios. **Anais [...]**. Búzios: ANTAC, 2011. p. 1-10.

DORNELLES, K. A.; CARAM, R. M.; SICHIERI, E. P. Absortância solar e desempenho térmico de tintas frias para uso no envelope construtivo. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**. Brasília, n. 12, p. 55–64, 2014.

DOYA, M.; BOZONNET, E.; ALLARD, F. Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment. **Energy and Buildings**, Amsterdã, v. 55, p. 42–50, 2012.

DWIVEDI, C.; BAMOLA, P.; SINGH, B.; SHARMA, H. Infrared radiation and materials interaction: active, passive, transparent, and opaque coatings. *In*: DALAPATI, G. K.; SHARMA, M. (ed.). **Energy Saving Coating Materials**. Amsterdã: Elsevier, 2020. p. 33–56.

ENERGY CODE ACE. **Residential cool roofs and reroofing**. Sacramento: California Title 24, 2020.

FERRARI, C.; MUSCIO, A.; SILIGARDI, C.; MANFREDINI, T. Design of a cool color glaze for solar reflective tile application. **Ceramics International**, Amsterdã, v. 41, n. 9, p. 11106–11116, 2015.

FERRARI, C.; LIBBRA, A.; MUSCIO, A.; SILIGARDI, C. Design of ceramic tiles with high solar reflectance through the development of a functional engobe. **Ceramics International**, Amsterdã, v. 39, n. 8, p. 9583–9590, 2013.

FERRARI, C.; MUSCIO, A.; SILIGARDI, C. Development of a solar-reflective ceramic tile ready for industrialization. **Procedia Engineering**, Amsterdã, v. 169, p. 400–407, 2016.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001. ISBN 85-85445-39-4.

GILBERT, H.; MANDEL, B. H.; LEVINSON, R. Keeping California cool: Recent cool community developments. **Energy and Buildings**, Amsterdã, v. 114, n. 2016, p. 20–26, 2016.

HACHICH, V. Consórcio brasileiro de superfícies frias e desempenho termoenergético de edificações com coberturas de alta refletância solar. Entrevista concedida a Diana Csillag. **CICS (Centro de Inovação em Construção Sustentável)**, São Paulo, p. 01-05, novembro, 2020.

IKEMATSU, P. **Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes**. Orientadora: Dra. Kai Loh. 2007. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Summary for policymakers in Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability**. Contribution of II Working Group to the Fifth Assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 2014. 18p.

JEEVANANDAM, P.; MULUKUTLA, R. S.; PHILLIPS, M.; CHAUDHURI, S.; ERICKSON, L. E.; KLABUNDE, K. J. Near infrared reflectance properties of metal oxide nanoparticles. **Journal of Physical Chemistry**, Washington, v. 111, n. 5, p. 1912–1918, 2007.

KOLOKOTSA, D.; MARAVELAKI-KALAITZAKI, P.; PAPANTONIOU, S.; VANGELOGLOU, E.; SALIARI, M.; KARLESSI, T.; SANTAMOURIS, M. Development and analysis of mineral based coatings for buildings and urban structures. **Solar Energy**, Amsterdã, v. 86, n. 5, p. 1648–1659, 2012.

LADCHUMANANANDASIVAM, R. A natureza da luz e a sua interação com a matéria. *In*: LADCHUMANANANDASIVAM, R. **Processos Químicos Têxteis - Ciência da Cor**. 2 ed. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007a. p. 1–34.

LADCHUMANANANDASIVAM, R. Colorimetria e o sistema CIE. *In*: LADCHUMANANANDASIVAM, R. **Processos Químicos Têxteis - Ciência da Cor**. 2 ed. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007b. p. 45–65.

LAMBERTS, R. Consórcio brasileiro de superfícies frias e desempenho termoenergético de edificações com coberturas de alta refletância solar. Entrevista concedida a Diana Csillag. **CICS (Centro de Inovação em Construção Sustentável)**, São Paulo, p. 01-05, novembro, 2020.

- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3 ed. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL, 2014.
- LEVINSON, R.; AKBARI, H.; BERDAHL, P.; WOOD, K.; SKILTON, W.; PETERSHEIM, J. A novel technique for the production of cool colored concrete tile and asphalt shingle roofing products. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Amsterdã, v. 94, n. 6, p. 946–954, 2010.
- LEVINSON, R.; BERDAHL, P.; AKBARI, H.; MILLER, W.; JOEDICKE, I.; REILLY, J.; SUZUKI, Y.; VONDRAN, M. Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Amsterdã, v. 91, n. 4, p. 304–314, 2007.
- LEVINSON, R.; AKBARI, H. Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. **Energy Efficiency**, Basingstoke, v. 3, n. 1, p. 53–109, 2010.
- LEVINSON, R.; AKBARI, H.; REILLY, J. C. Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings. **Building and Environment**, Amsterdã, v. 42, n. 7, p. 2591–2605, 2007.
- LEVINSON, R.; BERDAHL, P.; AKBARI, H. 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**, Amsterdã, v. 89, n. 4, p. 319–349, 2005a.
- LEVINSON, R.; BERDAHL, P.; AKBARI, H. Solar spectral optical properties of pigments - part II: survey of common colorants. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Amsterdã, v. 89, n. 4, p. 351–389, 2005b.
- LIM, Y.-F. Novel materials and concepts for regulating infra-red radiation: radiative cooling and cool paint. *In*: DALAPATI, G. K.; SHARMA, M. (ed.). **Energy Saving Coating Materials**. Amsterdã: Elsevier, 2020. p. 113–131.
- MARINOSKI, D. L.; ORIGE, L. P.; GUESSER, A.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. Análise comparativa de valores de refletância solar de superfícies opacas utilizando diferentes equipamentos de medição em laboratório. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO E AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., E ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO E AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2013, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: ANTAC, 2013. p. 1–9.
- MINOLTA, K. **Comunicação precisa da cor**: controle de cor da percepção à instrumentação. Osaka: Konica Minolta Sensing Americas Inc, 2007.
- MUSCIO, A.; AKBARI, H. An index for the overall performance of opaque building elements subjected to solar radiation. **Energy and Buildings**, Amsterdã, v. 157, p. 184–194, 2017.
- NASCIMENTO, R. S. R. **Desenvolvimento de engobe impermeável para ciclo de queima rápida**. Orientador: Genaro Zenaide Clericuzi. 2018. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- OREL, B.; JERMAN, I.; KOZELJ, M.; PERSE, L. S.; KUNIC, R. Materials aspects of solar paint coatings for building applications. *In*: KOLOKOTSA, D.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H. (org.). **Advances in the development of cool materials for the built environment**. Sharjah: Bentham Science Publishers, 2012. p. 120–173.
- PEDROSA, I. **Da cor à cor inexistente**. 3 ed. Brasília: Universidade de Brasília, 1982. 224p.
- PEREIRA, C. D.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R.; GUTHS, S.; GHISI, E. **Guia de medição e cálculo para refletância e absorvância solar em superfícies opacas (v.1)**. Florianópolis: Centro brasileiro de eficiência energética em edificações (CB3E), 2015.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. P.; RUTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Conceitos básicos. *In*: PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de energia solar**. 2 ed. São José dos Campos: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE), 2017. p. 15–19.
- PEREIRA, J. C. **Estudo do comportamento de nanopátículas de dióxido de titânio em diferentes suspensões**. Orientadoras: Isabel Ferreira e Ana Picado. 2010. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

- PERIN, A. L. **Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade**. Orientador: Arno Krenzinger. 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- PISELLO, A. L.; CASTALDO, V. L.; PISELLI, C.; PIGNATTA, G.; COTANA, F. Combined thermal effect of cool roof and cool façade on a prototype building. **Energy Procedia**, Amsterdã, v. 78, p. 1556–1561, 2015.
- PISELLO, A. L.; COTANA, F.; NICOLINI, A.; BRINCHI, L. Development of clay tile coatings for steep-sloped cool roofs. **Energies**, Basiléia, v. 6, n. 8, p. 3637–3653, 2013.
- PISELLO, A. L. State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities. **Solar Energy**, Amsterdã, v. 144, p. 660–680, 2017.
- PISELLO, A. L. Thermal-energy analysis of roof cool clay tiles for application in historic buildings and cities. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdã, v. 19, p. 271–280, 2015.
- PISELLO, A. L.; COTANA, F. The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy: Results from two years of continuous monitoring. **Energy and Buildings**, Amsterdã, v. 69, p. 154–164, 2014.
- PISELLO, A. L.; COTANA, F.; BRINCHI, L. On a cool coating for roof clay tiles: Development of the prototype and thermal-energy assessment. **Energy Procedia**, Amsterdã, v. 45, p. 453–462, 2014.
- PISELLO, A. L.; ROSSI, F.; COTANA, F. Summer and winter effect of innovative cool roof tiles on the dynamic thermal behavior of buildings. **Energies**, Basiléia, v. 7, n. 4, p. 2343–2361, 2014.
- PISELLO, A. L.; ROSSO, F. Natural materials for thermal insulation and passive cooling application. **Key Engineering Materials**, v. 666, p. 1–16, 2016.
- PISELLO, A. L.; SANTAMOURIS, M.; COTANA, F. Active cool roof effect: impact of cool roofs on cooling system efficiency. **Advances in Building Energy Research**, v. 7, n. 2, p. 209–221, 2013.
- PREUSS, N. L. **Efeito dos aspectos morfológicos do pigmento TiO₂ nas propriedades ópticas de tintas base água**. Orientador: Carlos Arthur Ferreira. 2016. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- QI, Y.; XIANG, B.; ZHANG, J. Effect of titanium dioxide (TiO₂) with different crystal forms and surface modifications on cooling property and surface wettability of cool roofing materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Amsterdã, v. 172, n. 2016, p. 34–43, 2017.
- REVEL, G. M.; MARTARELLI, M.; EMILIANI, M.; GOZALBO, A.; ORTS, M. J.; BENGOCHEA, M. A.; DELGADO, L. G.; GAKI, A.; KATSIAPI, A.; TAXIARCHOU, M.; ARABATZIS, I.; FASAKI, I.; HERMANN, S. Cool products for building envelope - part I: development and lab scale testing. **Solar Energy**, Amsterdã, v. 105, p. 770–779, 2014a.
- REVEL, G. M.; MARTARELLI, M.; EMILIANI, M.; CELOTTI, L.; NADALINI, R.; FERRARI, A.; HERMANN, S.; BECKERS, E. Cool products for building envelope - part II: experimental and numerical evaluation of thermal performances. **Solar Energy**, Amsterdã, v. 105, p. 780–791, 2014b.
- REVEL, G. M.; MARTARELLI, M.; BENGOCHEA, M. A.; GOZALBO, A.; ORTS, M. J.; GAKI, A.; GREGOU, M.; TAXIARCHOU, M.; BIANCHIN, A.; EMILIANI, M. Nanobased coatings with improved NIR reflecting properties for building envelope materials: development and natural aging effect measurement. **Cement and Concrete Composites**, Amsterdã, v. 36, n. 1, p. 128–135, 2013.
- RORIZ, V. F.; CARAM, R. M.; RORIZ, M. Absortâncias e emitâncias efetivas de superfícies: um método para estimá-las, um modelo experimental e exemplos de suas importâncias. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO E AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., E ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO E AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2011, Búzios. **Anais [...]**. Búzios: ANTAC, 2011. p. 1–10.
- ROSSO, F.; PISELLO, A. L.; CASTALDO, V. L.; FABIANI, C.; COTANA, F.; FERRERO, M.; JIN, W. New cool concrete for building envelopes and urban paving: optics-energy and thermal assessment in dynamic conditions. **Energy and Buildings**, Amsterdã, v. 151, p. 381–392, 2017.
- SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KOLOKOTSA, D.; DIMITRIOU, V.; APOSTOLAKIS, K. Passive cooling of the built environment – use of innovative reflective materials to fight heat islands and decrease

cooling needs. **International Journal of Low Carbon Technologies**, Oxford, v. 3, n. 2, p. 71–82, 2008.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar Energy**, Amsterdã, v. 85, n. 12, p. 3085–3102, 2011.

