DISSERTAÇÃO DE MESTRADO | ANA CAROLINA HIDALGO ARAUJO
ORIENTADORA: PROFA. DRA. KELEN ALMEIDA DORNELLES | 2022

ABSORTÂNCIA SOLAR E O ENVELHECIMENTO NATURAL DE TELHAS EXPOSTAS AO TEMPO

Ana Carolina Hidalgo Araujo

Absortância solar e o envelhecimento natural de telhas expostas ao tempo

(versão corrigida)

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:

Profª. Dra. Kelen Almeida Dornelles

São Carlos

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, 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)

H632a

Hidalgo Araujo, Ana Carolina
Absortância solar e o envelhecimento natural de telhas expostas ao tempo / Ana Carolina Hidalgo Araujo; orientadora Kelen Almeida Dornelles. -- São Carlos, 2022.
208 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2022.

1. Degradação natural. 2. Desempenho térmico. 3. Absortância solar. 4. Telhas. I. Almeida Dornelles, Kelen, 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: **Ana Carolina Hidalgo Araújo**

Título da dissertação: "Absortância solar e o envelhecimento natural de telhas expostas ao tempo".

Data da defesa: **12/05/2022**

Orientadora: Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Kelen Dornelles **Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles** (IAU/USP)	**Não votante**
p/ Kelen Dornelles **Prof. Dr. Victor Figueiredo Roriz** (IAU/USP)	APROVADA
p/ Kelen Dornelles **Prof. Dr. Deivis Luis Marinoski** (UFSC)	APROVADA
p/ Kelen Dornelles **Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger** (UTFPR)	APROVADA

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Prof. Dr. Tomás Antonio Moreira.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre guiar e iluminar o meu caminho.

À minha família, principalmente aos meus pais, pelo apoio, amor incondicional e bom humor que marcaram todas as etapas da minha vida. Ao Thiago e toda sua família, por sempre celebrarem as minhas vitórias como se fossem suas.

Aos meus amigos, por todo o suporte, alegria e leveza ao longo desta jornada.

À Profa. Kelen Almeida Dornelles, pelo apoio e orientação ao longo do desenvolvimento desde trabalho.

Aos funcionários do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, principalmente ao José Renato Dibo, Odinei Canevarollo e Pedro Mattia, que desde minha graduação sempre me ajudaram no que foi necessário e tornaram mais divertidas as etapas técnicas da minha formação.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil), pela bolsa concedida ao longo do Mestrado (Código de Financiamento 001).

"Caminante, son tus huellas

el camino y nada más;

Caminante, no hay camino,

se hace camino al andar.

Al andar se hace el camino,

y al volver la vista atrás

se ve la senda que nunca

se ha de volver a pisar.

Caminante no hay camino

sino estelas en la mar"

(Antonio Machado, *Proverbios y Cantares XXIX*, 1875-1939)

RESUMO

Para amenizar os efeitos decorrentes do aumento das temperaturas superficiais no ambiente construído, pode-se adotar a utilização de revestimentos externos com baixa absortância solar combinada com alta emitância térmica, denominados frios ou refletivos. No entanto, a exposição destes materiais às intempéries pode implicar em modificações nas suas propriedades ópticas iniciais (absortância e emitância), alterando o desempenho térmico das mesmas. Esta avaliação relativa ao impacto da absortância solar em decorrência da degradação natural dos materiais foi recentemente incluída na norma de desempenho NBR 15575-1 (ABNT, 2021). O objetivo principal deste trabalho é avaliar os impactos deste envelhecimento natural sobre as características de absortância solar para telhas cerâmicas (esmaltadas ou não-esmaltadas) e de concreto, ao longo de dois anos. Com isso, parte da lacuna existente em relação à falta de dados confiáveis referente à absortância solar de telhas cerâmicas e de concreto que considerem as alterações decorrentes de seus envelhecimentos naturais puderam ser preenchidas. Complementarmente, também foram avaliadas as variações das emitâncias térmicas e parâmetros de cor, além do monitoramento contínuo das temperaturas superficiais das amostras ao longo dos 24 meses de exposição ao tempo. Para viabilizar estes objetivos, uma das etapas desta dissertação consistiu no desenvolvimento de uma estação de envelhecimento baseada em normas internacionais, projetada e construída especialmente para a exposição das telhas selecionadas neste trabalho. Como diferenciais desta mesa, destaca-se seu sistema de operação, que é independente energeticamente (alimentado por um painel solar de 12V) e sua estrutura, a qual permite além da exposição das amostras, o monitoramento contínuo das temperaturas das superfícies das telhas. A partir desta exposição, verificou-se que a telha com maior aumento percentual de absortância solar, após 2 anos de degradação natural, foi a amostra com menor absortância solar inicial (telha fria). No entanto, mesmo sendo a telha com maior diminuição de sua capacidade refletiva, esta continuou apresentando uma baixa temperatura superficial ao final do período analisado, sendo que suas amplitudes térmicas e temperaturas máximas também foram os menores, quando comparado com todo o grupo analisado. Além disso, também foi verificada a influência do clima local sobre a degradação das telhas, cujas absortâncias solares variam diretamente conforme o acúmulo de poeira, nos períodos mais secos, e limpeza natural pela precipitação, nos períodos mais chuvosos.

Palavras-chave: degradação natural, envelhecimento, absortância solar, telhas

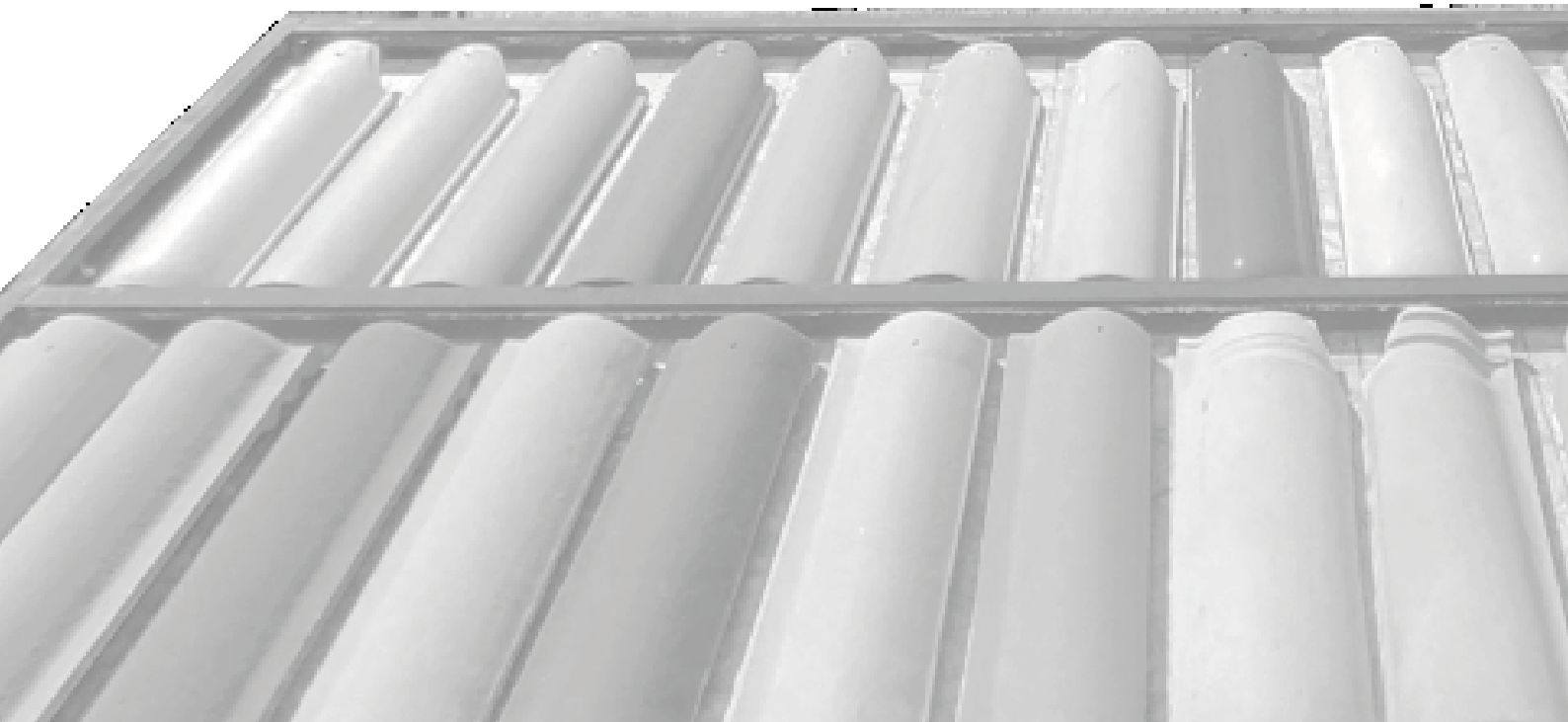
ABSTRACT

To mitigate the effects resulted by the increase of urban heating, the use of materials with low solar absortance combined with high thermal emittance can be use. However, the weathering of these materials may imply changes in their initial optical properties (absortance and emittance), affecting their thermal performance. This evaluation of the impact of solar absortance due to the natural degradation of materials was recently included in the Brazilian standard NBR 15575-1 (ABNT, 2021). The main objective of this work was to evaluate the impacts of this natural aging over the characteristics of solar absortance for ceramic tiles (glazed or unglazed) and concrete, during twenty four months. Therefore, part of the existing gap related to the lack of reliable data on the solar absortance of ceramic and concrete tiles that consider the changes resulting from their natural aging, specifically for the Brazilian scenario , could be filled. In addition, variations in thermal emittances and color parameters were also evaluated, besides to the continuous monitoring of surface temperatures of the samples over the 24 months of weathering. In order to achieve these objectives, one of the stages of this dissertation consisted in the development of an aging rack based on international standards, designed and built especially for the exposure of the tiles selected in this work. As differentials of this aging rack, its operation system stands out, which is energy independent (powered by a 12V solar panel) and its structure, which allows, besides to the exposure of the samples, the continuous monitoring of the temperatures of the surfaces of the tiles. From this exposure, it was found that the tile with the highest percentage increase in solar absortance, after 24 month of natural degradation, was the sample with the lowest initial solar absortance (cold tile). However, even being the tile with the greatest decrease in its reflective capacity, it continued to present a low surface temperature at the end of the analyzed period, and both its thermal amplitudes and maximum temperatures were also the lowest, when compared to the entire analyzed group. In addition, the influence of the local climate on the degradation of the tiles was also verified. Their solar absortance varies directly according to the accumulation of dust, in the driest periods, and natural cleaning by precipitation, in the rainy periods.

Keywords: weathering, natural aging, solar absortance, roof



Telhas expostas na Estação de Envelhecimento desenvolvida nesta pesquisa.



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVAS 15

1.2 OBJETIVOS 17

1.2.1 OBJETIVO GERAL 17

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 18

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1 EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS FRIOS NAS SUPERFÍCIES URBANA 19

2.1.1 NO MICROCLIMA URBANO 19

2.1.2 NAS EDIFICAÇÕES 24

2.1.3 NAS COBERTURAS 26

2.2 ENVELHECIMENTO NATURAL DE TELHAS 33

2.2.1 FATORES QUE CONTRIBUEM PARA O ENVELHECIMENTO NATURAL DE TELHAS 34

2.2.2 ALTERAÇÃO DAS PROPRIEDADES ÓPTICAS 37

2.2.3 RESTAURAÇÃO DAS PROPRIEDADES ÓPTICAS DAS TELHAS 40

2.3 AVALIAÇÃO DO ENVELHECIMENTO NATURAL DE TELHAS 43

2.3.1 RECOMENDAÇÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS 43

2.3.2 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DE ABSORTÂNCIA SOLAR 45

2.3.3 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DE EMITÂNCIA TÉRMICA 48

2.3.4 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DE PARÂMETRO DE COR 50

2.3.5 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL 52

2.3.6 ESTAÇÃO DE ENVELHECIMENTO 54

2.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 57

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MÉTODOS UTILIZADOS 60

3.1.1 ETAPA I: SELEÇÃO DOS MATERIAIS E EXPOSIÇÃO AO TEMPO 60

3.1.1.1 SELEÇÃO DE TELHAS 60

3.1.1.2 PREPARO DAS AMOSTRAS 62

3.1.1.3 PROJETO DA ESTAÇÃO DE ENVELHECIMENTO NATURAL 63

3.1.2 ETAPA II: MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO E CAMPO 72

3.1.2.1 DETERMINAÇÃO DA ABSORTÂNCIA SOLAR 72

3.1.2.2 MEDIÇÃO DE EMITÂNCIA TÉRMICA 73

3.1.2.3 MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DE COR 74

3.1.2.4 MONITORAMENTO DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS 75

3.1.2.5 EFEITOS DA DEGRADAÇÃO DA ABSORTÂNCIA SOLAR NO DESEMPENHO TÉRMICO DAS TELHAS 77

4. RESULTADOS

4.1 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS 78

4.1.1 DADOS CLIMÁTICOS 78

4.1.2 REFLETÂNCIA E ABSORTÂNCIA SOLAR 81

4.1.3 EMITÂNCIA TÉRMICA 92

4.1.4 PARÂMETROS DE COR 94

4.1.5 TEMPERATURA SUPERFICIAL 99

4.2 CORRELAÇÕES E DISCUSSÕES 108

5. CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 115

APÊNDICE A - Curvas de refletância espectral de todas as telhas expostas ao tempo aos 0, 3, 6 e 24 meses de exposição 125

APÊNDICE B - Comparação dos parâmetros de cor de todas as telhas expostas ao tempo aos 0 e 24 meses de exposição 135

APÊNDICE C - Monitoramento de temperatura superficial de todas as telhas expostas ao longo do período de exposição 139

APÊNDICE D - Imagens termográficas de temperatura superficial de todas as amostras ao final do período de exposição 153

APÊNDICE E - Histogramas da temperatura superficial de todas as amostras ao final do período de exposição 181

INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVAS

Construções projetadas em desarmonia com o clima local, além de aumentarem o consumo energético decorrente da climatização artificial, também contribuem para a formação de microclimas e ilhas de calor nas áreas urbanas (AKBARI *et al.*, 2009). O excesso de edificações e áreas pavimentadas, juntamente com a diminuição das áreas verdes nas cidades, acarretam em uma maior absorção da radiação solar por parte dessas superfícies urbanas, aquecendo-as alguns graus acima da temperatura do ar de seu entorno (JO, *et al.*, 2010; UNEP, 2007). Em decorrência dessas consequências negativas advindas do aquecimento das cidades, desde os anos 90 – principalmente após a ECO-92 - a discussão por uma cidade mais sustentável ambientalmente e energeticamente ganhou força e muitas pesquisas da área começaram a se destacar no meio acadêmico.

Em países de clima quente, como o Brasil, a escolha acertada dos materiais que compõem as superfícies das edificações é fundamental para a redução do consumo energético excedente, que é utilizado a fim de amenizar o desconforto térmico dos usuários no interior das construções. Globalmente, os edifícios são responsáveis por 40% do consumo de energia anual total e, consequentemente, por um terço das emissões de gases do efeito estufa (KRIMPALIS; KARAMANIS, 2015). Uma parcela significativa desta energia é utilizada para alimentar os sistemas de condicionamento artificial nas edificações. No cenário nacional, de acordo com dados do Balanço Energético Nacional de 2021 (ano base 2020) as edificações brasileiras são responsáveis por 51,2% do consumo de energia elétrica total, sendo 27,6% para o setor residencial e 23,6% para o setor não-residencial (EPE, 2021). Em ambos os casos, este consumo poderia ter suas taxas reduzidas caso não dependessem de sistemas de climatização artificial para proporcionarem ambientes adequados ao desenvolvimento das atividades humanas dentro dos espaços construídos.

Para edificações térreas, localizadas nos trópicos, o sistema que mais recebe energia térmica advinda da radiação solar é a cobertura. Como as telhas são os elementos construtivos que ficam mais tempo expostas à insolação em relação às demais faces da edificação, suas propriedades físicas são as variáveis com maior responsabilidade nos ganhos térmicos destas construções que estão inseridas em climas quentes (BRITO FILHO; SANTOS, 2014). Assim, controlando-se apenas a absortância solar e a emitância térmica dos revestimentos escolhidos para a cobertura, já seria possível melhorar a eficiência térmica em diversas tipologias de edificações, sendo esta uma estratégia eficiente e de baixo custo, para o resfriamento urbano e aumento do conforto térmico do usuário (ALCHAPAR; CORREA; CANTÓN, 2014).

Portanto, a utilização de materiais de baixa absortância solar e alta emitância térmica, em coberturas sem isolamento térmico, é uma conhecida e eficiente forma de se diminuir as cargas energéticas com climatização artificial. Estudos demonstraram economia de energia acima de 20% na refrigeração de edifícios a partir da redução da absortância solar de coberturas, além de melhorar a qualidade do ar (AKBARI & ROSE, 2001; POMERANTZ, *et al.*, 1999; ROSENFELD, *et al.*, 1998; TAHA, 2001; TAHA, 2002; TAHA, *et al.*, 2000). A partir desta menor absorção de radiação solar por parte das superfícies frias, também é possível minimizar os efeitos provocados pelo aquecimento global (AKBARI; MENON; ROSENFELD, 2009).

No entanto, quando expostas às intempéries, as estruturas de cobertura podem se degradar de forma a alterar as características ópticas originais das telhas. Como nos centros urbanos a temperatura é mais alta em decorrência das ilhas de calor e há maior concentração de poluentes atmosféricos, as coberturas localizadas nas cidades se deterioram de uma forma mais rápida do que em construções localizadas fora do perímetro urbano. Com isso, os ganhos térmicos da edificação podem ser intensificados, prejudicando o conforto térmico dos usuários e aumentando os gastos energéticos com climatização artificial.

Estudos mostram que a estação em que há maior degradação das telhas coincide com os períodos mais secos, pois há maior acúmulo de poeira sem que a precipitação pluvial possa limpar tais superfícies (CHENG *et al.*, 2012; ALGARNI; NUTTER, 2015; DORNELLES *et al* , 2015). Segundo Berdhal *et al.* (2008), as alterações nos valores da absortância solar nos telhados, quando se avalia o envelhecimento a longo prazo, são determinadas principalmente pela aderência da fuligem e poeira na superfície da cobertura que resiste à lavagem da chuva. Portanto, embora haja a recomendação do uso de telhados frios (baixa absortância e alta emitância) para se reduzir os ganhos

térmicos das edificações, o acúmulo de poeira nas coberturas diminui os benefícios deste sistema, principalmente em climas quentes e secos (ALGARNI; NUTTER, 2015).

No Brasil, além da escassez na base de dados referente às absortâncias dos materiais do envelope construtivo sem envelhecimento, há também uma carência na avaliação da variação das propriedades ópticas dos mesmos ao longo do tempo, já que esta avaliação relativa à degradação dos materiais foi incluída apenas em 2021 na norma de desempenho NBR 15575-1 (ABNT, 2021). Neste contexto, esta dissertação pretende preencher parte das lacunas aqui apresentadas. O principal objetivo deste trabalho consiste em analisar as alterações referentes às absortâncias solares de telhas ao longo de vinte e quatro meses de exposição natural ao tempo. Os resultados deste monitoramento são divulgados em todas as suas fases de envelhecimento a fim de contribuir no aumento da disponibilidade de dados relativos ao comportamento térmico de telhas, ao longo de sua vida útil. Desta forma, será possível realizar escolhas projetuais mais eficientes para as coberturas das edificações contribuindo para uma cidade mais sustentável.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como principal objetivo analisar os impactos do envelhecimento natural de telhas expostas às intempéries sobre suas características de absortância solar e desempenho térmico.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

_Construir uma estação de envelhecimento de telhas;

_Complementar as bases de dados nacionais de absortância solar (incluindo absortâncias por faixa do espectro: UV, VIS e IV) de telhas de concreto e cerâmicas naturais e esmaltadas;

_Compreender de que forma a alteração da absortância solar ao longo do tempo impacta na temperatura superficial e pigmentação das telhas.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A partir do Capítulo 1, referente à Introdução, no qual se expõe as justificativas e os objetivos, o presente memorial de dissertação de Mestrado é dividido da seguinte forma:

_Capítulo 2 | Contextualização: são abordados os conteúdos referentes à revisão bibliográfica, sendo a) os efeitos da utilização de materiais frios nas superfícies urbanas nos âmbitos macro e micro; b) o envelhecimento natural de telhas; c) formas de avaliação do envelhecimento natural de telhas.

_Capítulo 3 | Materiais e Métodos: apresenta-se os métodos adotados, assim como o detalhamento de todas as etapas executadas a fim de atingir os objetivos propostos.

_Capítulo 4 | Resultados: são apresentados todos os dados obtidos ao longo do trabalho e suas respectivas análises, além de suas correlações e discussões.

_Capítulo 5 | Conclusões: é feita uma análise geral dos resultados obtidos anteriormente.

CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1 EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS FRIOS NAS SUPERFÍCIES URBANAS

Em climas tropicais, como ocorre na maior parte do Brasil, a alta absorção da radiação solar por parte das superfícies urbanas pode acarretar no desconforto térmico dos usuários e no desempenho térmico e energético ineficiente do envelope construtivo. Como uma alternativa para se amenizar os efeitos negativos do aquecimento das cidades, a utilização de materiais frios nestas superfícies é uma estratégia bastante aceita e difundida entre os pesquisadores da área. No entanto, o envelhecimento natural destes materiais pode gerar um efeito inverso ao desejado, agravando a absorção de energia térmica em decorrência do escurecimento, e, consequente aumento das absortâncias solares destas superfícies. Para a compreensão do comportamento destes materiais, este capítulo abordará as potencialidades e limitações da utilização dos revestimentos frios em três âmbitos: no microclima urbano, nas edificações e nas coberturas. Assim, será possível compreender de forma mais ampla os impactos, a longo prazo, da utilização destes materiais sobre o desempenho térmico das edificações.

2.1.1 NO MICROCLIMA URBANO

Em regiões em que os centros são muito pavimentados, com alta densidade de edifícios e pouco vegetadas, é muito comum que ocorra o fenômeno denominado de Ilha de Calor Urbana (ICU). Este efeito diz respeito às temperaturas do ar mais altas nos centros das cidades em comparação com as áreas rurais ou suburbanas circundantes (SANTAMOURIS *et al.,* 2011). A ICU já foi intensamente pesquisada e

documentada ao longo dos últimos anos, nos fornecendo uma documentação completa do comportamento deste tema (SANTAMOURIS, 2007; MIRZAEI E HAGHIGHAT, 2010; SANTAMOURIS, 2011). Segundo Mastrapostoli *et al.* (2016, p. 191),

> O aumento da temperatura urbana impede que as cidades se refresquem à noite, o que agrava o consumo de energia elétrica para fins de refrigeração artificial, além de aumentar a demanda de pico de eletricidade, intensificar os problemas de poluição, diminuir a pegada ecológica e causar desconforto térmico e problemas de saúde aos moradores da cidade.

As superfícies urbanas têm importante responsabilidade neste processo de aquecimento das cidades, afinal dissipam ao seu entorno imediato, parte da energia térmica absorvida da radiação solar. Estes materiais que compõem o envelope construtivo das edificações, ao serem responsáveis por grande parte do aumento da temperatura na área urbana, interferem de forma direta nas condições diárias e noturnas de resfriamento artificial devido à combinação do armazenamento térmico da radiação solar nos materiais e às suas propriedades ópticas de absortância solar e emitância térmica (ALCHAPAR *et al.,* 2014). Sendo assim, ao diminuir a quantidade de radiação solar absorvida, a temperatura superficial dos elementos externos também pode ser reduzida e, consequentemente, os níveis de calor minimizados.

Em pesquisa realizada por Macintyre e Heaviside (2019) avaliou-se a eficiência da utilização de telhados frios na redução da mortalidade relacionada ao calor em West Midland, Reino Unido. A análise foi feita em relação ao verão de 2006 e outros dois períodos mais curtos de ondas de calor ocorridas em 2003 e 2006. Seus resultados mostraram que as Ilhas de Calor Urbanas contribuíram com até 40% da mortalidade relacionada ao calor durante o período de verão e que os telhados frios, se implementados em toda a cidade, poderiam ter evitado 18% das mortes relacionadas ao calor sazonal associada às ICU. Segundo suas análises, os telhados frios foram mais eficazes na redução das temperaturas de pico durante o dia, e, portanto, podem limitar altas temperaturas perigosas durante as ondas de calor (MACINTYRE, HEAVISIDE, 2019).

Neste sentido, a utilização de materiais com baixa absortância solar e alta emissão de infravermelho, ou seja, materiais denominados frios, é considerado uma das técnicas mais eficientes e poderosas para mitigar os efeitos das Ilhas de Calor Urbanas (AKBARI *et al.,* 2009,). Esta mitigação é essencial visto que as ICU têm contribuído para o aquecimento global em cerca de 30% (HUANG; LU, 2015; ZHAO,

2011) já que com o aumento da temperatura ambiente, há uma maior demanda energética para os sistemas de climatização artificial, acarretando em uma maior emissão de carbono e poluentes na atmosfera decorrente da queima de combustíveis fósseis para geração de energia (SABER, 2021). Segundo Santamouris *et al.* (2011, p. 3086),

> Os materiais com alta refletância são uma técnica econômica, passiva e ambientalmente amigável que contribui para alcançar a eficiência energética em edifícios pois reduz a demanda de energia elétrica e melhora o clima urbano através da diminuição de temperatura nas cidades.

Este fato é de conhecimento popular há muitos séculos, sendo que em diversas regiões de clima quente, predominam-se cores claras nas suas construções. A região do sul da Espanha, Andaluzia (Figura 1), é um exemplo clássico dessa estratégia de mitigação de calor baseada na utilização de materiais frios para diminuir a absortância solar de seus revestimentos externos, promovendo maior conforto aos usuários no interior das edificações e, consequentemente, contribuindo para a atenuação dos efeitos negativos das ilhas de calor que se formam nos grandes centros urbanos.

Figura 1: Pueblos blancos de Cádiz



Fonte: adaptado de Website *Trendencias*, 2016*

* Disponível em: <https://www.trendencias.com/viajes/el-increible-color-de-los-pueblos-blancos-de-espana> Acesso em 25 de jun. 2020

Synnefa *et al.* (2007), através de experimento realizado comparando o desempenho térmico entre protótipos de revestimentos frios e convencionais, comprovaram que todos os revestimentos com pigmentação fria apresentaram uma temperatura superficial mais baixa, sendo que a diferença de temperatura máxima entre um revestimento frio e padrão foi de 10,2ºC, medidos no verão. Segundo Rosenfeld *et al.* (1995), a utilização de árvores de sombra e superfícies urbanas claras podem compensar ou reverter a Ilha de Calor Urbana, além de economizar energia elétrica excedente utilizada para refrigerar artificialmente as edificações. Ou seja, além de causarem desconforto térmico, as ilhas de calor são um empecilho à eficiência energética das construções, já que o aumento da temperatura do ar reforça as cargas de ar-condicionado nos edifícios o que, por sua vez, aumenta o consumo de energia e o pico de demanda de eletricidade.

Segundo Prado *et al.* (2005, p. 296),

> Estudos realizados pelo "Heat Islands Project" no Laboratório *Nacional Lawrence Berkeley* examinaram o efeito das superfícies das cidades e edifícios em relação ao uso da energia e do clima. Através de simulações e estudos de caso, foi demonstrado que o aumento do albedo das superfícies urbanas e o plantio de árvores atenuam de maneira positiva o fenômeno das ilhas de calor, sendo que um grande aumento de albedo, combinado com o sombreamento da árvore, reduz o uso de energia para o ar condicionado em 40% nos casos estudados.

Segundo Rosenfeld *et al.* (1998), a aplicação em escala urbana de materiais frios pode potencialmente reduzir a poluição do ar, tanto direta quanto indiretamente. A redução direta da poluição do ar se deve ao fato de que menos energia de resfriamento é usada; portanto, menos emissões da usina são produzidas (partículas de CO2, NOx e PM10). Já as reduções indiretas da poluição atmosférica refletem o fato de que a reação da formação da camada de ozônio ocorre de forma mais acelerada a temperaturas mais altas; portanto, quando a temperatura do ar urbano é mais baixa, a probabilidade de formação da camada de ozônio diminui (ROSENFELD *et al.,* 1998).

Taha *et al.* (1994, 1997, 1999, 2000), comprovou através de medições e simulações que a redução da temperatura do ar em 1,5 - 2° C , na cidade de Los Angeles, utilizando-se estratégias passivas de mitigação de ilhas de calor, como o aumento do albedo das superfícies urbanas e a utilização de sombreamento e resfriamento através de vegetação, resulta em uma redução de 10 a 20% de poluição atmosférica.

Akbari e Matthews[*] (2010, *apud*. ALCHAPAR, CORREA; 2016, p. 297) e Akbari *et al.*[**] (2009a, 2009b, *apud*. ALCHAPAR, CORREA; 2016) estimaram que o aumento do albedo em nível global, considerando coberturas e pavimentos urbanos, induziriam um efeito de radiação negativa na Terra, o que equivaleria à compensação de 44Gt de emissões de CO2. Além disso, Akbari *et al.*[***] (2012, *apud* ALCHAPAR, CORREA; 2016, p. 297), calcularam que

> A cada aumento de 0,01 de albedo em por metro quadrado de superfície produz um efeito de resfriamento de 3x10^-15 K, o que corresponde à redução de emissões de CO2 equivalentes a cerca de 7 kg.

A partir dessas informações, é possível notar os inúmeros benefícios existentes em se aumentar o albedo das superfícies urbanas em relação ao aquecimento das cidades. Além de se mitigar os efeitos da Ilha de Calor Urbanas, há também uma diminuição no gasto energético para com resfriamento artificial das edificações e, consequentemente, uma redução na emissão de poluentes na atmosfera. No entanto, "estas superfícies estão expostas às intempéries e envelhecem ao longo do tempo, induzidas principalmente pela incidência de luz, calor e umidade" (SANTAMOURIS *et al.,* 2011, p. 3097). Este envelhecimento natural dos materiais pode gerar um efeito contrário do esperado, alterando as características originais de cor, absortância solar e emitância térmica das superfícies urbanas. Através do escurecimento destas superfícies, decorrentes da degradação, os efeitos das Ilhas de Calor podem ser agravados, afetando ainda mais o aquecimento das cidades (SANTAMOURIS *et al.,* 2011).

Segundo Rosenfeld *et al.* (1995), as superfícies escuras e a vegetação reduzida, quando analisadas de forma conjunta, aquecem o ar do verão nas áreas urbanas em cerca de 2,5ºC que nas áreas rurais circundantes. Isso ocorre pois o microclima ao redor dos edifícios é influenciado pela radiação de ondas longas, proveniente das próprias superfícies urbanas. Este fator contribui para o desenvolvimento de características climáticas locais específicas, como temperatura do ar, umidade relativa e velocidade

* AKBARI, H; MATTHEWS, D; SETO, D. The long-term effect of increasing the albedo of urban areas. **Environ. Res. Lett.** 7, 2012.

** AKBARI, H; MENON,S; ROSENFELD, A. lobal cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO2. **Climatic Change 94**, v. 3-4, p. 275–286, 2009. AKBARI, H; LEVINSON, R; ROSENFELD, A; ELLIOT, M. **Global cooling: policies to cool the world and offset global warming from CO2 using reflective roofs and pavements.** In: Presented at the 307 Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, Berkeley, CA 21–23 September, 2009b.

*** AKBARI, H; MATTHEWS, D; SETO, D. The long-term effect of increasing the albedo of urban areas. Environ. Res. Lett. 7, 2012.

do vento (PRADO *et al.,* 2005). Sendo assim, para o uso eficiente dos materiais frios nas superfícies urbanas, deve-se prever manutenções e limpezas periódicas a fim de se manter suas características refletivas e emissivas originais.

2.1.2 NAS EDIFICAÇÕES

Conforme discutido anteriormente, os revestimentos com baixa absortância solar e alta emitância térmica podem ser utilizados a fim de se reduzir as cargas térmicas das edificações e, consequentemente, amenizar as chamadas Ilhas de Calor Urbanas. Para Salman e Saleem (2021, p. 2), o desempenho de materiais frios está diretamente relacionado às suas propriedades de "capacidade de calor, refletância solar, taxas de transferência de calor, rugosidade e permeabilidade". Segundo Bretz *et al.* (1997), ao se diminuir a absorção de energia solar por parte do envelope construtivo, as temperaturas superficiais também são reduzidas e a transferência de calor para o interior do edifício é atenuado.

Para Mastrapostoli *et al.* (2016, p. 191), a baixa absortância solar e a alta emissão de infravermelho de um material afetam a temperatura de uma superfície

> pois o calor que penetra no edifício, através de seu envelope construtivo, contribui para a diminuição da temperatura do ar ambiente, uma vez que a intensidade da convecção de calor de uma superfície fria é menor.

Para Alchapar *et al.* (2014, p. 3181), "a aplicação destes materiais frios, ou seja, com alta refletância solar e emitância térmica, sobre as superfícies das construções resulta em uma estratégia eficaz de resfriamento passivo". No entanto, a sensibilidade destas estratégias sobre o desempenho térmico da edificação varia conforme as taxas da radiação solar global e a massa térmica do sistema construtivo, sendo que quanto maior o nível de radiação solar e quanto mais leve a estrutura do edifício, mais sensível é seu desempenho térmico de acordo com as características superficiais externas de refletância solar e emitância térmica (CHENG *et al.*, 2005).

Para Santamouris *et al.* (2011, p. 3086),

> Se uma superfície com alta refletância solar e emitância infravermelha for exposta à radiação solar, ela terá uma temperatura superficial mais baixa em comparação com uma superfície similar com valores de refletância solar e emitância infravermelha mais baixos. Se a superfície fria estiver no

> envelope do edifício, isso resultaria na diminuição do calor penetrante no edifício e, para uma superfície no ambiente urbano, isso contribuiria para diminuir a temperatura do ar ambiente, pois a intensidade de convecção de calor de uma superfície fria é mais baixa.

Segundo Cheng *et al.* (2005), o controle das características do envelope construtivo, é a maneira mais simples, eficaz e econômica para se reduzir as temperaturas internas em edificações localizadas em climas quente e úmido, como é o caso de grande parte do Brasil. No entanto, várias pesquisas anteriores já estudavam a importância da reflexão como alternativa para controlar os ganhos térmicos de edificações, principalmente cujos fechamentos fossem leves e com pouca inércia. Um destes estudos foi realizado por Lamberts (1988), no qual foram analisados quatro melhoramentos típicos no desempenho térmico de coberturas: pintura da cobertura de branco, ventilação do ático, isolamento térmico e utilização de materiais com baixa emitância. Concluiu-se que o uso de tintas brancas na superfície externa era de fato a ação mais eficiente e de baixo custo pois reduziu o fluxo de calor em 57%, sendo a segunda melhor opção, após a barreira radiante.

Outra pesquisa, desenvolvida na década de 90 por Roselfeld *et al.* (1995), concluiu através de experimento que ao se elevar o albedo de um único edifício, é possível economizar cerca de 20% a 40% de energia direta. Através de simulações computacionais, os mesmos autores indicaram que os efeitos indiretos destas mudanças, se ocorridas em larga escala, podem "dobrar a economia com energia elétrica excedente, podendo reduzir tais gastos em U$ 10 bilhões anuais (valores para 1995) e eliminar 27 milhões de toneladas métricas de emissões de CO2" (ROSELFELD *et al.,* 1995, p. 264). Em 1997, Akbari *et al.* (1997) demonstraram que o aumento do albedo no telhado, para uma casa típica em Sacramento, CA, resultou numa economia de energia de resfriamento direto de 10% a 20%.

Diversas pesquisas interessadas nas vantagens de se utilizar materiais frios, nas superfícies urbanas, vem sendo desenvolvidas há mais de 30 anos. Este fato nos oferece uma base teórica bastante sólida sobre o quanto a envoltória do edifício é responsável pelos ganhos térmicos mais significativos que afetam o conforto térmico dos usuários, no interior dos edifícios, e o desempenho térmico da edificação. Segundo Alchapar e Corrêa (2016), as propriedades físicas do invólucro do edifício que determinam a transferência de calor para o seu interior são a condutividade, a densidade e o calor específico, que, atuam juntamente com as propriedades ópticas de absortância e emitância. Conforme discutido anteriormente, materiais com

baixa absortância solar e alta emitância térmica permanecem mais frios quando expostos ao sol, reduzindo a demanda de energia para refrigeração e aumentando o conforto térmico dos usuários em edifícios não condicionados no verão. No entanto, estas propriedades são dinâmicas, ou seja, podem se alterar ao longo do tempo, descaracterizando um material como "frio".

Um dos principais fatores responsáveis por essa modificação é a alta incidência da luz ultravioleta (AKBARI *et al.,* 2005). Já segundo Dornelles *et al.* (2015, p. 1591), "as mudanças na refletância devem-se principalmente ao acúmulo de poeira durante o período seco em São Carlos, seguido pela remoção de poeira pelas chuvas após o inverno". No entanto, segundo os autores, para os revestimentos escuros analisados, os quais tiveram um aumento de 1% em suas refletâncias solares, o efeito da degradação da radiação UV foi menos significativo que o acúmulo de poeira. Sendo assim, para os revestimentos claros ou brancos, além das condições climáticas, também a sujeira (deposição de poeira e fuligem, crescimento biológico etc.) tem um enorme efeito sobre as suas características superficiais, alterando seus valores de refletância solar originais (DORNELLES *et al.*, 2015).

Essas alterações decorrentes da exposição natural do envelope construtivo às intempéries influenciam de forma direta no desempenho térmico da edificação. A utilização de materiais frios nas superfícies urbanas é uma ótima alternativa para mitigar o efeito negativo das ilhas urbanas de calor e amenizar a entrada do calor indesejado para o interior das edificações, reduzindo o gasto energético com refrigeração artificial nas estações mais quentes do ano. No entanto, o envelhecimento dessas superfícies pode anular os efeitos positivos dos materiais frios e invalidar sua utilização no dia a dia da construção civil (MORINI *et al.*, 2018). Por isso, assim como na discussão anterior (item 2.1.1), conclui-se que limpezas periódicas e manutenções das superfícies externas das edificações devem ser previstas a fim de se preservar as características originais refletivas e emissivas do envelope construtivo (AKBARI *et al.*, 2005; FERRARI *et al.*, 2014; MASTRAPOSTOLI *et al.,* 2016; KOLOKOTRONI *et al.*, 2018).