SHIRAKAWA, M. Consórcio brasileiro de superfícies frias e desempenho termoenergético de edificações com coberturas de alta refletância solar. Entrevista concedida a Diana Csillag. **CICS (Centro de Inovação em Construção Sustentável)**, São Paulo, p. 01-05, novembro, 2020.

SILVA, I. L. M. **Estudo de durabilidade de pinturas “frias” e convencionais expostas ao envelhecimento natural**. Orientadora: Kai Loh. 2017. 170 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SILVA, I. L. M.; LOH, K.; SATO, N. M. N. Proposta de método de medição de refletância e cor de pigmentos e cargas. *In*: INTERNATIONAL COATINGS CONGRESS, 13., 2013, São Paulo. **Proceedings [...]**. São Paulo: ABRAFATI, 2013. p. 1–10.

SILVA, M. E. X.; JACINTO, L. I.; MARINOSKI, D. L.; FREDEL, M. C.; SCHABBACH, L. M. Determinação do índice de refletância solar de revestimentos cerâmicos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 59., 2015, Barra de Coqueiros. **Anais [...]**. Barra de Coqueiros: ABCERAM, 2015. p. 1060–1069.

SINGH, V.; RAYAL, I.; PRIYANAKA; SHARMA, H.; DWIVEDI, C.; SINGH, B. Solar radiation and light materials interaction. *In*: DALAPATI, G. K.; SHARMA, M. (ed.). **Energy Saving Coating Materials**. Amsterdã: Elsevier, 2020. p. 1–32.

SOUZA, G. T. **Utilização de imagens em infravermelho para análise térmica de componentes construtivos**. Florianópolis: UFSC, 2010.

SYNNEFA, A.; SALIARI, M.; SANTAMOURIS, M. Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens. **Energy and Buildings**, Amsterdã, v. 55, p. 7–15, 2012.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M. White or light colored cool roofing materials. *In*: KOLOKOTSA, D.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H. (org.). **Advances in the development of cool materials for the built environment**. Sharjah: Bentham Science Publishers, 2012. p. 33–71.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; APOSTOLAKIS, K. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. **Solar Energy**, Amsterdã, v. 81, n. 4, p. 488–497, 2007.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; LIVADA, I. A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. **Solar Energy**, Amsterdã, v. 80, n. 8, p. 968–981, 2006.

UEMOTO, K. L.; SATO, N. M. N.; JOHN, V. M. Estimating thermal performance of cool colored paints. **Energy and Buildings**, Amsterdã, v. 42, n. 1, p. 17–22, 2010.

WANG, S.; ZHANG, J. Effect of titanium dioxide (TiO₂) on largely improving solar reflectance and cooling property of high density polyethylene (HDPE) by influencing its crystallization behavior. **Journal of Alloys and Compounds**, Amsterdã, v. 617, p. 163–169, 2014.

WERLE, A. P. **Vida útil de revestimento frio e autolimpante**. Orientador: Vanderley Moacyr John. 2015. 272 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

WERLE, A. P.; LOH, K.; JOHN, V. M. Pintura à base de cal como alternativa de revestimento frio. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 149–157, 2014.

XIE, N.; LI, H.; ABDELLHADY, A.; HARVEY, J. Laboratorial investigation on optical and thermal properties of cool pavement nano-coatings for urban heat island mitigation. **Building and Environment**, Amsterdã, ano 147, 2019. p. 231–240.

XUE, X.; YANG, J.; ZHANG, W.; JIANG, L.; QU, J.; XU, L.; ZHANG, H.; SONG, J.; ZHANG, R.; LI, Y.; QIN, J.; ZHANG, Z. The study of an energy efficient cool white roof coating based on styrene acrylate copolymer and cement for waterproofing purpose — Part I: Optical properties, estimated cooling effect and

relevant properties after dirt and accelerated exposures. **Construction and Building Materials**, Amsterdã, v. 98, p. 176–184, 2015.

YAMASOE, M. A.; CORRÊA, M. P. **Processos radiativos na atmosfera: fundamentos**. São Paulo: Oficina de textos, 2016. 142 p. ISBN 978-85-7975-229-2.

ZAIONTZ, C. **Real Statistics Resource Pack**. Versão Rel 8.4. Disponível em: <<http://www.real-statistics.com>>. Acesso em: 08 out. 2022.

ZINZI, M. Characterisation and assessment of near infrared reflective paintings for building facade applications. **Energy and Buildings**, Amsterdã, v. 114, p. 206–213, 2016.

ZINZI, M.; BOZONNET, E. Cool roof's case studies. *In*: KOLOKOTSA, D.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H. (org.). **Advances in the development of cool materials for the built environment**. Sharjah: Bentham Science Publishers, 2012. p. 333–383.

APÊNDICE A - TEMPERATURAS SUPERFICIAIS (°C) DE TODOS OS MATERIAIS REFLETIVOS E DE REFERÊNCIA MEDIDAS PELO TERMÔMETRO DE INFRAVERMELHO

Material	HORÁRIOS															
	11h	11h12	11h24	11h36	11h48	12h	12h12	12h24	12h36	12h48	13h	13h12	13h24	13h36	13h48	14h
TC-REF	49.90	48.37	49.33	49.47	48.70	49.70	45.00	46.83	43.63	36.67	35.93	43.13	43.07	44.70	44.83	38.27
TC-01-B	38.93	37.77	38.00	38.20	38.53	38.77	36.57	37.97	35.53	32.10	31.67	34.23	35.23	35.70	36.30	32.90
TC-01-M	43.80	42.73	43.57	44.47	43.90	44.70	40.97	42.60	39.50	34.90	34.10	38.30	39.07	39.90	40.53	35.90
TC-01-C	57.63	57.10	57.87	60.13	58.67	60.53	52.50	55.03	50.83	41.60	40.60	50.10	50.30	51.57	52.70	43.90
TC-01-V	55.63	54.50	54.93	56.13	55.13	56.27	49.37	51.83	45.67	40.37	39.20	46.73	47.33	48.33	49.53	41.67
TFC-REF	50.93	49.83	49.67	50.90	49.57	52.13	42.50	47.70	41.80	35.03	35.30	44.07	43.67	44.73	45.03	36.33
TFC-01	37.17	34.97	35.57	36.07	35.90	36.90	32.50	35.50	31.67	29.70	29.13	32.57	33.83	33.43	33.87	29.57
TFC-02	38.87	37.70	38.40	38.97	38.33	39.33	33.97	37.80	33.43	30.40	30.17	34.47	35.27	35.43	35.20	30.37
TFC-03	34.57	32.70	33.60	34.53	33.97	35.03	30.53	34.23	30.30	28.57	28.37	31.37	32.30	32.23	0.00	28.23
PC-01-REF	46.20	46.00	46.80	39.10	49.00	51.50	42.30	47.70	41.60	35.50	35.40	43.10	45.70	46.40	46.20	37.00
ML-01	35.80	35.40	36.10	37.90	37.70	39.10	34.10	37.50	33.60	30.30	29.70	33.70	35.90	36.40	36.00	30.90
ML-02	38.10	37.80	38.40	40.30	40.20	41.70	35.70	39.40	35.00	31.30	30.70	35.40	38.00	38.40	38.00	32.00
ML-03	39.30	38.90	39.80	41.60	41.30	42.80	36.90	40.40	35.70	31.70	31.10	36.30	39.00	39.60	39.00	32.80
T-01	38.00	38.00	38.90	40.30	40.30	41.80	36.10	39.70	35.20	31.50	30.60	35.40	37.90	38.60	38.00	32.30
T-02-B	36.40	36.40	37.50	39.20	38.60	40.30	35.20	37.60	33.40	31.20	30.30	34.60	37.00	36.80	37.00	31.00
T-02-P	43.30	43.90	44.10	46.90	45.40	47.20	39.80	44.40	39.10	33.90	33.60	39.70	42.80	43.00	42.80	34.90
T-02-C	63.00	61.70	64.30	66.90	66.50	70.00	53.80	63.20	53.20	43.00	42.60	55.80	60.00	60.50	60.70	45.70
T-02-V	54.20	53.90	55.50	58.10	56.90	60.00	47.70	54.90	46.90	38.90	38.50	48.90	52.20	53.30	52.30	41.20
T-03	38.10	38.10	39.40	40.70	40.50	41.90	35.60	39.80	35.20	31.30	30.90	35.90	38.30	38.80	38.10	32.10
T-04	37.40	37.90	38.70	39.80	40.00	41.50	35.30	39.50	35.00	31.30	30.70	35.80	37.80	38.30	37.60	31.90
T-05	34.10	34.40	35.10	36.10	36.50	37.40	32.50	36.30	32.30	29.80	29.00	32.60	34.70	0.00	34.50	30.00
T-06	36.40	36.20	37.40	38.50	38.90	39.60	34.30	38.20	33.70	30.60	30.00	34.40	36.50	0.00	36.60	31.50
T-07	35.50	35.90	36.10	38.30	38.40	39.10	33.90	37.80	33.70	30.60	29.90	34.40	36.20	0.00	36.10	31.30
T-08	31.10	31.60	31.90	33.20	33.50	34.10	30.20	33.60	30.30	28.70	27.90	30.60	32.30	0.00	32.10	28.80