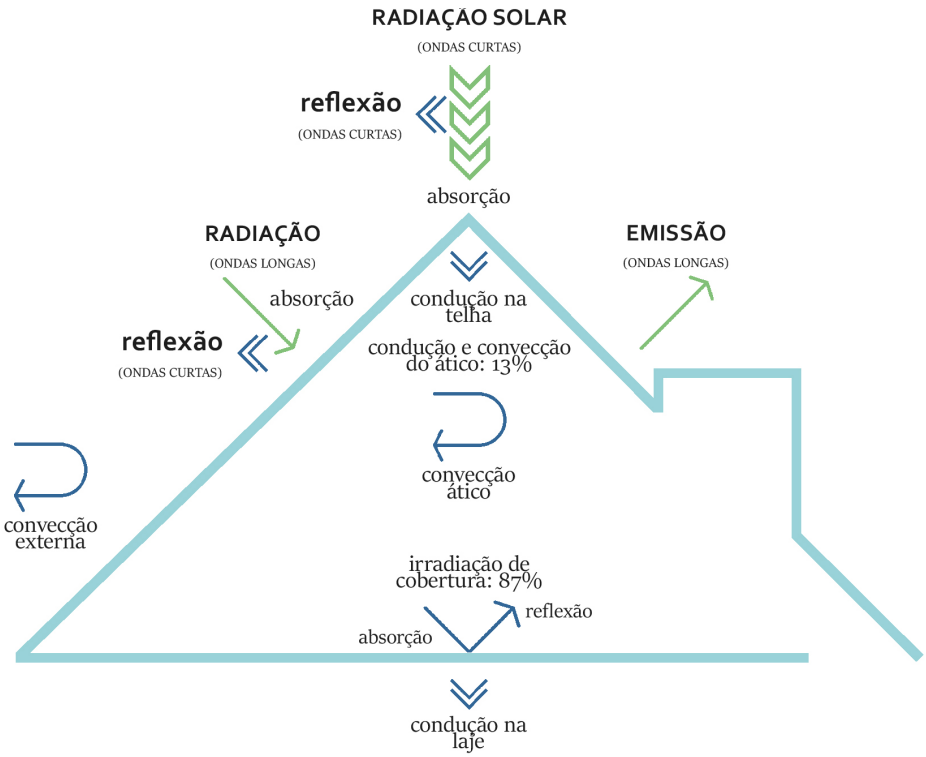
2.1.3 NAS COBERTURAS

Sabemos que é através do envelope construtivo que as edificações recebem energia térmica advinda do Sol e aquecem o interior das edificações. Destas superfícies externas, as coberturas são os elementos que mais recebem insolação ao longo do dia,

em relação às demais faces do edifício (PEREIRA, 2014). Segundo Maestri (2017), em baixas latitudes, aproximadamente 60% da energia térmica transferida para uma edificação térrea, numa condição extrema de verão, é recebida pelas coberturas.

Nas trocas térmicas entre os materiais opacos do envelope construtivo, uma parcela da energia solar que incide é refletida, retornando para o ambiente externo; e outra, é absorvida (DORNELLES, 2008). Segundo Cowan (1973), aproximadamente 87% do calor transferido pela cobertura ocorre através deste processo (Figura 2) e, portanto, soluções que possibilitem às superfícies se manterem em temperaturas mais baixas e emitirem menos energia para o interior das edificações são fatores que precisam ser mais utilizados.

Figura 2: Esquema de transferência de calor em superfícies opacas para cobertura com ático



Fonte: adaptado de MAESTRI, 2017

As trocas de calor entre o telhado e o forro de uma edificação são resultantes da energia térmica que não foi refletida ao meio externo, na forma de radiação de onda longa (COELHO, 2017). A camada de ar formada entre estas estruturas se torna mais uma barreira para o sistema térmico como um todo, já que o ar é um bom isolante térmico. Segundo Coelho (2017), para se minimizar a transmissão de calor para o ático, após essa radiação já ter sido absorvida pelas superfícies externas, pode-se utilizar ferramentas projetuais como a ventilação cruzada.

Segundo Maestri (2017), e de acordo com o que foi discutido ao longo deste capítulo, um eficiente controle no ganho de calor em coberturas é definido pela combinação de três parâmetros: absortância solar, emitância térmica e resistência térmica (transmitância). Brito Filho *et al.* (2011) fizeram diversos testes variando-se essas três propriedades dos materiais para edificações climatizadas artificialmente na cidade de São Paulo. Os autores concluíram que coberturas dotadas de isolamento térmico apresentam temperaturas mais amenas no interior de sua edificação, porém revelam temperaturas externas mais altas, o que pode acarretar na formação das ilhas de calor urbanas. No entanto, a utilização de cobertura com baixa absortância e alta emitância, para climas tropicais, manteria as temperaturas internas mais baixas sem que se aumentasse a temperatura superficial externa do telhado.

Em estudo de Libbra *et al.*[*] (2011 *apud* FERRARI *et al.,* 2014), cujo objeto de análise foram as coberturas italianas, demonstrou-se que ao se elevar a refletância solar de telhas de barro, com cor de terracota, de um valor médio de 0,25 até o valor máximo tecnicamente possível, assumido igual a 0,55, seria possível uma diminuição da carga térmica no verão em até 10W por metro quadrado de cobertura. Nos EUA, estudos deste mesmo fenômeno foram realizados por Levinson *et al.* (2007) demonstrando a redução do pico da temperatura da superfície do telhado e do pico do fluxo de calor na cobertura através da utilização de materiais frios nestes sistemas.

Desta forma, é possível concluir que a utilização do telhado frio é capaz de reduzir a quantidade de radiação solar absorvida pelo telhado de uma edificação, diminuindo a temperatura superficial do telhado, melhorando o conforto térmico dos usuários no interior do edifício e reduzindo o gasto energético com climatização artificial nas estações mais quentes do ano. No entanto, segundo Kim *et al.* (2020, p. 2), "a relação custo-benefício de telhados frios pode variar devido à economia de resfriamento flutuante e penalidades de aquecimento dependendo do clima, região e condições de construção". Além disso, é importante reforçar a ideia de que

> as economias de resfriamento alcançadas por telhados frios são mais pronunciadas em áreas tropicais; em contraste, a penalidade de aquecimento pode exceder qualquer economia potencial em zonas temperadas, dependendo do clima daquela região particular (KIM *et al.*, 2020, p. 2).

* LIBBRA, A., MUSCIO, A., SILIGARDI, C., AND TARTARINI, P. Assessment and improvement of the performance of antisolar surfaces and coatings. Progress in Organic Coatings, p. 73-80, 2011. .

Outra questão a ser discutida é que, em decorrência do seu ângulo de inclinação, tais estruturas de cobertura estão mais expostas que as demais faces da edificação ao acumulo de poeira e às radiações UV, principais responsáveis pelas degradações do envelope construtivo. Conforme discutido anteriormente, este envelhecimento altera as características superficiais originais, podendo descaracterizar um material como frio. Segundo Berdahl *et al.* (2008), tais desgastes podem ser desencadeados pela exposição a altas temperaturas, ventos, umidade, gases atmosféricos e poluentes. As altas temperaturas, decorrentes da radiação solar direta, além de deteriorar a superfície da telha por causa da incidência direta dos raios UV, aceleram as reações químicas que geram patologias nas telhas, causando tensões estruturais decorrentes das dilatações térmicas. Os ventos podem levar a fadigas e rachaduras no material. A chuva, apesar de limpar a superfície das telhas, se não tiver um bom escoamento, pode levar à proliferação de fungos na cobertura. Os gases atmosféricos (principalmente o oxigênio e o vapor de água) podem levar à formação de diversos óxidos e hidróxidos que, quando dissolvidos na água formam ácidos que danificam as telhas. Já os poluentes, como a fuligem, apesar de não serem reativos quimicamente, escurecem a cobertura levando ao aquecimento indesejado em climas quentes.

Como nas cidades a temperatura é mais elevada que nas áreas menos urbanizadas (em decorrência das ICH) e há maior concentração de poluentes atmosféricos, as coberturas localizadas dentro dos perímetros urbanos se deterioram de uma forma mais rápida que nas demais construções. Estudos mostram que a estação em que há maior envelhecimento das telhas coincide com os períodos mais secos, pois há maior acúmulo de poeira sem que a chuva possa limpar tais superfícies (CHENG *et al.,* 2012; ALGARNI; NUTTER, 2015; DORNELLES *et al.,* 2015). Segundo Berdhal *et al.* (2008), as alterações nos valores da absortância solar nos telhados, quando se analisa seu envelhecimento a longo prazo, são determinadas pela aderência da fuligem e poeira na superfície da cobertura que resiste à lavagem da precipitação pluvial. Portanto, embora haja a recomendação do uso de telhados frios para se reduzir os ganhos térmicos das edificações, o acúmulo de pó no topo da edificação diminui os benefícios deste sistema, principalmente em climas quentes e secos (ALGARNI; NUTTER, 2015).

Segundo Algarni e Nutter (2015, p. 182),

> Como a poeira tem uma absorção relativamente alta, a sujeira acumulada na superfície do telhado aumentará a absorção geral da cobertura, resultando em uma maior radiação solar absorvida no edifício. Como consequência,

> a radiação solar absorvida aumenta a demanda por condicionamento artificial do ar, o que pode aumentar ainda mais emissão de gases de efeito estufa. Além disso, em climas quentes e secos, em particular, onde o uso de ar condicionado é extremamente alto, os telhados empoeirados levam a um consumo de energia de alto pico, criando a necessidade de mais usinas de energia.

Sendo assim, o aumento da absortância na cobertura pode acarretar na diminuição do consumo com climatização artificial no inverno. No entanto, segundo Algarni e Nutter (2015), em climas quentes e secos, qualquer que seja esse benefício no período mais frio, no balanço anual ocorreria um aumento na carga de energia necessária para o resfriamento artificial para os demais meses do ano. Ainda segundo os autores, verificou-se que o acúmulo de poeira em cidades do Oriente Médio e Norte da África, reduziu as cargas térmicas para aquecimento entre 0,5–13,1 kWh/m^2/ano, enquanto as cargas térmicas para resfriamento sofreram um aumento entre 44,7-181,1 kWh/m^2/ano.

Segundo Mastrapostoli *et al.* (2016), analisando-se as propriedades ópticas dos telhados frios após quatro anos de exposição no ambiente externo, foi possível verificar uma diminuição de 25% em relação às suas propriedades originais de refletância. Em pesquisa realizada na região de Mendonza, Argentina, analisaram-se os efeitos do envelhecimento natural em 16 telhas, de diferentes características, ao longo de 3 anos. Segundo Alchapar *et al.* (2014, p. 3181), concluiu-se que todas as telhas testadas pelas pesquisadoras tenderam a

> Diminuir sua capacidade de reduzir a temperatura urbana em 40% e, 50% das composições de argila e 33% das composições de concreto mostram um valor de SRI de 30%, como resultado do desgaste.

Neste mesmo estudo, foi demonstrado que o Índice de Refletância Solar das telhas diminui rapidamente com o decorrer da exposição natural de todas as amostras avaliadas (75% dos ladrilhos apresentaram níveis de degradação do SRI superiores a 20%). Consequentemente, a capacidade de amenizar as altas temperaturas urbanas é rapidamente degradada nos primeiros anos de vida útil das coberturas, sendo que em materiais inicialmente mais eficientes, este efeito é ainda mais acentuado (ALCHAPAR *et al.*, 2014).

A influência do envelhecimento das telhas no desempenho térmico das

edificações está intimamente relacionada ao efeito combinado de suas características, como composição, cor, acabamento e forma (ALCHAPAR *et al.,* 2014). Segundo Alchapar *et al.* (2014, p. 3190), estas variáveis levam aos seguintes resultados:

> A composição do concreto mostra um comportamento mais eficiente do que a argila quando submetida a condições climáticas e de envelhecimento; A cor preta é menos degradada que os tons mais claros, como cinza ou terracota. Os acabamentos acrílicos e fosco apresentam menos desgaste que os demais(não acrílicos e não foscos); A forma francesa é a alternativa que registra um menor grau de envelhecimento em comparação ao colonial e ao romano.

Além disso, as autoras concluíram que "as telhas que se mostraram mais eficientes no início continuam ocupando este lugar após o envelhecimento" (ALCHAPAR *et al.,* 2014, p. 3190). A pesquisa também afirma que a utilização de telhas frias como estratégia de refrigeração urbana ou predial não é aconselhável para climas quentes, já que a pesquisa demonstrou que as "amostras analisadas tendem a aumentar a temperatura da superfície entre 12 e 24°C como resultado da forte diminuição dos níveis de SRI (*Solar Reflectance Index)*, cuja média foi de 40%" (ALCHAPAR *et al.,* 2014, p. 3190).

No entanto, na contramão do que Alchapar *et al.* (2014) concluíram, Bretz e Akbari (1997), em particular, demonstraram que a diminuição da refletância solar devido ao envelhecimento de revestimentos refletivos solares não é uma barreira significativa ao uso desses materiais para a melhoria da eficiência energética em edifícios. O estudo, desenvolvido na década de 90, foi realizado em colaboração com três fornecedores diferentes, analisando três tipos de revestimentos cujos materiais eram um polímero branco com base acrílica, um revestimento à base de acrílico branco e um revestimento cimentício branco aplicado em telhados horizontais com baixa inclinação (<25%). A principal descoberta deste trabalho foi que a mudança no albedo depende principalmente do revestimento, da textura da superfície, da inclinação do telhado e das fontes próximas de poeira, fuligem e detritos, quantificando a redução do albedo em 0,15 durante o primeiro ano e um declínio mais gradual após o primeiro ano de envelhecimento. Porém, segundo os autores, o albedo pode ser restaurado de 90 a 100% do valor original estimado, apenas lavando as superfícies.

Segundo Louzich *et al.* (2016, p. 1272),

> A alteração da absortância está intimamente ligada à facilidade de aderência da sujeira sobre a superfície do componente, da sua capacidade de limpeza com a incidência de chuvas, bem como relacionada à sua rugosidade superficial, sendo este um fator responsável pelo acúmulo de sujeira sobre a superfície (DORNELLES e SICHIERI, 2014; SEKER e TAVIL,1996). Estes aspectos demonstram a necessidade de se realizar manutenções periódicas no sistema de cobertura, sendo a mais simples por meio de esfregamento, utilizando detergente ou alvejante, conforme sugerido por Akbari *et al.* (2005).

No mesmo trabalho, Louzich *et al.* (2016, p. 1278), mostrou que

> Ao se analisar a absortância das telhas novas e deterioradas, observa-se que a ação das intempéries provocou elevação da absortância em todos os comprimentos de onda pesquisados. As maiores elevações foram verificadas nos comprimentos de onda do laranja, vermelho, vermelho profundo e região do infravermelho (elevação média ~ 27%).

Tais valores obtidos por Louzich *et al.* (2016), foram introduzidas no programa de simulação computacional com o objetivo de analisar impacto no desempenho térmico na edificação decorrente da degradação das telhas pela ação da exposição ao tempo das mesmas. Segundo os autores (LOUZICH *et al.,* 2016, p. 1279),

> A variação de temperatura interna durante dia típico de verão indicou que a edificação com telha nova no sistema de cobertura apresenta melhor desempenho térmico durante todo o dia típico em relação a edificação com telha cerâmica envelhecida, apesar da diferença ser pequena. Os picos de temperatura do ar no quarto 1 na tipologia com telha nova e envelhecida foram de 35,4°C e 35,7°C, ocorrendo ambas às 18h, indicando que há um atraso térmico em relação ao pico da temperatura do ar externa de 4 horas. Logo, constata-se que a edificação com telha nova apresentou menor temperatura máxima interna do que a com telha envelhecida (~0,3°C). No dia típico de verão, as reduções da temperatura do ar interno em relação à temperatura externa foram de 2,1°C e 1,8°C nas edificações com telhas novas e envelhecidas respectivamente, indicando que, em virtude da deterioração das telhas, o desempenho da edificação que era intermediário passou a ser mínimo.

O processo de envelhecimento natural do envelope construtivo, principalmente para as coberturas, influencia de forma direta no conforto térmico dos usuários dentro e fora das construções e no desempenho térmico da edificação. As alterações das características superficiais das telhas, em decorrência da deterioração e do acúmulo de material particulado e crescimento biológico, devem ser estudadas e monitoradas a fim de se compreender quais soluções devem ser tomadas para se melhorar o desempenho térmico das mesmas ao longo do tempo. Conforme já comentado, como solução para se recuperar a eficiência destes sistemas, diversas pesquisas (ALGARNI, NUTTER, 2015; BERDHAL at al, 2008; AKBARI *et al.,* 2005; PEREIRA, 2014) recomendam um periódico processo de limpeza das telhas para que suas características originais sejam preservadas mantendo uma baixa taxa de absortância na edificação por um maior período de tempo. Dessa forma, os materiais de coberturas denominados frios não perderiam sua capacidade de mitigação das ilhas de calor urbano e de diminuir o fluxo de calor indesejado para dentro da edificação.

2.2 Envelhecimento natural de telhas

Em baixas latitudes, as coberturas são os elementos construtivos que mais recebem insolação, em relação às demais faces da edificação. Portanto, para edificações térreas, localizadas nos trópicos, os telhados são os maiores transferidores de energia térmica para o interior das construções. Por cumprir com o papel de vedar as edificações horizontalmente, estas estruturas também estão mais suscetíveis ao acúmulo de poeira, fuligem e degradações ao longo do tempo. Esta sujeira acumulada pode aumentar a absorção de radiação solar por parte da cobertura, aumentando também a demanda por resfriamento artificial interno. A fim de compreender melhor o efeito da degradação natural sobre o desempenho térmico, especificamente para estas estruturas, este capítulo pretende analisar quais são os fatores externos que mais contribuem para o envelhecimento natural de telhas, como as propriedades ópticas são alteradas pela exposição ao tempo e, quais as formas de limpeza mais recomendadas a fim de se recuperar as características originais das coberturas frias.

2.2.1 Fatores que contribuem para o envelhecimento natural de telhas

Segundo Morini *et al.* (2014, p. 122),

> Luz (principalmente radiação UV), calor, umidade e sujeira são as principais causas do intemperismo e da degradação de um material. Comprimentos de onda curtas têm alta energia de prótons e são mais facilmente absorvidas, causando algumas vezes quebra das ligações químicas.

Akbari *et al.* (2005) destacam especificamente a luz ultravioleta como o principal fator de envelhecimento e degradação dos materiais expostos às intempéries. Para eles (AKBARI *et al.,* 2005, p. 4),

> Embora o envelhecimento seja causado principalmente pela absorção de UV, o processo de degradação é altamente dependente da temperatura. Para a mesma absorção de UV, quanto maior a temperatura e as flutuações de temperatura ao longo de um dia, mais rápido o material é degradado. As superfícies refletivas, mantendo a temperatura da superfície baixa durante as horas ensolaradas, que resultam em menor expansão e contração térmica diurna, podem ter uma vida útil mais longa.

Cheng *et al.* (2012, p. 516), ressaltam que a

> Radiação ultravioleta, a poluição atmosférica, o crescimento microbiano, a chuva ácida, a ciclagem de temperatura causada pela luz solar e tempestades repentinas, a penetração de umidade, a condensação, o vento, o granizo, o congelamento e descongelamento, tudo isso contribui para a perda da refletância solar de um telhado.

Para Berdhal *et al.* (2008), as alterações superficiais decorrentes do envelhecimento natural das telhas podem ser desencadeadas por diversos fatores, como a exposição a altas temperaturas, ventos, umidade, gases atmosféricos e poluentes. As altas temperaturas, decorrentes da radiação solar direta, além de deteriorar a superfície da telha por causa da incidência direta dos raios UV, aceleram reações químicas que geram patologias nas telhas, além de causar tensões estruturais decorrentes das dilatações térmicas. Os ventos podem levar a fadigas e rachaduras

no material. A chuva, apesar de limpar a superfície das telhas, se não tiver um bom escoamento, pode levar à proliferação de fungos na cobertura. Os gases atmosféricos, principalmente o oxigênio e o vapor de água, podem levar à formação de diversos óxidos e hidróxidos que, quando dissolvidos na água, formam ácidos que danificam as telhas. Já os poluentes, como a fuligem, apesar de não serem reativos quimicamente, podem acabar escurecendo as superfícies expostas ao tempo.

Segundo Bretz e Akbari (1997, p. 160),

> Acumulações de superfície, como sujeira e crescimento microbiano, podem ou não ser permanentes. A degradação, no entanto, pode modificar permanentemente o albedo, induzindo alterações químicas no material. Insolação (particularmente radiação ultravioleta), umidade (orvalho, chuva, umidade), temperatura (principalmente a temperatura média do telhado) e poluentes naturais e antropogênicos (principalmente aerossóis e ácido) são os principais elementos que degradam os revestimentos.

Como nos centros urbanos a temperatura é mais alta em decorrência das ilhas de calor e há maior concentração de poluentes atmosféricos, as coberturas localizadas nas cidades se deterioram de uma forma mais rápida do que em construções do campo. Estudos mostram que a estação em que há maior envelhecimento das telhas coincide com os períodos mais secos, pois há maior acúmulo de poeira sem que a precipitação pluvial possa limpar as mesmas (CHENG, 2012; ALGARNI; NUTTER, 2015; DORNELLES *et al.,* 2015). Segundo Berdhal *et al.* (2008), as alterações nos valores da absortância solar nos telhados, quando se analisa seu envelhecimento a longo prazo, são determinadas pela aderência da fuligem e poeira à superfície da cobertura que resiste à lavagem da chuva. Portanto, embora haja a recomendação do uso de telhados frios para se reduzir os ganhos térmicos das edificações, o acúmulo de pó no topo da edificação diminui os benefícios deste sistema, principalmente em climas quentes e secos (ALGARNI; NUTTER, 2015).

Segundo Akbari *et al.* (2005), "durante um período de vários anos, espera-se que as superfícies de cobertura de cor clara percam cerca de 20% de sua refletância solar inicial" (AKBARI *et al.,* 2005, p. 4). Para os autores, os envelopes construtivos envelhecidos demonstraram um aumento maior na absorção em comprimentos de onda curtos do que em comprimentos de onda longos. Berdahl *et al.*[*]

* Berdahl, P., H. Akbari, and L.S. Rose. 2002. Aging of reflective roofs: soot deposition, Applied Optics 41, no. 12: 2355-2360

> indicaram que a sujeira depositada na superfície das membranas de cobertura é composta de carbono elementar, hidrocarbonetos e outros depósitos que, juntamente com a poeira, reduzem ainda mais a refletância das superfícies. A sujeira e o acúmulo de partículas de carbono é um problema sério dentro ou ao redor de centros urbanos expostos a níveis mais altos de combustão de combustíveis fósseis. Como os aerossóis carbonáceos podem viajar rapidamente na atmosfera de mistura, eles podem se espalhar para locais urbanos e rurais para criar um efeito semelhante (BERDHAL *et al.,* 2002, *apud* Akbari *et al.*, 2005, p. 4).

Conforme visto acima, pode-se concluir que o envelhecimento natural, principalmente no caso das coberturas, se deve principalmente à retenção de poeira e fuligem depositada, crescimento biológico e incidência de radiação ultravioleta. No entanto, cada local possui um comportamento climático específico e, segundo Shi *et al.* (2019), "uma vez que diferentes condições de exposição levem a resultados de degradação especiais, é necessário realizar pesquisas locais sobre o envelhecimento natural de telhados frios" (SHI *et al.*, 2019, p. 2). Além disso, cada tipo de telha possui uma patologia específica em decorrência da composição de sua matéria prima. As telhas cerâmicas feitas de barro, cujas queimas são submetidas a fornos de alta temperatura, se livres de impurezas, são materiais extremamente estáveis quimicamente e sua estrutura tem boa resistência a climas com altas amplitudes térmicas (BERDHAL *et al.,* 2008). No entanto, a partir de sua exposição ao tempo, as telhas sofrem uma variação volumétrica que danifica a camada superficial vitrificada aumentando sua permeabilidade e porosidade. Com isso, há maior penetração de água da chuva e poluentes, o que acarreta na formação de limo e musgo em sua superfície, além de alterar seu peso e volume iniciais (VERÇOZA, 1991).

Já as telhas que possuem cimento Portland em sua composição, como as de fibrocimento e de concreto, podem sofrer carbonatação e eflorescências (COELHO, 2017). O primeiro processo consiste na facilidade que o CO_2 possui para penetrar na telha através de sua camada de cobrimento de concreto em um determinado intervalo de tempo. O segundo processo, segundo Coelho (2017), diz respeito

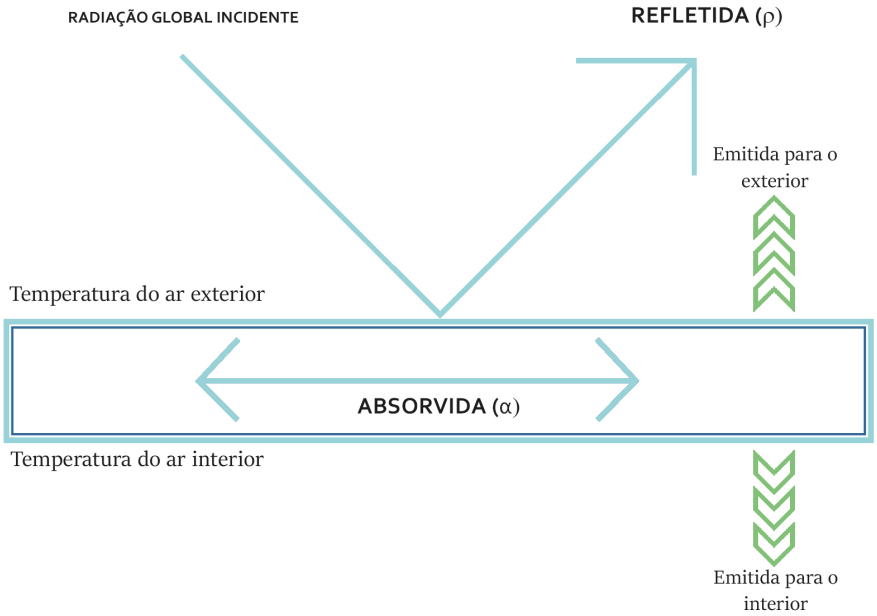
> ao deslocamento de sais da matriz cimentícia para a superfície, provocado por um fenômeno chamado eflorescência. A eflorescência é resultante da penetração de líquidos nos poros dos materiais à base de cimento, diluindo sais que migram para o meio externo (COELHO, 2017, p. 68).

Na análise do envelhecimento de telhas é importante considerar as debilidades específicas de cada material e a forma como este desgaste se mostra na sua superfície externa. Segundo Bretz e Akbari (1997), "o envelhecimento ao longo do tempo depende do próprio revestimento, da textura da superfície, da inclinação do telhado e das fontes próximas de sujeira e detritos" (BRETZ; AKBARI, 1997, p. 165). Como consequência deste fenômeno, "materiais se tornam mais escuros e rugosos, promovendo alteração na sua absortância." (LOUZICH *et al.,* 2016, p. 1271). Por isso, para analisar o desempenho térmico das telhas ao longo de suas vidas úteis, deve-se compreender como cada amostra se comporta a partir de cada estímulo externo. Cada alteração ocorrida na telha modifica sua textura e cor, características fundamentais na determinação da absortância solar e emitância térmica de cada material, o que afetará de forma direta o desempenho térmico da edificação e o conforto térmico dos usuários.

2.2.2 Alteração das propriedades ópticas

Os materiais frios, conforme já discutido anteriormente, são caracterizados a partir de suas propriedades ópticas de refletância solar e emitância térmica. Em materiais opacos (Figura 3), a refletância solar é complementar à absortância, definida como a razão entre a energia solar refletida por uma superfície e a energia total incidente sobre ela (ABNT, 2005).

Figura 3: Trocas de calor através das vedações opacas



Fonte: adaptado de DORNELLES, 2008

Vale ressaltar que há uma associação errônea entre os valores de absortância de um material com sua cor. De fato, cores claras absorvem menos radiação que cores escuras, mas não devem ser usadas como indicativos precisos para avaliar se um material é refletivo ou não (CASTRO, 2003; DORNELLES, 2009; SANTOS *et al.,* 2009). Segundo Dornelles e Roriz (2007), as cores representam apenas sensações visuais e não devem ser tomadas como dominantes de propriedades físicas das superfícies. A simplificação desta relação entre cor e absortância, apesar de não estar correta, ainda é utilizada por importantes documentos considerados referência na área, como a última versão dos Fundamentos da *American Society of Heating, Refrigeranting and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE 90.1: *Energy standard for buildings except low-rise residential buildings*, 2013) e a norma brasileira NBR 15220-3 (2005).

Já a emitância, segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), é definida como o quociente da taxa de radiação emitida pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura. Esta propriedade determina qual a quantidade de energia térmica emitida por unidade de tempo (LAMBERTS *et al.,* 1997), com valores que variam de 0 a 100% (ou de 0 a 1). Segundo Miranda *et al.* (2015), "como a emitância reflete a facilidade que determinada superfície tem em emitir fótons de determinado comprimento de onda, ela independe da temperatura do corpo, sendo apenas função da natureza da superfície" (MIRANDA *et al.,* 2015, p. 10). Segundo Dornelles (2008), se por um lado a absortância faz com que o material retenha radiação de onda curta, a emitância é o potencial de uma superfície em emitir e absorver energia em ondas longas. Para Coelho (2017), este fato evidencia "o quanto a natureza do material influencia na energia que volta para o meio na forma de radiação de onda longa" (COELHO, 2017, p. 35).

Como alternativa para se avaliar materiais frios, segundo Jacinto*,

> a determinação do Índice de Refletância Solar, do inglês "Solar Reflectance Index" (SRI), representa outra maneira de quantificar o comportamento da superfície de um material quando exposto a incidência da radiação solar. Este índice indica a capacidade que uma superfície tem de refletir a radiação solar e emitir radiação térmica, reduzindo o aumento da temperatura causada por esta exposição (JACINTO *et al.,* 2016, *apud* KRELLING *et al.,* 2019, p.2).

* JACINTO, L.I.; SILVA, M.E.X.; MARINOSKI, D.L.; FREDEL, M.C.; SCHABBACH, L.M. Determination of solar reflectance index of ceramic coatings for use in outside surfaces. Materials Science Forum, v. 881, p. 251-256, 2016.

Segundo Alchapar e Correa (2016),

> Todos os materiais que compõem o invólucro do edifício têm propriedades físicas que determinam a transferência de calor: condutividade, densidade e calor específico, juntamente com as propriedades ópticas: refletância solar e emitância térmica. No entanto, apenas as duas últimas são propriedades dinâmicas superficiais, ou seja, que se alteram ao longo do tempo (ALCHAPAR; CORREA, 2016, p. 297).

Tendo em vista este comportamento variável, o padrão internacional para consumo eficiente de energia da Agencia de Proteção Ambiental dos EUA – o *Energy Star*, estabeleceu que para que um produto de cobertura de baixa inclinação possa se enquadrar dentro de suas recomendações, este deve demonstrar um albedo de pelo menos 65% quando novo e um albedo de pelo menos 50% três anos após a instalação (SHI *et al.,* 2019). Neste sentido, para manter a máxima economia de energia com resfriamento artificial, principalmente em climas quente e seco, e mitigar a formação das ilhas de calor urbano durante toda a vida útil dos materiais frios, as superfícies do envelope construtivo devem ter alta refletância solar, principalmente nas faixas visíveis e de infravermelho próximo, ter alta emitância infravermelha e manter ambas as propriedades ao longo de toda sua vida útil (BRETZ; AKBARI, 1997, p. 159).

Porém, inevitavelmente, com a exposição ao tempo e o envelhecimento natural das superfícies, o potencial ambiental e econômico de se utilizar estes materiais nos envelopes urbanos é diminuído (AOYAMA *et al.,* 2017). Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007) analisaram as alterações de refletância solar e emitância térmica de uma superfície quando exposta ao tempo. Como resultado de sua pesquisa, os autores observaram que as alterações superficiais ocorridas em suas amostras tiveram menor impacto em relação a emitância térmica, enquanto a refletância solar sofreu maior modificação, principalmente em materiais com alta refletância solar inicial.

Na pesquisa de Shi *et al.* (2019), a refletância solar de telhados frios foi estabilizada após dois anos de envelhecimento nas cidades de Xiamen e Chengdu, China, nos intervalos de 0,45-0,62 e 0,36-0,59 em ambas as cidades, respectivamente. Segundo os resultados obtidos através de simulações, a economia de energia demandada para climatização artificial das edificações, utilizando-se telhados frios, possui uma correlação linear em relação a mudança do albedo no telhado. Por fim, os autores estimaram que a aplicação de um novo revestimento de telhado

reflexivo pode diminuir o uso anual de energia para as áreas do último andar em 24,2% em Xiamen e 26,3% em Chengdu. No entanto, as reduções de albedo após o envelhecimento reduziram essas economias para 15,4% em Xiamen e 10,5% em Chengdu, respectivamente.

No trabalho de Krelling *et al.* (2019), a influência do envelhecimento foi avaliada sobre as alterações de refletância e emitância da superfície de telhas de fibrocimento. Os pesquisadores concluíram que a degradação das amostras "provocou a redução da refletância solar e aumento da emitância, levando ao acréscimo de 9,4% e 7,8% do somatório da carga térmica anual de refrigeração para as amostras cinza e branca, respectivamente" (KRELLING *et al.,* 2019, p.1).

A partir do exposto anteriormente, é possível compreender que "tanto a refletância solar quanto a emitância de onda longa são as propriedades mais importantes que podem afetar significativamente o desempenho térmico dos sistemas de cobertura frios" (SABER, 2021, p. 3). Portando, para que estas propriedades não se alterem significativamente ao longo do tempo, diversos métodos de limpeza e manutenção destas superfícies foram estudados a fim de se restaurar e/ou manter o albedo inicial das amostras, os quais serão expostos no próximo subitem.

2.2.3 Restauração das propriedades ópticas das telhas

A fim de se manter os benefícios da utilização de materiais frios nas superfícies urbanas, especificamente em coberturas, diversas pesquisas analisaram processos de limpeza capazes de restaurar as propriedades ópticas iniciais das telhas, degradadas pela ação natural da exposição ao tempo. Segundo Dornelles e Sichieri[*] e Seker e Tavil[**] *apud* Louzich *et al.* (2016),

> a alteração da absortância está intimamente ligada à facilidade de aderência da sujeira sobre a superfície do componente, da sua capacidade de limpeza com a incidência de chuvas, bem como relacionada à sua rugosidade superficial, sendo este um fator responsável pelo acúmulo de sujeira sobre a superfície (DORNELLES e SICHIERI, 2014; SEKER e TAVIL, 1996, *apud* LOUZICH *et al.,* 2016, p. 1272).

* DORNELLES, K. A; SICHIERI, E. Efeitos do intemperismo natural sobre a refletância de tintas brancas para coberturas. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 2014, Maceió. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2014. p. 1004- 1013

** SEKER, D. Z.; TAVIL, A. Ü. Evaluation of exterior building surface roughness degrees by photogrammetric methods. Building and Environment, v. 31, n. 4, p. 393-398, 1996

Levinson *et al.* (2005), analisaram o efeito dos processos de limpeza superficial sobre os ganhos térmicos em coberturas de PVC e, observaram que praticamente todo o material particulado depositado na superfície havia sido removida, com exceção das finas camadas de carbono orgânico e algumas manchas escuras isoladas de biomassa. Para a amostra em pior condição de degradação, cuja perda foi de aproximadamente 60% da refletância solar inicial, o processo de limpeza reduziu a perda de refletância para 14%. Os autores, para analisarem a influência dos diferentes processos de limpeza, naturais e artificiais, utilizaram quatro processos de laboratório: a secagem, o enxague, a lavagem e o branqueamento. Primeiro as amostras foram limpas para simular a ação do vento, depois enxaguadas para simular a ação da chuva, em seguida, as superfícies foram lavadas simulando um processo de limpeza caseiro usando um detergente de lavar louça. Por fim, todas as superfícies foram tratadas com uma mistura de hipoclorito de sódio e hidróxido de sódio ("*algae cleaner*") para simular processos de limpeza profissionais.

Akbari *et al.* (2005), também utilizou o mesmo método de limpeza de Levinson (2005), cuja lógica é de replicar os processos de limpeza naturais e artificiais. Foram coletados materiais em diferentes locais dos EUA e Canadá, totalizando 16 amostras. Segundo os autores,

> Primeiro, cada amostra foi limpa a seco para simular o efeito da remoção de poeira pelo vento. Depois de medições das amostras limpas a seco, elas foram lavadas com água corrente para simular o efeito da chuva. As amostras também foram lavadas com detergente e hipoclorito de sódio (NaClO) e solução de hidróxido de sódio (NaOH) (limpadores de algas) para simular o efeito de limpeza profissional (AKBARI *et al.,* 2005, p. 6-7).

Akbari *et al.* (2005) concluíram que todos os processos de limpeza utilizados foram eficazes, recuperando cerca de 90% da refletância original das amostras, sendo que em alguns casos foi necessário utilizar um produto "anti-alga" para restaurar o nível desejado de refletividade do material. Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007) também verificaram que a limpeza das amostras permitiu restaurar 93% das propriedades iniciais das telhas, analisando que a recuperação da refletância solar foi decorrente especialmente da remoção do material particulado acumulado. Segundo Mastrapostoli *et al.* (2013), se os processos de limpeza forem aplicados regularmente, o efeito do envelhecimento natural nas telhas pode ser reduzido para apenas 10% de perda em relação a refletância solar original.

Ferrari *et al.* (2014, p. 34), também utilizaram processos de limpeza que simulam fenômenos naturais, como o vento e a chuva, para telhas cerâmicas. Em sua metodologia,

> A superfície das amostras foi soprada com um secador de cabelo em fluxo de ar frio para simular o vento e foi lavado com água corrente fria para simular a chuva. Ambos os processos foram aplicados por 2 min em cada amostra e após cada processo, as telhas foram secas sob uma lâmpada de aquecimento.

No entanto, segundo os autores, "analisando para os diferentes processos de limpeza, não há grande recuperação da refletância solar nem após a limpeza nem após a lavagem" (FERRARI *et al.,* 2014, p. 38). Isso ocorre pois

> os processos de lavagem e branqueamento não eram adequados para as amostras analisadas na pesquisa, pois não podem ser aplicados em telhados cobertos com cerâmicas à base de argila. Um motivo adequado dessa falta de recuperação da refletância solar pode ser atribuído à morfologia das amostras. Por esse motivo, análises microestruturais, mineralógicas e químicas serão realizadas em todas as amostras, não contaminadas e sujas, a fim de melhor compreender esse comportamento específico (FERRARI *et al.,* 2014, p. 38).

Já no cenário nacional, analisando o desempenho térmico de telhas de fibrocimento através do estudo da variação de suas propriedades ópticas após o processo de envelhecimento natural seguido pela restauração das telhas através de limpeza e pintura, Krelling *et al.* (2019), concluíram que

> A limpeza da telha permitiu a recuperação das propriedades originais, com redução de carga térmica de 10,5% (cinza) e 13,4% (branca), quando comparadas ao material envelhecido. A pintura mostrou-se relevante apenas quando há intenção de mudança para uma coloração que favoreça o desempenho térmico (Krelling *et al.,* 2019, p. 1).