T-09	33.50	33.60	34.20	35.70	35.80	36.20	32.20	35.50	31.90	29.60	28.90	32.20	33.80	0.00	34.00	30.10
PC-02-REF	45.20	44.40	47.10	49.10	48.40	39.30	41.10	37.60	40.20	35.00	34.80	41.90	44.30	45.50	44.80	37.10
A-01-B	35.30	35.40	36.60	38.00	37.80	37.70	33.10	37.60	32.80	30.20	29.60	33.80	35.60	36.00	35.60	30.80
A-01-P	39.50	39.50	40.30	42.20	41.60	41.90	35.90	41.30	35.60	31.90	31.50	36.80	38.80	39.60	38.80	33.10
A-01-C	56.70	56.60	56.20	61.10	60.10	60.10	47.70	57.50	47.40	39.30	39.20	50.50	53.80	54.60	53.90	42.50
A-01-V	50.20	50.60	51.40	54.80	53.80	53.20	42.70	51.20	43.40	36.60	36.80	46.10	47.90	48.70	48.50	38.80
T-01-B-REF	34.70	35.50	36.30	37.50	37.90	37.00	33.00	37.20	32.50	29.80	29.50	33.40	35.80	35.70	35.10	30.10
T-01-P-REF	40.00	40.50	41.40	43.30	42.90	42.80	36.60	41.80	35.80	32.30	32.00	37.00	40.00	40.50	39.70	33.40
T-01-C-REF	57.30	55.90	58.30	61.40	61.10	61.30	48.40	56.90	47.20	39.30	39.80	50.30	53.90	55.70	54.20	42.70
T-01-V-REF	50.70	52.10	52.50	55.30	54.90	54.30	43.10	51.10	43.60	37.40	37.90	46.30	48.80	49.80	49.20	39.50
A-01-B-2	34.60	35.50	56.00	37.80	37.50	39.30	33.00	36.80	32.60	29.60	30.10	33.10	35.80	37.40	35.10	31.10
A-01-P-2	38.00	38.50	40.00	41.40	41.60	41.80	35.60	40.00	35.10	31.40	31.80	35.90	38.70	39.40	38.30	33.30
A-01-C-2	55.40	56.20	58.40	61.30	60.70	61.20	48.30	56.70	47.70	39.30	40.60	49.40	54.30	56.00	54.60	43.10
A-01-V-2	48.90	49.80	51.50	53.90	53.80	54.30	42.40	49.90	43.30	36.70	37.70	44.70	48.10	49.20	48.20	38.80

APÊNDICE B - AVALIAÇÃO VISUAL QUALITATIVA DAS MICROGRAFIAS

Nos materiais do fabricante B, pelo mapeamento o oxigênio (O), silício (Si) e alumínio (Al) localizam-se nos pontos demarcados da micrografia preto e branca da manta líquida ML-02 e nas áreas mais sobressaltadas da tinta T-01 (Quadro B.1). As concentrações de silício e alumínio são próximas, podendo estar relacionadas às cargas especiais adicionadas pelo fabricante, porém não declaradas, como sendo elementos químicos provenientes do caulim ou silicato de alumínio, por exemplo.

O silício e o alumínio na manta ML-02 encontram-se por vezes sobrepostos, em menor quantidade. Enquanto nas tintas T-01, T-03 e T-04 o silício quase não aparece no mapeamento por estar encoberto pelo oxigênio, e o alumínio está mais evidente e bem distribuído na imagem (Quadro B.1), sendo as concentrações dos elementos em ordem decrescente, nesta ordem.

Nas tintas T-03 e T-04, em poucos pontos, porém concentrados e de maiores dimensões, por vezes sobrepostos, estão o magnésio (Mg), de concentração ínfima, e cálcio (Ca). A presença desses elementos químicos pode confirmar a adição como uma carga especial da dolomita conforme descrito na especificação técnica apenas da tinta T-04. No entanto, cita-se a concentração de 30% a 40% deste composto químico, mas os valores detectados pelo EDS são muito inferiores a este limite para ambos os elementos. A tinta T-03 é a única que possui concentração de oxigênio superior a 30% dentre os do fabricante B conforme nota-se na sua distribuição (Quadro B.1).

O cálcio (Ca) e titânio (Ti), em quantidades próximas, estão distribuídos na manta ML-02 de forma uniforme pela imagem, mas o titânio é predominante sobrepondo-o em algumas áreas. Na tinta T-01 o cálcio com percentual desprezível possui apenas poucos pontos detectados de modo que a presença do titânio é prevacente. Nas tintas T-03 e T-04, o titânio distribui-se melhor e sobrepõe em algumas regiões o cálcio, estando mais sobressalente. O cálcio é mais evidente, por isso aparece mais na imagem da tinta T-04 também por possuir maior concentração, dentre todos (Quadro B.1).

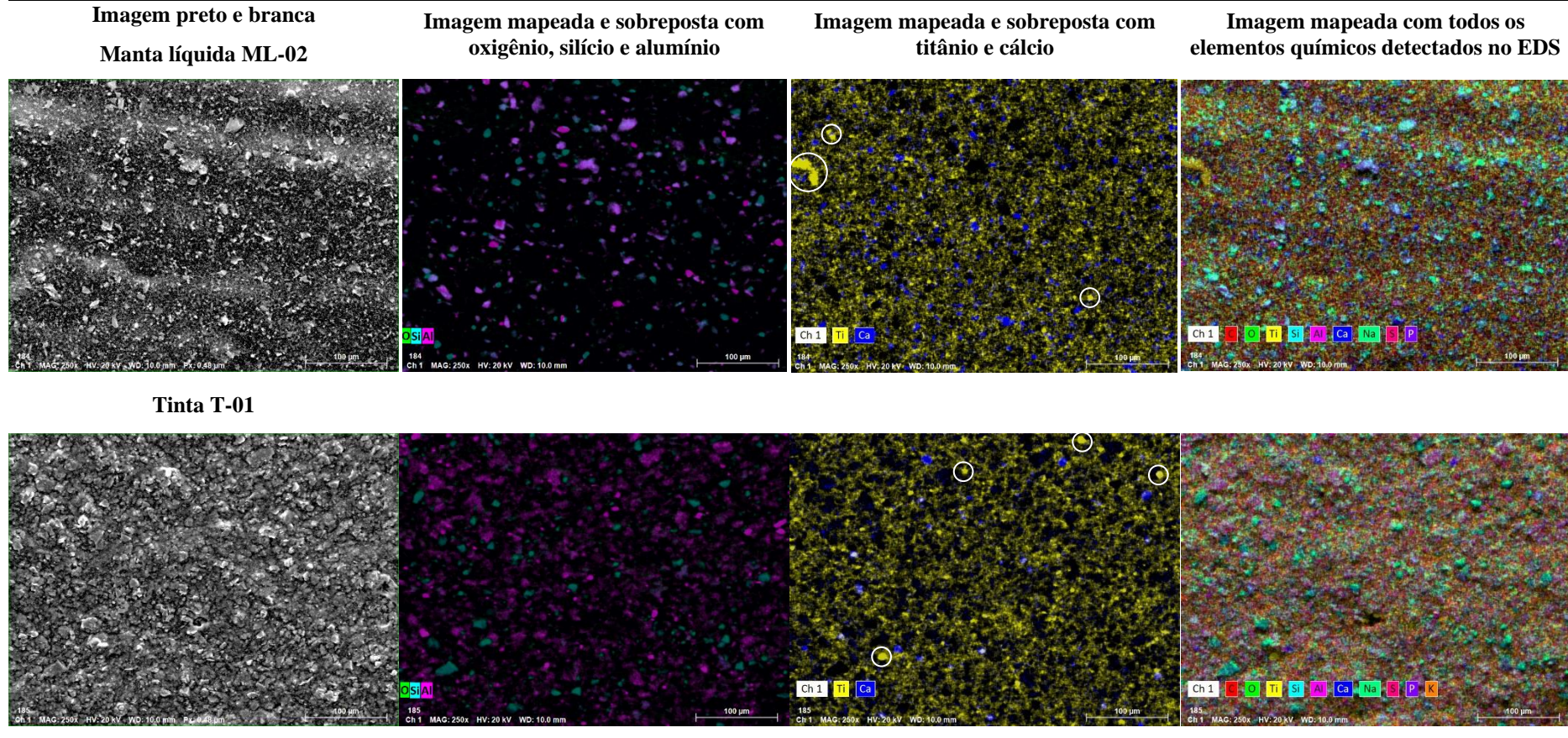
Destaca-se nas áreas em que há maior predominância de sódio (Na), elemento químico presente no dispersante, não há identificação de titânio, estando o sódio mais bem distribuído nas regiões onde foram detectados o cálcio. A concentração de sódio está dentro do limite indicado (0,1%

a 1%) nos materiais do fabricante B, o que é favorável tendo em vista que o excesso de dispersante ou até mesmo solvente pode alterar as características morfológicas dos pigmentos.