Dessa forma, é possível concluir que apesar das propriedades ópticas das superfícies opacas das edificações se degradarem ao longo do tempo, a limpeza e a manutenção periódica destes sistemas de cobertura são necessárias e eficientes para garantir o bom funcionamento dos telhados frios ao longo de sua vida útil. Segundo Kolokotroni *et al.* (2018), a manutenção destas propriedades para casas sem

refrigeração artificial, melhoraria o conforto térmico interno das construções e, para locais com ar condicionado, haveria uma redução significativa no gasto energético. Portanto, de acordo com o exposto ao longo do texto, além de diminuir a demanda de energia de refrigeração e melhorar o conforto térmico no verão, principalmente para climas quentes, os materiais frios também contribuem para a mitigação das ilhas de calor urbana.

2.3 Avaliação do envelhecimento natural de telhas

Conforme discutido nos capítulos anteriores, para mensurar a degradação nas superfícies das telhas, decorrentes da exposição ao tempo, e analisar quais os impactos sobre o desempenho térmico das mesmas, deve-se atentar principalmente à variação das propriedades ópticas das amostras analisadas. Para complementar esta avaliação também é interessante estudar as alterações dos parâmetros de cor decorrentes das modificações de absortância solar e emitância térmica. Além disso, pode-se também acompanhar as variações de temperatura superficial das telhas, ao longo do tempo, como indicador de desempenho térmico das coberturas e conforto térmico dos usuários. Sendo assim, este capítulo pretende compreender como cada uma das variáveis citadas acima podem ser mensuradas a fim de avaliarmos os impactos do envelhecimento natural de telhas sobre o seu desempenho térmico.

2.3.1 Recomendações nacionais e internacionais

A Norma brasileira referente ao desempenho térmico de coberturas, a NBR 15575-5 (2021), apresenta requisitos e critérios para verificação dos níveis mínimos esperados para estes sistemas. Tais exigências se referem às transmitâncias e absortâncias dos materiais utilizados na composição dos telhados e, seus valores máximos se ajustam conforme o zoneamento bioclimático brasileiro. Esta norma foi recentemente atualizada (ABNT, 2021), acrescentando uma emenda na qual recomenda a avaliação das possíveis alterações decorrentes da degradação dos revestimentos de paredes e coberturas, em relação aos seus valores de absortância solar, para a análise de desempenho térmico das edificações. Esta avaliação, recomendada de forma

normativa, é inédita no âmbito nacional e, tem como principal objetivo considerar o comportamento da unidade habitacional (UH) ao longo de sua vida útil (ABNT, 2021). Para se analisar tal degradação, o documento apresenta duas sugestões: a) o estudo dos produtos em uso, com inspeção sistemática de amostra representativa; ou b) o estudo de envelhecimento natural de corpos-de-prova de pequenas dimensões, os quais devem ser expostos em estações de envelhecimento natural pelo período de 3 anos.

Em contrapartida ao cenário nacional, diversas pesquisas na Europa e nos EUA já avaliam o comportamento a longo prazo dos materiais frios, utilizados principalmente em coberturas, e métodos de limpeza para restauração do albedo inicial, desde a década de 90, conforme apresentado nos itens anteriores. Além disso, nos EUA, a especificação de revestimentos para paredes e coberturas, com alta refletância solar e alta emitância térmica é promovida por administrações e organizações públicas, cujos resultados positivos de diversos testes e estudos têm encorajado o desenvolvimento de normas para medição das propriedades térmicas dos materiais e certificações de produtos comerciais. Tais recomendações, além de usufruírem de apoio financeiro para sua real inserção no mercado da construção civil, também têm sido incluídas nos códigos de obras das edificações. Sistemas de certificação ambiental para edifícios como o LEED (Leadership in Energy and Environmental Design - U. S. Green Building Council's) e o Green Globes também reconhecem o uso de produtos de alta refletância como boas práticas para reduzir o ganho de calor indesejado em edifícios e minimizar os efeitos das ilhas urbanas de calor.

Além destas certificações ambientais, outros órgãos internacionais também têm desenvolvido códigos e normas para a implantação destes materiais refletivos em edificações. As normas ASHRAE 90.1-2013 (novas edificações comerciais) e ASHRAE 90.2-2007 (novas edificações residenciais), por exemplo, oferecem subsídios para a instalação de coberturas frias, os chamados *cool roofs* (ASHRAE, 2007; 2013b). Especificamente no estado da Califórnia (EUA), a Norma *Title 24' building energy-efficiency (California Energy Commission, CEC)*, de 2013, prescreve refletância solar inicial mínima de 70% e emitância térmica inicial mínima de 75% para coberturas, desde que estas propriedades dos revestimentos tenham sido certificadas pelo *Cool Roofing Rating Council* - CRRC (Conselho de Certificação de Coberturas Refletivas).

No Brasil, além da NBR 15575, o Selo Procel Edificações (CENTRO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 2014), Etiqueta Nacional de

Conservação de Energia para edificações comerciais, de serviços, públicas e residenciais, também limita os valores de absortância solar do envelope construtivo para a certificação do nível de eficiência energética dessas edificações. O documento "Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais" (RTQ-R), no qual se baseia a etiquetagem, recomenda a medição dos valores de absortância de revestimentos segundo as normas estrangeiras ASTM E1918-06, ASTM E903-12, ASHRAE 74-1988 (ASHRAE, 1988). Porém, a confiabilidade e a credibilidade destes Selos Nacionais, que não consideram o desempenho a longo prazo dos materiais utilizados nas edificações e nas coberturas, podem ser questionadas.

Além disso, a base de dados de absortância solar de revestimentos disponíveis no Brasil é muito restrita, sendo comumente formada pela compilação genérica de dados disponibilizados em diferentes publicações nacionais e internacionais. A norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005) apresenta em sua parte 2, tabela B2, faixas de valores de absortância solar e emitância térmica para 12 diferentes materiais apenas em seu estado original, ou seja, sem envelhecimento, além de sete cores de pinturas. Já a norma de desempenho para edificações habitacionais, NBR 15575 (ABNT, 2021), refere-se aos dados publicados na NBR 15220 ou sugere a medição pelos métodos da ASTM C1549, ASTM E903 e ASTM E1918. Com exceção das publicações realizadas para um amplo espectro de amostras de tintas novas por Castro (2002) e Dornelles (2008), assim como a publicação de Ferreira e Prado (2003), a maior parte das bases de dados dessas propriedades disponível nacionalmente é genérica e pouco precisa, além de desatualizada.

2.3.2 Avaliação da variação de absortância solar

A principal forma para se caracterizar um revestimento como frio é a mensuração de suas propriedades ópticas: a absortância solar e a emitância térmica. A primeira é definida como a razão entre a energia radiante refletida e a energia radiante incidente (ABNT, 2005), sendo que há diversas formas para se obter esses valores referentes às superfícies dos materiais. Akbari *et al.* (2008), afirma que o CRRC (*Cool Roof Rating Council*) aceita três métodos de mensuraração de absortância, os quais estão regulamentados em normas internacionais da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e utilizam diferentes equipamentos de medição, sendo indicados para avaliação de superfícies com características diversas. Nos três casos, a absortância solar (α) é obtida a partir da refletância (ρ).

Segundo Dornelles (2021), estes três métodos, que utilizam equipamentos diferentes (espectrofotômetro, refletômetro e piranômetro) por serem normatizados, permitem a

> Confiabilidade dos resultados obtidos quando se considera suas particularidades e aplicabilidades em função da superfície a ser caracterizada. Especificamente o primeiro método (espectrofotômetro), indicado pela ASTM E903-12, tem sido o mais utilizado para obtenção de dados mais exatos de refletância e absortância solar para materiais no Brasil (DORNELLES, 2021, p. 20).

Segundo Maestri (2017, p. 64), os

> Espectrofotômetros são equipamentos que iluminam uma superfície com uma luz monocromática e captam a luz refletida numa esfera integradora. Essa incidência ocorre normalmente a superfície numa série de bandas espectrais (300 nm – 2500 nm) e fornecem a refletância solar da superfície.

Apesar de ser considerado um equipamento bastante preciso (CASTRO, 2002; FERREIRA e PRADO, 2003; DORNELLES, 2008), segundo Levinson *et al.* (2010), o espectrofotômetro com esfera integradora possui algumas limitações que devem ser observadas. Os autores indicam que o equipamento é mais preciso para amostras uniformes, pequenas (inferior a 10 cm x 15 cm) e planas em decorrência do tamanho do feixe de luz emitido, do ângulo de incidência do feixe luminoso e do tamanho do suporte do instrumento. No entanto, apesar desses limites, as medições realizadas com o espectrofotômetro "podem resultar valores de refletância com precisão de 0,006, quando ajustadas ao espectro padrão, para um dia sem nuvens" (MAESTRI, 2017, p. 67).

No cenário nacional do início dos anos 2000, os dados medidos com este equipamento começaram a ser publicados a partir da dissertação de mestrado de Castro (2002), na qual as refletâncias para 22 diferentes tonalidades de tintas produzidas por fabricante nacional foram medidas em espectrofotômetro com esfera integradora. No ano seguinte, Ferreira e Prado (2003) publicaram dados de refletância para revestimentos de cobertura (telhas novas), incluindo materiais metálicos com e sem pintura (alumínio, aço galvanizado, metal com banho de alumínio e zinco), cerâmica vermelha e branca, telhas de cimento colorido e telhas de fibrocimento, utilizando o mesmo método. Com a pesquisa de Dornelles (2008), além da apresentação da extensa base de dados relativa a absortância espectral e solar

de diversas tintas disponíveis no mercado brasileiro na época, a autora consagrou a necessidade de se determinar a refletância e absortância solar dos revestimentos de forma mais exata, fornecendo informações confiáveis, visto que apenas a percepção visual não é instrumento adequado.

Especificamente no âmbito da análise de envelhecimento de telhas, diversas pesquisas utilizaram os métodos descritos anteriormente para avaliar o impacto da degradação natural sobre as absortâncias solares das amostras analisadas. No trabalho de Dornelles, Caram e Sichieri (2015), cujo objetivo era determinar as alterações de absortância solar ocorridas em 20 corpos de prova submetidos ao intemperismo natural pelo período de 18 meses, os autores utilizaram um espectrofotômetro de duplo feixe (Varian – CARY – 5G) equipado com esfera integradora de 150mm. Foi considerado a radiação especular e difusa de acordo com a ASTM E903-96 e "a refletância foi determinada de 300 a 2500nm, faixa do espectro solar com maior concentração de energia solar de acordo com a ASTM G173-03" (DORNELLES *et al.,* 2015, p. 1588).

Na pesquisa de Shi *et al.* (2019), a refletância solar de 12 coberturas diferentes foi medida antes, a cada três meses e após a exposição de 32 meses ao intemperismo natural. Assim como no trabalho de Dornelles *et al.* (2015), os autores utilizaram um espectrômetro (PerkinElmer Lambda 950) equipado com esfera integradora de 150nm, operado de acordo com a ASTM E903-12. A faixa do espectro também foi determinada entre 300 a 2500nm e a refletância solar foi calculada pela média entre a refletância espectral solar ponderada e a irradiação espectral solar.

Da mesma forma, na pesquisa de Krelling *et al.* (2019), cujo objetivo foi de analisar a influência da degradação natural e do processo de limpeza e pintura em superfícies de telhas de fibrocimento sobre a emitância térmica e refletância solar, também foi utilizado um espectrofotômetro (PerkinElmer Lambda 1050) equipado com esfera integradora de 150mm. Segundo os autores

> O ensaio foi realizado com base na Norma ASTM E903: *Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres* (ASTM, 2012), na faixa espectral de 300 a 2500 nm, com intervalos de 5 nm. Após cada medição do espectrofotômetro, foi realizada a correção dos valores de refletância espectral com base na intensidade de radiação solar para cada comprimento de onda, obtida por meio de um espectro solar padrão (KRELLING *et al.,* 2019, p. 4).

2.3.3 Avaliação da variação de emitância térmica

A emitância térmica pode ser definida como o quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura. Os valores de emitância podem variar de 0 a 1, sendo 1 o valor referente ao corpo negro (ABNT, 2005). Segundo Pereira (2014, p. 18-19),

> Para um mesmo comprimento de onda de radiação, uma superfície apresenta o mesmo valor de emitância e absortância (considerando irradiação difusa ou superfície difusa). Porém, tais valores podem diferir muito quando avaliados para diferentes regiões espectrais. A emissão dos corpos que estão na superfície terrestre concentra-se no infravermelho, ou seja, nos comprimentos de onda mais longos da radiação térmica. Por isso, nos estudos relacionados ao desempenho térmico de edificações, utilizam-se valores de emitância integrados ao longo de comprimentos de onda longa (infravermelho).

Algumas pesquisas no âmbito nacional (MARINOSKI, *et al.,* 2013; BORTOLI *et al.,* 2016; SHIRAKAWA, *et al.,* 2018; KRELLING, *et al.,* 2019) utilizam um medidor portátil (D&S modelo AE1) para avaliação da emitância térmica de amostras. Em todos os casos, o procedimento de medição adotado segue as recomendações da Norma ASTM C1371-15: *Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers* (ASTM, 2015). Segundo Krelling *et al.* (2019, p. 3-4), em sua pesquisa,

> O detector foi continuamente calibrado, a partir das amostras padrão, entre cada uma das medições de emitância das amostras do material. Cada uma das seis amostras foi medida em cinco pontos diferentes da telha. Para todos os casos, o tempo de contato entre o detector e a amostra foi de 90 segundos, objetivando possibilitar a estabilização da medição, assim como padronizar o procedimento.

Na pesquisa de Pereira (2014), a autora tinha como principal objetivo compreender a influência da refletância solar e da emitância térmica do envelope construtivo sobre o desempenho térmico de edificações, para diferentes climas brasileiros. Seu objeto de análise foram amostras de tintas, com distintas refletâncias e emitâncias, aplicadas sobre chapas de alumínio, as quais foram expostas ao tempo por um período de 1 ano. Para medição de emitância, a autora utilizou o emissômetro

Model AE1 (*DT&S Devices ans Services Company*). Seus resultados mostraram que a degradação natural das amostras teve um maior impacto sobre a refletância do que sobre a emitância das superfícies analisadas, sendo que nas amostras de cor branca, foram medidas reduções de até 15% em relação à refletância inicial.

Na pesquisa de Shirakawa *et al.* (2018), os autores avaliaram a alteração de refletância solar e emitância térmica em amostras de fibrocimento, previamente carbonatas em condições laboratoriais e pintadas com tinta convencional branca, após 1 ano de exposição das mesmas às intempéries. Os experimentos foram realizados em 4 cidades distintas (São Paulo, Pirassununga, Belém, São Sebastião) e o equipamento utilizado para ensaio de emitância também foi o emissômetro Model AE1 (*DT&S Devices ans Services Company*). Assim como no trabalho de Pereira (2014), os resultados obtidos por Shirakawa *et al.* (2018) mostraram que, em decorrência da exposição ao tempo, houve uma redução na refletância, sendo o caso mais drástico ocorrido em Pirassununga, SP, onde foi observada uma intensa colonização por organismos fototróficos. No entanto,

> Embora a Análise de variância (fator único) da emitância tenha mostrado que houve variação significativa após um ano de exposição, do ponto de vista do efeito físico ao usuário este fator não traz alterações importantes (SHIRAKAWA *et al.,* 2018, p. 1237).

A pesquisa de Krelling *et al.* (2019), a qual também se propôs em avaliar a influência do envelhecimento sobre a refletância solar e a emitância térmica, utilizou duas telhas de fibrocimento, uma de cor branca e outra cinza, para produzir as amostras necessárias para o experimento. Assim como a pesquisa de Shirakawa (2018), os autores utilizaram um emissômetro fabricado pela empresa *Devices and Services Company* (D&S), modelo AE1. Foi observado que a degradação natural das amostras analisadas implicou em uma redução da refletância solar e um aumento da emitância térmica das amostras, fator que levou a um acréscimo de 9,4% e 7,8% no somatório da carga térmica anual de refrigeração artificial para as amostras cinza e branca, respectivamente.

2.3.4 Avaliação da variação de parâmetro de cor

Segundo Dornelles (2021, p. 21)

> As cores podem ser descritas por nomes ou designações numéricas. No entanto, os nomes de cores são uma forma pouco precisa de identificação. Para identificar com precisão a cor de um objeto, procura-se caracterizá-la por dados numéricos. Os resultados de comparações visuais de cores podem ser traduzidos por um conjunto de três números que se referem às três características cromáticas de matiz, claridade e saturação. A partir de tais características e utilizando-se um sistema de referência, é possível identificar objetivamente uma cor.

A matiz, se refere ao nome que damos às cores e se relaciona ao tipo de luz que atinge os olhos do observador. Segundo Dornelles (2008), "é a característica da sensação cromática que distingue, por exemplo, aquilo que se denomina "azul" daquilo que se denomina "vermelho"" (DORNELLES, 2008, p. 39). Já a claridade é a escala do claro ao escuro de uma determinada cor, em relação à escala de cinza que varia do branco ao preto, ou seja, é a quantidade de luz que atinge os olhos. Segundo Dornelles (2008), "trata-se da característica que distingue, por exemplo, aquilo que se denomina "azul" daquilo que se denomina "azul-claro"" (DORNELLES, 2008, p. 39). Por fim, a saturação relaciona-se à intensidade, vivacidade e palidez de uma cor. Para Dornelles (2008, p. 39),

> É o que distingue, por exemplo, o que se denomina "azul" do que se denomina "azul-acinzentado". Diz-se que uma tonalidade é saturada quando ela é pura, intensa. Ela se torna "dessaturada" à medida que se torna mais clara, escura ou acinzentada, ou seja, à medida que perde "cor".

A CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*), organização internacional de caráter normativo, é considerada a maior autoridade na área da iluminação. Foi fundada em 1900, em Zurique, com o objetivo de harmonizar internacionalmente os critérios de medição fotométrica para a iluminação a gás; hoje o Órgão incorpora novos campos de pesquisa, como a iluminação elétrica, a visão, a luz e a colorimetria (CIE, INMETRO, 2020). Esta organização definiu três espaços de cor, CIE XYZ, CIE L*C*h e CIE L*a*b*, para a comunicação e expressão das cores. O espaço de cor L*a*b*, também conhecido como espaço de cor CIELAB é atualmente o mais popular dos espaços de cores uniformes usados para avaliar as cores, onde "L" representa a

luminosidade e “a” e “b” representam coordenadas cromáticas. Esse espaço de cor é amplamente utilizado, pois correlaciona os valores de cor com a percepção visual, além de permitir identificar inconsistências ou desvios de uma cor padrão.

Segundo o site da Empresa Japonesa Konica Minolta* (2015), tais variáveis citadas anteriormente, correspondem a:

L* = Luminosidade (ou claridade)

a* = coordenada vermelho/verde (+a indica vermelho e –a indica verde)

b* = coordenada amarelo / azul (+b indica amarelo e –b indica azul)

C* = Saturação

h = Tonalidade (ou matiz)

Algumas pesquisas avaliaram a forma em que o envelhecimento natural pode afetar a durabilidade das cores nos revestimentos expostos às intempéries. Na pesquisa de Silva (2017), o objetivo do trabalho consistiu em avaliar as propriedades refletivas de pinturas frias e convencionais quando expostas ao processo de envelhecimento natural e “verificar a influência da formulação (tipo de pigmentos e teor de resina), nos resultados de avaliação de refletância e luminosidade das pinturas” (SILVA, 2017, p. 29). Especificamente para as análises de medidas de cor, a autora realizou os ensaios conforme a norma ASTM D 2244-89, utilizando colorímetro da marca Byk Gardner, geometria 45/0, que pode ser utilizado tanto em campo como em laboratório. Para avaliação dos resultados a autora utilizou o sistema CIE, baseado nas coordenadas L*a*b*, e selecionou 5 pontos distintos em cada corpo de prova para realizar as aferições. Os resultados obtidos especificamente para esta análise mostram que

> Há uma pequena diferença entre os valores de luminosidade (L) das pinturas frias em comparação com as convencionais. Entretanto, mesmo pinturas que apresentem valores de luminosidade muito próximos, como no caso das pinturas de cor cinzas frias e convencionais, podem apresentar valores de refletância muito distintos. A pintura fria de cor amarelo apresenta valor de (L) inferior ao apresentado pela pintura cinza convencional, mas apresenta valor de refletância solar superior em cerca de 10%. O que significa que nem sempre existe uma correlação direta

* Disponível em: < https://sensing.konicaminolta.us/br/blog/entendendo-o-espaco-de-cor-lab/> Acesso em 31 de ago. 2021

> entre cor, que ocorre na faixa do visível, e a refletância solar medida, que ocorre na região do infravermelho. Sendo assim, nem sempre a superfície mais clara possui maior refletância" (SILVA, 2017, p. 83).

Na pesquisa de Shirakawa *et al.* (2018), o principal objetivo do trabalho era

> Investigar a influência do envelhecimento natural na redução da refletância de uma tinta branca convencional exposta em quartas cidades do Brasil: São Paulo, SP, Pirassununga, SP, São Sebastião, SP e Belém, PA durante o primeiro ano de exposição" (SHIRAKAWA, 2018, p. 1230-1231).

Para a avaliação dessas alterações nos parâmetros de cor,

> Foi avaliada uma área de 2,5 cm de diâmetro. A cor foi medida antes e depois da exposição nos mesmos locais da refletância. Foi utilizado equipamento da BYK Gardner 45/0, que se baseia no sistema da Comissão Internacional sobre Iluminação (CIE) L* a* b*. No qual L* varia entre 0 e 100 (preto a branco), para a* valores negativos (verde) e valores positivos (vermelho); para b* valores negativos (azul) e valores positivos (amarelo) (SHIRAKAWA, 2018, p. 1232).

Como resultado desta análise, os autores perceberam que

> A refletância sofreu redução em função da redução da luminosidade (L*), principalmente em Pirassununga. Maior tendência ao vermelho (a* positivo) foi observada em Pirassununga, assim como a maior tendência ao amarelo (b* positivo). A maior intensidade de vermelho pode ser explicada pela ocorrência de terra vermelha característica da região de Pirassununga (SHIRAKAWA, 2018, p. 1235).

2.3.5 Avaliação da variação de temperatura superficial

A análise de variação de temperatura de uma superfície, ao longo do dia, permite compreender o desempenho térmico do sistema avaliado e como tal comportamento impacta no conforto térmico dos usuários. Um exemplo disso é que ao se diminuir a absorção da energia solar das coberturas, superfícies de alto albedo reduzem as temperaturas destas superfícies e, consequentemente, a transferência de calor para o interior do edifício, sendo que esta baixa temperatura superficial também diminui a contribuição por parte do edifício para a formação das ilhas de

calor (BRETZ; AKBARI, 1997). Para se compreender as variações das temperaturas superficiais, em telhas expostas ao tempo, devem-se também monitorar as condições climáticas locais, assim as comparações são feitas sob dados neutros e precisos relativos às temperaturas do ar e umidade ambientes.

Segundo Jacques (2000),

> A medição da temperatura ambiente pode ser usada como descritor climático, porém a temperatura ambiente não é coincidente com a temperatura da superfície da amostra. O clima é principalmente um efeito de superfície; portanto, a temperatura da superfície da amostra é mais influente nas propriedades de intemperismo do material do que a temperatura ambiente. Se dados precisos forem necessários, a temperatura da superfície da amostra deve ser monitorada. A fonte de radiação tem um efeito de aquecimento profundo na temperatura da superfície de uma amostra. O efeito preciso da radiação em uma amostra depende da própria fonte e das propriedades absorventes e condutoras específicas da amostra. Assim, cada material diferente é único em sua resposta ao clima (JACQUES, 2000, p. 1349).

Para Wypych (2018, p. 139),

> É imperativo ter informações precisas sobre todas as condições que influenciam a degradação (irradiância UV, temperatura, umidade relativa, concentração de poluentes, etc.). Alguns desses dados podem ser obtidos em uma estação local de monitoramento climático.

Para exemplificar pesquisas que avaliaram a variação da temperatura superficial de materiais coberturas, podemos citar o trabalho desenvolvido por Jo *et al.* (2010). Os autores monitoraram as temperaturas superficiais e a refletividade de uma cobertura fria a fim de documentar a economia de energia e a redução da temperatura superficial obtida através da substituição da cobertura de uma edificação existente por um mais refletivo. Tal monitoramento ocorreu através de uma rede de 24 sensores de temperatura superficiais, 6 no exterior e 6 no interior de cada uma das secções do telhado. Segundo os autores, a temperatura da superfície foi medida utilizando-se uma sonda RTD (*Resistance Temperature Detector*), sendo que a rede de sensores examinou de forma contínua a "temperatura superficial da telha, a temperatura do ar adjacente e a umidade relativa de ambos os lados do telhado do

edifício em intervalos de 30 minutos, de 13 de agosto a 19 de setembro de 2008" (JO *et al.*, 2010, p. 455).

No âmbito nacional, em pesquisa desenvolvida por Pereira (2014), a autora monitorou, durante um período de 12 meses, a variação das temperaturas superficiais de 5 amostras de tintas expostas às intempéries, posicionando-as "sobre uma plataforma horizontal com isolamento térmico (poliestireno expandido de 10 cm de espessura) na face interior" (PEREIRA, 2014, p. 53). Para cada tipo de tinta selecionada, a autora produziu 4 amostras de 2 tamanhos distintos, sendo que 1 amostra de cada tamanho foi limpa uma vez por mês e as demais permaneceram sem nenhum tipo de limpeza. As amostras maiores foram utilizadas para monitorar as temperaturas superficiais das tintas através de sensores do tipo termopar (tipo T). Já as amostras pequenas foram utilizadas para as medições de propriedades radiantes.

2.3.6 Estação de envelhecimento

Para avaliar o envelhecimento de telhas expostas ao tempo deve-se simular as condições nas quais tal processo ocorreria naturalmente (WYPYCH, 2018). Segundo Wypych,

> as amostras devem ser expostas de acordo com um dos padrões de exposição sugeridos, em particular, o padrão sugerido para o material específico a ser avaliado. As amostras expostas e o local de exposição devem ser mantidos sistematicamente para garantir que as condições de exposição não se alterem devido à cobertura de poeira, mudança na posição da amostra e mudança no entorno (WYPYCH, 2018, p. 139).

Segundo o *Weathering Test Guidebook*, desenvolvido pelo *Atlas Material Testing Solutions* (*ATLAS ELETRIC DEVICES COMPANY*), o teste de envelhecimento natural é definido como a exposição direta à insolação e às demais intempéries dos materiais a serem analisados em determinado experimento. Este processo é realizado através de uma "*exposure rack*" feita de alumínio anodizado, voltado à Sul (no hemisfério Norte) com uma angulação fixa, cujo tamanho médio das amostras a serem expostas é de 150 x 305 mm. O *Atlas Weathering Services Group* (AWSG) possui uma grande seleção de materiais expostos às intempéries espalhados por diversas cidades da América do Norte, Ásia, Europa e Oceania. Segundo Wypych, a maioria destas estações foi selecionada a fim de fornecer condições climáticas especiais, sendo que as estações de Phoenix, Arizona Miami, Flórida, EUA, e Sanary,

França, são consideradas referência. O autor ainda explica que o sul da Flórida é usado como base para testes de exposição ao tempo pelas principais industriais de materiais, pois possui ao longo de todo ano clima estável. Além disso, o clima do sul da Flórida causa efeitos de aceleração no envelhecimento natural devido à sua alta radiação, alta temperatura média, alta umidade e alta precipitação.

Figura 4: Tintas expostas ao tempo, Arizona



Fonte: Adaptado do Site Q-LAB*

A fim de regulamentar e normatizar o estudo da degradação dos materiais, existem alguns procedimentos recomendados por órgãos especializados para a realização dos testes de envelhecimento. A norma internacional ASTM G7/G7M *"Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials"* (ASTM, 2021) apresenta os procedimentos a serem adotados ao se realizar testes de envelhecimento natural em ambiente externo de materiais não-metálicos. Nela são apresentadas diversas orientações como a) Local para os testes, posicionamento das amostras na estrutura fixa, e orientação para exposição; b) Método de construção das estruturas para exposição (*exposure racks*); c) Instrumentação; d) Procedimento dos testes; e) Relatório de resultados; e f) Precisão e confiabilidade dos resultados.

* Disponível em: <https://www.q-lab.com/de-de/applications/paints-coatings> Acesso em 31 de ago. de 2021

Existem diversos tipos de métodos de exposição ao ar livre, sendo que a escolha deve ser determinada avaliando qual sistema permite uma melhor simulação da degradação que ocorre naturalmente através das intempéries. Portanto, essas recomendações metodológicas são variáveis e dependerão, principalmente, do tipo de material ou revestimento que será estudado, assim como das propriedades dos materiais que se pretende avaliar o efeito da degradação ao longo do tempo. Segundo Araujo e Dornelles (2022),

> especificamente para estações de envelhecimento natural, estas devem apresentar características estruturais que variam com o tipo de material a ser avaliado, assim como a distância acima do solo e a área circundante devem ser consideradas ao se planejar testes de envelhecimento em áreas externas. Além disso, a seleção do ângulo de exposição à radiação solar mais apropriado é de extrema importância, uma vez que influencia diretamente outros parâmetros ambientais: a quantidade de energia solar absorvida pelo material afeta a temperatura superficial e, por consequência, o tempo de umidade presente na amostra, e assim sucessivamente (ARAUJO; DORNELLES, 2022).

Em relação às estações de envelhecimento já existentes, "a base de envelhecimento padrão é feita de alumínio e suas angulações padrões são 0º (horizontal), 5º, 45º, 90º (vertical) e um ângulo igual a latitude do local no qual a estação está inserida" (WYPYCH, 2018, P. 144). Segundo o guia norte americano *Outdoor Weathering Basic Exposure Procedures*, desenvolvido pelo Q-LAB, a exposição em 0º é mais utilizada em coberturas pois promove um maior acúmulo de sujeira e poeira. Já a de 5º é recomendada para produtos automotivos pois permite uma maior drenagem e redução do acúmulo de sujeira que a inclinação anterior e é preferível pois evitam água parada em sua superfície. As exposições a 45º são ainda mais convenientes pois os dados medidos de umidade, temperatura superficial, sujeira e material orgânico são próximos aos valores médios entre os dois métodos extremos de exposição (0º e 90º), sendo esta angulação a mais indicada para produtos que não possuem uma especificação de angulação no seu uso. A exposição a 90º é mais recomendada para testar materiais construtivos que ficarão na posição vertical, como por exemplo revestimento de paredes. Por fim, a inclinação no mesmo ângulo da latitude do local onde o experimento será realizado permite uma exposição máxima à radiação solar para exposições em ângulos fixos.

Dessa forma, cada localidade e objeto de pesquisa possui exigências únicas que devem ser consideradas no projeto e execução da estação de envelhecimento. As mesas devem simular de forma realista o comportamento desses materiais em seus usos cotidianos, permitindo uma análise comportamental e patológica coerente. Com isso medidas feitas em laboratório comparando dados iniciais das amostras às finais, pós exposição, poderão mensurar de forma precisa os efeitos do envelhecimento no desempenho da edificação como um todo.

2.4 Conclusões do capítulo

Nesse capítulo foram abordados temas relativos à utilização de revestimentos frios no envelope construtivo, destacando-se sua aplicação para as coberturas das edificações. Conforme discutido pelos autores, os telhados são as faces construtivas com maior responsabilidade nos ganhos térmicos de uma edificação térrea, em decorrência de sua posição e angulação. Portanto, ao se controlar a absortância solar e a emitância térmica destes elementos, é possível melhorar o desempenho térmico e energético da edificação como um todo, assim como o conforto térmico dos usuários, de uma forma simples, efetiva e de baixo custo.

No entanto, essas estruturas se degradam ao longo do tempo, principalmente em decorrência do acúmulo de poeira e incidência dos raios UV. Com isso, a propriedade refletiva das coberturas frias pode perder eficiência ao longo de sua vida útil. Neste sentido, este capítulo também avaliou quais são os fatores que mais contribuem para o envelhecimento natural das telhas, como isso afeta as propriedades ópticas dos materiais e quais as alternativas existentes para se recuperar o desempenho térmico e energético das coberturas frias.

Com o objetivo de compreender as formas de mensuração do impacto do envelhecimento natural de telhas sobre seu desempenho térmico, este capítulo também estudou quais as recomendações normativas, nacionais e internacionais, para tal análise. Também foram avaliados os métodos utilizados por outros trabalhos acadêmicos para a medição das propriedades ópticas e parâmetro de cor e o monitoramento da temperatura superficial de telhas envelhecidas naturalmente. Por fim, o estudo relativo à construção e funcionamento das estações de envelhecimento, baseada em guias e normas internacionais, também foi fundamental para viabilizar a análise que este trabalho se propôs a fazer.

Portanto, diante dos tópicos que foram abordados nesse capítulo, pode-se destacar os seguintes pontos: 1) a responsabilidade das coberturas nos ganhos térmicos das edificações, principalmente térreas; 2) o impacto do envelhecimento natural de telhas, principalmente cujos revestimentos possuem alta refletância solar e emitância térmica inicial, sobre o desempenho térmico das mesmas; 3) a escassez de dados nacionais precisos relativos à absortância solar dos revestimentos do envelope construtivo, considerando o processo de degradação ao tempo; 4) a escassez de dados nacionais relativos à construção e funcionamento de uma estação de envelhecimento natural. Dessa forma, este trabalho foi desenvolvido a fim de preencher as lacunas aqui apresentadas e analisar o impacto do envelhecimento natural de telhas expostas às intempéries sobre suas características de absortância solar e desempenho térmico.

MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 5: Diagrama de delineamento da pesquisa



Fonte: a autora

3.1 Métodos utilizados

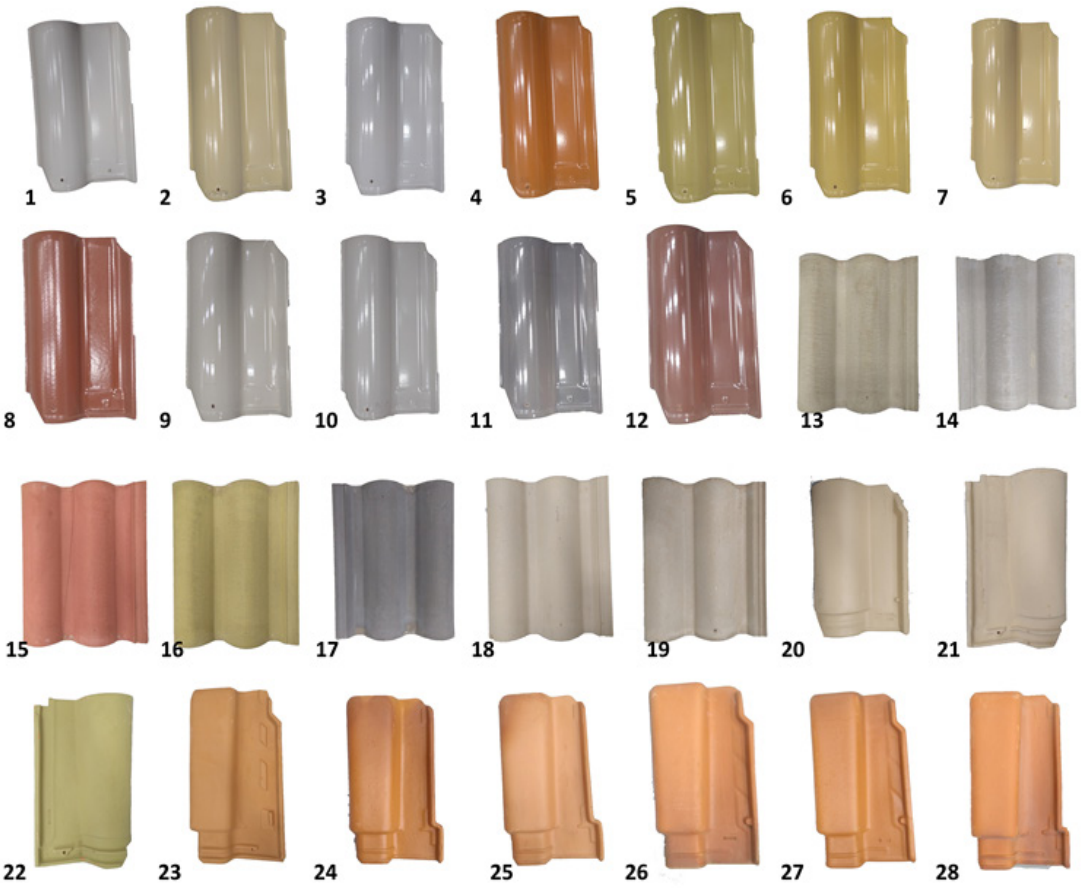
A pesquisa caracteriza-se como experimental, com medições em laboratório e em campo, assim como a análise e tratamento dos dados para avaliação dos impactos do envelhecimento natural de telhas expostas às intempéries, sobre suas características de absortância solar e desempenho térmico ao longo do tempo. A metodologia incluiu três fases: Etapa I - Seleção das telhas, preparo das amostras e montagem do sistema de envelhecimento; - Etapa II - Medição das propriedades de refletância, absortância e cor dos revestimentos em laboratório e temperatura superficial em campo; Etapa III – Análise e tratamento dos dados. Ao longo de toda a pesquisa foi realizada a atualização bibliográfica referente ao tema objeto da pesquisa.

3.1.1 ETAPA I: Seleção dos materiais e exposição ao tempo

3.1.1.1 Seleção de telhas

Foram selecionadas 28 telhas (Figura 6), adquiridas em comércio local (São Carlos, SP). Esta amostragem pode ser dividia em 3 grupos (Tabela 1): cerâmicas esmaltadas (cerâm. E | numeradas de 1 a 12), concreto (13 a 19) e cerâmicas pigmentadas e convencionais (cerâm. P e cerâm. C | 20 a 28). As telhas cerâmicas esmaltadas são aquelas cujas cores são fixadas através da aplicação de uma resina acrílica após a queima da telha cerâmica. As telhas de concreto apresentam colorações diferentes, cuja pigmentação é realizada diretamente na massa, tingindo a telha como um todo e não apenas a superfície superior, como ocorre nas telhas esmaltadas. Para o caso das telhas cerâmicas convencionais coloridas (telhas 20, 21 e 22), a pigmentação difere do processo das telhas esmaltadas pois sua aplicação ocorre através de uma camada de tinta em pó derivado do aquecimento em altas temperaturas. Já a telha cerâmica número 24 é a única amostra dentre as telhas cerâmicas que possui resina transparente aplicada em sua superfície para impermeabilização da peça. A gama de amostras selecionadas contribuiu para a análise mais complexa dos impactos do envelhecimento natural de telhas expostas às intempéries sobre suas características de absortância solar e desempenho térmico ao longo do tempo, de tal forma a garantir a aplicabilidade e precisão dos resultados de acordo com o tipo de telha avaliada. Cada material e tipo de acabamento superficial respondem de forma diferente à reflexão e absorção da radiação solar, por isso a importância de se considerar suas particularidades no método simplificado de medição da absortância solar.