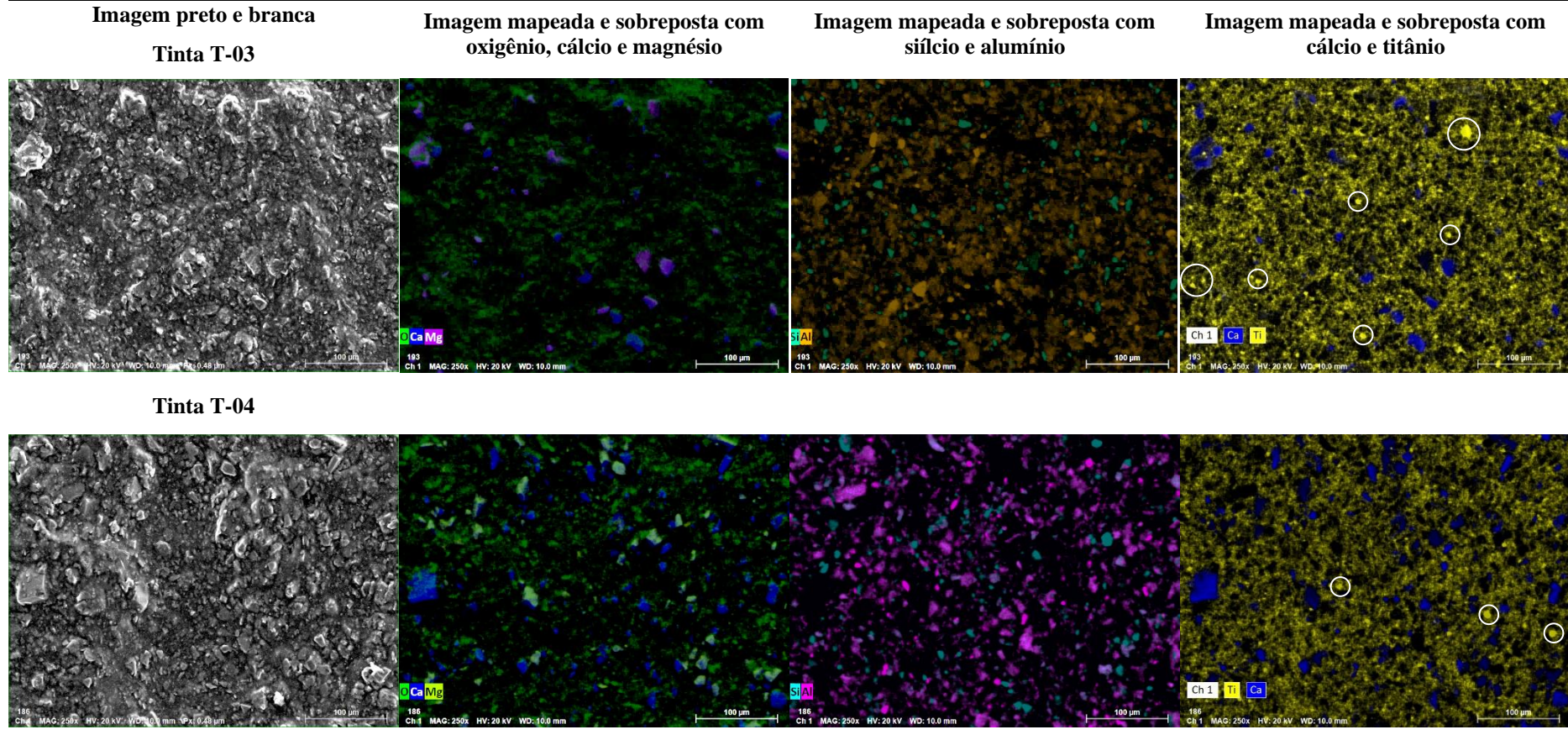
Então, nestas regiões marcadas com círculos brancos referentes aos maiores e mais brilhantes pontos amarelos, do elemento titânio, uma provável explicação é que não houve segregação das suas partículas. Desta forma, estes pontos são identificados como áreas em que há sobreposição de titânio, provavelmente partículas aglomeradas ou agregadas. Portanto, apesar da menor concentração de titânio na tinta T-03 do que na T-04 são encontrados mais pontos (marcados com círculos brancos) sobrepostos (Quadro B.1).

De forma geral, nas imagens com todos os elementos químicos, observa-se algumas regiões amareladas (titânio) e a presença do silício e alumínio mais evidentes em pontos delimitados na manta ML-02 e mais distribuídos em toda a imagem da tinta T-01.

Quadro B.1 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras do fabricante B (Continua)



Quadro B.1 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras do fabricante B (Conclusão)



Fonte: A autora.

Para os materiais do fabricante C, conforme apresentam-se as micrografias preto e branca (Quadro B.2), a manta líquida ML-03 apresenta uma superfície mais lisa, isto é, com menos regiões rugosas do que na tinta T-06 devido à maior proporção de elementos orgânicos, especialmente o carbono (C) na manta líquida ML-03 (Tabela 4.16).

Nota-se a dispersão do oxigênio (O) e cálcio (Ca) nos pontos demarcados, de menores e maiores dimensões, respectivamente, na manta ML-03 e tinta T-06, estando o oxigênio em maior concentração, como observa-se na imagem. Por entre esses elementos, está mais bem distribuído o titânio. São observados mais pontos de aglomeração de titânio (Ti), marcados com círculos brancos, na manta líquida, apesar da maior concentração (quase 2,5 vezes superior) do elemento titânio na tinta. Contudo, a presença do elemento sódio (Na) foi detectado apenas na tinta, o qual pode estar presente no dispersante e assim auxiliar na dispersão das partículas dos pigmentos (Quadro B.2).

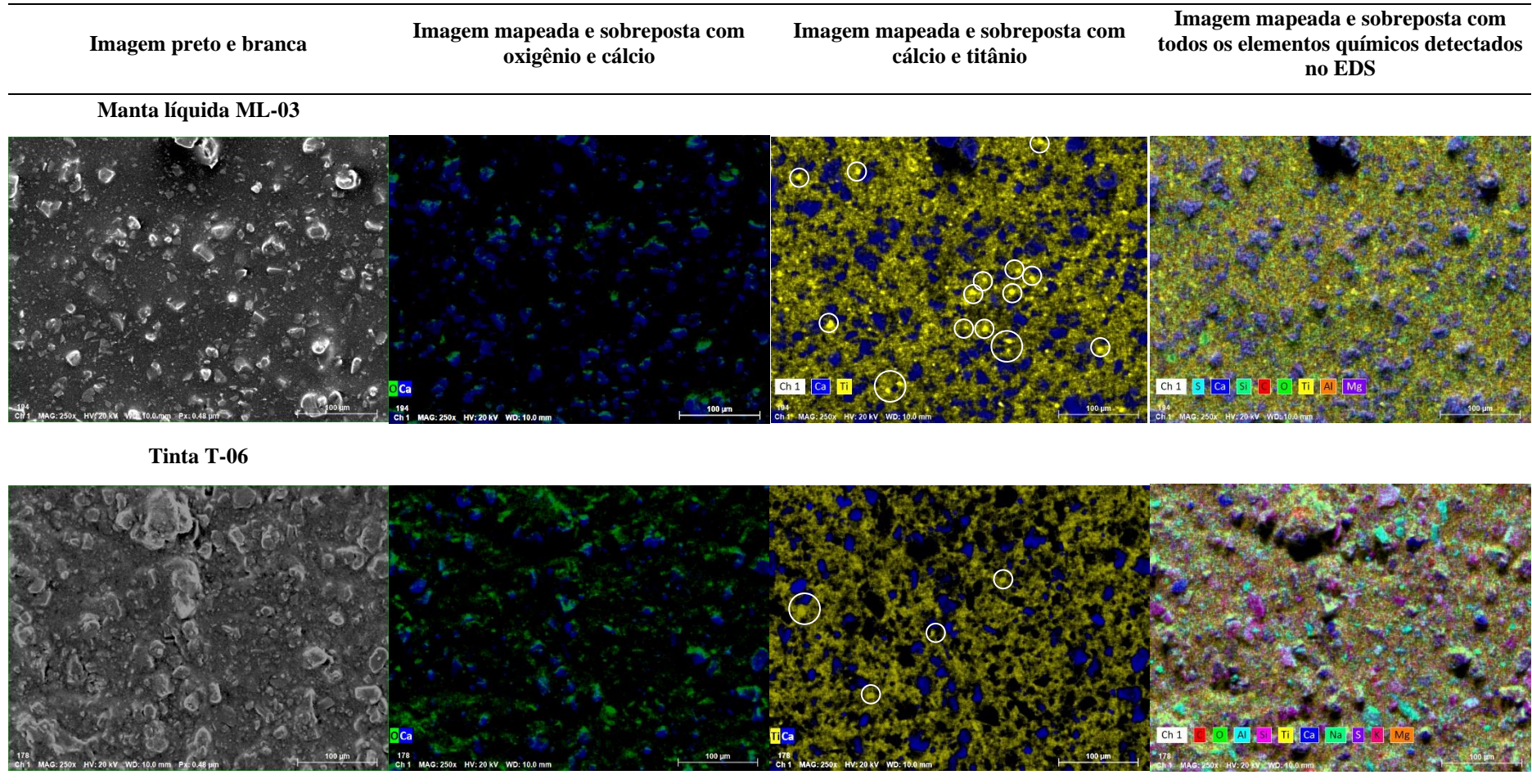
O elemento alumínio (Al) encontra-se encoberto sob os pontos aglomerados de titânio (Ti), o magnésio (Mg) e o cálcio (Ca) estão justapostos enquanto o silício (Si) é observado de forma pontual na superfície lisa da micrografia na manta líquida. Logo, tanto as ínfimas quantidades detectadas para os elementos alumínio e silício como suas localizações não estando-os justapostos ou mesmo próximos talvez indiquem que eles não sejam referentes à adição de caulim ou silicato, por exemplo. Uma probabilidade é que a alumina e a sílica, os óxidos individuais destes elementos, estão presentes em menores quantidades juntos aos pigmentos de dióxido de titânio (TiO₂) comerciais da marca DuPont que foram analisados por Preuss (2016). A adição deles na forma encapsulada ou precipitada aumenta significativamente a área superficial específica dos pigmentos, o que tende a aglomerá-los e dificulta a sua dispersão, o que é coerente com o observado na imagem.

Contudo, o silício (Si) e o alumínio (Al), em maiores proporções na tinta, distribuem-se de forma sobreposta por entre os espaços vazios existentes na distribuição do titânio (Ti). Neste caso, os elementos químicos podem estar relacionados à inclusão de caulim ou silicato de alumínio, as microesferas cerâmicas, na tinta T-06. Ainda por entre outros espaços vazios estão identificados o magnésio (Mg) e cálcio (Ca), em menores quantidades que na manta, também sobrepostos. Por causa disto, em ambos os materiais do fabricante C, indica-se a provável adição da dolomita, as microesferas de vidro, nas suas composições químicas.

Pelas imagens com todos os elementos químicos detectados pelo EDS, a manta ML-03 é a que possui mais regiões amareladas, em razão da evidência do titânio enquanto na tinta T-06 a

imagem apresenta-se mais ciano-roseada por causa do destaque dos elementos silício e alumínio.

Quadro B.2 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras do fabricante C



Fonte: A autora.

As micrografias em preto e branco das tintas branca T-02-B e pérola T-02-P para cobertura do fabricante D mostram superfícies predominantemente lisas com raros e pequenos pontos delimitados (Quadro B.3).

Nas regiões brancas, predominam-se os elementos orgânicos, carbono (C) e oxigênio (O), da tinta e por onde também está distribuído o sódio (Na). Nas áreas mais escuras constata-se a presença do titânio (Ti), referente ao pigmento inorgânico. Então, ele não está espalhado de forma predominante pela resina, a parte orgânica, da tinta. Apesar disso e da maior concentração do elemento, em relação às outras tintas coloridas, há poucos pontos de aglomeração de titânio (marcados com círculos vermelhos) nestas regiões (Quadro B.3).

Na tinta pérola, o titânio distribui-se de forma mais uniforme por toda a imagem mapeada. Mesmo assim, verifica-se mais pontos aglomerados de Ti (em círculos vermelho) do que na branca. O percentual de titânio detectado nas tintas branca e pérola é similar e reduz-se progressivamente à medida em que escurece a tonalidade de cor para as tintas cinza e vermelha (Tabela 4.16).