Figura 6: Telhas selecionadas para a pesquisa em seu estado original



Fonte: a autora

Tabela 1: Tipologias telhas selecionadas para a pesquisa

telha	material	cor	fábrica	telha	material	cor	fábrica
1	cerâm. E	branca	karina	**15**	concreto	vermelho	vilhena
2	cerâm. E	marfim	karina	**16**	concreto	mostarda	vilhena
3	cerâm. E	cinza	karina	**17**	concreto	canela	vilhena
4	cerâm. E	caramelo	karina	**18**	concreto	marfim	vilhena
5	cerâm. E	verde	karina	**19**	concreto	natural	vilhena
6	cerâm. E	ravena	karina	**20**	cerâm. P	branca	ouro preto
7	cerâm. E	palha	karina	**21**	cerâm. P	marfim	top telha
8	cerâm. E	bordô	karina	**22**	cerâm. P	vigo	top telha
9	cerâm. E	areira	vilhena	**23**	cerâm. C	natural*	top telha
10	cerâm. E	cinza dark	vilhena	**24**	cerâm. C	natural	morandim
11	cerâm. E	grafite	vilhena	**25**	cerâm. R	natural**	morandim
12	cerâm. E	café	vilhena	**26**	cerâm. C	natural	barrobelo
13	concreto	damasco	vilhena	**27**	cerâm. C	natural	barrobelo
14	conreto	cristal	vilhena	**28**	cerâm. C	natural	vista alegre

Fonte: a autora

* Telha cerâmica convencional impermeabilizada pelo fabricante

** Telha cerâmica convencional resinada pelo fabricante

3.1.1.2 Preparo das amostras

Em decorrência da restrição em relação ao tamanho máximo das amostras (ideal entre 5 e 10 cm de lado) e em relação às suas planicidades, foi necessário o recorte de amostras menores de cada telha para a realização das medições de refletância espectral em espectrofotômetro, e posterior cálculo da absortância solar. Assim, a lateral retilínea das telhas foi cortada e extraídas amostras menores em dimensões aproximadas entre 5 e 10 cm (Figura 7a), no total de 4 amostras para cada telha (para as medidas de 0, 3, 6 e 24 meses de exposição). A parte maior da telha, e mais irregular (devido às curvas de encaixe do próprio sistema), também foi exposta na base de envelhecimento (Figura 7b). Por terem uma dimensão mais próxima às telhas usadas nas edificações, o processo de envelhecimento natural destas peças maiores ocorre de forma mais homogênea que nas amostras menores, se aproximando ao que ocorre naturalmente nas coberturas. Além disso, como o espaço livre em sua superfície inferior acomoda melhor os termopares para monitoramento da temperatura, é a partir destas amostras que é possível analisar o impacto da degradação da absortância nos ganhos térmicos das telhas.

Figura 7: Amostras extraídas das telhas para exposição ao tempo.



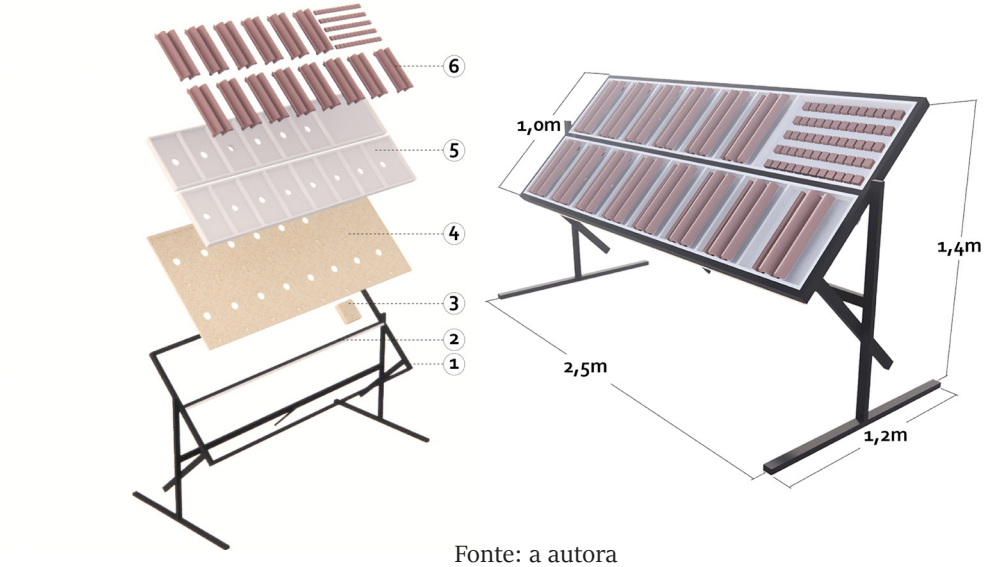
a) Amostras menores para laboratório b) Parte maior para termopares

Fonte: a autora

3.1.1.3 Projeto da Estação de Envelhecimento Natural

O sistema de envelhecimento das telhas objetiva reproduzir uma cobertura convencional. A Figura 8 apresenta uma vista geral e uma vista explodida com detalhamento de todos os componentes que fazem parte da estrutura (Tabela 2).

Figura 8: Projeto da Estação de Envelhecimento



Fonte: a autora

Tabela 2: Elementos constituintes da Estação de Envelhecimento

item	nome da peça	função	material
1	estrutura	Sustentar toda a carga das amostras a serem analisadas, permitindo um giro da mesa de apoio de 0° a 80°	Tubo de aço galvanizado da marca Metalon, 30 x 40 - 1,25 mm
2	canaleta	Organizar a distribuição dos termopares ao longo da mesa de apoio	Canaleta em alumínio para passagem de fios elétricos
3	caixote	Organizar a chegada dos termopares, advindos do sistema de aquisição de dados	Chapa de OSB (Oriented Strand Board)
4	suporte	Apoiar as amostras a serem analisadas	Chapa de OSB (Oriented Strand Board)
5	divisórias	Isolar as amostras de qualquer superfície que pudesse interferir no monitoramento das temperaturas	Placas de isopor de espessura 15 mm
6	amostras	Objeto de análise	Telhas de diferentes materiais e acabamento

Fonte: a autora

O projeto da estação foi baseado em referências internacionais, cujo detalhamento está especificado em guias como o Weathering Testing Guidebook (ATLAS-MTS) e o Outdoor Weathering: Basic Exposure Procedures (Q-LAB), além da norma ASTM G7/G7M (ASTM, 2021). Esta base de envelhecimento, além de permitir a exposição das amostras de acordo com a angulação recomendada pelos fabricantes, também foi posicionada na direção que recebe mais radiação ao longo do ano. Assim, é possível simular as funções de um telhado usual em uma situação de maior vulnerabilidade em relação às intempéries. Outro ponto a se destacar, assim como realizado na pesquisa de Pereira (2014), já discutido anteriormente, este trabalho incluiu o monitoramento simultâneo e contínuo das temperaturas superficiais inferiores das telhas ao longo de todo o período de exposição ao tempo. Com isso, foi possível avaliar o desempenho térmico dos revestimentos ao longo de todo o experimento, associando de forma concomitante a alteração de absortância sobre a variação de temperatura superficial das amostras analisadas. Este é um diferencial importante da estação de envelhecimento proposta, em comparação com as estações comumente utilizadas em estudos de degradação dos materiais. Além disso, tanto as amostras quanto o local de exposição foram preservados para que nenhum elemento externo invalidasse o processo avaliado (WYPYCH, 2013).

3.1.1.4 Execução da Estrutura da Estação

Na figura 9 apresenta-se o passo a passo das etapas de montagem do sistema de envelhecimento natural utilizado nesta pesquisa, o qual foi inteiramente construído pelos técnicos do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP, em São Carlos e, nas figuras 10 e 11 a estação de envelhecimento finalizada e instalada.

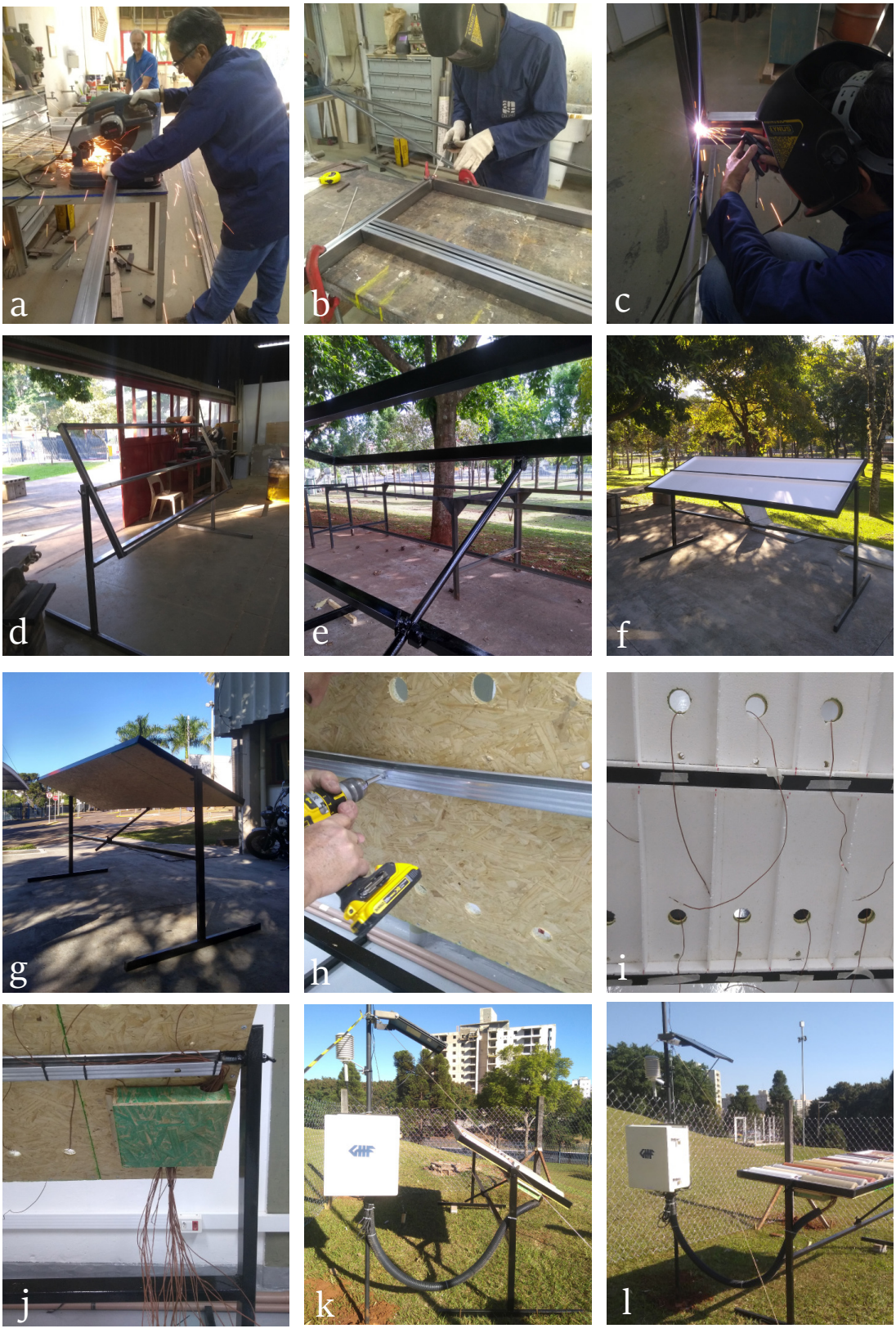
Especificamente sobre a materialidade utilizada no sistema desenvolvido neste trabalho, foram utilizados tubos de aço galvanizado para a estruturação (Figura 9a e 9b). Após a soldagem desta estrutura metálica (Figura 9c), os tubos foram pintados com tinta de esmalte sintético (Figura 9d), a fim de evitar que o metal oxidasse ao longo da exposição. Placas de madeira do tipo OSB (Figura 9g) foram parafusadas no aço galvanizado para a vedação dos vazios deixados pela estrutura metálica e, servir como base de apoio para o isopor que fica em contato com as telhas. Este isopor, com espessura de 15 mm (Figura 10f), foi instalado a fim de garantir o isolamento térmico entre a estrutura metálica e as telhas e, entre telhas, através de uma fixação utilizando-se silicone. O sistema de travamento da estação de envelhecimento (Figura 9e) é livre (0° - 80°), possibilitando a sua reutilização em futuras pesquisas que analisem outros

tipos de telhas, cujas inclinações sejam distintas das estudadas neste trabalho. Após finalização da montagem da estrutura, foram realizados recortes circulares (Figura 9h), utilizando-se furadeira e serra copo, nas extremidades da mesa e nos centros de cada nicho que receberia uma determinada telha. Essas aberturas foram feitas a fim de se escoar a água pluvial que pudesse ficar acumulada nas arestas da estrutura, além de permitir a passagem de toda a instalação prevista para o monitoramento desejado (Figura 9i).

Como esta estação foi pensada não apenas para expor as amostras, mas também para acompanhar as alterações da temperatura nas superfícies inferiores das telhas de forma contínua, na parte de trás do sistema, junto à placa de OSB, foram instalados um trilho, a fim de servir como guia para os fios, e uma caixa, para armazenamento e proteção dos termopares que ficariam aderidos às telhas (Figura 9j). O contato entre o termopar e a superfície inferior da telha se dá através de uma das passagens circulares abertas com a serra copo, conforme comentado anteriormente, o que permite ao sensor de medição das temperaturas superficiais uma maior proteção em relação às intempéries, evitando assim interferências na leitura dos dados. O abastecimento energético do sistema de captação de dados (Figura 9k), é feito através de um painel solar (21 Volts), que alimenta todo o sistema de captura de dados das temperaturas da face interior das telhas. Além disso, dois equipamentos que medem a umidade relativa do ar (HMP 35C, Vaisala) e a incidência de radiação (Piranômetro SP Lite, Kipp & Zonen) também foram instalados a fim de complementar os dados analisados e finalizar a montagem da estação de envelhecimento (Figura 9l).

Dessa forma, a estação de envelhecimento foi projetada e executada com o objetivo de analisar tanto as alterações das propriedades ópticas das superfícies externas das telhas, quanto monitorar a temperatura nas superfícies inferiores (Figuras 10 e 11). O primeiro objetivo foi possibilitado através das amostras menores, expostas em uma das extremidades da mesa e fixadas com silicone na base de isopor. Estas peças, que não possuem nenhum sistema de monitoramento acoplado a elas, foram recortadas nas dimensões limitantes do equipamento de medição de refletância em laboratório pois sua única função é a mensuração da alteração de absortância e parâmetro de cor das superfícies através de suas retiradas periódicas ao longo dos 24 meses de experimento. Já as telhas maiores, isoladas uma das outras através das tiras de isopor, foram os objetos de análise no experimento de monitoramento das temperaturas, possibilitado através da utilização dos termopares e de todo o sistema de aquisição de dados desenvolvido.

Figura 9: Passo a passo da montagem do sistema de envelhecimento



Fonte: a autora

Figura 10: Telhas instaladas na estação de envelhecimento



Fonte: a autora

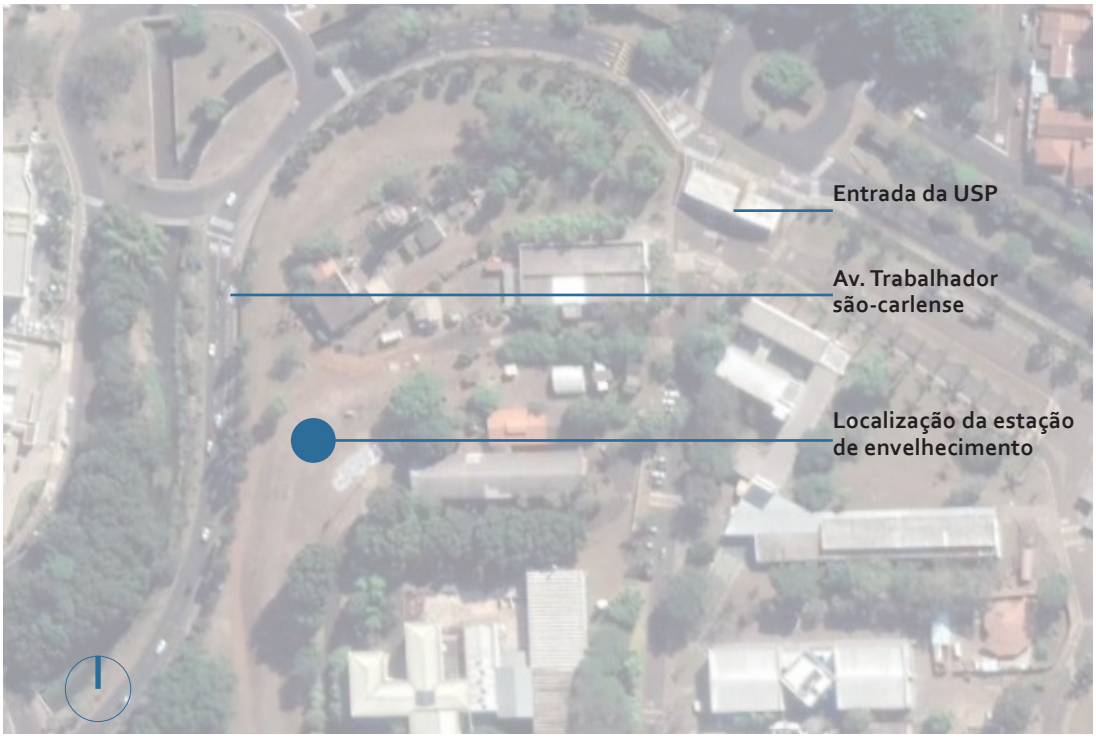
Figura 11: Telhas instaladas na estação de envelhecimento



Fonte: a autora

Após a finalização da execução da estação de envelhecimento, o sistema foi instalado dentro da Área I, do campus da Universidade de São Paulo, localizado na cidade de São Carlos, SP (Figura 12), sem a presença de vegetação alta de forma que pudesse interferir no sombreamento das amostras expostas. Sua implantação está posicionada à Norte, de tal forma que todas as telhas do sistema de envelhecimento possam receber a maior incidência da radiação solar possível, durante todo o período de exposição ao tempo. O local está em uma área com poucas árvores ao seu redor, evitando assim o acúmulo de folhas indesejadas nas suas superfícies e sombreamentos exagerados. Seu entorno imediato engloba uma avenida com alto fluxo de veículos, e consequente exposição aos materiais particulados presentes no ar; um córrego e edifícios institucionais pertencentes à própria Universidade de São Paulo. De modo geral, sua localização promove uma boa aproximação à degradação ocorrida naturalmente nos sistemas de coberturas urbanos em cidades de médio porte, como ocorre na cidade de São Carlos. No entanto, é importante ressaltar que cada localidade possui uma especificidade em relação ao clima, ao material particulado presente no ar e à incidência da radiação solar global sobre as superfícies. Dessa forma, conforme discutido na revisão bibliográfica, o envelhecimento das superfícies pode variar conforme a sua localização.

Figura 12: Localização aérea da estação de envelhecimento



Fonte: a autora

Em decorrência à pandemia de COVID-19 em 2020 e 2021, a estrutura ficou muitos meses sem que pudesse ser acessada pelos pesquisadores e o projeto como um todo atrasou. Em virtude desta situação, a estrutura que havia sido projetada para ficar 12 meses exposta às intempéries, acabou ficando o dobro do tempo planejado.

Por um lado, pudemos avaliar o efeito da degradação das telhas sobre seu desempenho térmico por um maior período de exposição, o que foi extremamente positivo para o trabalho já que o tempo de envelhecimento avaliado se aproximou do recomendado pela norma, que é de no mínimo 3 anos (ABNT, 2021). Por outro lado, a madeira do OSB não suportou o desgaste de 24 meses de exposição e acabou cedendo (Figura 13a e 13b). Com isso, 3 amostras menores, que seriam levadas para medição em laboratório ao final do período avaliado, foram perdidas (T14, T26, T27). Porém, todas as amostras maiores, as quais estavam conectadas aos termopares para monitoramento de temperatura superficial, mantiveram-se inteiras. Em junho de 2021 a placa de OSB deteriorada foi substituída por uma nova (Figura 14) e está instalada na estação até o presente momento. Pretende-se deixar as telhas expostas até completarem um período total de 60 meses de exposição às intempéries.

Figura 13: Estrutura de OSB deteriorada



a) Vista face inferior OSB deteriorado

b) Vista face superior OSB deteriorado

Fonte: a autora

Figura 14: Telhas instaladas na estação de envelhecimento após reforma da placa de OSB



Fonte: a autora

3.1.2 ETAPA II: Medições em Laboratório e Campo

3.1.2.1 Determinação da Absortância Solar

As medidas de reflexão espectral das amostras selecionadas foram realizadas em espectrofotômetro com esfera integradora, para posterior cálculo da absortância. Esta análise de alta precisão varre toda a região do espectro solar, englobando suas três faixas (ultravioleta, visível e infravermelho), o que permite a análise específica sobre cada região do espectro que interesse.

Conforme descrito no trabalho de Araujo e Dornelles (2022), as medições de refletância foram realizadas com dois equipamentos de fabricantes diferentes: o espectrofotômetro Varian modelo CARY 5G, do Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica da Universidade Federal de São Carlos (Figura 15a), para as medidas de 0, 3 e 6 meses de exposição; e o espectrofotômetro da PerkinElmer, modelo Lambda 1050, da Universidade Federal de Santa Catarina (Figura 15b), para as medições após 24 meses de exposição ao tempo. Ambos os equipamentos utilizam a esfera integradora de 150 mm de diâmetro para detecção da refletância difusa. Para todas as medições, adotou-se o procedimento apresentado na ASTM E903 (2020a) na faixa espectral de 300 a 2500nm, com intervalos de 5nm, e posterior ajuste ao espectro solar padrão apresentado na ASTM G173-13 (ASTM, 2020b). A refletância solar (ρ_{solar}) de cada telha é calculada a partir da integração das curvas de refletância espectral, e a absortância solar (α_{solar}) a partir da Equação 1.

$$\alpha_{solar} = 1 - \rho_{solar} \qquad \text{Equação 1}$$

Também conforme consta no trabalho de Araujo e Dornelles (2022), devido à pandemia de COVID-19 em 2020 e 2021, não foi possível realizar a medição de refletância espectral aos 24 meses no mesmo equipamento utilizado nas etapas anteriores, devido à impossibilidade de acesso ao laboratório da UFSCar nesse período. Desta forma, buscou-se uma alternativa de equipamento de mesmas características técnicas ao utilizado anteriormente, sendo realizada a medição na UFSC, em Florianópolis-SC, mantendo-se condições de ensaio iguais às anteriores. Em todas as etapas, as amostras foram cuidadosamente removidas da estação de envelhecimento, armazenadas em uma caixa de forma a não remover o material

particulado que estava aderido às superfícies e transportadas até os laboratórios para a realização das medições.

Figura 15: Espectrofotômetros utilizados nas medições de refletância espectral.



a) Varian CARY 5G (UFSCar) b) Perkin Elmer Lambda 1050 (UFSC)

Fonte: (a) a autora; (b) adaptado de Krelling *et al.* (2019)

3.1.2.2 Medição de Emitância térmica

Para medição da emitância térmica das amostras selecionadas, foi utilizado um emissômetro portátil da D&S, modelo AE1 (Figura 16), "equipado com dois discos para calibração, um de alta emitância (0,88) e outro de baixa emitância (0,06)" (DAL SOGLIO *et al.,* 2018). Como o Laboratório de Conforto Ambiental (LCA) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP São Carlos (IAU-USP) não possui esse equipamento, a aferição foi realizada na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianópolis-SC.

Assim como na pesquisa de Silva *et al.* (2020), as medições seguiram as recomendações da norma ASTM C1371-15: Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers (ASTM, 2015). O valor da emitância foi obtido através do deslocamento do emissômetro sobre as amostras, sendo que cada medição teve uma duração de noventa segundos.

No entanto, ao invés de três medições por amostra, conforme recomenda a norma, em decorrência do tamanho reduzido das telhas recortadas, foram realizadas apenas duas medições para cada amostra, o que gerou dois valores de emitância para cada uma. Desta forma, uma média simples foi calculada para se obter o valor médio final de emitância para as telhas novas e envelhecidas em 24 meses.

Figura 16: Emissômetro portátil



Fonte: adaptado de Website Devices and Services*, 2022

3.1.2.3 Medição dos Parâmetros de Cor

Nesta pesquisa foi realizado o ensaio de determinação da cor dos materiais analisados, conforme a norma ASTM D2244-15 “Calculation of color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates” (ASTM, 2015). O equipamento utilizado foi o colorímetro portátil Colorium 2, da marca Delta Color (Figura 17). Este equipamento calcula 5 variáveis relativas às cores das superfícies das amostras. Estas são: luminosidade, coordenada vermelho/verde, coordenada amarelo / azul, saturação e tonalidade ou matiz. Tais resultados foram organizados em tabelas comparativas em relação às telhas novas e após 24 meses de exposição. O objetivo principal desta análise é compreender quais são as variáveis que mais sofrem alteração conforme o envelhecimento superficial das telhas e como tais resultados podem se relacionar às alterações de absortâncias das peças analisadas.

Figura 17: Colorímetro portátil utilizado na pesquisa



Fonte: a autora

* Disponível em: <https://www.devicesandservices.com/prod03.htm> Acesso em 03 de fev. 2022

3.1.2.4 Monitoramento das Temperaturas Superficiais

Com o objetivo de avaliar a influência das alterações de absortância solar e suas capacidades refletivas, decorrentes do envelhecimento natural das telhas, sobre os ganhos térmicos das mesmas, o monitoramento contínuo das temperaturas superficiais inferiores das amostras selecionadas foi realizado (Figura 18a). As medições foram realizadas no canteiro experimental do Laboratório de Conforto Ambiental (LCA) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP São Carlos (IAU-USP). O monitoramento foi realizado utilizando-se sensores termopares do tipo T (Cobre-Constantan), aderidos às superfícies inferiores das amostras e termômetros de infravermelho da marca Testo modelo S30-T1, com resolução de 0,1°C. A ligação do termopar com a face inferior da amostra foi realizada através de uma pasta térmica e uma fita adesiva metálica de baixa emitância, a fim de minimizar interferências externas no monitoramento dos dados (Figura 18b).

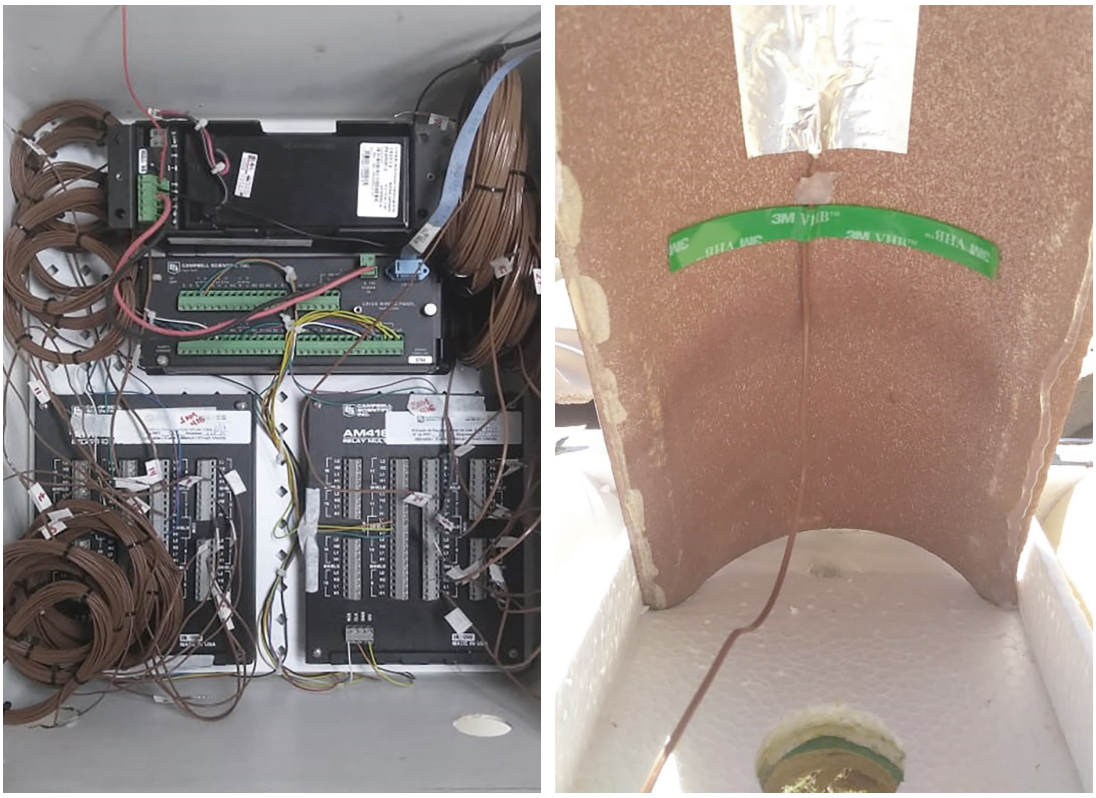
Complementarmente ao monitoramento, para análise simultânea dos efeitos da degradação da absortância no desempenho térmico das telhas, também foram registradas imagens termográficas das amostras novas e envelhecidas em 24 meses. Para isso, foi utilizada a câmera termográfica, modelo Testo 870 com resolução de infravermelho de 120x160 pixels e sensibilidade térmica < 100 mK a +30°C. As imagens foram organizadas em tabelas comparativas a fim de se detectar quais as amostras apresentaram maiores temperaturas superficiais superiores e correlacionar tais informações às alterações de absortância decorrentes da exposição às intempéries.

Para maior entendimento das variações de temperatura nas telhas expostas ao tempo, também foram monitoradas as condições climáticas locais, a partir de dois equipamentos acoplados ao sistema: o piranômetro e sonda HMP 35C. O primeiro, modelo SP Lite (Kipp e Zonen), mede a radiação solar global incidente no local onde está instalada a base de envelhecimento e, o segundo, da marca Vaisala, monitora a umidade e temperatura relativa do ar. Ambos os equipamentos estão ligados ao sistema de aquisição de dados (Figura 15a), onde também se conectam os 28 termopares que estão conectados às telhas expostas na estação de envelhecimento.

A caixa responsável por armazenar todos os dados medidos ao longo dos 24 meses de intemperismo é composta por uma bateria do tipo nobreak (12V, 7Ah), alimentada por um painel solar de 12 V (Figura 19), um Data Logger do tipo CR10X, responsável por coletar e armazenar os dados medidos e dois multiplexadores que aumentam as saídas do Data Logger, permitindo a medição simultânea de todas as

amostras. Tal registrador de dados foi programado no software PC 20 (Campbell) para fazer a aquisição dos dados de temperatura das telhas (e dos equipamentos de suporte de medição das condições climáticas locais) a cada minuto e calcular a média de tais valores a cada 30 minutos.

Figura 18: Sistema se ligação dos termopares utilizados na pesquisa.



a) Sistema de aquisição de dados b) Ligação do termopar na telha

Fonte: a autora

Figura 19: Sistema de medição complementar e alimentação da estação de envelhecimento.



Fonte: a autora

3.1.2.5 Efeitos da degradação da absortância solar no desempenho térmico das telhas

A estação de envelhecimento iniciou suas medições no dia 13 de jul. de 2019. Desde esta data o equipamento monitora as temperaturas superficiais das telhas e coleta os dados citados no item 3.1.2.3. Conforme descrito anteriormente, as amostras menores de cada telha, utilizadas para avaliação em laboratório da degradação da absortância, também foram expostas na estação nesta mesma data. Com o intuito de analisar de forma conjunta os efeitos da degradação da absortância solar em relação ao desempenho térmico das telhas, foram organizados dados comparativos para 4 períodos diferentes ao longo dos 24 meses de exposição. Os dados retratam os estágios do envelhecimento superficial das telhas nos dias 14 de jul. de 2019 (0m), 13 de out. de 2019 (3m), 14 de jan. de 2020 (6m) e 14 de jul. de 2021 (24m). As telhas permanecerão na estação para obter resultados após 5 anos de exposição ao tempo, o que será alcançado em 14 de julho de 2024. Este período de 60 meses de envelhecimento é baseado nos critérios adotados por parte dos programas norte-americanos CRRC (Cool Roof Rating Council) e EPA (Environmental Protection Agency), os quais estabelecem que os fabricantes forneçam resultados de refletância solar e emitância térmica dos revestimentos após, ao menos, 3 anos de exposição natural (SLEIMAN *et al.,* 2011).

Conforme comentado nos capítulos anteriores, a emenda à NBR 15575-1 (ABNT, 2021) apresenta valores teóricos de absortância à radiação solar obtidos a partir de uma equação empírica (Equação 2), supondo três anos de envelhecimento natural ($\alpha_{t=3}$). Assim, no próximo capítulo, os valores de absortância solar das telhas avaliadas nesta pesquisa serão utilizados na equação 2 para estimativa da absortância solar após 3 anos de exposição (julho de 2022) e, para verificar a relação entre os dados medidos experimentalmente, ao longo dos 2 anos de exposição, com os valores teóricos apresentados na norma.

$$\alpha_{t=3} = 0{,}07*(\alpha_{t=0})^2 + 0{,}59* \alpha_{t=0} + 0{,}27 \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:

$\alpha_{t=3}$ é a absortância à radiação solar da superfície externa após degradação de três anos (adimensional);

$\alpha_{t=0}$ é a absortância à radiação solar inicial da superfície externa (adimensional);

RESULTADOS

4.1 Análise e tratamento dos dados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos ao longo desta pesquisa a fim de se avaliar os impactos do envelhecimento natural de telhas expostas às intempéries sobre suas características de absortância solar e desempenho térmico ao longo de dois anos. Conforme discutido anteriormente, foram realizadas medições em laboratório, referente às características ópticas e de cor das amostras analisadas, e em campo para monitoramento das temperaturas superficiais das telhas. A seguir, cada uma dessas medições é exposta separadamente, para análise individual de cada variável, além da análise climática realizada para todo o período de exposição. A partir destes dados, foi possível correlacionar todas as medições a fim de se compreender de que forma a degradação da absortância solar impacta no desempenho térmico das telhas expostas ao envelhecimento natural ao longo do tempo.

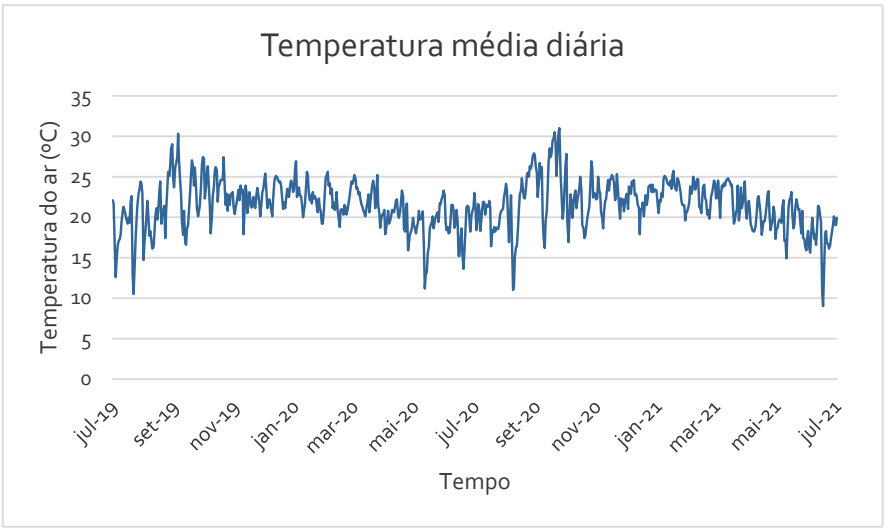
4.1.1 Dados climáticos

Para se compreender as alterações ocorridas nas superfícies das amostras expostas ao tempo, primeiramente é necessário avaliar o clima local ao longo de todo o período de envelhecimento (Jul. 2019 - Jul. 2021). A partir dos dados da Estação da Embrapa Pecuária Sudeste, disponibilizados pela Embrapa [*], foram elaborados 5 gráficos relativos às variáveis climáticas que influenciam diretamente na degradação das telhas ao longo do tempo: Temperatura média anual (Figura 20a), Precipitação diária (Figura 20b), Umidade relativa média diária (Figura 20c), Velocidade média dos ventos diários (Figura 20d) e Radiação solar diária (Figura 20e).

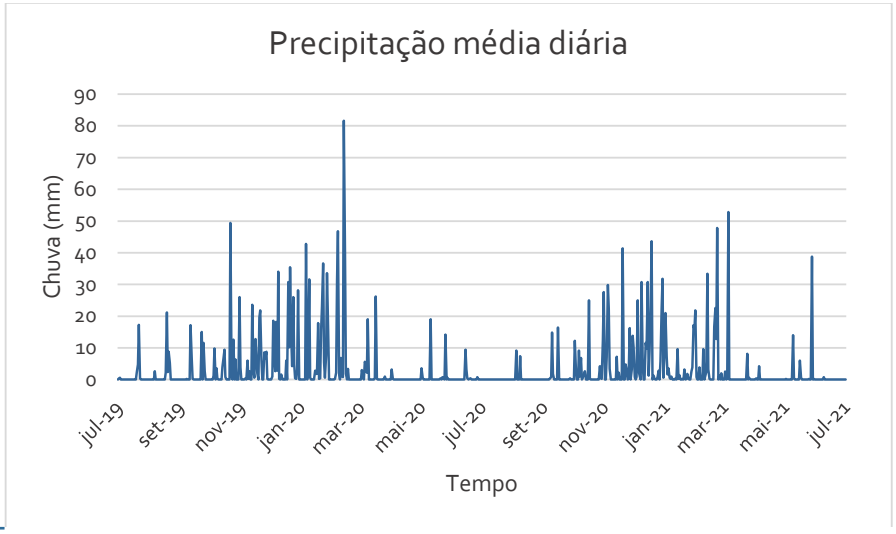
* EMBRAPA. Disponível em: < http://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg=inicio>. Acesso em: 25 jan. 2022.