Além do titânio, nos pequenos pontos em branco demarcados, nas micrografias preta e branca, eles são mapeados e constituídos pelo elemento cálcio (marcados com círculo branco) predominantemente na tinta branca, apesar da concentração ínfima. Na tinta pérola, há sobreposição de pelo menos dois destes elementos (cálcio, silício e alumínio), os quais também estão marcados pelos círculos brancos, sendo os dois últimos com pelo menos 1% ou mais em concentração, as maiores detectadas para estes elementos entre todas as cores de tintas para cobertura do fabricante D (Quadro B.3).

As superfícies das tintas cinza T-02-C e vermelha T-02-V são especialmente mais lisas ainda, as quais possuem mais de 90% da sua composição química com elementos orgânicos, mais especificamente o carbono, e quantidades cada vez menores de elementos inorgânicos, como os pigmentos, dos elementos titânio e ferro, no caso da vermelha (Quadro B.3).

Desta forma, constata-se que o acabamento mais liso da superfície é resultante da maior proporção da resina em relação à concentração de volume dos pigmentos, o que é definido pelo índice PVC (*Pigment Volume Concentration*). Portanto, quanto menor o índice de 20% a 25% de PVC, como o caracterizado nas tintas cinza e vermelha, maior o seu brilho e mais baixo o volume de pigmentos, o que lhes conferem um acabamento brilhante.

Nas áreas brancas das micrografias preto e branca, através do mapeamento, detecta-se a sobreposição de oxigênio nestas regiões. Logo, a distribuição do oxigênio e o carbono, junto ao sódio, não ocorre de forma uniforme em toda a imagem mapeada. Também, nas regiões onde não há carbono e oxigênio, nas tintas cinza e vermelha, foi constatado a presença dos elementos titânio e ferro, este apenas na vermelha (Quadro B.3). Então, nota-se em todas as tintas que os óxidos inorgânicos, referentes aos pigmentos titânio e ferro, apenas na vermelha, não estão juntos apenas aos elementos orgânicos da resina e do sódio (Na), relativo ao dispersante, o que pode atrapalhar a dispersão das partículas.

Na tinta cinza, o alumínio e silício, mesmo em concentrações ínfimas, sobrepõem-se ao cálcio e titânio apenas em dois pontos (delimitados com círculos vermelhos) enquanto os outros círculos brancos marcados referem-se ao titânio (Quadro B.3). Portanto, além da indicação do caulino, inferior a 3% de concentração na formulação apenas para a tinta branca, supõe-se que também nas tintas pérola e cinza, pelo menos, os elementos silício e alumínio referem-se ao caulino. Mesmo com a presença de cálcio (Ca), em percentuais muito baixos, descarta-se a possibilidade da utilização das microesferas de vidro nas tintas tendo em vista que não foi detectado magnésio (Mg), elemento constituinte da dolomita.

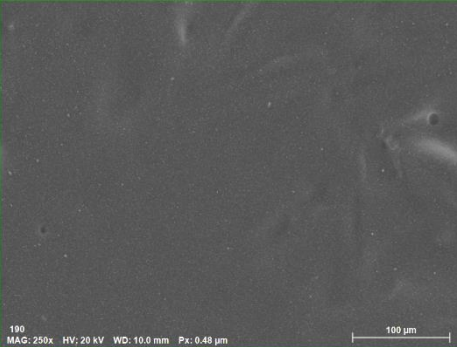
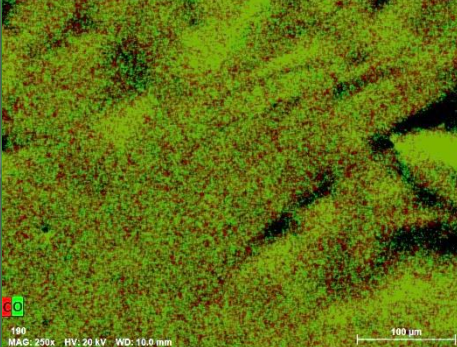
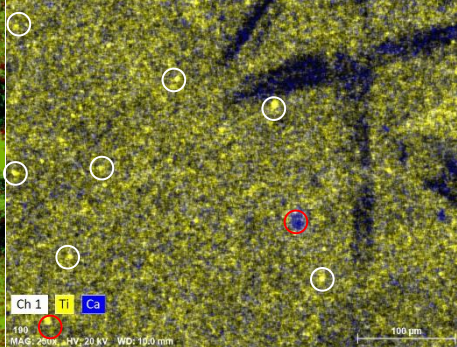
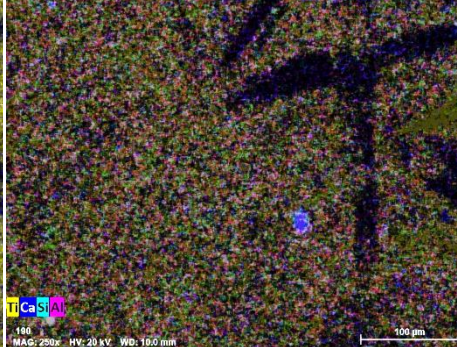
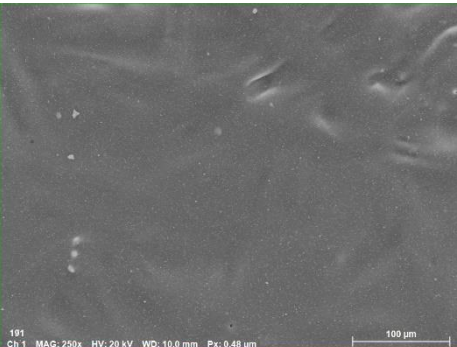
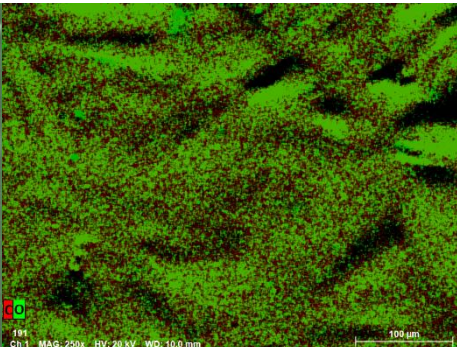
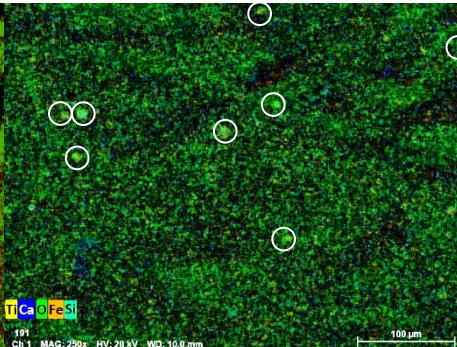
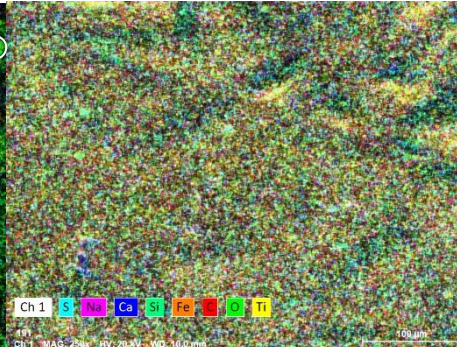
Ao contrário das outras tintas, a vermelha possui maior concentração de ferro (Fe), decorrente da adição do pigmento vermelho de óxido de ferro (Fe_2O_3) do que a de titânio (Ti). Em razão disso, observa-se que os pontos sobrepostos correspondem aos elementos ferro e silício (marcados com círculos brancos) (Quadro B.3). Como não foi detectada a presença de alumínio, então supõe-se que não há adição de caulino na tinta vermelha. Dessa forma, a presença do silício, sozinho, e o próprio ferro (Fe) podem indicar uma fonte de contaminação conforme detectado por Pereira (2010) em nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2) da marca Degussa.

Em outra aparição do elemento químico ferro (Fe), pela imagem geral do mapeamento, observa-se na tinta pérola também alguns poucos pontos laranjas (marcado com círculos brancos), cuja concentração detectada é próxima aos elementos alumínio e silício, porém inferior a 1% (Quadro B.3). Então, supõe-se que o alumínio (Al) possa ter sido parcialmente substituído pelo ferro (Fe) na formação dos minerais argilosos como os silicatos de alumínio hidratados, o caulim, de granulação fina, apenas na matéria-prima da tinta bege.

Quadro B.3 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras de tintas para telhas do fabricante D (Continua)

Imagem preto e branca	Imagem mapeada e sobreposta com carbono e oxigênio	Imagem mapeada e sobreposta com titânio, cálcio, silício e alumínio	Imagem mapeada e sobreposta com todos os elementos químicos detectados no EDS
Tinta T-02-B			
Tinta T-02-P			

Quadro B.3 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras de tintas para telhas do fabricante D (**Conclusão**)

Imagem preto e branca	Imagem mapeada e sobreposta com carbono e oxigênio	Imagem mapeada e sobreposta com titânio e cálcio	Imagem mapeada e sobreposta com titânio, cálcio, silício e alumínio
Tinta T-02-C			
 <p>190 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm Px: 0.48 µm</p>	 <p>190 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm</p>	 <p>190 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm</p>	 <p>190 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm</p>
Imagem mapeada e sobreposta com titânio, cálcio, oxigênio, ferro e silício			Imagem mapeada e sobreposta com todos os elementos químicos detectados no EDS
Tinta T-02-V			
 <p>191 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm Px: 0.48 µm</p>	 <p>191 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm</p>	 <p>191 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm</p>	 <p>191 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm</p>

Fonte: A autora.

A tinta branca de referência T-01-B-REF do fabricante D apresenta uma superfície predominantemente lisa e com alguns pequenos pontos espalhados na sua micrografia preta e branca. Sobre estes pontos não há a identificação dos elementos titânio (Ti) e carbono (C), os quais distribuem-se mais uniforme na imagem, no entanto, verifica-se a sobreposição de oxigênio (O) no mapeamento sobre eles. Então além do elemento orgânico, oxigênio, são identificados os elementos potássio (K), alumínio (Al) e silício (Si) sobrepostos em regiões maiores e os menores pontos são compostos por cálcio (Ca), magnésio (Mg) e silício (Si) (Quadro B.4). Então, os elementos alumínio (Al) e silício (Si) sobrepostos são relacionados provavelmente ao caulino conforme indicado pelo fabricante D.

Para complementar a análise das micrografias das tintas, após a adição do pó aditivo refletivo, estão apresentados os dados expressos em porcentagem (%) dos óxidos e elementos químicos (Tabela B.1) realizados por espectrometria de fluorescência de Raio-X no material pulverulento.