Figura 20: Temperatura média diária, Precipitação diária, Umidade relativa média diária, Velocidade média dos ventos diários e Radiação solar diária para a cidade de São Carlos, SP

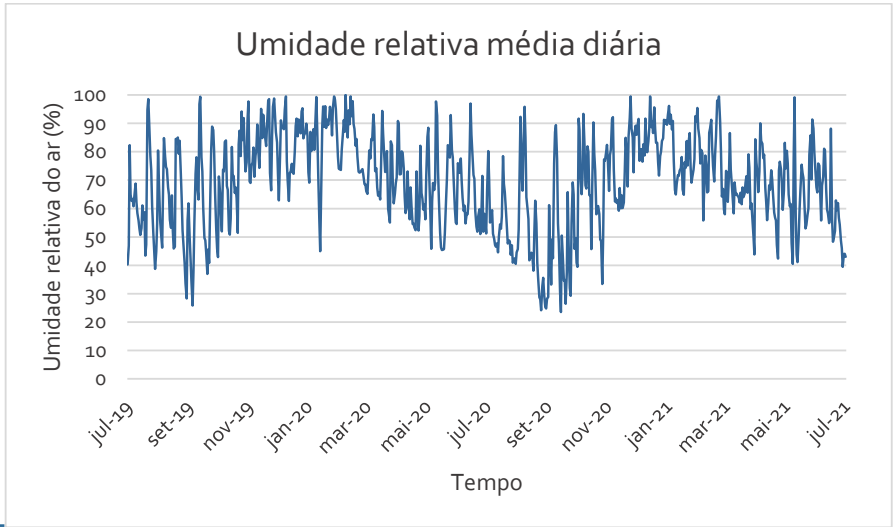
a

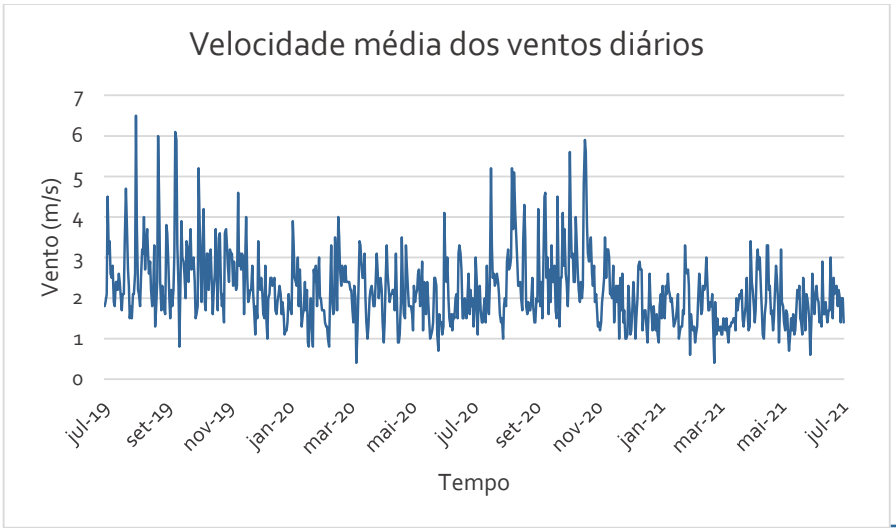


b

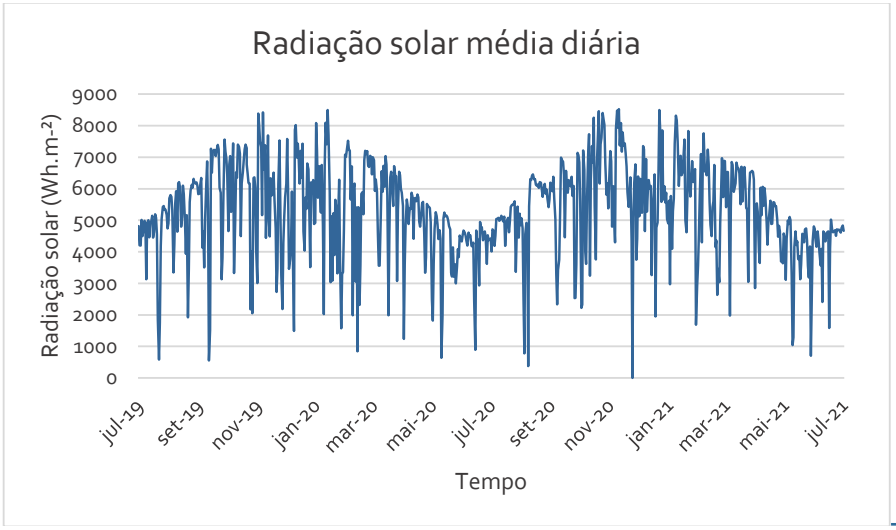


c





d



e

Fonte: a autora

Ao analisarmos de forma conjunta as 5 variáveis expostas acima, podemos perceber algumas correlações que serão destacadas a seguir. A primeira análise refere-se aos períodos mais chuvosos, de novembro a março, que coincide com os meses com menor amplitude térmica entre os dias avaliados, em decorrência da maior umidade relativa do ar. De maio a setembro há pouca precipitação, assim como maior amplitude térmica entre os dias, demonstrando um comportamento oposto ao que ocorre nos meses descritos anteriormente. Abril e outubro são meses de transição entre os períodos chuvosos e secos.

Tal avaliação demonstra que o clima para a cidade de São Carlos, SP, pode ser classificado em dois grupos principais, ao invés de 4 estações bem definidas: 1) úmido e com menor amplitude térmica, 2) seco com maior amplitude térmica. Essa

alternância entre períodos mais chuvosos e mais secos impacta diretamente na forma em que as telhas expostas ao tempo irão se degradar. Enquanto no período mais seco pode haver uma maior deposição de poeira nas superfícies das coberturas, as chuvas podem acabar retirando o excesso de material particulado depositado sobre as amostras.

De agosto a outubro foram registradas as maiores velocidades médias dos ventos diários. Neste período há pouca precipitação, conforme comentado anteriormente, o que juntamente com a ação dos ventos também pode ser considerada como um fator de limpeza natural das superfícies, retardando sua degradação natural. No entanto, nos meses mais quentes subsequentes, de novembro a fevereiro, quando o Hemisfério Sul está mais inclinado ao Sol, há uma maior incidência da radiação solar sobre as superfícies, fazendo com que a incidência principalmente dos raios UV desbotem e degradem com mais intensidade as propriedades ópticas dos materiais expostos ao tempo.

Em decorrência da influência de tantos fatores climáticos sobre o envelhecimento natural das superfícies urbanas, principalmente as coberturas, a análise do efeito da degradação natural deve considerar, no mínimo, um período de 12 meses de exposição a fim de avaliar o efeito total do ciclo anual do clima para cada localidade. Este trabalho avaliou um período de exposição de 24 meses, menos do que os 36 meses recomendados pelo CRRC (Cool Roof Rating Council), EPA (Environmental Protection Agency) e NBR 15575 (ABNT, 2021). No entanto, pretende-se manter as amostras das telhas selecionadas nesta pesquisa expostas na estação de envelhecimento para se obter resultados de degradação após 5 anos de exposição ao tempo, o que será alcançado em 14 de julho de 2024.

4.1.2 Refletância e Absortância Solar

A partir das medições em espectrofotômetro, foi feito o tratamento dos dados para análise dos resultados obtidos em laboratório. A cada trimestre foram medidas e calculadas as refletâncias totais das amostras das telhas para três intervalos do espectro solar: ultravioleta (300 a 380nm), visível (380 a 780nm) e infravermelho (780 a 2500nm), além do espectro solar total (300 a 2500nm). A absortância solar obtida foi calculada segundo a equação $\alpha=1-\rho$.

O método para ajuste das refletâncias e absortâncias ao espectro solar padrão a ser adotado nesta pesquisa é o mesmo apresentado por Dornelles (2008) e Levinson

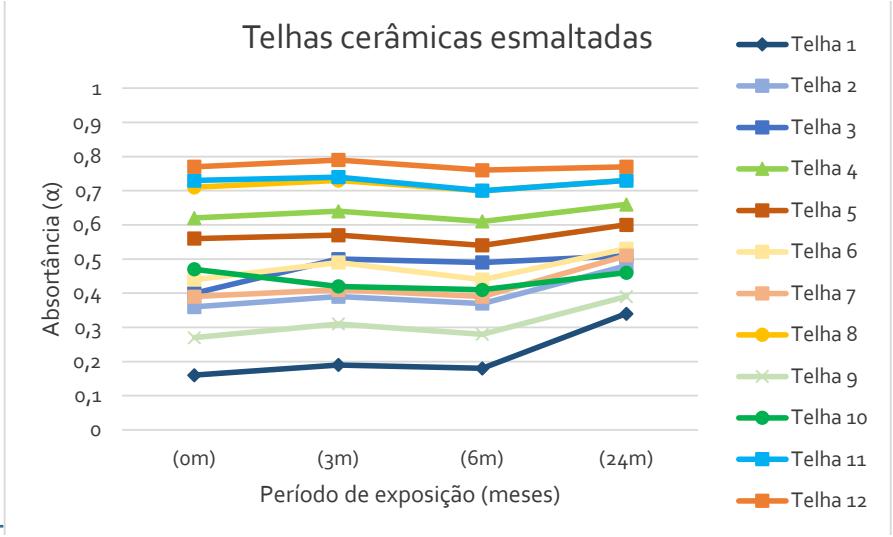
et al. (2010). Além disso, adotou-se também uma incerteza de medição na ordem de 2%, conforme relatado no *Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas* (CB3E, 2015).

As absortâncias das telhas para cada fase de seu envelhecimento natural (novas, 3m, 6m e 24m.) são apresentadas na figura a seguir. A Figura 21a apresenta a variação de absortância nas amostras das telhas cerâmicas esmaltadas (Telhas 1-12), a Figura 21b das telhas de concreto (Telhas 13-19) e, a Figura 21c, os resultados obtidos para as telhas cerâmicas convencionais (Telhas 20-28).

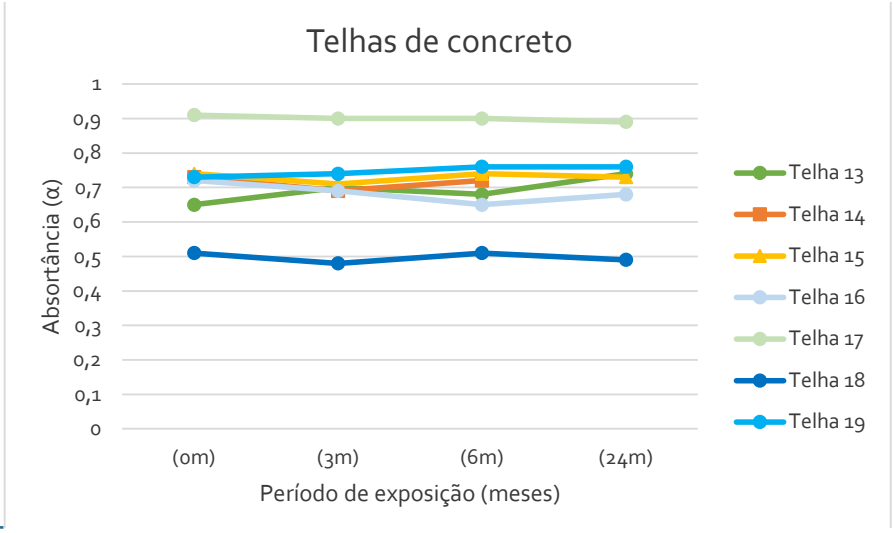
As amostras das telhas números 14, 26 e 27 que seriam utilizadas para a medição de absortância solar aos 24 meses de exposição, foram danificadas na superfície em decorrência da deterioração da estrutura de OSB, citada anteriormente e, portanto, excluídas dessa etapa de medição em laboratório. No entanto, as medições de temperatura das respectivas telhas continuaram normalmente, já que as peças maiores não foram danificadas.

Figura 21: Absortância solar das telhas nas 4 diferentes fases da exposição ao tempo

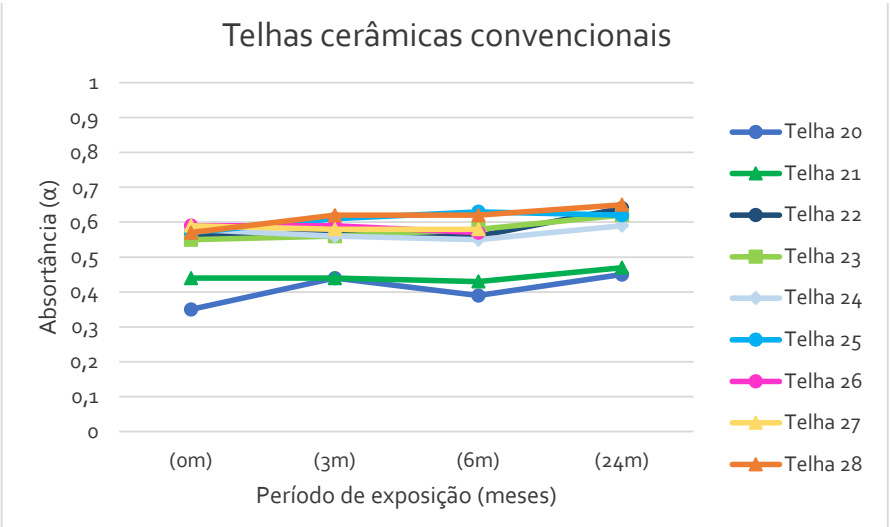
a



b



c



Fonte: a autora

Na Tabela 3, além das absortâncias totais das telhas para os 4 estágios de exposição ao intemperismo natural, também é feita uma análise contendo a diferença percentual na alteração da absortância solar total entre os meses 0 e 3m ($\Delta_{3m\text{-}0m}$), 0 e 6m ($\Delta_{6m\text{-}0m}$) e 0 e 24m ($\Delta_{24m\text{-}0m}$).

A partir destes dados, observou-se que nos primeiros 3 meses de exposição houve aumento da absortância solar total para a maioria das telhas, cuja variação ficou entre 1% e 28% de acréscimo. Este período coincide com a época mais seca do ano na cidade de São Carlos, SP, entre os meses de julho e outubro, com aumento da presença de material particulado suspenso no ar. Este fato justifica o aumento da absortância solar nas telhas de coloração mais clara (menor absortâcia inicial) e a diminuição da absortância solar nas telhas de coloração mais escura (maior absortância inicial). Este comportamento já foi evidenciado em outras pesquisas, como as realizadas por Akbari *et al.* (2005), Alchapar e Correa (2016), Ferrari *et al.* (2014) e Dornelles (2021).

No entanto, no período mais chuvoso, entre outubro de 2019 e janeiro de 2020, a maior parte das amostras apresentou redução da absortância solar em relação àquela medida aos 3 meses de exposição, com tendência de recuperação em relação aos valores originais. Esse comportamento no estágio de 6 meses de envelhecimento provavelmente seja em decorrência da limpeza natural do material particulado acumulado na superfície, através do escoamento da água da chuva. Os resultados obtidos após 2 anos de exposição das telhas indicam que a maioria das amostras apresentou aumento da absortância ao final do período, sendo que apenas 4 das 28 amostras apresentaram redução da absortância solar total em relação à original (T10, T16, T17 e T18), com redução mais significativa para a amostra T16 (-5,5%).

A amostra que sofreu maior efeito da degradação da absortância foi a telha cerâmica esmaltada de cor branca (T1), com aumento de 112,5% em sua absortância solar após 24 meses de exposição ($\alpha_{t=0}$ = 0,16 para $\alpha_{t=24}$ = 0,34). Esta perda significativa já era esperada, já que outros trabalhos também evidenciaram que para as superfícies frias, o impacto do envelhecimento natural é maior do que em superfícies convencionais (Akbari *et al.,* 2005; Synnefa *et al.,* 2007; Mastrapostoli *et al.,* 2016; Shi *et al.,* 2019). No entanto, assim como evidenciado por Alchapar *et al.* (2014), mesmo sendo a amostra com maior perda de refletância ao longo do tempo, a telha cerâmica esmaltada branca (T1) continua tendo o melhor desempenho térmico mesmo após os 24 meses de exposição (ver item 4.1.5).

Tabela 3: Absortância solar total das telhas novas (om), aos 3, 6 e 24 meses de exposição, e diferenças (em %) na absortância após 3 meses, 6 meses e 24 meses

telha	αT om	αT 3m	αT 6m	αT 24m	ΔαT (3-om%)	ΔαT (6-om%)	ΔαT (24-om%)
1	0,16	0,19	0,18	0,34	18,7%	12,5%	112,5%
2	0,36	0,39	0,37	0,48	8,3%	2,7%	33%
3	0,40	0,50	0,49	0,51	25%	22,5%	27,5%
4	0,62	0,64	0,61	0,66	3,2%	-1,6%	6,4%
5	0,56	0,57	0,54	0,60	1,8%	-3,5%	7,1%
6	0,44	0,49	0,44	0,53	11,3%	0%	20,4%
7	0,39	0,41	0,39	0,51	5,1%	0%	30,7%
8	0,71	0,73	0,70	0,73	2,8%	-1,4%	2,8%
9	0,27	0,31	0,28	0,39	14,8%	3,7%	44,4%
10	0,47	0,42	0,41	0,46	-10,6%	-12,7%	-2,1%
11	0,73	0,74	0,70	0,73	1,4%	-4,1%	0%
12	0,77	0,79	0,76	0,77	2,5%	-1,3%	0%
13	0,65	0,70	0,68	0,74	7,6%	4,6%	13,8%
14	0,73	0,69	0,72	-	-5,4%	-1,3%	-
15	0,74	0,71	0,74	0,73	-4,0%	-1,3%	0%
16	0,72	0,69	0,65	0,68	-4,1%	0%	-5,5%
17	0,91	0,90	0,90	0,89	-1,0%	-1,0%	-2,2%
18	0,51	0,48	0,51	0,49	-5,9%	0%	-3,9%
19	0,73	0,74	0,76	0,76	1,3%	-9,7%	4,1%
20	0,35	0,44	0,39	0,45	25,7%	-1,0%	28,6%
21	0,44	0,44	0,43	0,47	0%	-2,3%	6,8%
22	0,56	0,57	0,56	0,64	1,8%	0%	14,3%
23	0,55	0,56	0,58	0,62	1,8%	5,5%	12,7%
24	0,58	0,56	0,55	0,59	-3,4%	-5,1%	1,7%
25	0,57	0,61	0,63	0,62	7,0%	10,5%	8,8%
26	0,59	0,59	0,57	-	0%	-3,4%	-
27	0,59	0,58	0,58	-	-1,7%	-1,7%	-
28	0,57	0,62	0,62	0,65	8,8%	8,8%	14,0%

Fonte: a autora

A fim de se compreender o desempenho térmico das amostras analisadas de forma mais completa, a Tabela 4 apresenta os valores de absortância solar para cada região do espectro solar. A faixa mais importante a ser avaliada é a infravermelha, já que além de corresponder a mais da metade do espectro solar total, é a região que se relaciona diretamente com o aquecimento dos ambientes (Dornelles, 2008). Pode-se notar que para as telhas cerâmicas esmaltadas e cerâmicas convencionais houve um aumento na absortância relativa ao infravermelho em todas as amostras, com exceção da T10 (cerâmica esmaltada na cor cinza escuro), que teve uma diminuição de 2%. Em relação às telhas de concreto, das 7 amostras expostas ao tempo, 4 apresentaram uma diminuição nos valores relativos às absortâncias na faixa do infravermelho, variando de -2% a -9%. A diminuição da absortância total e no infravermelho dessas amostras pode estar associada ao desbotamento superficial das telhas, já que em todos os casos, houve também diminuição no valor de suas absortâncias totais.

Assim como ocorreu com a absortância solar total, a telha que sofreu maior variação na absorção de IV foi a telha esmaltada branca, T1, cujo aumento foi de 77%. Calculando-se o coeficiente de correlação de Pearson entre a variação de absortância total e a variação de absortância específica para a faixa de infravermelho de todas as amostras, obtemos um valor de 0,89. Segundo Paranhos *et al.* (2014), esse valor demonstra que há forte correlação entre ambas variações.

No entanto, o valor médio total da absortância não necessariamente reflete a proporcionalidade das três faixas do espectro analisada, ou seja, nem sempre uma telha com maior valor médio de absortância terá a maior absortância relativa para as três faixas (UV, VIS e IV). Por exemplo, ao compararmos as únicas duas amostras com absortâncias iniciais totais exatamente iguais, mas feitas a partir de diferentes materiais, como as T11 (cerâmica esmaltada) e T14 (concreto), cuja absortância solar total inicial é igual a $\alpha om = 0,73$, notamos que para as faixas do UV e VIS a T11 possui valores mais altos, porém, para a região do IV essa relação se inverte. Isso faz com que a telha cerâmica esmaltada T11, mesmo tendo o mesmo valor de absortância solar total inicial que a T14, possua desempenho térmico levemente superior, já que sua temperatura superficial média inicial é 1,4°C mais baixa (Apêndice E). Para uma análise mais completa, seria interessante repetir esta comparação ao final dos 24 meses de exposição, porém não foi possível fazer esta avaliação entre a variação de absortância ao longo do tempo para ambas as telhas citadas acima pois a amostra relativa ao estágio de envelhecimento final da T14 foi deteriorada.

A mesma análise pode ser feita entre as T8 (cerâmica esmaltada) e T16

(concreto). Ambas possuem valores de absortância solar inicial próximas, α0 T8= 0,71 e α0 T14= 0,72. O mesmo ocorre para a situação após o envelhecimento, sendo suas absortâncias iguais a α24 T8 = 0,73 e α24 T14 = 0,68. Em todos os estágios de envelhecimento, a telha cerâmica esmaltada demonstrou um menor valor de absortância para a faixa do infravermelho. Mesmo que para as faixas de UV e VIS essa relação se inverta, a temperatura superficial atingida pela telha de concreto ao final dos 24 meses de exposição é 2ºC mais elevada que na telha cerâmica esmaltada (Apêndice E).

Ao compararmos as telhas T4 (cerâmica esmaltada) e T13 (concreto), há um comportamento similar ao descrito anteriormente entre as telhas T8 e T16. A absortância solar total inicial de ambas é de α0 T4 = 0,62 e α0 T13 = 0,65. Já suas absortâncias totais para o estágio de envelhecimento final são α24 T4 = 0,66 e α24 T13 = 0,74. Assim como na comparação descrita no parágrafo anterior, aqui a telha cerâmica esmaltada (T4) também apresentou menor valor relativo à absortância de infravermelho em todos os estágios de envelhecimento em relação à telha de concreto (T13). Mesmo que as absortâncias no UV e VIS sejam maiores na telha cerâmica, em decorrência de sua baixa absortância no IV, a telha T4 apresentou melhor desempenho térmico (Apêndice E) tanto no início quanto no final do experimento, já que sua temperatura superficial inicial foi 3,2ºC inferior à T13 e ao final do s 24 meses de exposição, 2,0ºC inferior à T13.

A última comparação a ser feita refere-se a 3 amostras de telhas cerâmicas, duas esmaltadas (T6 e T10) e uma natural (T21), cujas absortâncias iniciais e finais são bastante próximas (α0 T6= 0,44; α0 T10= 0,47; α0 T21= 0,44; α24 T6= 0,53; α24 T10= 0,46; α24 T21= 0,47). Nota-se que apesar dos acabamentos superficiais serem distintos a olho nu, os valores relativos às absortâncias nas faixas do infravermelho são semelhantes, independentemente do estágio de envelhecimento, já que as três amostras possuem a mesma matéria prima. Como indicador de desempenho térmico, as temperaturas superficiais apresentadas pelas telhas T6, T10 e T21, no inicio da exposição, foram, respectivamente de 45,6ºC, 44,8ºC e 45,9 ºC. Esses valores demonstram diferença máxima de 1,1 ºC entre as três amostras. Já após os 24 meses de envelhecimento, as temperaturas superficiais apresentadas pelas telhas T6, T10 e T21, foram, respectivamente de 46,7ºC, 47,3ºC e 46,1ºC, demonstrando uma diferença máxima de 1,2ºC entre as três amostras. Isso demonstra que o desempenho térmico entre amostras com a mesma matéria prima e absortâncias solares semelhantes, pode ser aproximado, mesmo que seus acabamentos superficiais sejam diferentes.

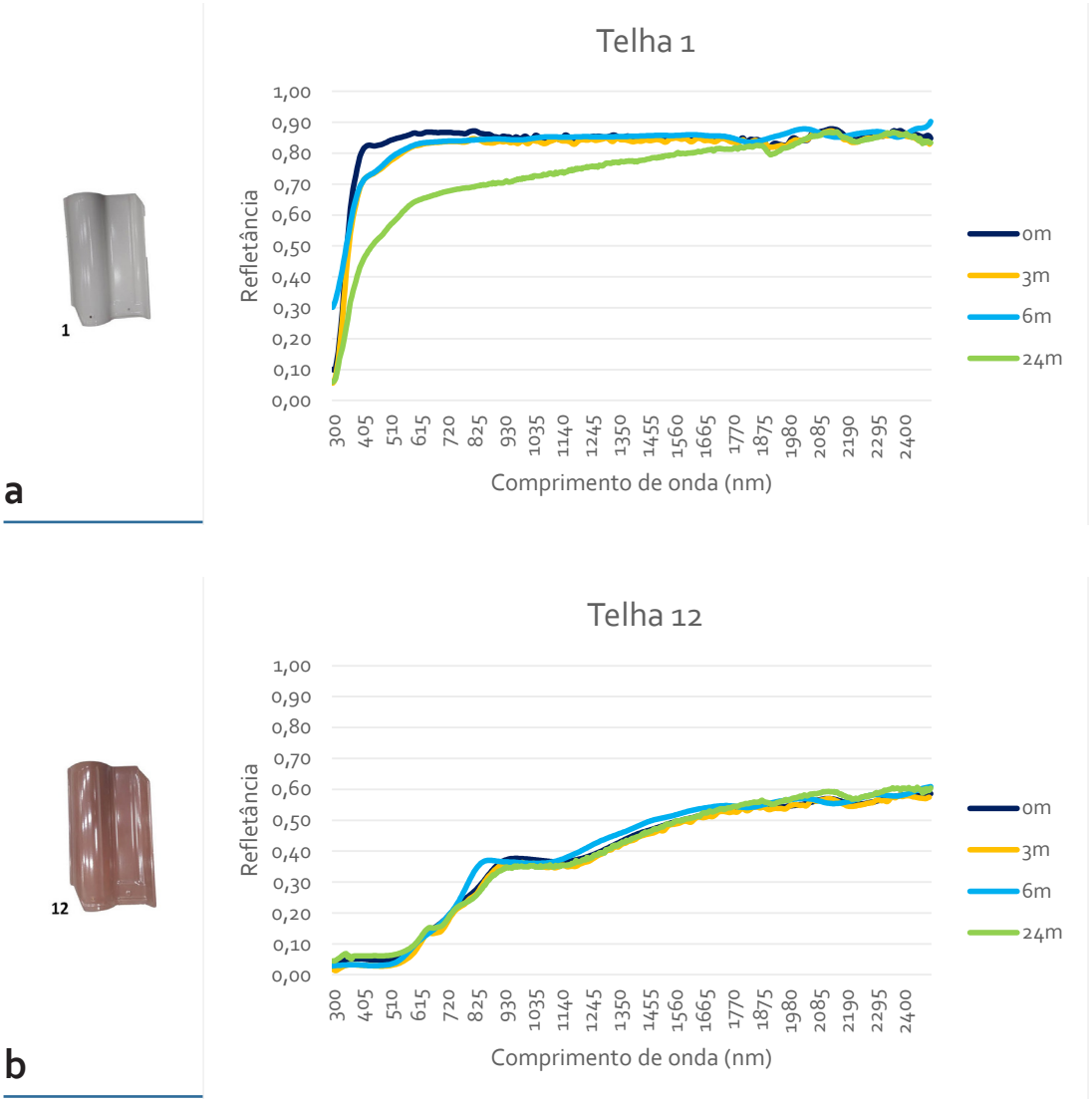
Tabela 4: Absortância solar para todas as regiões do espectro solar das telhas novas (0m), aos 3, 6 e 24 meses de exposição

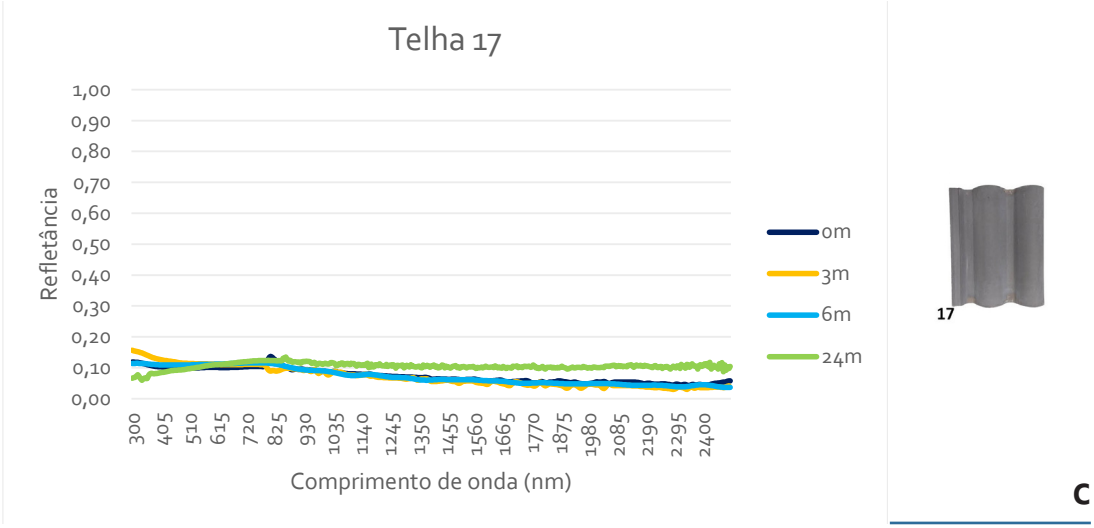
telha	α 0m			α 3m			α 6m			α 24m			ΔαIV (24-0m%)
	UV	VIS	IV	UV	VIS	IV	UV	VIS	IV	UV	VIS	IV	IV
1	0,50	0,15	0,15	0,71	0,21	0,16	0,48	0,20	0,15	0,73	0,40	0,26	77%
2	0,81	0,42	0,27	0,89	0,47	0,29	0,77	0,43	0,28	0,87	0,56	0,36	33%
3	0,76	0,48	0,28	0,87	0,61	0,31	0,76	0,61	0,33	0,82	0,63	0,35	25%
4	0,95	0,80	0,39	0,97	0,82	0,34	0,97	0,80	0,38	0,95	0,82	0,44	14%
5	0,94	0,72	0,35	0,96	0,74	0,33	0,92	0,70	0,33	0,93	0,76	0,41	18%
6	0,91	0,58	0,26	0,94	0,64	0,28	0,89	0,57	0,27	0,92	0,67	0,35	38%
7	0,83	0,47	0,27	0,91	0,51	0,27	0,82	0,47	0,28	0,89	0,61	0,36	36%
8	0,95	0,87	0,50	0,97	0,89	0,44	0,96	0,87	0,49	0,95	0,88	0,55	10%
9	0,73	0,29	0,23	0,85	0,34	0,26	0,65	0,30	0,23	0,82	0,45	0,30	29%
10	0,79	0,58	0,33	0,86	0,51	0,25	0,72	0,51	0,29	0,83	0,57	0,32	-2%
11	0,90	0,88	0,55	0,94	0,89	0,41	0,90	0,88	0,50	0,91	0,88	0,56	2%
12	0,95	0,90	0,61	0,98	0,91	0,53	0,97	0,90	0,59	0,94	0,89	0,62	2%
13	0,79	0,66	0,63	0,82	0,71	0,67	0,84	0,69	0,67	0,91	0,76	0,69	10%
14	0,78	0,73	0,73	0,75	0,68	0,69	0,79	0,72	0,72	-	-	-	-
15	0,88	0,79	0,67	0,85	0,77	0,64	0,91	0,78	0,68	0,93	0,80	0,65	-2%
16	0,92	0,75	0,69	0,90	0,71	0,65	0,89	0,66	0,63	0,93	0,71	0,63	-8%
17	0,89	0,90	0,92	0,85	0,89	0,94	0,89	0,89	0,92	0,93	0,89	0,89	-3%
18	0,75	0,54	0,46	0,74	0,51	0,48	0,73	0,54	0,48	0,80	0,54	0,42	-9%
19	0,83	0,74	0,70	0,85	0,76	0,72	0,86	0,77	0,75	0,89	0,79	0,72	2%
20	0,93	0,39	0,27	0,95	0,51	0,38	0,84	0,44	0,32	0,93	0,50	0,36	35%
21	0,88	0,51	0,34	0,93	0,51	0,32	0,83	0,50	0,34	0,89	0,56	0,34	1%
22	0,91	0,74	0,33	0,93	0,75	0,29	0,92	0,73	0,33	0,93	0,80	0,44	34%
23	0,94	0,70	0,35	0,94	0,72	0,31	0,96	0,72	0,40	0,95	0,76	0,43	24%
24	0,93	0,72	0,39	0,93	0,71	0,30	0,92	0,68	0,36	0,93	0,72	0,42	7%
25	0,94	0,74	0,36	0,96	0,78	0,35	0,96	0,78	0,45	0,95	0,76	0,44	23%
26	0,95	0,75	0,39	0,96	0,76	0,32	0,95	0,74	0,35	-	-	-	-
27	0,94	0,76	0,39	0,95	0,74	0,30	0,96	0,73	0,38	-	-	-	-
28	0,93	0,72	0,36	0,95	0,77	0,35	0,95	0,77	0,42	0,93	0,79	0,47	28%

Fonte: a autora

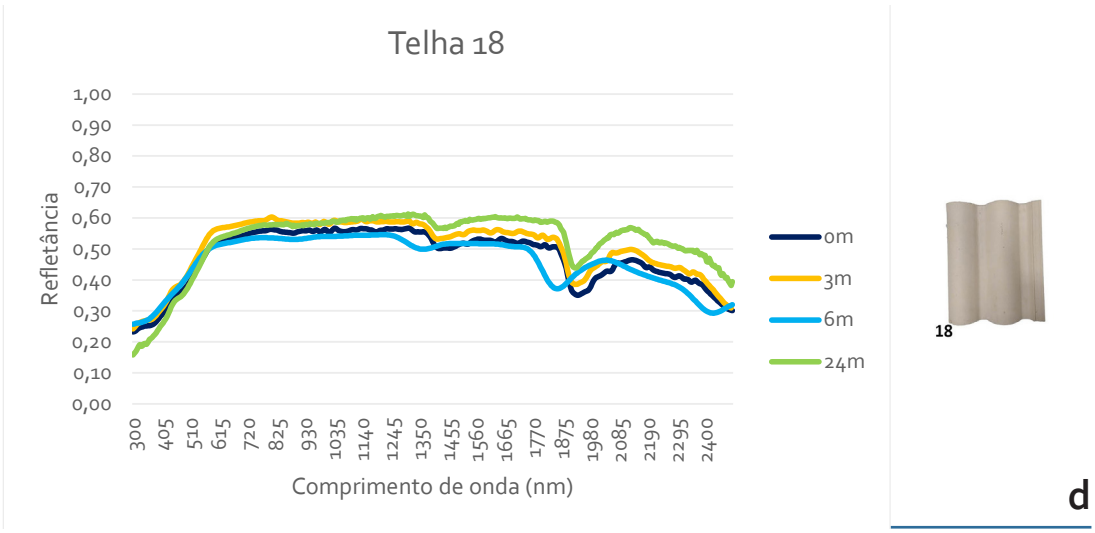
Complementarmente, na Figura 22 destacam-se as curvas de refletância espectral para as telhas com valores máximos e mínimos de absortâncias dentro de cada grupo (Fig. 21a : T1 esmaltada, Fig. 21b: T12 esmaltada, Fig. 21c: T17 concreto, Fig. 21d: T18 concreto, Fig. 21e: T20 cerâmica, Fig. 21f: T28 cerâmica) para análise comparativa entre os grupos de telhas selecionadas e exemplificação dos resultados apresentados pelas amostras analisadas ao final dos 24 meses de exposição ao tempo. Dentro de um mesmo grupo, ao compararmos as telhas com valores máximos e mínimos de refletância solar inicial e ao longo dos 24 meses de exposição ao tempo, notamos que a maior diferença na curva espectral ocorre na faixa do UV e VIS, sendo a segunda sensível ao olho humano e associada à coloração superficial das peças.

Figura 22: Curvas de refletância espectral das telhas T1 e T12-cerâmica esmaltada, T17 e T18-concreto, T20-cerâmica colorida e T28-cerâmica convencional aos 0, 3, 6 e 24 meses de exposição

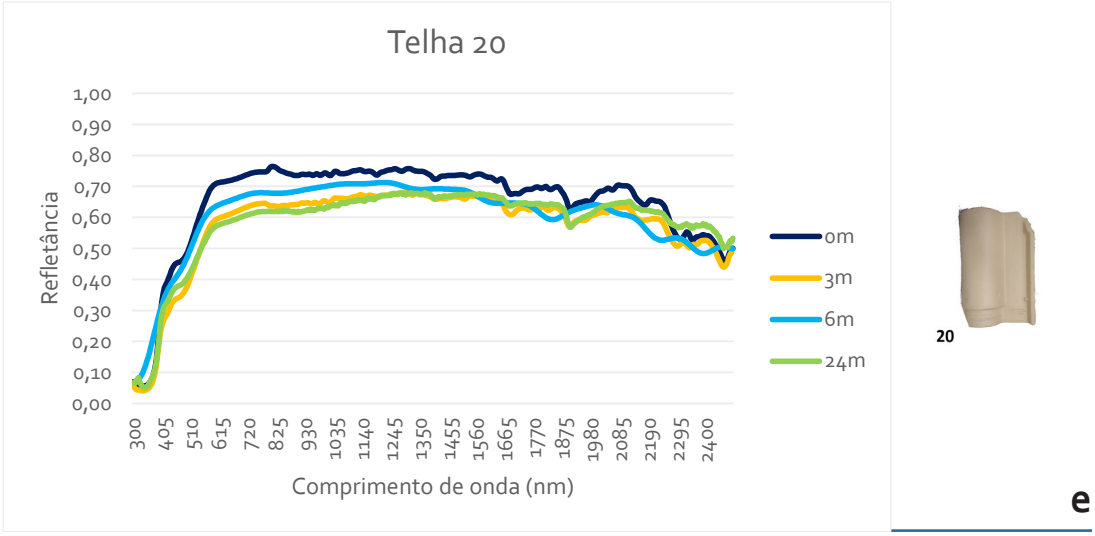



Telha 17
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m
17

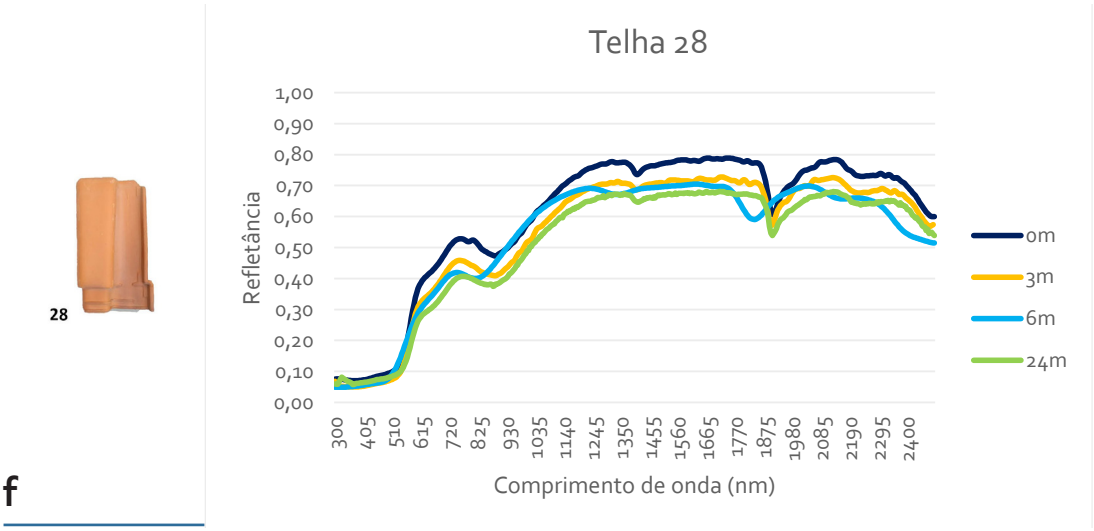
c


Telha 18
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m
18

d


Telha 20
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m
20

e



Fonte: a autora

Ao compararmos as telhas com menor refletância solar de cada um dos três grupos, percebemos que a telha com maior absorção da radiação solar é a amostra T17 (α0 = 0,91), de concreto, pois sua absortância na faixa do infravermelho é superior a 0,89 (α0IV T17= 0,92; α3IV T17= 0,94; α6IV T17= 0,92; α24IV T17= 0,89) em todos os estágios de envelhecimento, enquanto que a telha com o segundo menor valor de refletância solar inicial, a telha cerâmica esmaltada T12 (α0 = 0,77), possui uma absortância que corresponde, em média, a 64,4% do valor da absortância solar para a região do Infravermelho da telha de concreto (T17) para todos os estágios de envelhecimento (α0IV T12= 0,61; α3IV T12= 0,53; α6IV T12= 0,59; α24IV T12= 0,62).

Analisando de forma conjunta as tabelas e figuras apresentadas neste item, percebemos que as telhas cuja matéria prima é cerâmica, no geral, possuem menor absortância global e de infravermelho que as telhas de concreto. Com exceção da telha de concreto pigmentada na cor marfim (T18), todas as telhas deste grupo, avaliadas nesta pesquisa, correspondem às maiores absortâncias solares na faixa do infravermelho de todo o conjunto de 28 telhas analisado. No entanto, essa conclusão não é válida quando se avalia unicamente as absortâncias médias totais, já que existem telhas do grupo cerâmico com estes dados similares às telhas de concreto.

Portanto, apenas a análise do valor de absortância total de uma amostra não é suficiente para determinar se a telha em questão possui um bom desempenho térmico. É importante avaliar como a absortância se comporta em todas as regiões do espectro eletromagnético, principalmente na região do Infravermelho. Com base nos

resultados obtidos neste trabalho, percebemos que a telha com melhor desempenho em todas as regiões do espectro, para todos os estágios de envelhecimento, é a telha cerâmica esmaltada na cor branca (T1) e, a telha com pior desempenho é a telha de concreto de cor canela (T17).

4.1.3 Emitância térmica

A partir das medições em emissômetro portátil, foi feito o tratamento dos dados para análise dos resultados obtidos em laboratório. Foram realizadas medições para as telhas novas e envelhecidas em 24 meses. Na tabela 5, apresentam-se os valores obtidos nestas medições, assim como a diferença percentual entre os dois estágios de envelhecimento comparados. Destaca-se que o equipamento de medição utilizado possui uma precisão de 0,01, portanto uma incerteza de medição, relativa ao emissômetro portátil, na ordem de 1% (MARINOSKI *et al.*, 2013)

Percebe-se que houve um aumento no valor da emitância em 22, das 28 telhas analisadas. Sabe-se que quanto maior a emitância, maior é a facilidade que determinada superfície tem em emitir energia em ondas longas. No entanto, qualquer efeito benéfico obtido através deste aumento percentual de emitância é anulado em decorrência do aumento mais significativo nos valores das absortâncias das mesmas amostras (Tabela 3). As telhas T14, T26 e T27, conforme já explicado anteriormente, não puderem ser analisadas após a exposição de 24 meses.

As amostras com maior variação de emitância foram as telhas T4, T12 e T16. Nos três casos, a variação de emitância foi superior a 5%, enquanto, para as mesmas telhas, a variação de absortância ao longo dos 24 meses de exposição foi de 6,4%, 0% e -5,5%, respectivamente. Fazendo-se a mesma análise, porém no sentido inverso, as amostras com maior variação de absortância foram as telhas T1, T9 e T7, respectivamente ($\Delta\alpha$T1 = 112,5%; $\Delta\alpha$T9 = 44,4%; $\Delta\alpha$T7 = 30,7%). Para estas telhas, as variações de emitância foram, respectivamente 1,15%, 3,37% e 4,0%.

Portanto, assim como demonstrado na pesquisa de Pereira (2014) e Krelling *et al.* (2019), este trabalho observou um aumento significativo de absortância na maior parte das amostras expostas às intempéries. Já as emitâncias, apesar da maioria das amostras também terem aumentado seus valores após os 24 meses de envelhecimento, suas variações foram muito menos relevantes que na análise de variação de absortância. Ou seja, a degradação natural das telhas teve um maior impacto sobre a absortância do que sobre as emitâncias das superfícies analisadas.

Tabela 5: Variação da emitância térmica entre os estágios de envelhecimento om-24m

telha	ε om	ε 24m	Δ 24m-om (%)
1	0,811	0,823	1,51%
2	0,834	0,858	2,83%
3	0,832	0,858	3,10%
4	0,824	0,865	5,02%
5	0,833	0,868	4,23%
6	0,831	0,849	2,19%
7	0,838	0,872	4,00%
8	0,823	0,854	3,76%
9	0,834	0,862	3,37%
10	0,830	0,854	2,95%
11	0,832	0,861	3,50%
12	0,838	0,880	5,03%
13	0,897	0,917	2,26%
14	0,896	-	-
15	0,896	0,925	3,27%
16	0,887	0,933	5,17%
17	0,897	0,903	0,68%
18	0,887	0,900	1,52%
19	0,893	0,919	2,89%
20	0,858	0,873	1,77%
21	0,847	0,877	3,52%
22	0,843	0,882	4,59%
23	0,888	0,885	-0,33%
24	0,868	0,846	-2,58%
25	0,865	0,871	0,73%
26	0,855	-	-
27	0,856	-	-
28	0,836	0,836	0,00%

Fonte: a autora

4.1.4 Parâmetros de Cor

Com a exposição às intempéries, além das alterações das propriedades ópticas, há também as alterações relativas às cores das telhas analisadas. Esta degradação pode ser percebida visualmente através da opacidade e escurecimento das peças (Figura 23), sem que haja a necessidade de medições em laboratórios para comprovar tal desgaste superficial.

Sabe-se que apesar de cores claras absorverem menos radiação que cores escuras, há uma associação errônea entre os valores de absortância de um material com sua cor superficial. Como as cores representam apenas uma sensação visual, não é possível compreender a olho nu as propriedades de cor das superfícies avaliadas. Para análise mais aprofundada entre os parâmetros alterados ao longo do período de exposição ao tempo, foi feita uma análise completa, comparando-se todos os parâmetros de cor, entre as telhas novas e envelhecidas em 24 meses (Anexo B). Expõe-se na figura 24 a análise completa das amostras mais representativas dentro de cada grupo analisado, já comparadas previamente em relação às suas absortâncias e emitâncias: T1 e T12 - Cerâmica esmaltada, T17 e T18 – Concreto, T20 e T28 - Cerâmica colorida e convencional, respectivamente.

A telha T1, peça com menor absortância dentre todas as telhas selecionadas, foi a amostra que apresentou maior alteração em luminosidade, apresentando um $\Delta L^* = -10{,}11$, ou seja, a T1 foi a que mais escureceu após os 24 meses de exposição às intempéries. As telhas mais escuras, ou seja, com L* inicial mais baixas (Telhas 12 e 17) foram as amostras que apresentaram menor variação de ΔL^*. Porém, a diminuição dos parâmetros de Saturação (C*) e Tonalidade (h) das telhas 12 e 17, respectivamente, indicam o desbotamento das mesmas ao longo do tempo.

De modo geral, todas as telhas apresentaram escurecimento de suas superfícies, com exceção da telha 12. Conforme discutido anteriormente, tal fenômeno se deve ao fato de que quanto mais clara for uma superfície, maior será o escurecimento da mesma em relação ao seu estágio inicial, em decorrência do acúmulo de sujeira depositada sobre ela. O efeito inverso ocorre nas superfícies de cores mais escuras, já que a deposição de poeira e a incidência dos raios UV tendem a desbotar e, consequentemente, clarear estas telhas.

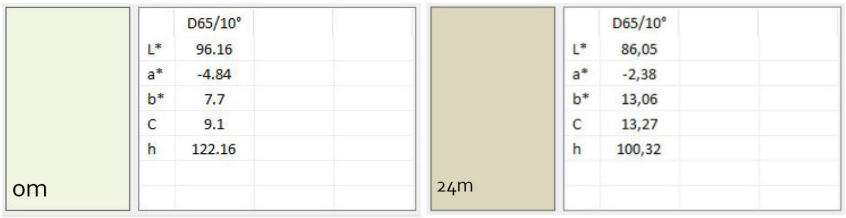
Figura 23: Percepção visual das cores em telhas novas, om, e após 24 meses de exposição



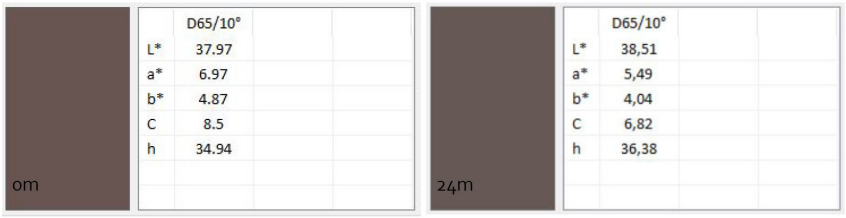
Fonte: a autora

Figura 24: Comparação dos parâmetros de cor das telhas T1 e T12-cerâmica esmaltada, T17 e T18-concreto, T20-cerâmica colorida e T28-cerâmica convencional aos 0 e 24 meses de exposição

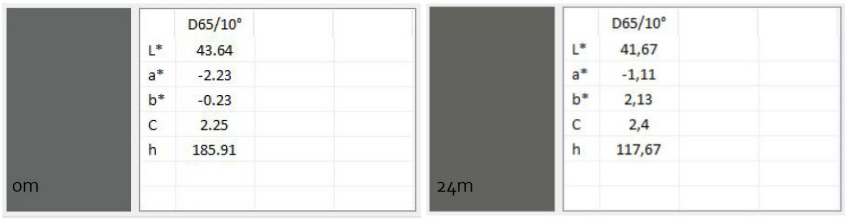
TELHA 01



TELHA 12



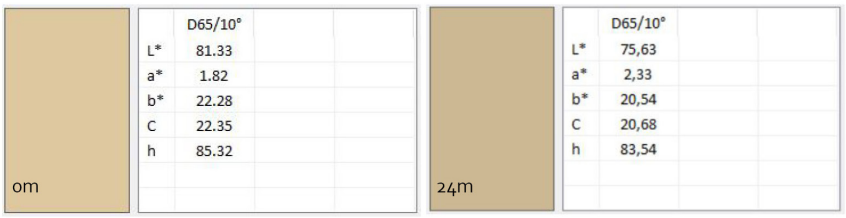
TELHA 17



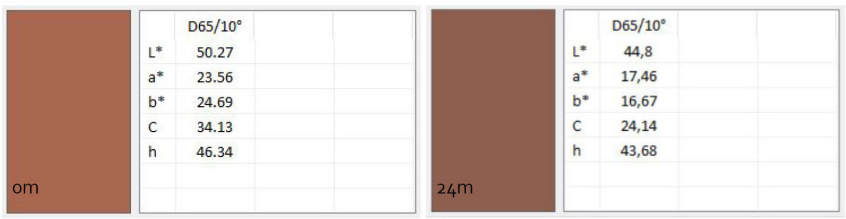
TELHA 18



TELHA 20



TELHA 28



Fonte: a autora

Para compreender se existe uma relação linear entre a alteração de absortância e os parâmetros de cor, ao longo do processo do envelhecimento natural de telhas, uma tabela comparativa entre as absortâncias e as luminosidades (L*) de cada umas das 28 amostras selecionadas nesta pesquisa foi elaborada (Tabela 6).

A escala de claridade é expressa em porcentagem, sendo que quanto menor o valor, mais escuro é o objeto analisado. Escolheu-se o parâmetro de claridade (ou luminosidade) pois este se refere a escala do claro ao escuro de uma determinada cor, em relação à escala de cinza que varia do branco ao preto, ou seja, é a quantidade de luz que atinge os olhos. Desta forma, isola-se o parâmetro de cor que se relaciona diretamente com a capacidade de absorção das superfícies analisadas.

A telha que teve maior variação de luminosidade entre os meses 0-24 foi a telha T7 (L*= -11,8%), cuja absortância aumentou em 30,7%. As únicas amostras que tiverem um aumento em relação à sua luminosidade inicial foram as telhas T12, T15 e T24, cujas absortâncias aumentaram em menos de 2% em relação ao seu estágio inicial, o restante das telhas avaliadas tiveram uma redução de suas luminosidades originais. A partir desta tabela é possível notar uma relação inversamente proporcional entre as variáveis comparadas, já que quanto maior a absortância, menor sua luminosidade. Além disso, conforme comentado anteriormente, de modo geral, a luminosidade das superfícies das telhas analisadas diminuiu conforme o tempo de exposição às intempéries.

No entanto, calculando-se o coeficiente de correlação de Pearson entre a variação de absortância total e a variação do parâmetro de cor de luminosidade (L*), entre todas as amostras, obtemos um valor de -0,55. Isso significa que para 55% das amostras comparadas, enquanto uma variável aumentou (α), a outra diminuiu (L*). Segundo Dancey e Reidy* (2006 *apud* Paranhos *et al.,* 2014, p. 119), este valor de representa uma correlação moderada.

* DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia:** Usando SPSS para Windows. Porto Alegre, Artmed. 2006.

Tabela 6: Absortância solar e luminosidade de telhas novas (om) e após 24 meses de exposição

telha	absortância (α)			parâmetro de cor (L*)		
	om	24m	Δ 0-24	om	24m	Δ 0-24
1	0,16	0,34	112,5%	96,16	86,05	-10,5%
2	0,36	0,48	33%	80,05	69,84	-11,7%
3	0,40	0,51	27,5%	67,65	63,25	-6,5%
4	0,62	0,66	6,4%	44,12	43,20	-2%
5	0,56	0,60	7,1%	57,38	54,51	-5%
6	0,44	0,53	20,4%	64,29	60,80	-5,4%
7	0,39	0,51	30,7%	74,86	66,02	-11,8%
8	0,71	0,73	2,8%	39,05	38,98	-0,17%
9	0,27	0,39	44,4%	88,76	78,63	-11,4%
10	0,47	0,46	-2,1%	75,11	71,19	-5,2%
11	0,73	0,73	0%	43,25	42,40	-1,9%
12	0,77	0,77	0%	37,97	38,51	1,4%
13	0,65	0,74	13,8%	61,04	55,39	-9,25%
14	0,73	-	-	60,09	-	-
15	0,74	0,73	-1,3%	45,27	45,41	0,3%
16	0,72	0,68	-5,5%	61,85	59,82	-3,2%
17	0,91	0,89	-2,2%	43,64	41,67	-4,5%
18	0,51	0,49	-3,9%	75,62	71,12	-5,9%
19	0,73	0,76	4,1%	54,93	52,20	-4,9%
20	0,35	0,45	28,6%	81,33	75,63	-7,0%
21	0,44	0,47	6,8%	77,64	71,69	-7,6%
22	0,56	0,64	14,3%	53,89	49,19	-8,7%
23	0,55	0,62	12,7%	55,13	49,21	-10,7%
24	0,58	0,59	1,7%	55,96	57,98	3,6%
25	0,57	0,62	8,8%	50,78	49,82	-1,8%
26	0,59	-	-	50,53	-	-
27	0,59	-	-	51,60	-	-
28	0,57	0,65	14,0%	50,27	44,8	-10,9%

Fonte: a autora

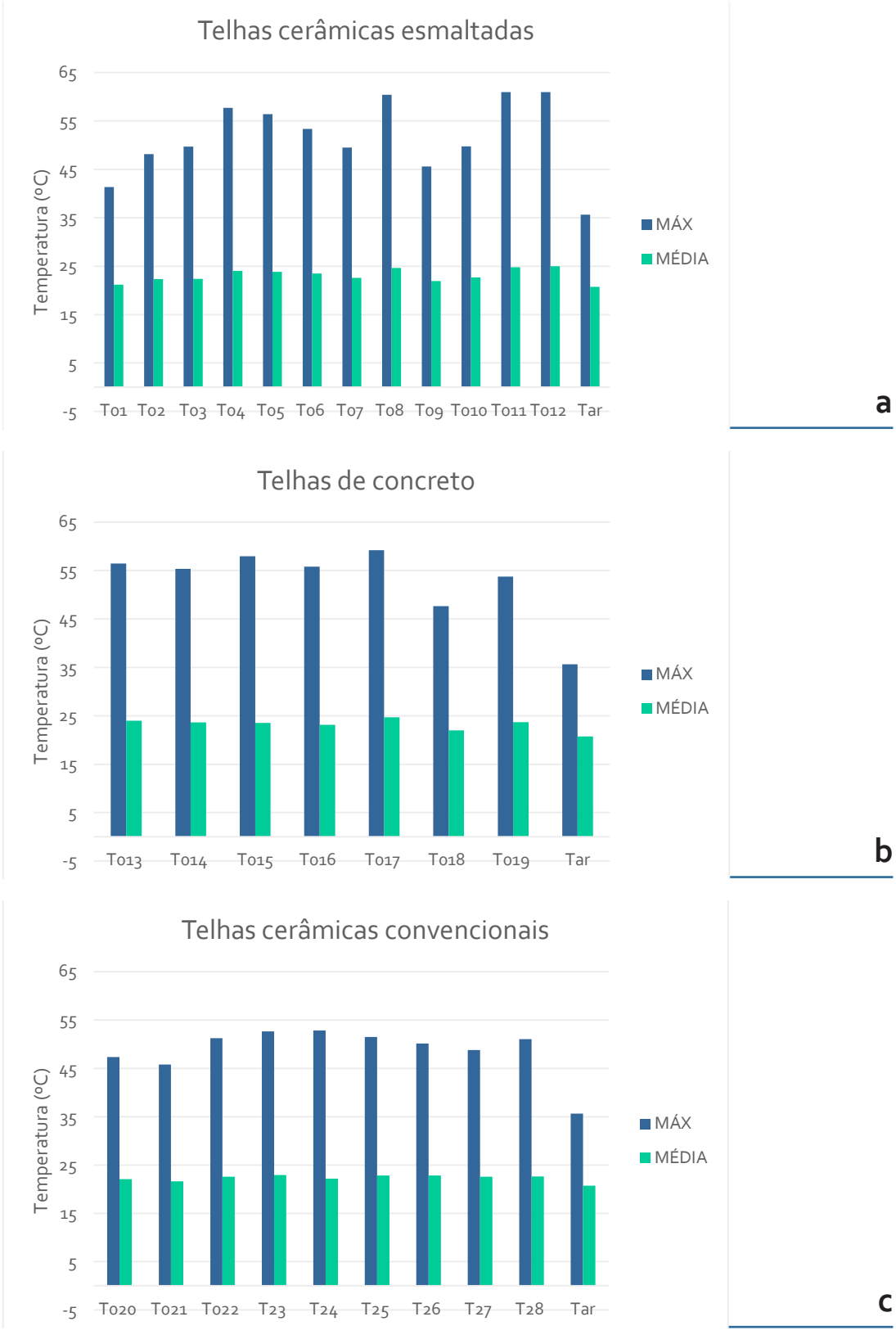
4.1.5 Temperatura Superficial

Para compreender o impacto da degradação superficial das telhas sobre seu desempenho térmico, as curvas de monitoramento das temperaturas superficiais, para as faces inferiores de todas as telhas expostas ao longo dos 24 meses, foram elaboradas e analisadas (Apêndice C). Aqui, apresenta-se na Figura 25 os gráficos com as variações das temperaturas superficiais máximas e médias para todas as telhas avaliadas ao longo dos 2 anos de exposição natural. Observa-se que as temperaturas superficiais das telhas apresentaram variações significativas no período, sendo que esses valores dependem do efeito conjugado entre absortância solar da superfície e o tipo de material de cada telha e sua respectiva espessura, características que influenciam diretamente a transmitância (U) e capacidade térmica (CT) das amostras.

Entre o grupo de telhas cerâmicas esmaltadas (T1 a T12), observa-se que a telha branca (T1) apresentou a menor temperatura máxima, assim como a menor amplitude térmica dentre todas as 28 telhas avaliadas. Esta telha também apresentou a menor absortância solar medida em laboratório para os 4 estágios de avaliação (α_{0m} = 0,16; α_{3m} = 0,19; α_{6m} = 0,18; α_{24m} = 0,34), sendo que esta característica influenciou diretamente suas temperaturas superficiais ao longo de todo o período de envelhecimento. Já entre as telhas de concreto, a T17 apresentou a maior absortância solar (α_{0m} = 0,91; α_{3m} = 0,9; α_{6m} = 0,9; α_{24m} = 0,89) e, portanto, as maiores temperaturas superficiais máximas. Por outro lado, a telha de concreto T18, com menor absortância dentro deste grupo (α_{0m} = 0,51; α_{3m} = 0,48; α_{6m} = 0,51; α_{24m} = 0,49), apresentou as menores temperaturas máximas em relação às telhas de concreto, sendo a única amostra do grupo que não ultrapassou a temperatura de 50°C em sua superfície inferior.

Por fim, no grupo de telhas cerâmicas convencionais, as telhas com menores temperaturas máximas foram T24, T21 e T20, respectivamente. Além disso, este foi o grupo cuja média de temperaturas máximas foi a mais baixa entre os três grupos analisados, já que nenhuma das telhas cerâmicas convencionais ultrapassou os 55°C medidos em sua superfície inferior. Também cabe destacar que, apesar da telha T24 não ser a que apresentou menor absortância solar dentro do grupo das cerâmicas convencionais, ela é a única que possui uma camada de resina transparente na superfície exposta ao sol, o que pode ter contribuído com a capacidade refletiva dessa amostra.

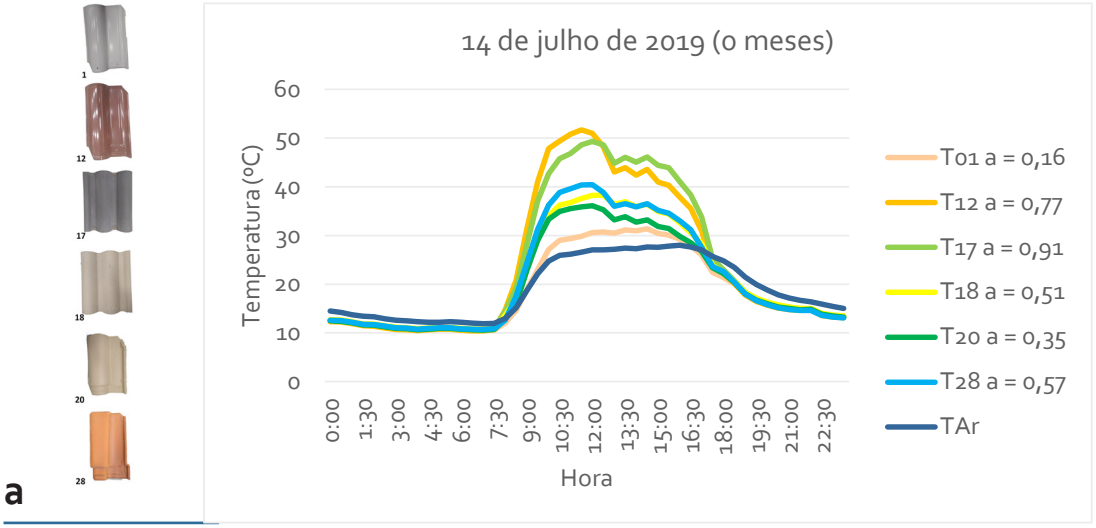
Figura 25: Variações das temperaturas superficiais máximas e médias, ao longo de 24 meses, para os três grupos de telhas: a) Cerâmicas Esmaltadas; b) Telhas de Concreto; e c) Telhas Cerâmicas Naturais, em comparação com a temperatura do ar (T_{Ar})

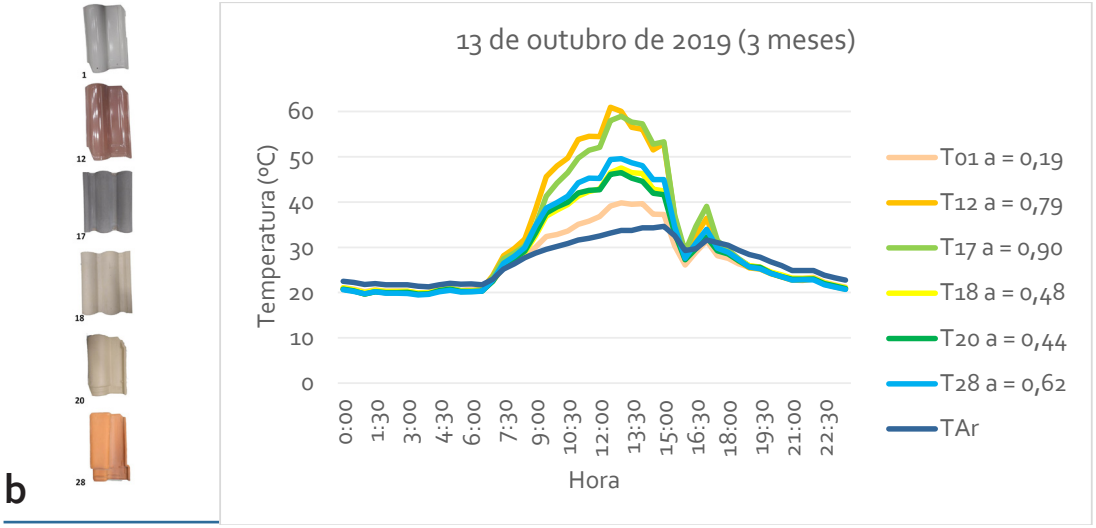


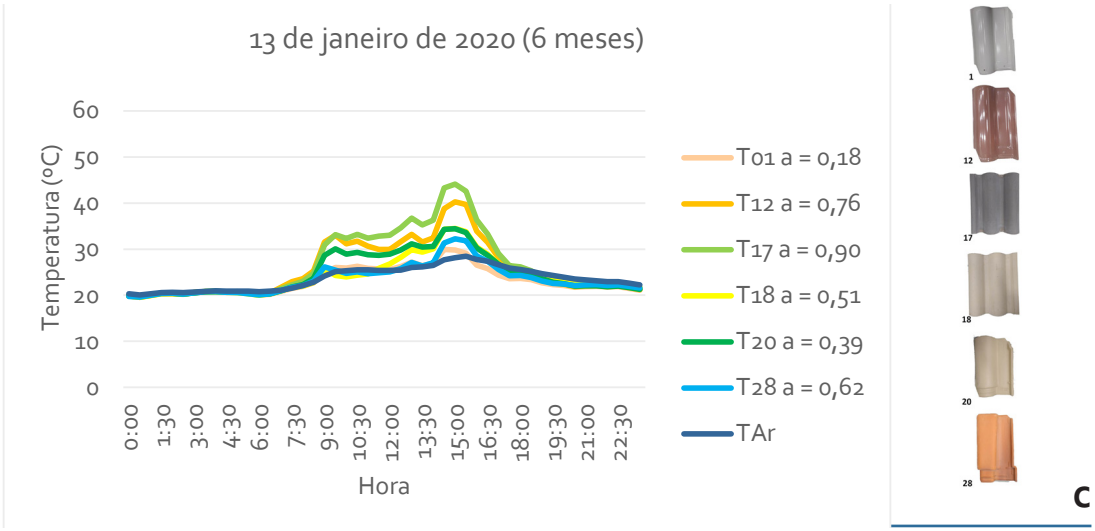
Fonte: a autora

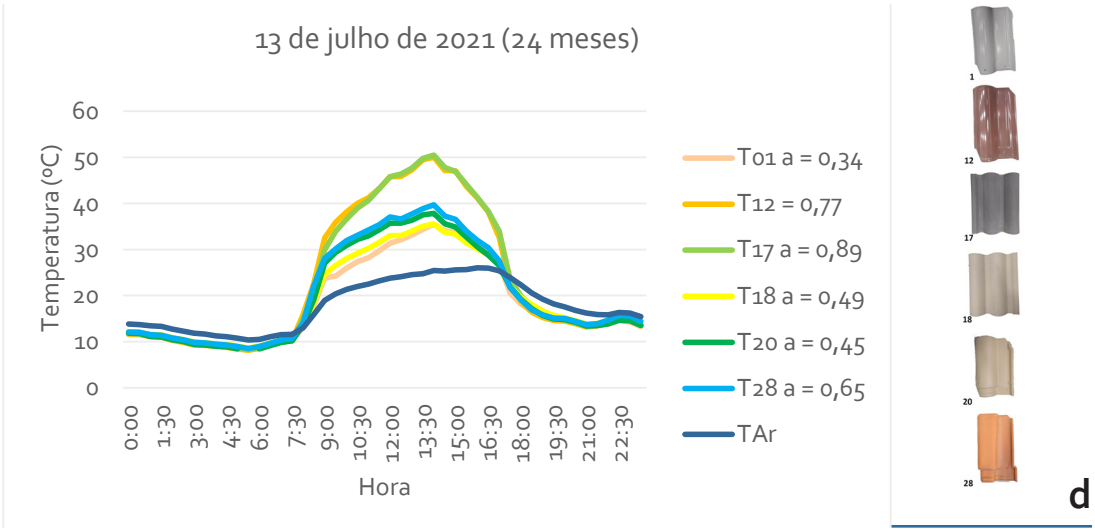
Para a análise dos efeitos da degradação da absortância solar sobre a temperatura superficial das telhas, são apresentadas as variações de temperaturas para as telhas T1 e T12 (Cerâmica Esmaltada), T17 e T18 (Concreto), T20 (Cerâmica Convencional Colorida) e T28 (Cerâmica Natural) ao longo de um dia relativo à cada estágio de exposição (nova: 14/07/2019; 3m: 13/10/2019; 6m: 13/01/2020; 24m: 13/07/2021) na Figura 26. Estas telhas foram selecionadas, conforme já citado anteriormente, por serem as amostras com valores de absortâncias iniciais mais opostas dentro de cada grupo.

Figura 26: Variações da temperatura superficial das telhas T1 e T12-cerâmica esmaltada, T17 e T18-concreto, T20-cerâmica colorida e T28-cerâmica convencional quando novas (14/07/2019), aos 3 meses (13/10/2019), aos 6 meses (14/01/2020) e aos 24 meses de exposição (14/07/2021).









Fonte: a autora

Apesar da absortância da telha T12 não ter se alterado ao final dos 24 meses de exposição e da absortância de telha T17 ter diminuído em relação a sua absortância inicial, ambas continuaram sendo as amostras cujas temperaturas superficiais foram as mais altas dentre todas as telhas avaliadas, mesmo ao final dos 24 meses de exposição ao tempo. A telha T1 foi a amostra que manteve menor temperatura superficial ao longo de todo o período, mesmo tendo sua absortância aumentada em 112,5%. No entanto, ao longo dos 24 meses de intemperismo, a diferença entre a temperatura superficial da T1 e das demais telhas foi diminuindo, sendo que ao final do período analisado, a temperatura superficial ao longo do dia da T1 não difere muito da T18, por exemplo.As telhas cerâmicas convencionais, T20 e T28, apesar de serem visualmente diferentes, uma pigmentada na cor clara e outra natural, demonstraram

um comportamento térmico mais estável, mantendo suas temperaturas superficiais sem muitas alterações em relação às demais telhas destacadas nos gráficos.

Complementarmente ao monitoramento continuo das temperaturas superficiais inferiores das telhas, também foram registradas imagens térmicas das faces superiores de todas as amostras expostas ao tempo, comparando-se os estágios sem envelhecimento com o final dos 24 meses de intemperismo. Como produtos destas análises, obtivemos as imagens termográficas (Apêndice D) e os histogramas (Apêndice E) de todas as telhas, exceto as T14, T26 e T27 que se deterioraram e não puderam ser medidas após os 24 meses de envelhecimento. Todas as amostras foram expostas à insolação pelo mesmo período de tempo, no mesmo dia e horário, justamente para poder se comparar, sob as mesmas condições climáticas, a temperatura superficial das telhas novas e envelhecidas. Aqui, serão apresentados apenas as comparações entre as duas telhas mais representativas de cada um dos grupos avaliados (Figura 27), ou seja, as telhas T1 e T12 (Cerâmica Esmaltada), T17 e T18 (Concreto), e, T20 (Cerâmica Convencional Colorida) e T28 (Cerâmica Natural), conforme já realizado anteriormente.

A T1 apresentou menor temperatura superficial dentre as telhas sem envelhecimento, sendo que essa diferença de temperatura em relação às demais amostras é visível através da escala de cores das imagens geradas pela câmera termográfica. Nenhuma das 6 amostras aqui comparadas apresentou uma coloração tão escura (menor temperatura) quanto a telha cerâmica esmaltada na cor branca para a situação sem envelhecimento. No entanto, nenhuma outra amostra apresentou tanta diferença na temperatura superficial entre os estágios sem envelhecimento e após os 24 meses de exposição quanto a T1 (Δ_T = 7,3°C), o que faz sentido já que foi a telha com maior aumento percentual em relação a sua absortância solar entre as situações de 0m e 24m ($\Delta\alpha$ 24m-0m = 112,5%).

Em contrapartida, a T12, amostra com maior absortância em todos os estágios de envelhecimento dentre as telhas cerâmicas esmaltadas, apresentou pouca variação entre sua temperatura superficial superior, comparando-se a situação da telha nova e envelhecida em 24 meses, sendo que essa diferença foi negativa (Δ_T = -0,3°C). Este comportamento térmico segue a mesma lógica de sua variação de absortância entre a situação inicial e final do envelhecimento, já que não houve diferença percentual entre os dois estágios ($\Delta\alpha$ 24m-0m = 0,0%). Isso ocorre em decorrência da T12 ter uma coloração mais escura e sofrer menos com os impactos da degradação natural, já que através do desbotamento da peça, a tendência ao longo do tempo é de diminuição

de absortância solar e não o inverso, como ocorre com as telhas frias. No entanto, este fato não significa que esta amostra demonstre um bom desempenho térmico já que sua temperatura superficial, independentemente do estágio de envelhecimento, foi a mais alta dentre as 6 amostras selecionadas para comparação.

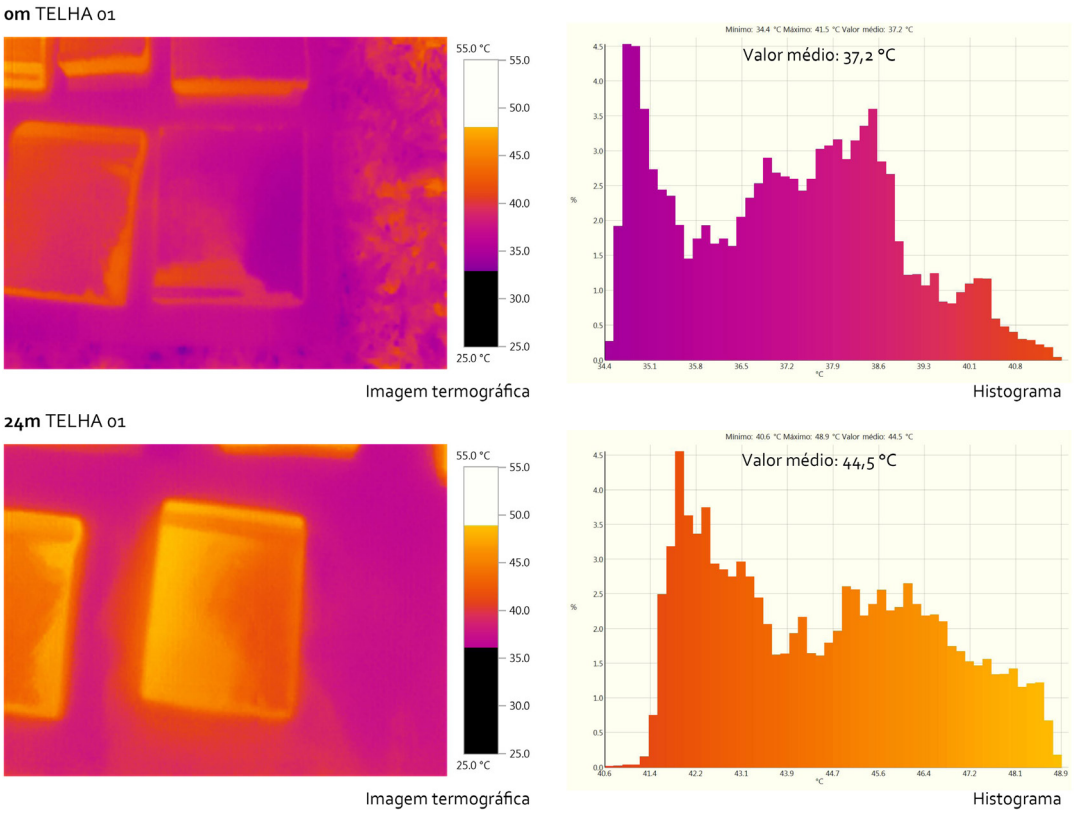
Analisando-se o grupo das telhas de concreto, percebemos que houve pouca variação entre as temperaturas superficiais comparando-se as telhas novas e envelhecidas. Para a telha com maior absortância do grupo, a T17, a variação de temperatura foi baixa (Δ_T = 0,4°C), assim como para a telha com menor absortância do grupo, a T 18 (Δ_T = 0,3°C). Destaca-se para esta última telha citada que, sua temperatura superficial medida na câmera termográfica, para a situação após envelhecimento, foi a menor temperatura registrada dentre as 6 telhas comparadas neste capítulo para o estágio de 24 meses de exposição, sendo inferior em 0,1°C à temperatura medida para a telha fria T1. Para ambos os casos, a temperatura superficial aumentou levemente após o período de exposição ao tempo. No entanto, quando analisamos as variações de absortância totais para as duas telhas, entre os estágios de 0m e 24m, percebemos que tanto para a telha T17 quanto para a T18, houve uma redução nos dois casos ($\Delta\alpha$ 24m-0m = -2,2% e $\Delta\alpha$ 24m-0m = -3,9%, respectivamente), assim como as variações de absortância para a região do espectro correspondente ao infravermelho ($\Delta\alpha$ IV 24m-0m = -3,0% e $\Delta\alpha$ IV 24m-0m = -9,0%, respectivamente). Esta variação de temperatura positiva para ambos os casos é surpreendente, já que suas superfícies passaram a absorver menos calor após a exposição ao tempo. Por isso, deve-se ressaltar que existem incertezas relativas às medições em decorrência da precisão dos equipamentos e das diferenças climáticas entre os dias avaliados.