Tabela B.1 – Porcentagem (%) dos elementos químicos e óxidos presentes no pó aditivo refletivo por fluorescência de raio-X

Elemento	100% m/m	Óxidos	100% m/m
Al	12.717	Al₂O₃	15.705
Si	44.154	SiO₂	55.404
K	3.794	K₂O	2.190
Ca	7.396	CaO	4.748
Ti	31.149	TiO₂	21.548
Fe	0.476	Fe₂O₃	0.251
Zr	0.314	ZrO₂	0.153

Fonte: A autora.

O pó possui quase 93% da sua composição com os óxidos de silício (SiO₂), titânio (TiO₂) e alumínio (Al₂O₃) e em menor proporção de cálcio (CaO), a cal. Então, caso ocorra a união da alumina e da sílica, os óxidos individuais, resulta em alumino silicato (Al₂SiO₅) que se compõe nas microesferas cerâmicas e fazem parte em mais de 70% da constituição do pó refletivo. O óxido de zircônio (0,153%) pode estar associado ao dióxido de titânio (TiO₂), o qual foi constatado sua presença na técnica por fluorescência de raios-X em Werle (2015) na proporção entre 0,1% e 0,2% junto aos pigmentos de estrutura cristalina anastásio. Ela conclui que este óxido residual possa estar adsorvido na superfície do pigmento de TiO₂ ou foi adicionado para permitir a estabilidade nas dimensões das partículas.

Logo, pela análise de EDS, após a adição do pó aditivo, composto por diversos óxidos, foi observado um aumento de oxigênio (O) e diminuição de carbono (C), apesar de sutis, nas tintas aditivadas. Também foi irrisório o aumento dos elementos químicos relativos, como silício (Si), titânio (Ti) e alumínio (Al), presentes em maiores porcentagens e os de menores como o potássio (K) e cálcio (Ca) no pó refletivo (Tabela 4.16). De forma alguma, tampouco o ferro (Fe) como o zircônio (Zr) foi identificado na tinta de referência mesmo após a adição do pó, que contém os elementos em quantidades ínfimas (Tabela B.1).

Então, a quantidade presente no pó refletivo do elemento titânio (superior a 30%) que foi adicionado à tinta branca de referência, a qual já apresenta elevado teor quantificado em quase 20% no EDS, não evidenciou nenhum aumento substancial do elemento às tintas aditivadas. Portanto, a dosagem de 25% em volume do pó aditivo em relação às tintas convencionais não foi suficiente para o aumento na quantificação dos elementos químicos.

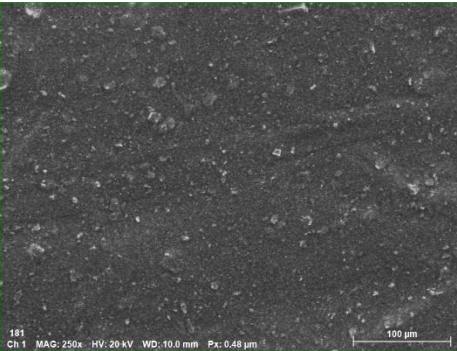
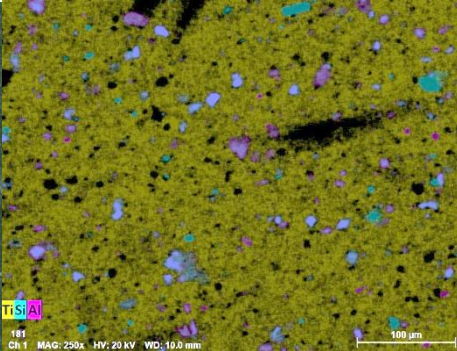
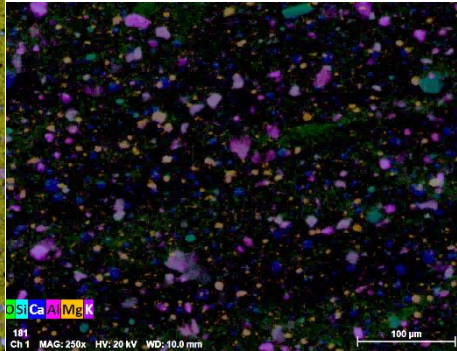
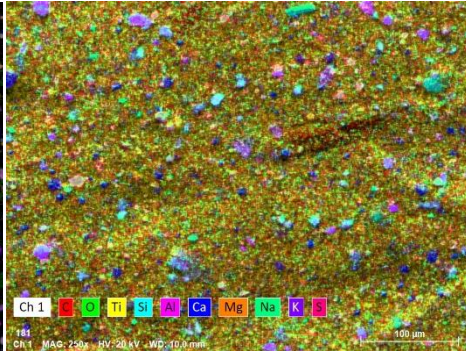
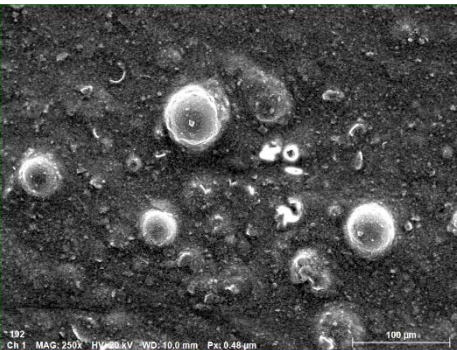
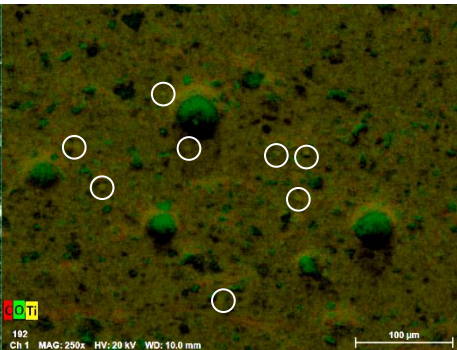
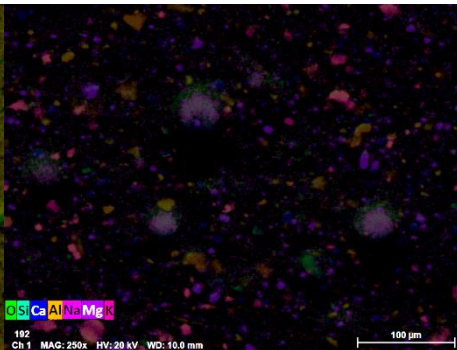
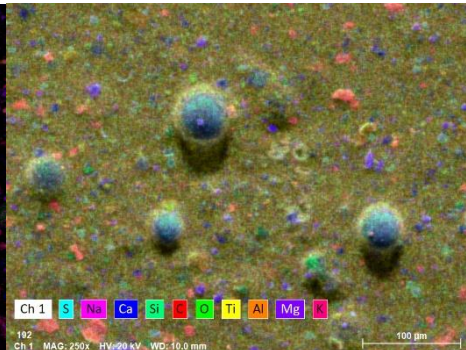
Nas micrografias das tintas brancas aditivadas conforme se altera a aplicação de demãos observa-se cada vez mais a presença de grandes “bolhas” espalhadas nas imagens. A distribuição do carbono, oxigênio e titânio mantém o padrão descrito na tinta branca de referência. As menores regiões demarcadas são constituídas pelos elementos magnésio (Mg) e cálcio (Ca) sobrepostos, nos pontos médios estão o potássio (K) e o alumínio (Al), em maior proporção, e nas “bolhas” são mapeados os elementos cálcio (Ca) e silício (Si), de aumentos graduais nas suas concentrações, os quais estão envolvidos pelo oxigênio (O). Também se detecta nesta região o elemento sódio (Na), cuja quantitativo também é aumentado progressivamente (Quadro B.4).

Após a adição do pó refletivo, o alumínio encontra-se em destaque e a localização do silício na superfície fica evidenciada, tanto pela mudança de forma, antes pontual, e a sua distribuição fica concentrada nessas regiões de “bolhas”. Por entre elas, o pigmento de titânio apresenta-se distribuído mais uniforme na tinta de referência e nas aditivadas. Contudo, apenas nas aditivadas, observa-se pontos de sobreposição do titânio (marcados com círculos brancos) tendo em vista que o elemento sódio, pertencente ao dispersante, está concentrado na região destas “bolhas” onde não há titânio, ao passo que o aumento na concentração de titânio também foi irrisório (Quadro B.4).

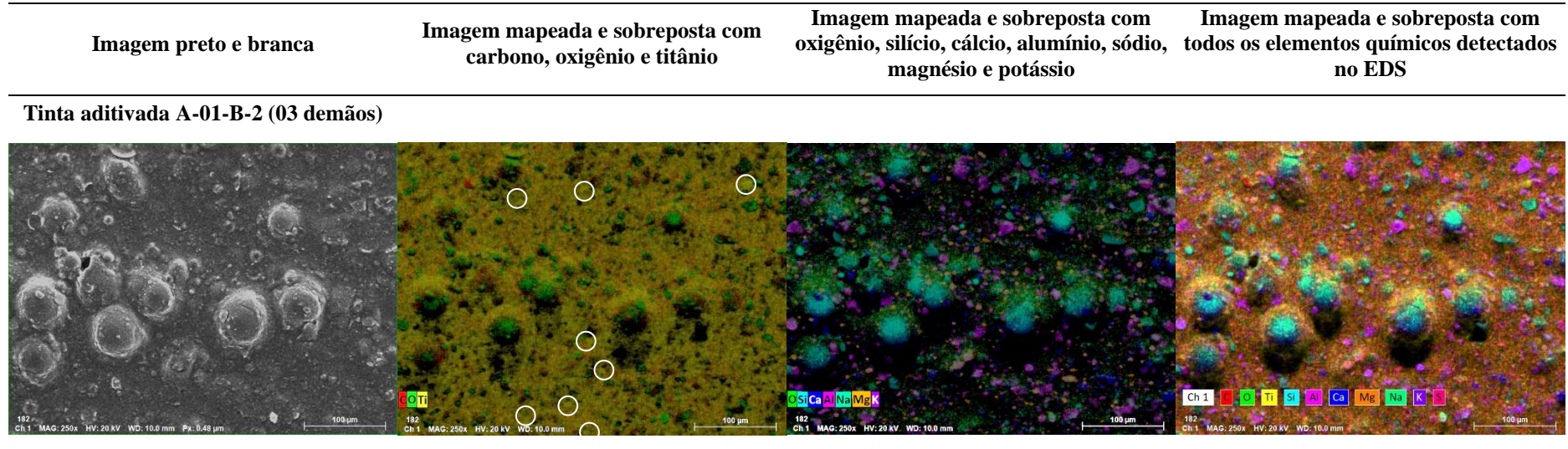
Além disto, verifica-se que o alumínio e silício deixam de estar sobrepostos como na tinta de referência na mesma região e não se sobrepõem mais nas tintas aditivadas (Quadro B.4). Então, a adição destes elementos químicos talvez ocorram na forma de seus óxidos individuais,

presentes no pó aditivo, e não se juntam formando alumino silicato (microesferas cerâmicas) ou caulino ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) como presente na tinta de referência. De forma geral, foi verificada uma modificação morfológica e de distribuição dos elementos químicos, como no silício (Si), por exemplo, inclusive em diferentes aplicações de demãos.