Por fim, o grupo das telhas cerâmicas convencionais apresentou uma diferença de temperatura em os dois estágios de envelhecimento maior que as telhas de concreto, porém menor que a telha fria T1. Para a telha com menor absortância dentro do terceiro grupo, a T20, a diferença entre as temperaturas iniciais e finais foi de Δ_T = 3,5°C, enquanto sua variação de absortância foi de $\Delta\alpha$ 24m-0m = 28,6%. Já para a telha com maior absortância, a T28, a diferença entre as temperaturas iniciais e finais foi de Δ_T = 1,7°C, enquanto sua variação de absortância foi de $\Delta\alpha$ 24m-0m = 14,0%. Sendo assim, podemos concluir que mesmo a T20 tendo sofrido maior impacto sobre sua absortância em decorrência da exposição ao tempo, continuou tendo um desempenho térmico levemente superior que a T28.

Pode-se concluir que a telha que mais sofreu com os impactos da exposição

ao tempo, tanto na sua variação de temperatura, como na absortância, foi a telha cerâmica esmaltada na cor branca, T1. No entanto, mesmo sendo a amostra que mais se degradou, a T1 continuou apresentando uma das temperaturas mais baixas medidas após os 24 meses de exposição, apresentando apenas 0,1°C a mais que a T18. Considerando que a T1 possui um acabamento esmaltado que a T18, que é mais porosa por ser de concreto, a primeira apresenta uma maior facilidade de limpeza superficial que a segunda, o que implica numa melhor recuperação de desempenho térmico ao se restaurar a absortância inicial da amostra para a telha cerâmica esmaltada. Já o pior desempenho ocorreu nas telhas com maior absortância, tanto nas situações novas quanto envelhecidas (α T12 0m = α T12 24m = 0,77; α T17 0m = 0,91 e α T17 24m = 0,89). Estas telhas, T12 (cerâmica esmaltada) e T17 (concreto), apresentaram as maiores temperaturas superficiais para ambos estágios de envelhecimento, comprovando que o controle das propriedades ópticas dos materiais é uma boa estratégia para se controlar os ganhos térmicos de uma edificação.

Figura 27: Imagens termográficas e histogramas das telhas T1 e T12-cerâmica esmaltada, T17 e T18-concreto, T20-cerâmica colorida e T28-cerâmica convencional aos 0 e 24 meses de exposição



om TELHA 12

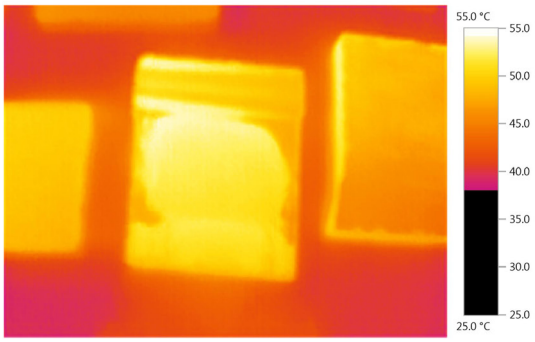
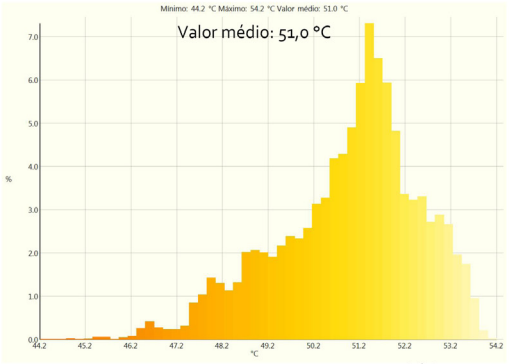


Imagem termográfica



Histograma

24m TELHA 12

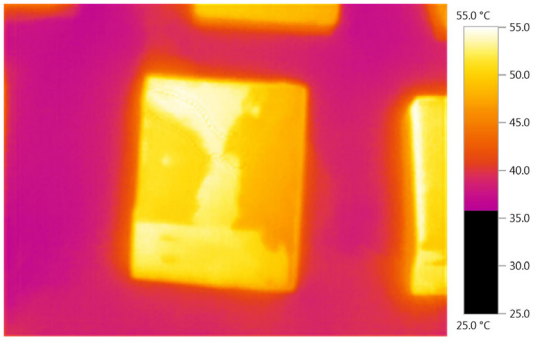
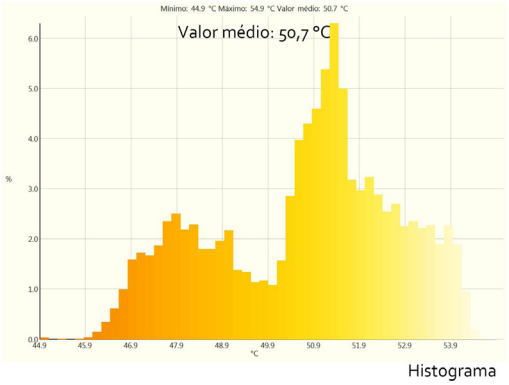


Imagem termográfica



Histograma

om TELHA 17

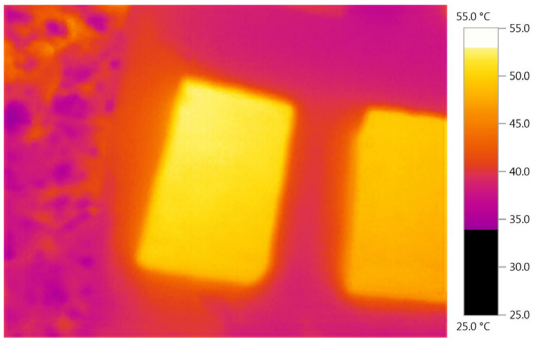
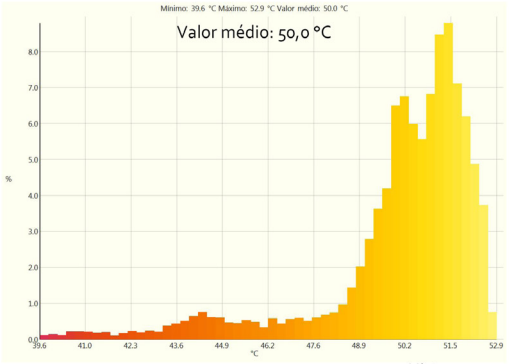


Imagem termográfica



Histograma

24m TELHA 17

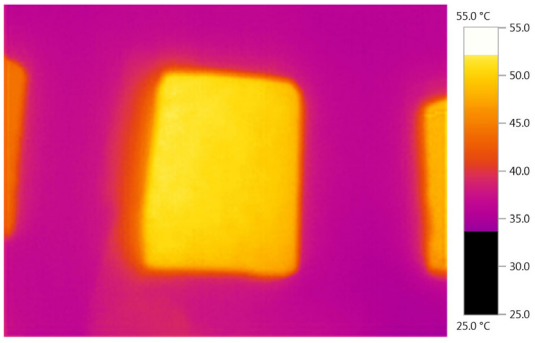
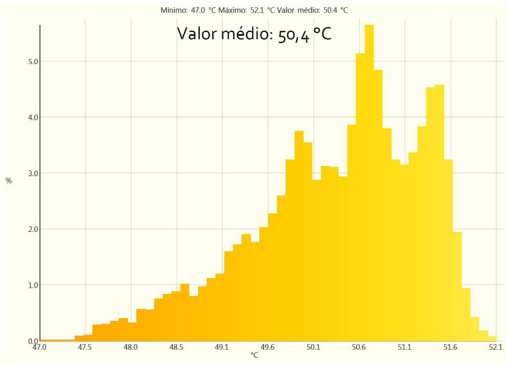


Imagem termográfica



Histograma

om TELHA 18

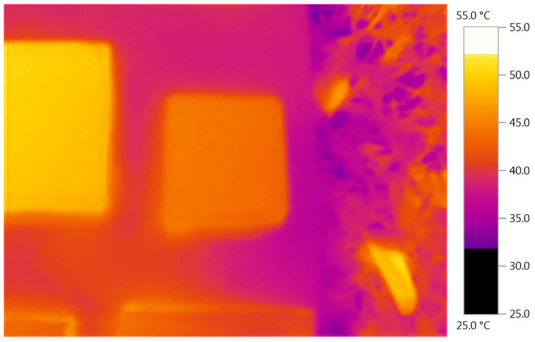
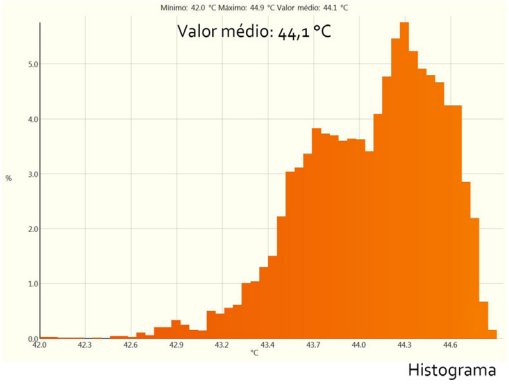


Imagem termográfica



Histograma

24m TELHA 18

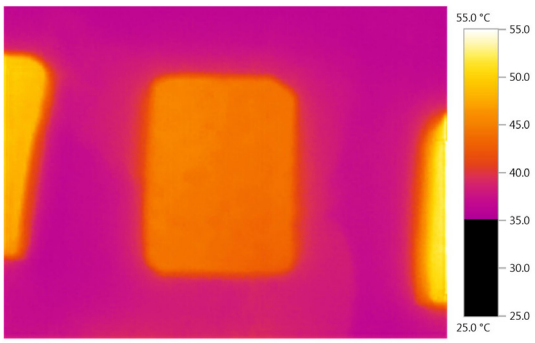
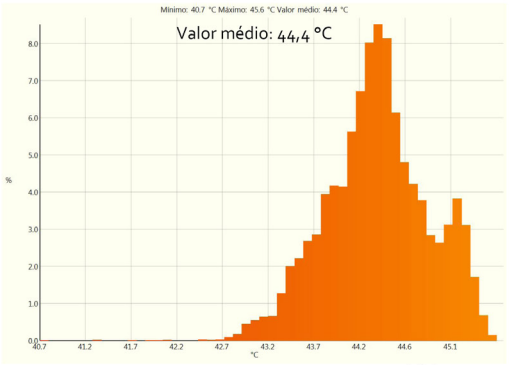


Imagem termográfica



Histograma

om TELHA 20

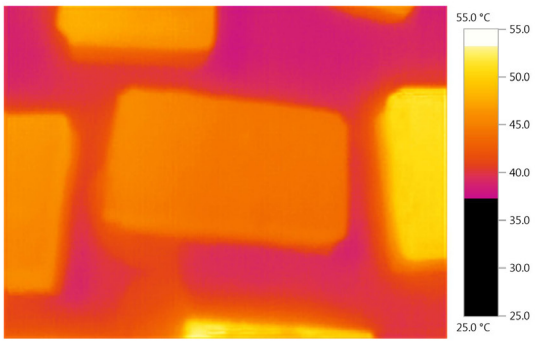
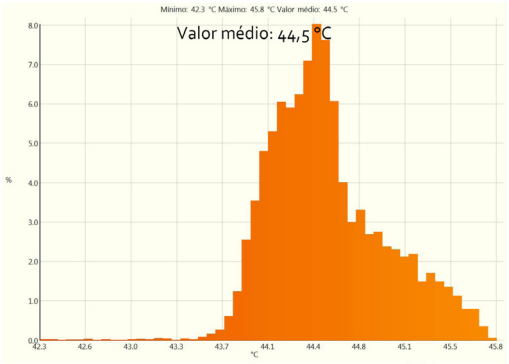


Imagem termográfica



Histograma

24m TELHA 20

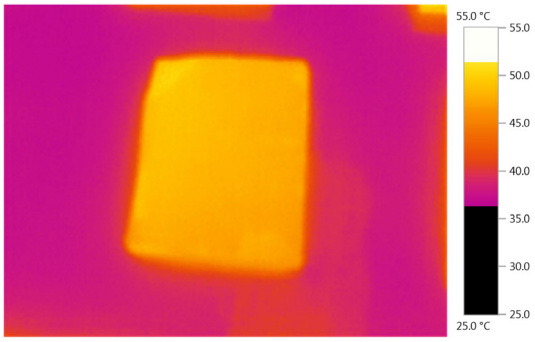
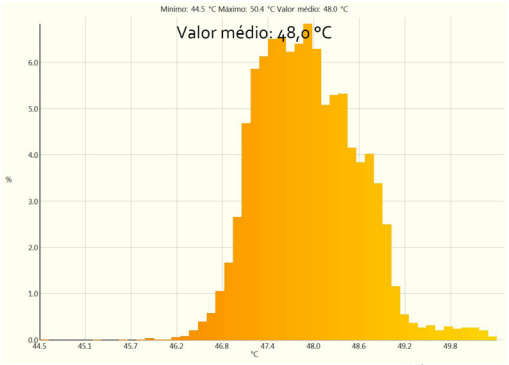
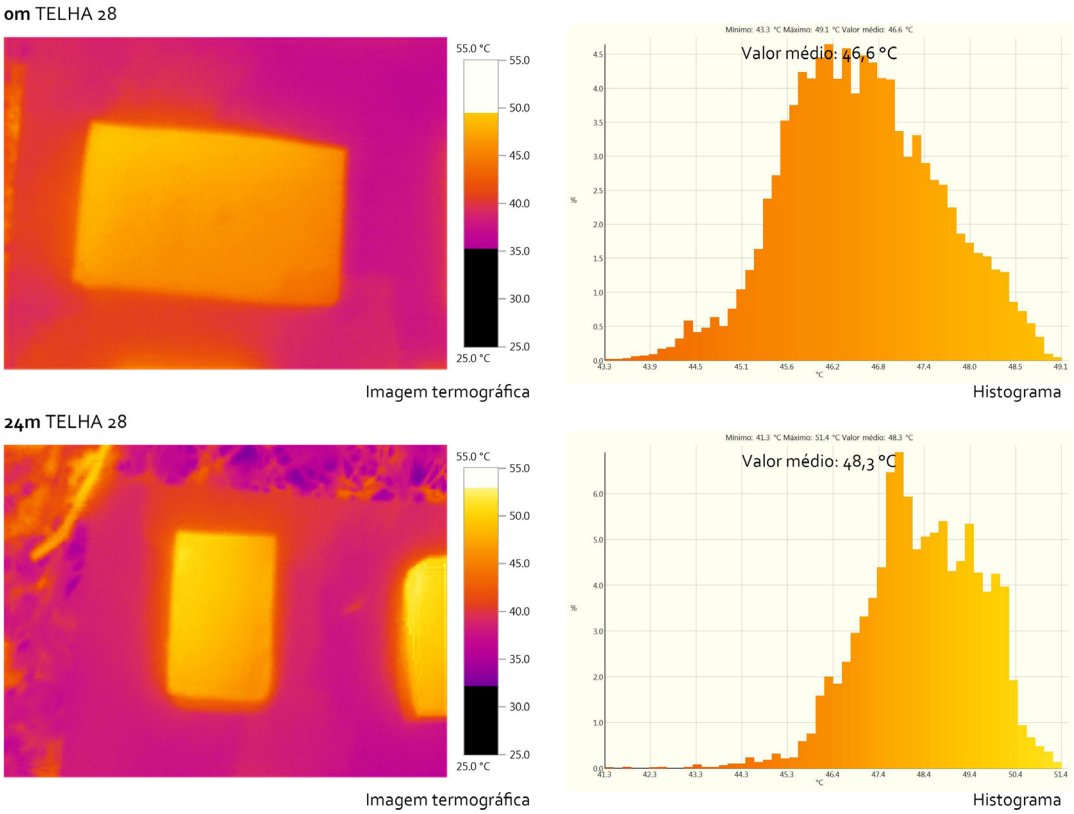


Imagem termográfica



Histograma



Fonte: a autora

4.2 Correlações e Discussões

Uma importante correlação a se destacar é em relação à influência do clima local sobre a degradação de absortância ao longo do período de exposição. Das 28 telhas analisadas, 18 variaram suas absortâncias para mais (α3m > α0m), 8 variaram suas absortâncias para menos (α 3m < α 0m) e 2 não variaram (α 3m = α 0m). Das 8 telhas que tiveram suas absortâncias diminuídas, metade possuía uma absortância inicial superior a 0,7, logo, a diminuição de seus valores totais de absortância, após o período mais seco, é esperada em decorrência da deposição de poeira. Da mesma forma, mas no sentido inverso, as telhas com absortâncias iniciais mais baixas foram as amostras que mais aumentaram seus valores de absortâncias totais após estes primeiros meses de exposição.

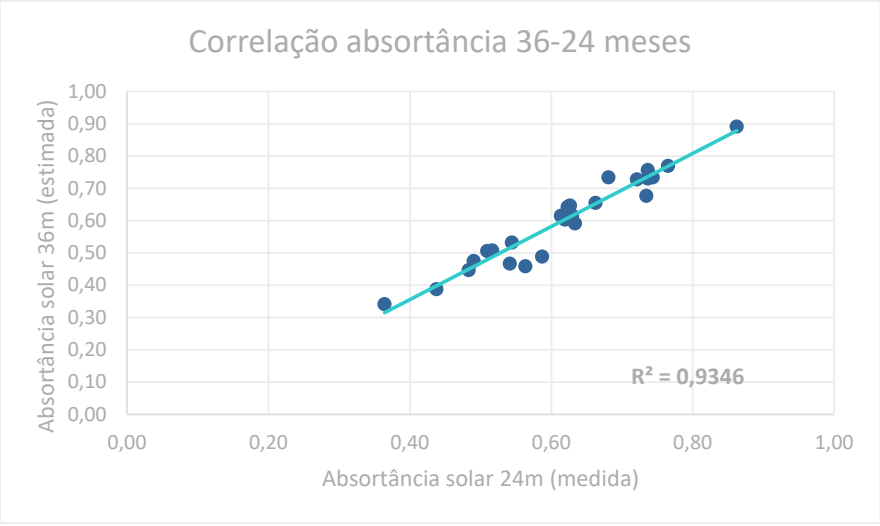
No estágio de envelhecimento relativo aos 6 meses de exposição, houve uma recuperação da absortância inicial para 17 telhas analisadas. Esta restauração da absortância solar, seja ela alta ou baixa, pode ser justificada a partir da maior incidência de chuvas neste período (novembro – janeiro), fator que pode amenizar a

deposição de sujeira acumulada nos períodos mais secos (julho – outubro).

Ao final de todo o ciclo de 24 meses analisado, podemos averiguar que para 18 telhas analisadas neste trabalho houve um aumento em suas absortâncias, 4 tiveram uma redução, 3 não sofreram alterações e 3 não puderam ser medidas por problemas recorrentes da deterioração da estrutura de OSB. De modo geral, para as telhas com maior absortância, houve uma redução nestes valores nos períodos mais secos e um aumento nos períodos mais chuvosos. O oposto ocorreu nas telhas com absortâncias solares iniciais mais baixos. Assim, conforme esperado, concluímos que o efeito da degradação natural das telhas sobre suas absortâncias solares é diretamente influenciado pelo clima onde as mesmas estão expostas.

Já para fins de análise comparativa entre dados medidos neste trabalho e o cálculo para o envelhecimento estimado, após 3 anos de exposição, conforme indicado na NBR 15575-1 (ABNT, 2021), os valores obtidos para as telhas quando novas (0m) foram utilizados para o cálculo da absortância solar estimada aos 36 meses, com base na Equação 2 da NBR 15575-1. Segundo o coeficiente de correlação de Pearson, a Figura 28, que relaciona os dados medidos aos 24 meses àqueles estimados para os 36 meses, indica que há forte correlação entre a equação empírica apresentada na norma e os dados medidos em laboratório a partir de ensaios em campo (R^2 = 0,9346). Isso demonstra que as telhas analisadas neste trabalho sofreram uma degradação dentro de uma curva já esperada e, que a equação indicada na norma de fato corresponde ao comportamento natural de telhas cerâmicas e de concreto quando expostas ao tempo.

Figura 28: Correlação entre absortâncias medidas aos 24 meses de exposição ao tempo e estimadas, segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2021), para 36 meses.

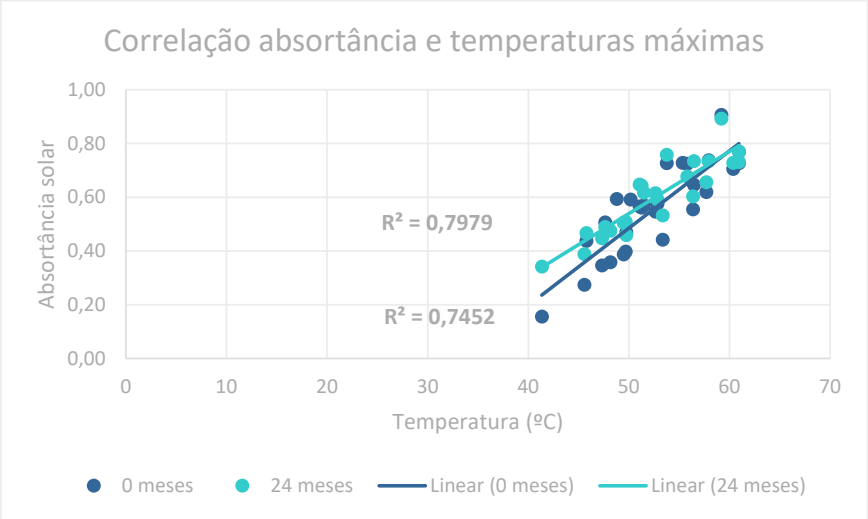


Fonte: a autora

Com base nesses resultados, pode-se inferir que a absortância solar é determinante sobre as temperaturas superficiais das telhas. No entanto, para uma avaliação mais completa, deve-se considerar também sua combinação com as demais características térmicas das amostras (transmitância e capacidade térmica). Para exemplificar essa afirmação, pode-se reafirmar o que já foi comprovado nas análises anteriores: a telha T17 (α_{om} = 0,91) foi a amostra que apresentou as maiores temperaturas superficiais e a telha T1 (α_{om} = 0,16) as menores.

Na Figura 29 é apresentada a correlação existente entre as temperaturas superficiais máximas com as absortâncias de cada telha quando novas (0 meses) e após 24 meses de exposição ao tempo. Segundo o coeficiente de correlação de Pearson (Paranhos *et al.,* 2014), o resultado indica que há forte correlação (R^2 = 0,745 e R^2 = 0,797, respectivamente) das temperaturas superficiais máximas em função da absortância solar da superfície ao longo do tempo.

Figura 29: Correlação entre absortâncias e temperaturas superficiais máximas.



Fonte: a autora

Apesar desta correlação acima ter muitas limitações em decorrência de suas variáveis, já que depende das condições climáticas dos dias das comparações, está análise evidencia a relação diretamente proprocional entre a temperatura superficial das telhas e suas absortâncias solares.

Através da correlação dos dados medidos em laboratório (absortâncias, emitâncias e parâmetros de cor) e em campo (temperaturas superficiais), foi possível desenvolver uma análise conjunta dos efeitos da degradação da absortância solar ao longo do tempo sobre as temperaturas superficiais das telhas selecionadas. COm

isso, pode-se estimar de forma mais precisa o quanto o processo de envelhecimento natural pode interferir nos ganhos térmicos das edificações. Além disso, pode-se também validar o funcionamento do sistema de medição (Estação de Envelhecimento) desenvolvido neste trabalho.

5. CONCLUSÕES

Atualmente, no cenário nacional, os dados relativos às propriedades ópticas dos elementos construtivos e suas alterações ao longo do tempo ainda são escassos e não atentam às especificidades de aplicação e de comportamento térmico de cada material. No entanto, estudos diversos já comprovaram os efeitos que a exposição ao intemperismo natural de telhas e revestimentos de edifícios apresentam sobre suas capacidades de absorção e reflexão da radiação solar, podendo agravar ainda mais os gastos energéticos excedentes com climatização artificial. Com a recente aprovação da emenda à norma de desempenho de edifícios NBR 15575-1 (ABNT, 2021), que recomenda a observação do efeito da degradação dos revestimentos de paredes e coberturas sobre os valores de absortância solar, torna-se primordial a possibilidade de facilitar esse tipo de análise e divulgar os dados relativos aos materiais novos e degradados. Assim, a fim de preencher parte dessa lacuna através do compartilhamento de uma metodologia de análise conjunta dos efeitos da degradação da absortância sobre o desempenho térmico de revestimentos e disponibilizar os dados já mensurados relativos às telhas novas e envelhecidas em 24 meses, é que se apresenta este trabalho.

A estação de envelhecimento natural desenvolvida nesta pesquisa apresentou-se como uma forma viável, simples, de baixo custo e confiável de avaliação dos efeitos da degradação da absortância solar ao longo do tempo sobre o desempenho térmico de telhas. Através da capacidade da estrutura metálica da estação em resistir à ação das intempéries, proteção aos equipamentos de medição, independência energética para operar, fácil manuseio, flexibilidade de angulação da mesa, escoamento da água pluvial, funcionalidade e estética, este sistema desenvolvido no Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP pode ser replicado e utilizado por outras pesquisas que avaliem os impactos do envelhecimento de revestimentos do envelope construtivo no desempenho térmico das edificações.

É importante ressaltar que para períodos de exposição mais longos, é

necessária uma manutenção da chapa OSB que apoia as amostras em monitoramento, pois estas se deterioram com o tempo devido principalmente ao acúmulo de água em suas extremidades. Outro ponto que pode ser otimizado em projetos futuros é em relação ao tamanho das aberturas feitas para o escoamento de água pluvial, que podem ser maiores dos que os projetados neste trabalho. Por fim, a utilização de isolantes entre as peças monitoradas se mostrou desnecessária, já que em poucos meses foi completamente deteriorada pelo tempo e pelas aves e sua ausência não impactou de forma relevante as medições obtidas no monitoramento, já que a análise realizada foi de forma comparativa.

Além do desenvolvimento da estação de envelhecimento, as medições obtidas em laboratório, possibilitaram uma análise conjunta dos efeitos da degradação da absortância solar ao longo do tempo sobre as temperaturas superficiais e desempenho térmico das mesmas. Foi comprovado que quanto maior a absortância solar da telha, maior sua temperatura superficial quando exposta ao sol e que as telhas originalmente frias possuem uma degradação percentual de suas absortâncias muito maior que as demais amostras. Também foi verificado que altas absortâncias implicam em valores mais baixos de luminosidade, o que de certa forma explica a associação visual, e errônea, entre as cores claras e sua baixa absorção de radiação.

Em relação às temperaturas superficiais das amostras avaliadas, comprovou-se que mesmo sendo a telha com maior aumento percentual de sua absortância, a T1 (cerâmica esmaltada branca - fria) continuou sendo a telha com menor temperatura superficial mesmo após os 24 meses de exposição. Ao final do período monitorado, apesar de se manter como a opção que menos absorve radiação solar ao longo do dia, a amplitude entre sua temperatura superficial e das demais telhas diminuiu consideravelmente, o que comprova os efeitos negativos da degradação natural decorrente, principalmente, do acúmulo de sujeira. Conforme discutido nos primeiros capítulos deste trabalho, acredita-se que uma limpeza superficial periódica seja um método de baixo custo e eficiente para se recuperar as propriedades ópticas iniciais destas amostras frias. No entanto, esta análise não foi realizada neste trabalho.

Por fim, também foram relacionados os dados medidos aos 24 meses àqueles estimados para os 36 meses, segundo a equação apresentada pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021). A partir dos dados obtidos, comprovou-se que há forte correlação entre a equação empírica apresentada na norma e os dados medidos em laboratório a partir de ensaios em campo, os quais demonstram a tendência de degradação da absortância das telhas após longo período de exposição às intempéries. Desta forma,

pretende-se manter as amostras selecionadas neste trabalho expostas até que se complete um ciclo de 60 meses de envelhecimento, a fim de que com os resultados a serem alcançados após 5 anos completos de exposição das telhas às intempéries, obtenha-se uma avaliação mais precisa dos efeitos que o envelhecimento natural das telhas causa sobre a absortância solar e o desempenho térmico delas. Assim, será possível estender essas análises sobre o desempenho termoenergético de edificações no dia a dia projetual da construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220:** Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro. 2005.

ABNT. **NBR 15575:** Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro. 2021.

AKBARI, H.; BERHE, A.; LEVINSON, R.. **Aging and weathering of cool roofing membranes.** Report LBNL-58055, 2005.

AKBARI, H.; KURN, D.; BRETZ, S.; HANFORD, J. Peak power and cooling energy savings of shade trees. **Energy and Buildings**, v. 25, p. 139-148, 1997.

AKBARI, H.; LEVINSON, R.; ROSENFELD, A.; ELLIOT, M. **Global cooling: policies to cool the world and offset global warming from CO2 using reflective roofs and pavements** (Conference). Berkeley: 307 Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, 2009.

AKBARI, H.; MATTHEWS, D. **Global cooling updates: reflective roofs and pavements.** Rhode Island: Third International Conference Passive & Low Energy Cooling for the Built Environment, 2010.

AKBARI, H.; MENON, S.; ROSENFELD, A. Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO2. **Climatic Change**, v. 95, 2009.

AKBARI, H.; ROSE, L. S. **Characterizing the fabric of the urban environment: a case study of metropolitan Chicago, Illinois**. LBNL- 49275. ed. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory Report, 2001.

ALCHAPAR, N. L.; CORREA, E. N. Aging of Roof Coatings: solar reflectance stability according to their morphological characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 297–305, 2016.

ALCHAPAR, N.; CORREA, E.; CANTÓN, M. A. Urban passive cooling aging effects on optical properties of roof tiles. **Energy Procedia**, v. 57, p. 3181-3190, 2014.

ALGARNI, S.; NUTTER, D. Influence of dust accumulation on building roof thermal performance and radiant heat gain in hot-dry climates. **Energy and Buildings**, v. 104, p. 181-190, 2015.

AOYAMA, T.; SONODA, T.; NAKANISHI, Y.; TANABE, J.; TAKEBAYASHI, H. Study on aging of solar reflectance of the self-cleaning highreflectance coating. **Energy and Buildings**, v. 157, p. 92-100, 2017.

ARAUJO, A. C. H.; DORNELLES, K. A. Estação de envelhecimento natural para análise de degradação da absortância de telhas e monitoramento de temperaturas superficiais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 247-267, abr./jun. 2022.

ASHRAE. **ASHRAE 90.1** - Energy standard for buildings except low-rise residential buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. [S.l.]. 2013.

ASHRAE. ASHRAE 90.2 - Energy Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings. American Society for Testing and Materials. [S.l.]. 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1549-09** - Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer. American Society for Testing and Materials. [S.l.]. 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E903 – 12** -Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. American Society for Testing and Materials. [S.l.]. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G7/G7M-21** - Standard Practice for Natural Weathering of Materials. American Society for Testing and Materials. [S.l.]. 2021.

ATLAS ELETRIC DEVICES COMPANY. **Weathering Testing Guide Book.** Atlas Material testing Solution. 2001. Disponível em: http://www.strenometer.dk/files/downloads/guidebook.pdf. Acesso em 26 mar. 2021.

AWSG. **Atlas Weathering Services Group.** Disponível em: https://www.atlas-mts.com/. Acesso em 10 de fev. 2022.

BERDHAL, P., AKBARI, H., LEVINSON, R., & MILLER, W. A. Weathering of roofing materials – An overview. **Construction and Building Materials**, v. 22, 423-433, 2008.

BORTOLI, L.; STAPAIT, C.; MARINOSKI, D.; FREDEL, M.; SCHABBACH, L. **Influência Das Características Da Superfície No Índice De Refletância Solar De Telhas Cerâmicas Esmaltadas.** Natal: 22º CBECImAT, 2016.

BRETZ, S.; AKBARI, H. Long-term performance of high-albedo roof coatings. **Energy and Buildings**, v. 25, n.2, p. 159-167, 1997.

BRITO FILHO, J. P.; HENRIQUEZ, J. R.; DUTRA, J. C. C. Effects of coefficients of solar reflectivity and infrared emissivity on the temperature and heat flux of horizontal flat roofs of artificially conditioned nonresidential buildings. **Energy and Building**, v. 43, n. 2-3, p. 440–445, 2011.

BRITO FILHO, J.; SANTOS, T. Thermal analysis of roofs with thermal insulation layer and reflective coatings in subtropical and equatorial climate regions in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 84, p. 466–474, 2014.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION (CEC). **Building Energy Efficiency Standards - Title 24**. Disponível em: https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/building-energy-efficiency-standards. Acesso em 10 de fev. 2022.

CASTRO, A. P. A. S. **Análise da refletância de cores de tintas através da técnica espectrofotométrica.** Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2002.

CASTRO, A. P. A. S. *et al.* Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral. **Ambiente Construído**, 2003.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (CB3E). **Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas**. Disponível em: https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Guia_medicao_refletancia_CB3E_v1.pdf. Acesso em 02 de jun. 2022.

CENTRO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Selo Procel Edificações.** Disponível em: http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={8E03DCDE-FAE6-470C-90CB-922E4DD0542C}. Acesso em 10 de fev. 2022.

CHENG, M.-D.; MILLER, W.; NEW, J.; BERDAHL, P. Understanding the long-term effects of environmental exposure on roof reflectance in California. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 516-526, 2012.

CHENG, V.; NG, E.; GIVONI, B. Effect of envelope colour and thermal mass on indorr temperatures in hot humid climate. **Solar Energy**, v. 78, n. 1, p. p. 528-534, 2005.

COELHO, T. C. C. **Efeitos do envelhecimento natural no desempenho térmico de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2017.

COWAN, H. J. **Reflective insulation and the control of thermal environments**. [S.l.]: University of Sydney, 1973.

DAL SOGLIO, C. R., MELLER, B. J., OLINGER, M. S., GÜTHS, S., MARINOSKI, D. L, MIZGIER, M. O. **Análise das propriedades radiativas de uma tinta natural e três tintas acrílicas aplicadas a três diferentes substratos**. Foz do Iguaçu: ENTAC, 2018.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. Tese (Doutorado). ed. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 2008.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. **A ilusão das cores na identificação da absortância solar de superfícies opacas**. Ouro Preto: ENCAC, 9, ELACAC, 5. 2007.

DORNELLES, K.; CARAM, R.; SICHIERI, E. Natural weathering of cool coatings and its effect on solar reflectance of roof surfaces. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1587-1592, 2015.

DORNELLES, K; **Biblioteca de absortância de telhas [recurso eletrônico]:** base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios. São Carlos: Instituto de Arquitetura e Urbanismo, IAU/USP, 2021.

DORNOLLES, K. A. **Comportamento espectral de tintas seletivas produzidas no Brasil para pintura de telhados e sua influencia sobre o desempenho térmico e energético de edificações.** Natal: X Encontro nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2020:** ano base 2019. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: https://www.

epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em 15 jan. 2021.

FERRARI, C.; TOUCHAEI, G. A.; SLEIMAN, M.; LIBBRA, A.; MUSCIO, A.; SILIGARDI, C.; AKBARI, H. Effect of aging processes on solar reflectivity of clay roof tiles. **Advances in Building Energy Research**, v.8, n.1, 28-40, 2014.

FERREIRA, F.; PRADO, R. T. A. Medição do albedo ou refletância dos materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil. Curitiba: ENCAC, 7., COTEDI, 3. 2003.

HUANG, Q.; LU, Y. The Effect of Urban Heat Island on Climate Warming in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration in China. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, v. 12, p. 8773–8789, 2015.

INMETRO. **Comitê Brasileiro de Iluminação (CIE Brasil)**. INMETRO, 2020. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/ciebrasil/origem.asp. Acesso em 10 de fev. 2022.

JACQUES, L. Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coatings. **Progress in Polymer Science**, v. 25, p. 1337–1362, 2000.

JO, J. H.; CARLSON, J. D.; GOLDEN, J. S.; BRYAN, H. An integrated empirical and modeling methodology for analyzing solar reflective roof technologies on commercial buildings. **Building and Environment**, v. 45, p. 453–460, 2010.

KIM, G.; SONG, B.; PARK, K. Long-term monitoring for comparison of seasonal effects on cool roofs in humid subtropical climates. **Energy and Buildings**, v. 206, 2020.

KOLOKOTRONI, M.; SHITTU, E.; SANTOS, T.; RAMOWSKI, L. Cool roofs: High tech low cost solution for energy efficiency and thermal comfort in low rise low income houses in high solar radiation countries. **Energy and Buildings**, v. 176, p. 58–70, 2018.

KRELLING, A. F.; SILVA, M. P.; SOUZA, R. V.; MARINOSKI, D. L.; GÜTHS, S. **Influência do envelhecimento, limpeza e pintura da superfície de telhas de fibrocimento sobre o desempenho térmico da cobertura.** In: ENCAC, XV, ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2019, João Pessoa. Anais... João Pessoa, 2019.

KRIMPALIS, S.; KARAMANIS, D. A novel approach to measuring the solar reflectance

of conventional and innovative building components. **Energy and Buildings**, v. 97, p. 137-145, 2015.

LAMBERTS, R. **Heat transfer through roofs of low cost brazilian houses.** Leeds: Tese doutorado – Department of Civil Engineering. University of Leeds, 1988.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura.** PW Editores. São Paulo. 1997.

LEVINSON, R.; AKBARI, H.; BERDAHL, P. Measuring solar reflectance— Part II: Review of practical methods. **Solar Energy**, v. 84, n. 9, p. 1745-1759, 2010.

LEVINSON, R.; BERDAHL, P.; AKBARI, H.; MILLER, W.; JOEDICKE I.; REILLY, J.; ... VONDRAN, M. Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 91, p. 304–314, 2007.

LEVINSON, R.; BERDAHL, P.; BERHE, A. A.; AKBARI, H. Effects of soiling and cleaning on the reflectance and solar heat gain of a light-colored roofing membrane. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 7807-7824, 2005.

LOUZICH, K.; CALLEJAS, I.; DURANTE, L.e; MARTINS, A.; ROSSETI, K.; MARTINS, W. Absortância de telhas cerâmicas novas e deterioradas pela exposição às intempéries: impacto no desempenho térmico de edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

MACINTYRE, H.L.; HEAVISIDE, C. Potential benefits of cool roofs in reducing heat-related mortality during heatwaves in a European city. **Environment International**, v. 127, p. 430-441, 2019.

MAESTRI, A. **Avaliação da refletância solar em coberturas no Campus da Universidade Federal de Santa Catarina.** Florianópolis: Dissertação de mestrado - UFSC, 2017.

MARINOSKI, D.; ORIGE, L.; GUESSER, A.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. **Análise comparativa de valores de refletância solar de superfícies opacas utilizando diferentes equipamentos de medição em laboratório**. Brasília: XII ENCAC E VIII ELACAC. 2013.