Quadro B.4 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras de tinta branca do fabricante D, antes e após a adição do pó refletivo (**Continua**)

Imagem preto e branca	Imagem mapeada e sobreposta com titânio, silício e alumínio	Imagem mapeada e sobreposta com oxigênio, silício, cálcio, alumínio, magnésio e potássio	Imagem mapeada e sobreposta com todos os elementos químicos detectados no EDS
Tinta T-01-B-REF			
 <p>181 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm Px: 0.48 µm 100 µm</p>	 <p>181 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm 100 µm</p>	 <p>181 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm 100 µm</p>	 <p>181 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm 100 µm</p>
Tinta aditivada A-01-B (02 demãos)			
 <p>192 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm Px: 0.48 µm 100 µm</p>	 <p>192 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm 100 µm</p>	 <p>192 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm 100 µm</p>	 <p>192 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm 100 µm</p>

Quadro B.4 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras de tinta branca do fabricante D, antes e após a adição do pó refletivo (**Conclusão**)



Fonte: A autora.

Este conjunto de micrografias dos materiais referentes à manta líquida ML-01 e tintas T-08 e T-09 de fabricantes diferentes foi analisado em razão das suas maiores quantidades de cálcio na superfície.

Pelas micrografias coloridas da manta líquida ML-01 (Quadro B.5) observa-se nas regiões, onde há maior concentração de oxigênio são as mais rugosas com a presença dos elementos cálcio (Ca) e silício (Si) separados. O titânio (Ti) está distribuído homogeneamente, por entre o cálcio, nas regiões onde estão os elementos orgânicos, carbono (C) e oxigênio (O).

Em outras áreas rugosas de menores dimensões da manta líquida ML-01 estão presentes o magnésio (Mg), que por vezes mesmo em menor quantidade sobrepõe o cálcio (Ca), o que pode indicar a presença das microesferas de vidro (dolomita), e o alumínio (Al) com o silício (Si) indicar caulim ou silicato de alumínio (Quadro B.5). Como a diferença percentual entre magnésio (1,48%) e cálcio (16,69%) é muito grande, a presença deste elemento pode indicar a inclusão ainda de carbonato de cálcio (CaCO_3) ou o próprio óxido de cálcio (CaO).

Nas especificações técnicas da tinta T-08 indica-se que possui a menor quantidade de resina, do tipo estireno acrílica, dentre todos os materiais, o que se confirma pelo baixo percentual de carbono (C), o menor em 26,09% dentre todas as amostras analisadas. Contudo, pelo EDS, detectou-se agora a maior em quase 40% de outro elemento orgânico, o oxigênio, proveniente também do carbonato de cálcio (CaCO_3), um sal inorgânico, do silicato de alumínio (Al_2SiO_5), as microesferas cerâmicas, e do óxido de titânio (TiO_2), os quais estão especificados pelo seu fabricante.

Em locais da micrografia colorida da tinta T-08 onde foi identificado a sobreposição de carbono (C) e oxigênio (O), o titânio (Ti) distribui-se mais homogeneamente em relação ao cálcio (Ca), que em pequenos pontos encobre o magnésio (Mg) (Quadro B.5). Esta constatação pode indicar que além da presença do cálcio (Ca) proveniente do carbonato, inclusive detectado em concentração acima da indicada (21%), ele possa estar incorporado em menor quantidade ao magnésio (Mg), o que forma a dolomita, as microesferas de vidro.

De forma geral, na micrografia da tinta T-08, o titânio (Ti) encontra-se em evidência e bem distribuído com poucos pontos aglomerados (marcados com círculos brancos) assim como o cálcio (Ca) por toda a imagem. Por entre estes elementos, as maiores regiões vazias são identificadas com os elementos silício (Si) e alumínio (Al), que por vezes se sobrepõem, isto é,

são os alumino silicatos indicados pelo fabricante. A presença do oxigênio (O) também está evidente em pequenos pontos verdes que aparecem de forma concentrada (Quadro B.5).

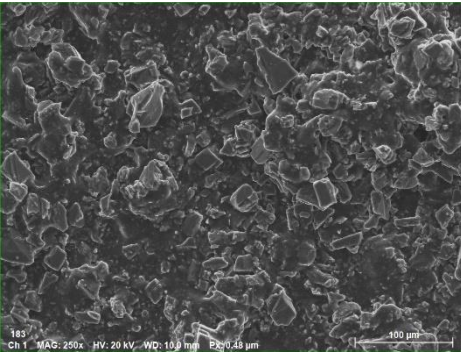
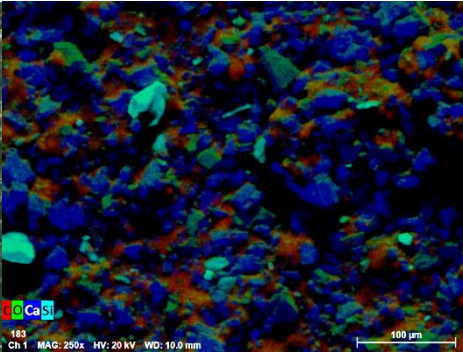
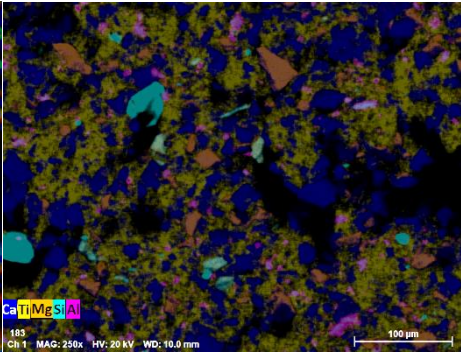
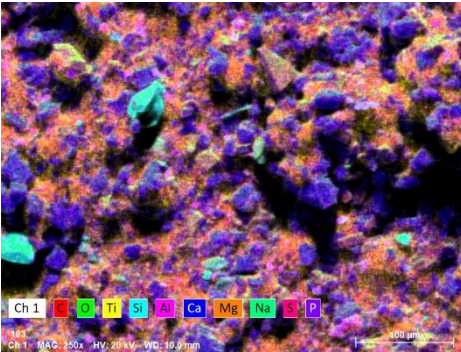
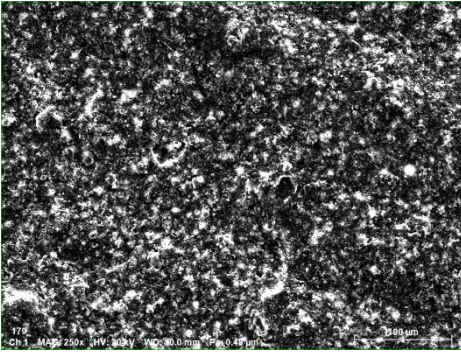
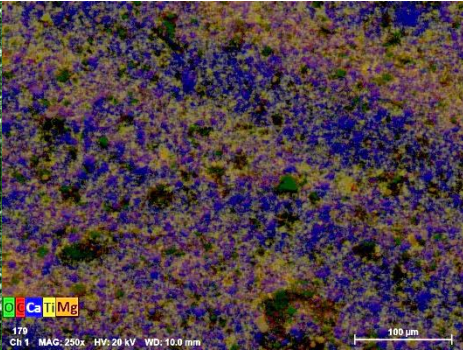
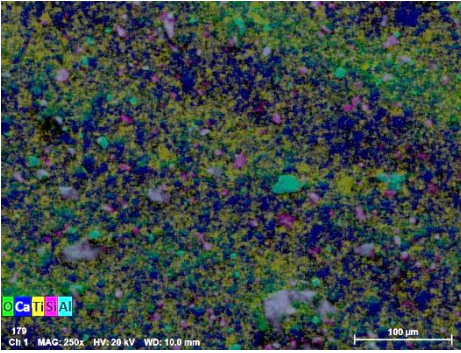
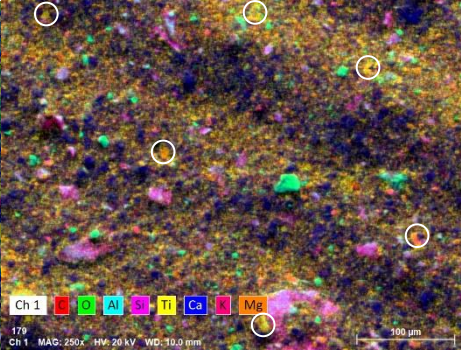
Apesar das maiores concentrações do cálcio, em relação ao titânio, identificadas na manta líquida ML-01 e tinta T-08, a sua forma de distribuição é muito distinta. Na manta o cálcio apresenta-se concentrado em poucos pontos, porém em maiores dimensões, enquanto na tinta está mais uniformemente distribuído (Quadro B.5).

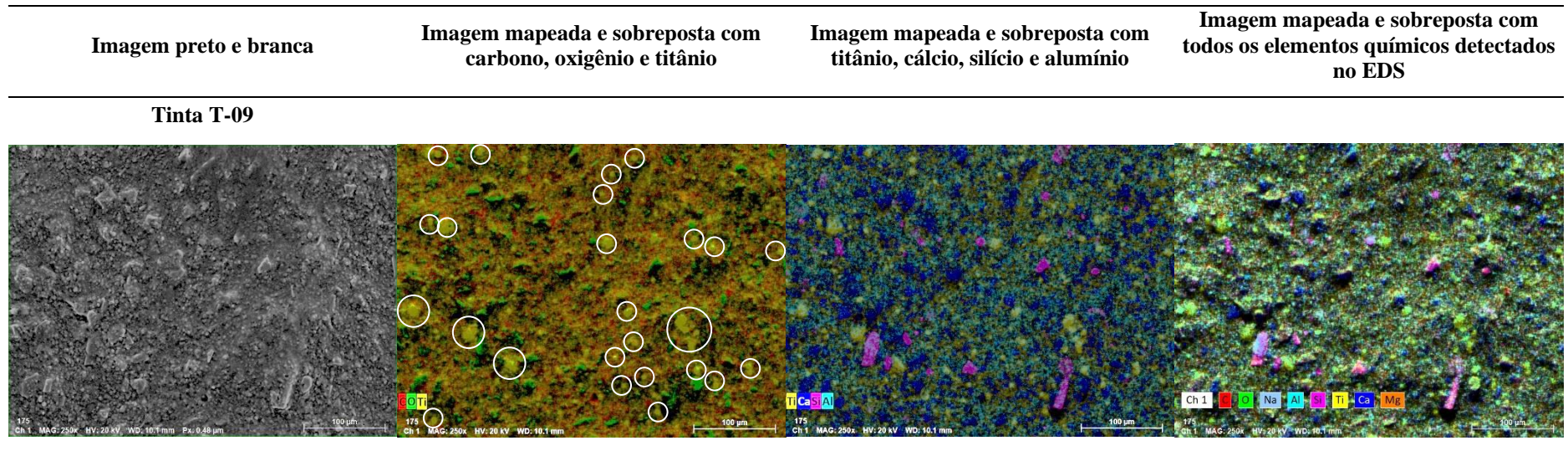
Na micrografia da tinta T-09, por entre os elementos titânio (Ti) e cálcio (Ca), nos espaços vazios, está constatada a presença do silício (Si). Ele sobrepõem-se ao alumínio (Al), assim como na tinta T-08, contudo não exclusivamente, estando junto ao titânio (Ti) também. Então, além da sua localização, a sua menor concentração, dentre todos, pode indicar que ele é um elemento residual provavelmente incorporado junto aos dióxidos de silício (SiO_2) ou de titânio (TiO_2), os quais estão especificados pelo fabricante como matérias-primas. Bem como na tinta T-08, o magnésio (Mg) encontra-se sobreposto sob o cálcio, também presente em ínfima concentração (inferior a 1%), e não se localiza em evidência na micrografia geral (Quadro B.5).

Além disso, os pontos aglomerados de titânio (marcados com círculos brancos) não são encontrados onde há sobreposição de carbono e oxigênio, que estão junto ao sódio (Na). Então, indica-se que este seja o elemento químico também referente ao dispersante, o qual então não auxiliou para a desagregação das partículas do pigmento de titânio (Quadro B.5).

Diferentemente dos outros dois materiais, na tinta T-09 a concentração de titânio (16,04%) é maior do que a de cálcio (10,46%), o que é evidenciado na micrografia pela maior quantidade de pontos amarelos em relação aos azuis, mas também se aumenta os pontos de aglomerações dessas partículas (marcados com círculos brancos). O silício (rosa) está em evidência em alguns pontos marcados e o alumínio (ciano) está mais espalhado (Quadro B.5).

Quadro B.5 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras com maiores percentuais de cálcio (**Continua**)

Imagem preto e branca	Imagem mapeada e sobreposta com carbono, oxigênio, cálcio e silício	Imagem mapeada e sobreposta com cálcio, titânio, magnésio, silício e alumínio	Imagem mapeada e sobreposta com todos os elementos químicos detectados no EDS
Manta líquida ML-01			
 <p>185 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm E2: 0.48 µm</p>	 <p>185 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm</p>	 <p>185 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm</p>	 <p>185 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm</p>
Tinta T-08			
 <p>172 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm E2: 0.48 µm</p>	 <p>170 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm</p>	 <p>170 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm</p>	 <p>170 Ch 1 MAG: 250x HV: 20 kV WD: 10.0 mm</p>

Quadro B.5 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras com maiores percentuais de cálcio (**Conclusão**)

Fonte: A autora.

Os últimos materiais de fabricantes diferentes, as micrografias das tintas T-05 e T-07 foram analisadas de forma comparativa, porque possuem as maiores porcentagens de silício detectados pelo EDS junto aos materiais do fabricante B.

A tinta T-05 apresenta-se a sua micrografia preto e branca rugosa e alguns “furos” pretos (marcados com círculos brancos) em que não foi detectado por EDS nenhum elemento químico. Nas partes brancas foram identificados as maiores concentrações do elemento oxigênio (O), o qual junto ao carbono (C) não estão bem distribuídos por toda a imagem. Na tinta T-07, apesar da concentração um pouco menor dos elementos orgânicos, carbono e oxigênio, eles estão mais bem distribuídos na micrografia (Quadro B.6).

Ainda na tinta T-05, o elemento inorgânico silício (Si) é o que possui a maior proporção (15,93%) dentre todos os materiais avaliados e forma uma estrutura em teia, a qual nos seus espaços vazios são identificados os pontos de titânio, em menor quantidade (Quadro B.6). Então, em razão da maior quantidade do elemento, identifica-se o silício (Si), provável o dióxido de silício (SiO_2) como a carga especial, a qual foi adicionada em 30% a 40% pelo fabricante sem declará-la qual é enquanto o titânio (Ti) refere-se ao pigmento de dióxido de titânio (TiO_2), o qual está em menor concentração conforme a indicação pelo fabricante.

Na tinta T-05 pela sua micrografia geral, o silício (em rosa) não está tão evidente na superfície sendo inclusive encoberto por elementos de mínimas concentrações (inferior a 1%) como cálcio (Ca), em azul, alumínio (Al) em ciano e enxofre (S) em roxo (Quadro B.6).

Na tinta T-07, assim como na retícula da tinta T-05, o titânio, agora em maior porcentagem (10,48%), forma uma teia, com alguns pontos aglomerados (marcados em círculos brancos), onde não foi detectado a presença do sódio (Na) (Quadro B.6). Portanto, este elemento químico, que se apresenta em maior concentração (0,55%) dentre todos os materiais analisados, proveniente do dispersante por não estar presente junto ao titânio, não auxiliou na dispersão das suas partículas.

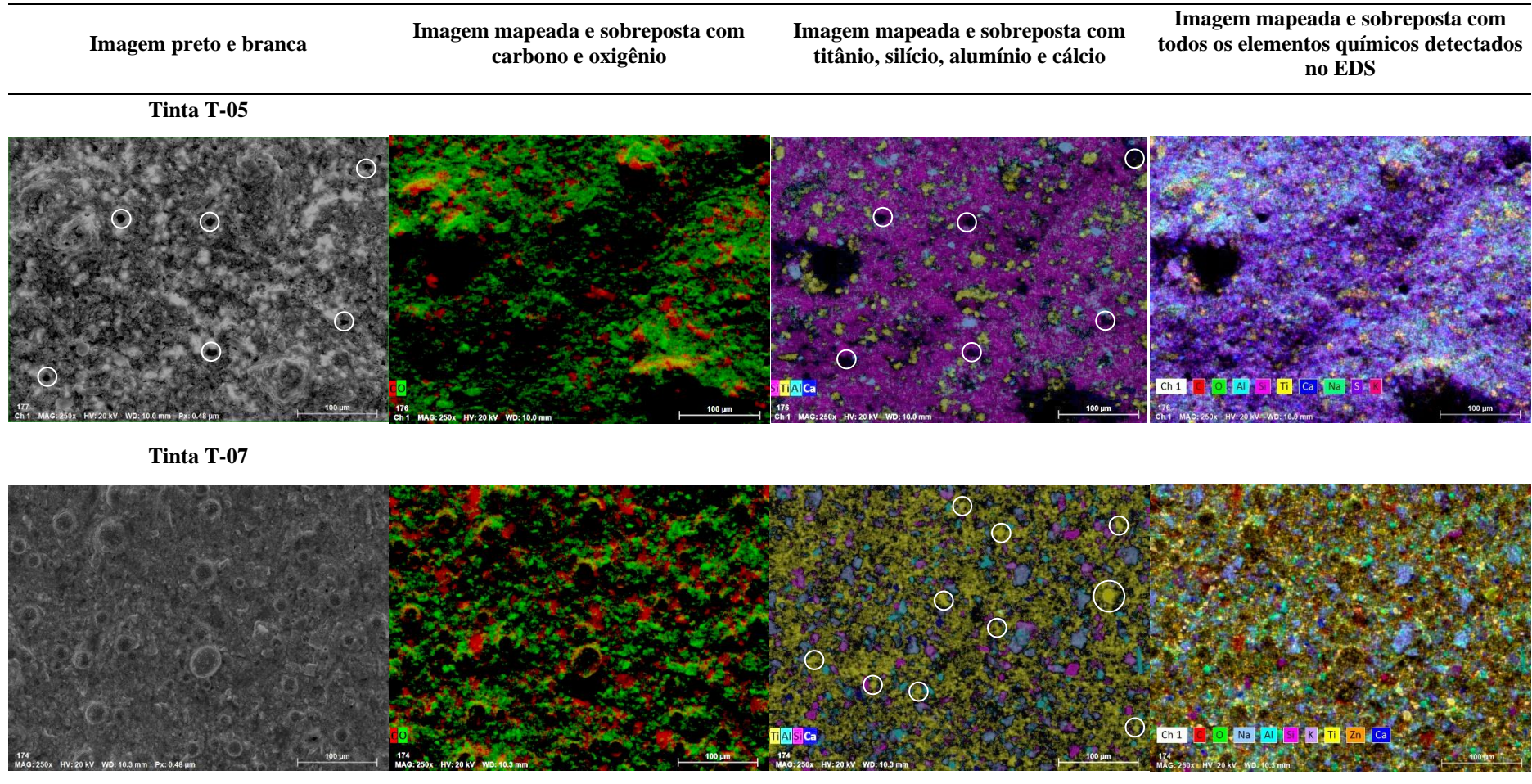
Nas superfícies ao redor do titânio (Ti), encontra-se o silício (Si) que se sobrepõem por vezes, junto ao alumínio (Al) (Quadro B.6). Além de possuírem concentrações próximas, e pelas suas localizações, são prováveis de corresponderem ao caulim ou mesmo o silicato de alumínio, as microesferas cerâmicas. A concentração de titânio (Ti), apesar de elevada, ainda não é próxima ao indicado pelo fabricante, que afirma que o pigmento está presente em duas formas diferentes, cuja concentração poderia alcançar até 35%. O zinco, detectado uma única vez pelo EDS, dentre

todos os materiais, pode ser relativo ao óxido de zinco (ZnO), cuja porcentagem alcança quase 3%.

Então, pela micrografia geral da tinta T-07 além da evidência do titânio (em amarelo) por toda a imagem, observa-se também alguns pontos de alumínio (Al) e silício (Si), sobrepostos às vezes, como dito, e pequenos pontos concentrados com oxigênio (O) e cálcio (Ca), em pouca concentração, porém evidente (em azul marinho) na superfície (Quadro B.6).

Além do cálcio (Ca) estar em pouca concentração, não foi detectado tampouco o magnésio (Mg), o que se exclui a possibilidade da inclusão de microesferas de vidro em ambas as tintas.

Quadro B.6 – Imagens microscópicas (ampliação 250x) das amostras com maiores percentuais de silício



Fonte: A autora