MASTRAPOSTOLI, E.; SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTSA, D.; VASSILIS, P.; VENIERI, D.; GOM-PAKIS, K. **A numerical and experimental analysis of the aging of the cool roofs for buildings in Greece.** Atenas: Proceedings of the 34th AIVC Conference Energy conservation technologies for mitigation and adaptation in the built environment: the role of ventilation strategies and smart materials. 2013.

MASTRAPOSTOLI, E.; SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTSA, D.; VASSILIS, P.; VENIERI, D.; GOMPAKIS, K. On the ageing of cool roofs: Measure of the optical degradation, chemical and biological analysis and assessment of the energy impact. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 191-199, 2016.

MIRANDA, P. B. **Espectroscopia não linear de interfaces e de polímeros semicondutores.** Tese (Livre Docência em Física da Matéria Condensada) - Instituto de Física de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2015.

MIRZAEI, P. A.; HAGHIGHAT, F. Approaches to study urban heat island - abilities and limitations. **Buildings and Environment**, v. 45, p. 2192-2201, 2010.

MORINI, E.; CASTELLANI, B.; NICOLINI, A.; ROSSI, F.; BERARDI, U. Effects of aging on retro-reflective materials for building applications. **Energy and Buildings**, v. 179, p. 121-132, 2018.

PARANHOS, R.; FIGUEIREDO FILHO, D. B.; ROCHA, E. C. da; SILVA JUNIOR, J. A. da; NEVES, J. A. B.; SANTOS, M. L. W. D. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson: o Retorno**. Leviathan, São Paulo, v. 8, p. 66-95, 2014.

PEREIRA, C. D. **Influência da refletância e da emitância de superfícies externas no desempenho térmico de edificações.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2014.

POMERANTZ, M.; AKBARI, H.; KONOPACKI, S. J.; TAHA, H.; ROSENFELD, A. H. Reflective surfaces for cooler buildings and cities. **Philosophical Mag B**, v. 79, n. 9, p. 1457–1476, 1999.

PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. **Energy ans Buildings**, v. 37, n. 4, p. 295-300, 2005.

Q-LAB CORPORATION. **Outdoor Weathering: Basic Exposure Procedures. Technical Bulletin**, LL-9025, 2006. Disponível em: http://www.q-lab-corporation.

ru/doc/Q-Lab-LL9025-Outdoor.pdf. Acesso em: 10 jan. 2021.

ROSENFELD, A. H.; AKBARI, H.; ROMM, J. J.; POMERANTZ, M. Cool communities: strategies for heat islands mitigation and smog reduction. **Energy and Buildings**, v. v.28, n. n.1, p. p.51–62, 1998.

ROSENFELD, A.; AKBARI, H.; BRETZ, S.; FISHMAN, B.; KURN, D.; SAILOR, D.; TAHA, H. Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. **Energy and Buildings**, v. 22, p. 255-265, 1995.

SABER, H. Experimental characterization of reflective coating material for cool roofs in hot, humid and dusty climate. **Energy and Buildings**, v. 242, 2021.

SALMAN, M.; SALEEM, Y. The effect of Urban Heat Island mitigation strategies on outdoor human thermal comfort in the city of Baghdad. **Frontiers of Architectural Research**, v. 4, p. 838-856, 2021.

SANTAMOURIS, M.; PAVLOU, K.; SYNNEFA, A.; NIACHOU, K.; KOLOKOTSA, D. Recent progress on passive cooling techniques – Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households. **Energy and Buildings**, v. 39, n.7, p. 859–866, 2007.

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**, v. 85, p. 3085-3102. 2011.

SANTOS, E. I. *et al.* **Manual para obtenção da absortância solar em superfícies opacas**. Florianópolis: Manual para abtenção da absortância solar em superfícies opacas, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, UFSC, 2009.

SHI, D.; ZHUANG, C.; LIN, C.; ZHAO, X.; CHEN, D., GAO, Y.; LEVINSON, R. Effects of natural soiling and weathering on cool roof energy savings for dormitory buildings in Chinese cities with hot summers. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 200, 2019.

SHIRAKAWA, M.A., SILVA Junior, J.A., MARQUES, S.A.V., JOHN, V.M. Superfícies frias Avaliação da refletância em quatro cidades brasileiras após um ano de envelhecimento natural. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

SILVA, I. **Estudo de durabilidade de pinturas "frias" e convencionais expostas ao envelhecimento natural.** Dissertação (Mestrado) São Paulo: Escola Politecnica da Universidade de São Paulo, USP, 2017.

SILVA, M. P.; DEIVIS, D.; GUTHS, S. **Simulação termoenergéticae análise econômica do uso de telhados de fibrocimento de alta refletância solar em uma residência unifamiliar.** Porto Alegre: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, ANTAC, 2020.

SLEIMAN, M.; BAN-WEISS, G.; GILBERT, H. E.; FRANCOIS, D.; BERDAHL, P.; KIRCHSTETTER, T. W.; DESTAILLATS, H.; LEVINSON, R. Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance - Part I: Analysis of roofing product databases. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 95, n. 12, p. 3385-3399, 2011.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; APOSTOLAKIS, K. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. **Solar Energy**, v. v.81, p. p.488-497, 2007.

TAHA, H. **Meteorological and air quality impacts of increased urban surface albedo and vegetative cover in the Greater Toronto Area, Canada**. LBNL- 49210. ed. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory Report, 2002.

TAHA, H. Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin. **Atmospheric Environment**, v. 31, p. 1667–1676, 1997.

TAHA, H. **Potential impacts of climate change on tropospheric ozone in California: a preliminary episodic modeling assessment of the Los Angeles Basin and the Sacramento Valley.** LBNL - 46695. ed. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory Report, 2001.

TAHA, H.; CHANG, C.; AKBARI, H. **Meteorological and Air Quality Impacts of Heat Island Mitigation Measures in Three US Cities. Lawrence Berkeley National Laboratory**. LBNL - 44222, 2000.

TAHA, H.; CHANG, S.-C.; AKBARI, H. **Meteorological and air quality impacts of heat island mitigation measures in three U.S. Cities**. LBNL - 44222. ed. Berkeley, CA: LBNL Report , 2000.

TAHA, H.; KONOPACKI, S.; GABERSEK, S. Impacts of large-scale surface modifications on meteorological conditions and energy use: a 10-region modeling study. **Theoretical**

and Applied Climatology, v. 62, p. 175–185, 1999.

TAHA, H.; LIU, X; SAILOR, D.; MEIER, A.; BENJAMIN, M.; WINER, A.; DOUGLAS, S.; HANEY, J. **Analysis of Energy Efficiency and Air Quality in the South Coast Air Basin of California – Phase II**. LBNL - 35728, v. 2, 1994.

UNEP. **Building and climate change:** status, challenges and opportunities, United Nations Environment Program, 2007. Disponivel em: < https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7783/-Buildings%20and%20Climate%20Change%20-%20Status%2C%20Challenges%20and%20Opportunities-20073934.pdf?sequence=3&isAllowed=y >. Acesso em: 18 Setembro 2018.

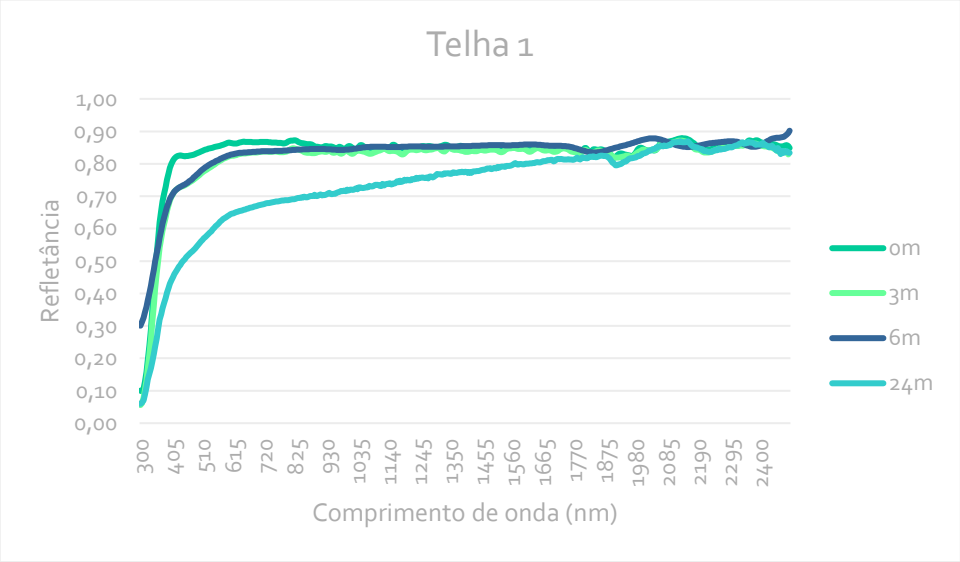
VERÇOZA, E. J. **Patologia das Edificações.** [S.l.]: Editora Sabra, 1991.

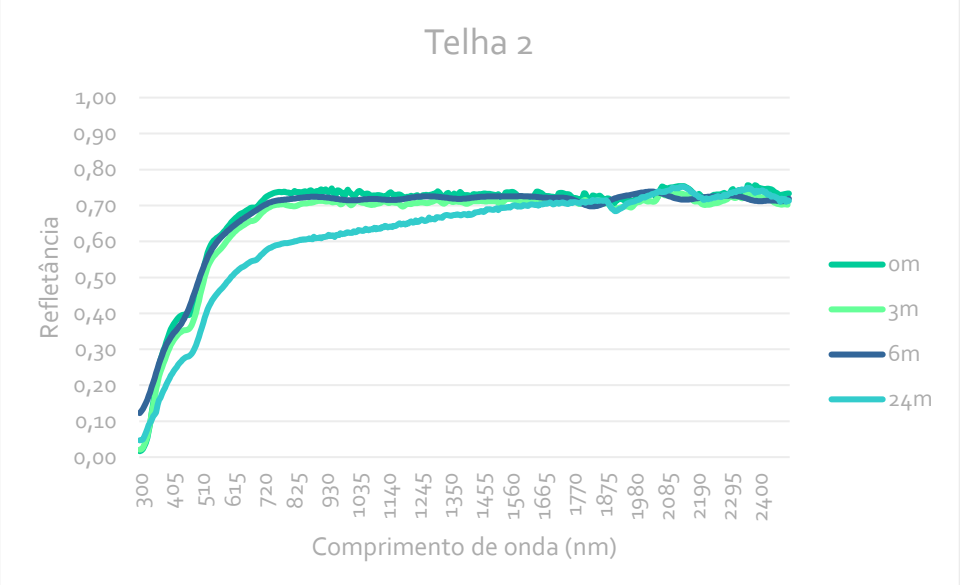
WYPYCH, G. **Handbook of Material Weathering.** 5 ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2013.

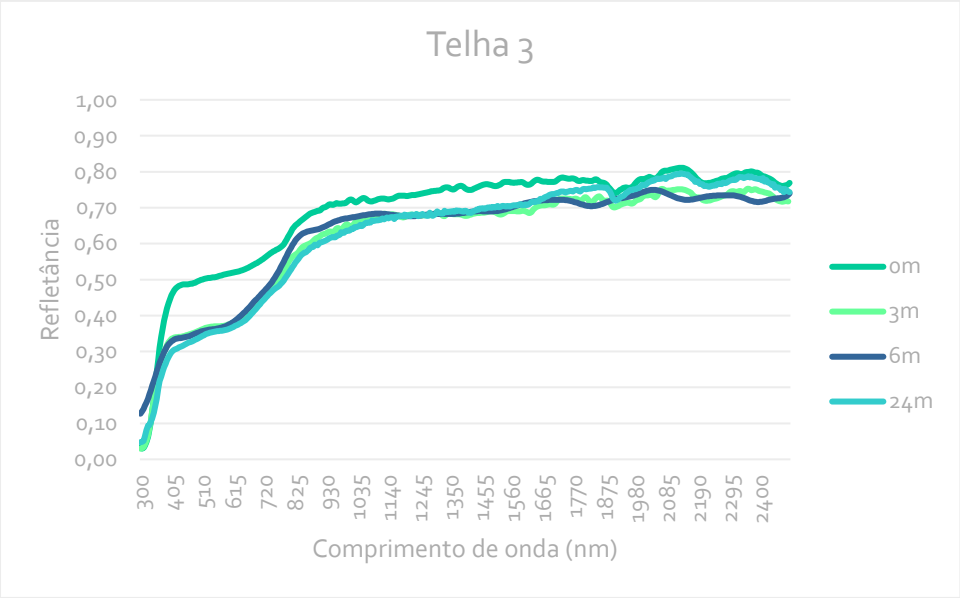
ZHAO, Z. Impacts of urbanization on climate change. In: 10,000 Scientific Difficult Problems: Earth Science (in Chinese), 10,000 scientific difficult problems Earth Science Committee Eds.. **Science Press**, p. 843–846, 2011.

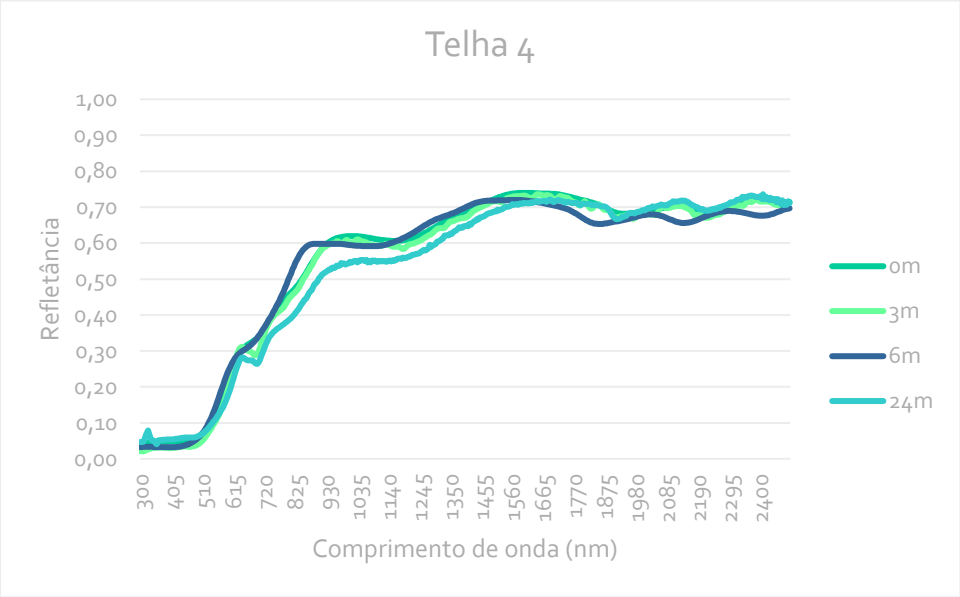
APÊNDICE A

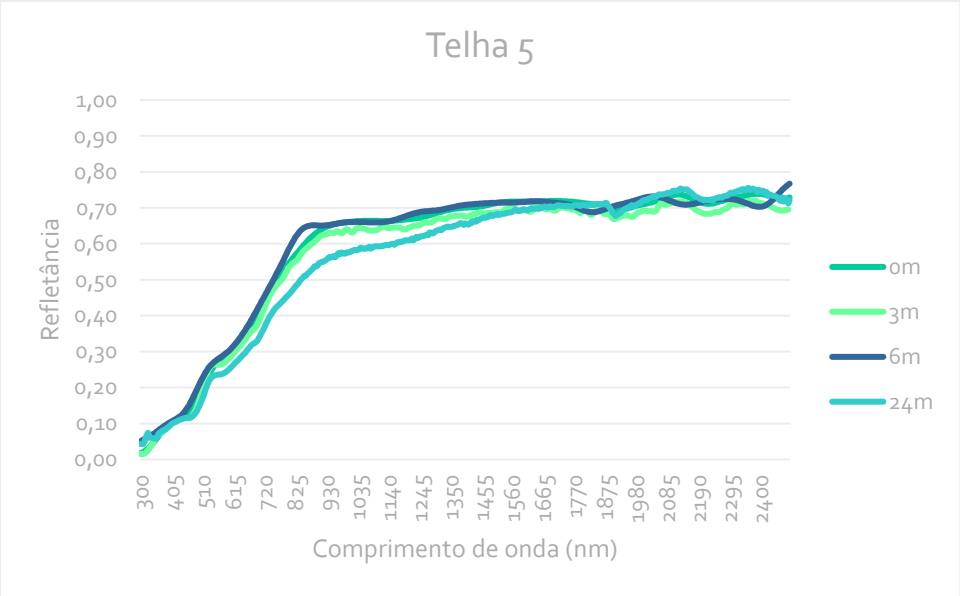
Curvas de refletância espectral de todas as telhas expostas ao tempo aos 0, 3, 6 e 24 meses de exposição

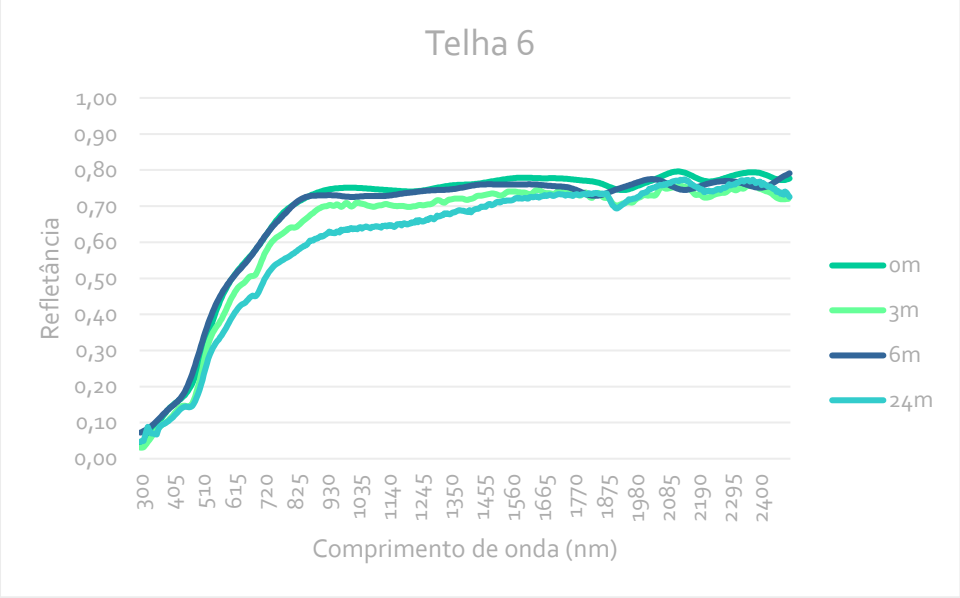


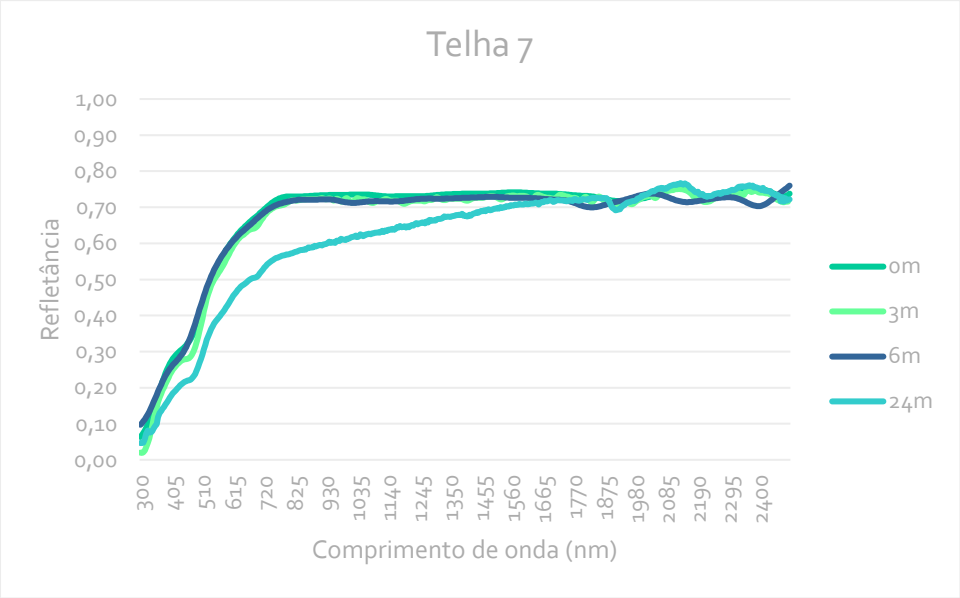


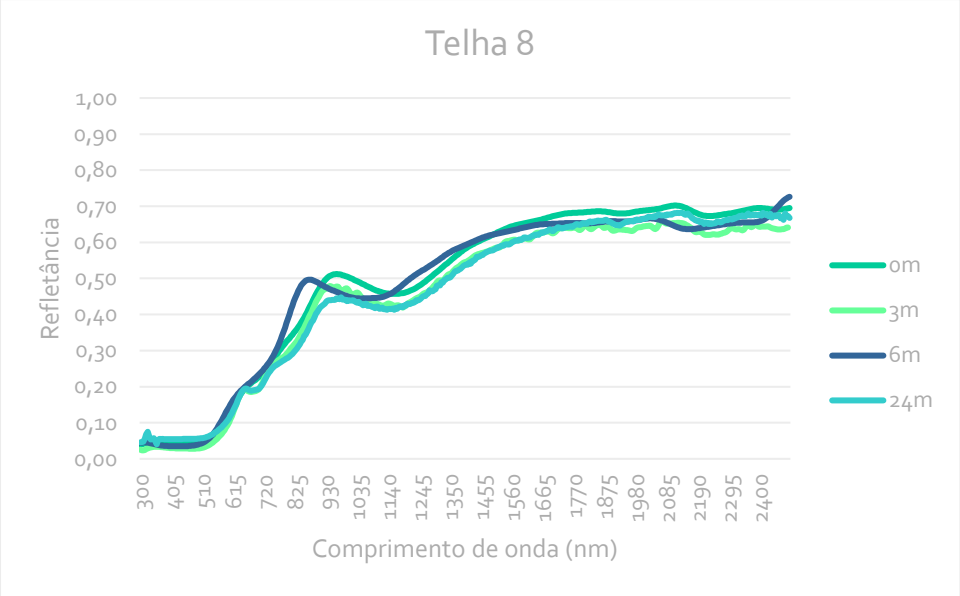

Telha 3
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

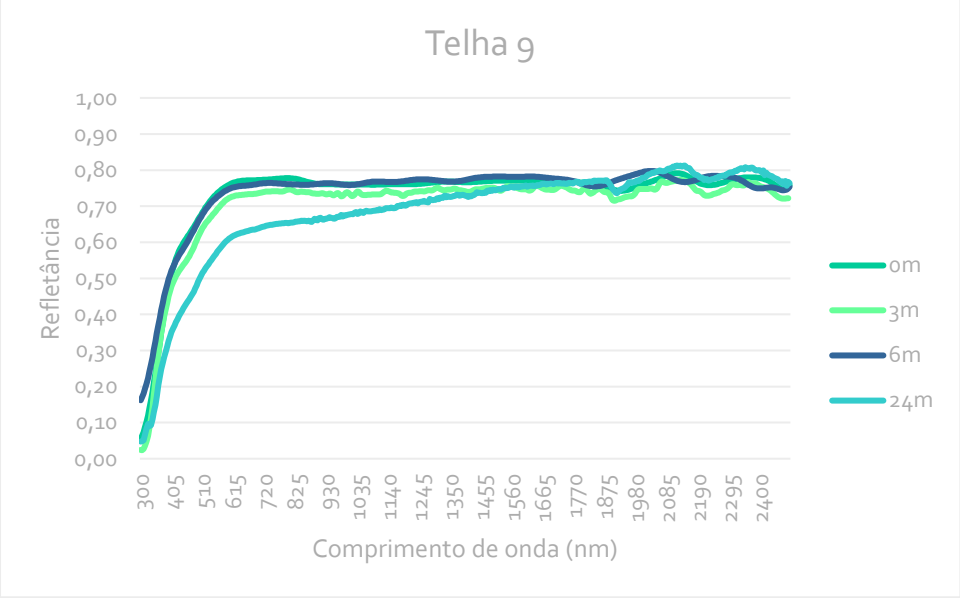

Telha 4
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

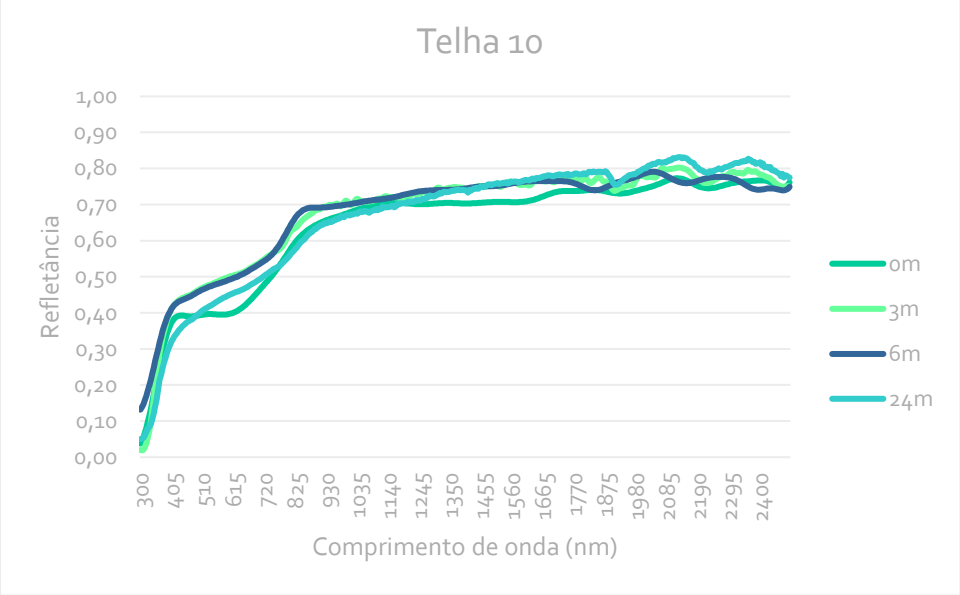

Telha 5
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

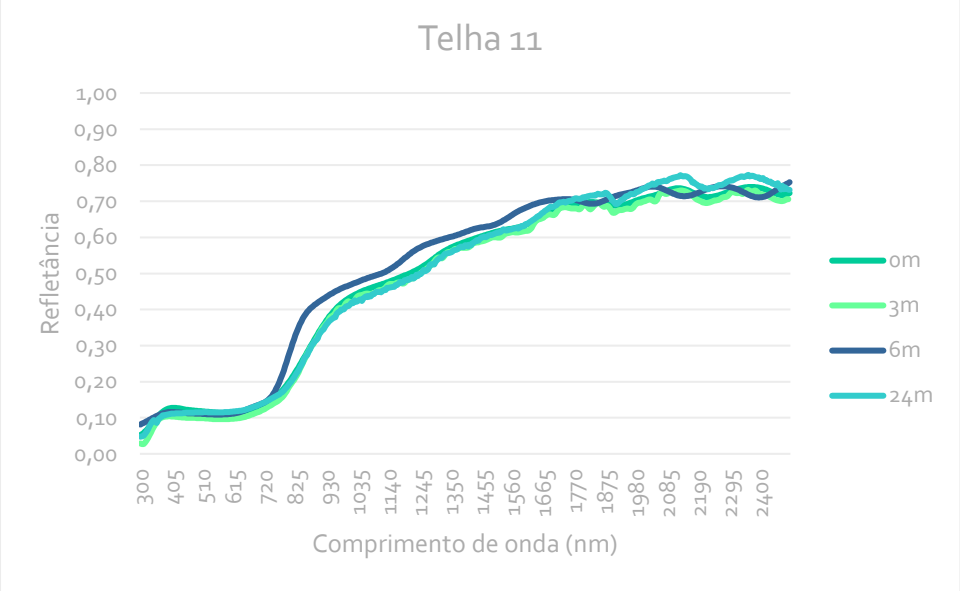

Telha 6
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

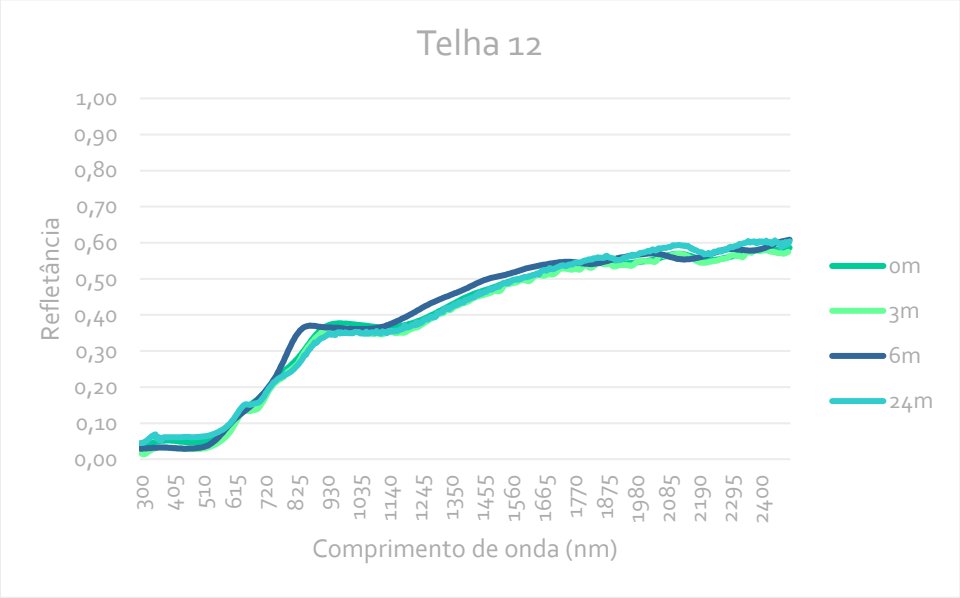

Telha 7
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

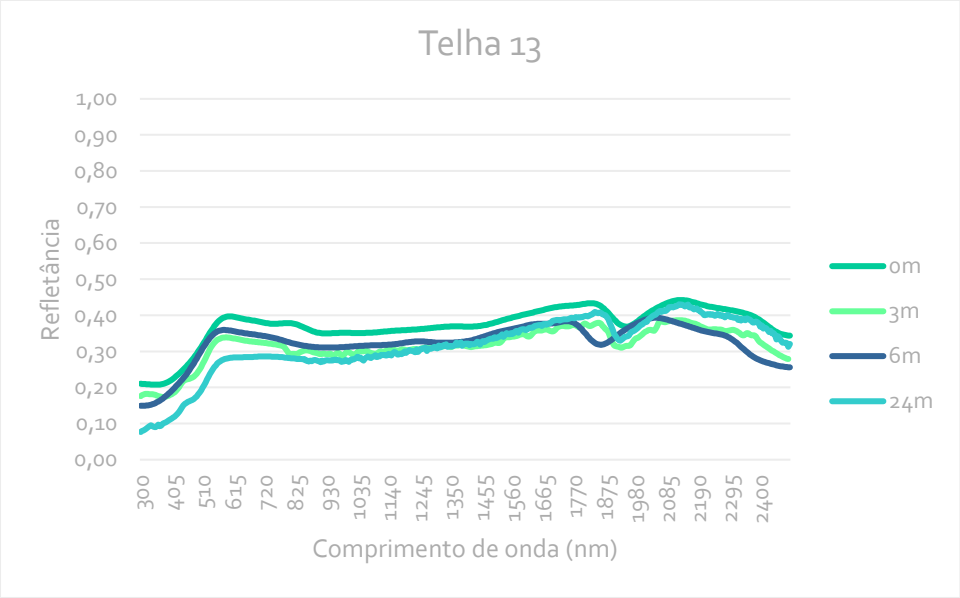

Telha 8
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

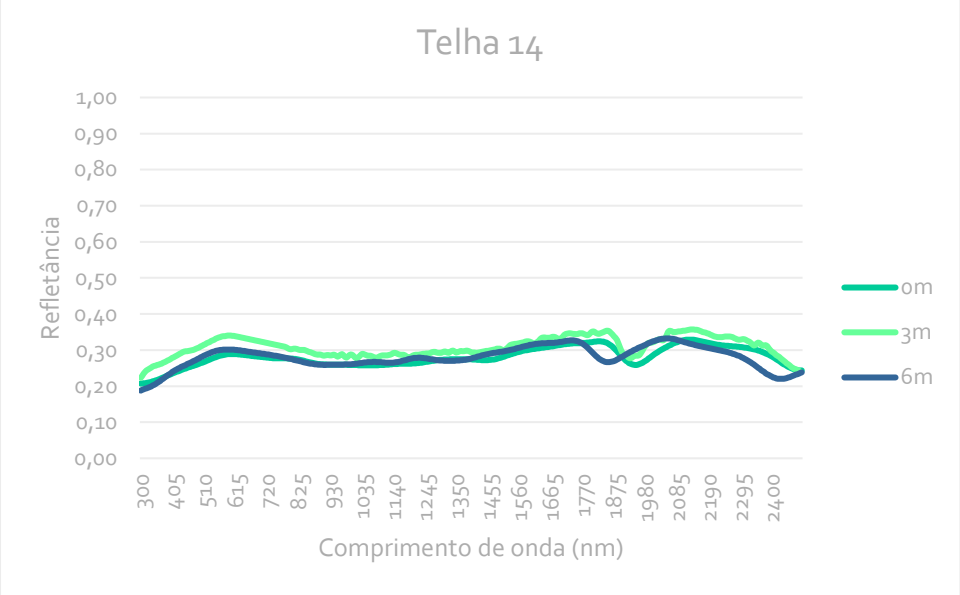

Telha 9
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

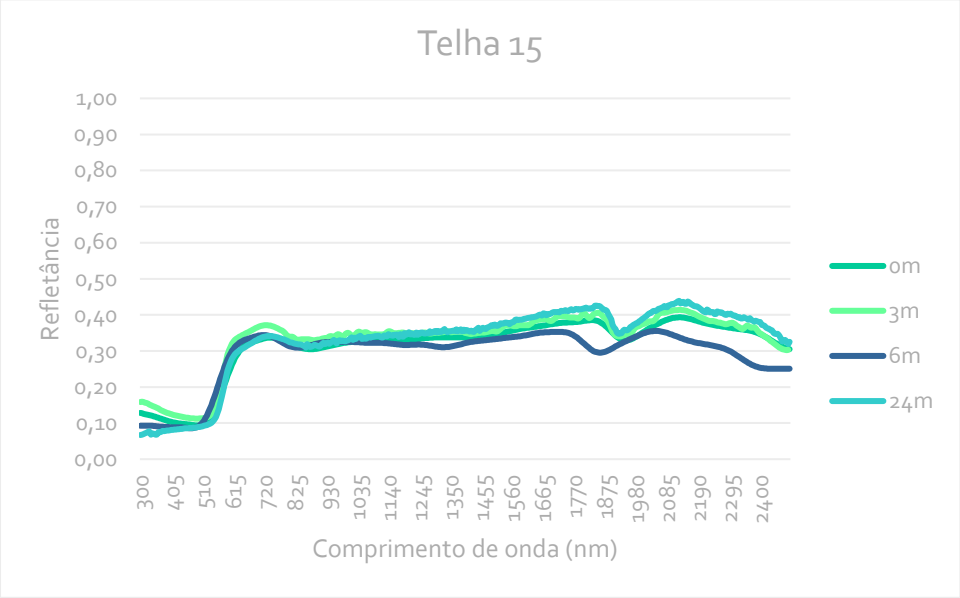

Telha 10
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

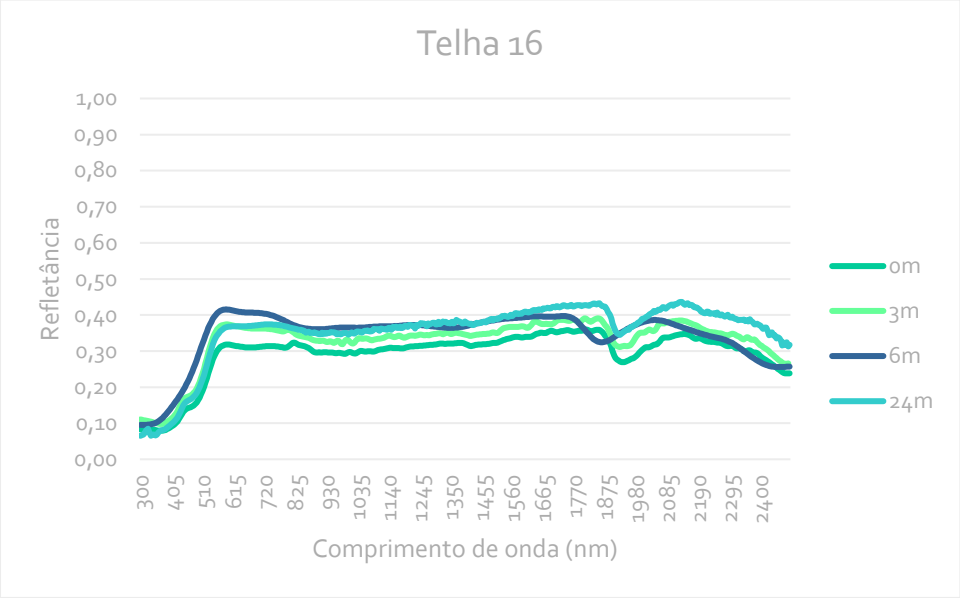

Telha 11
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

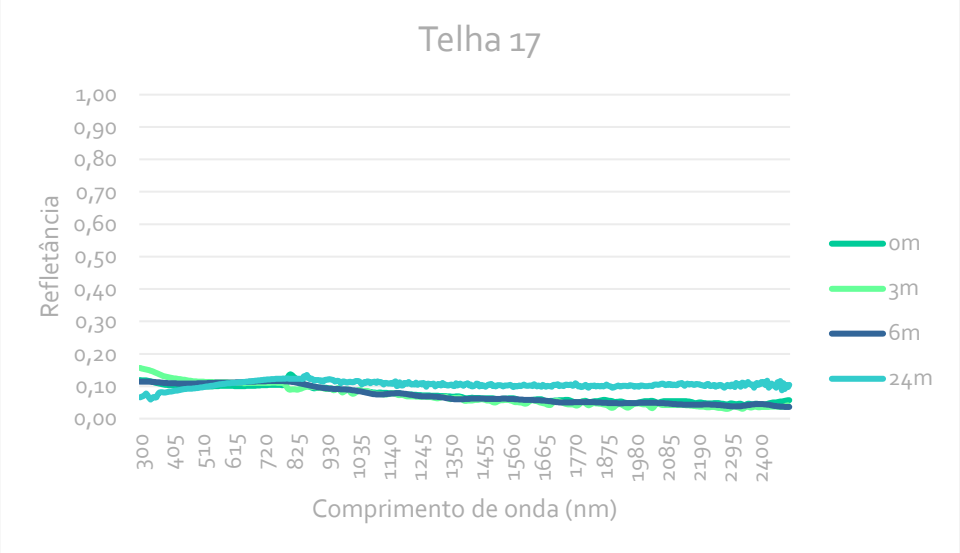

Telha 12
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

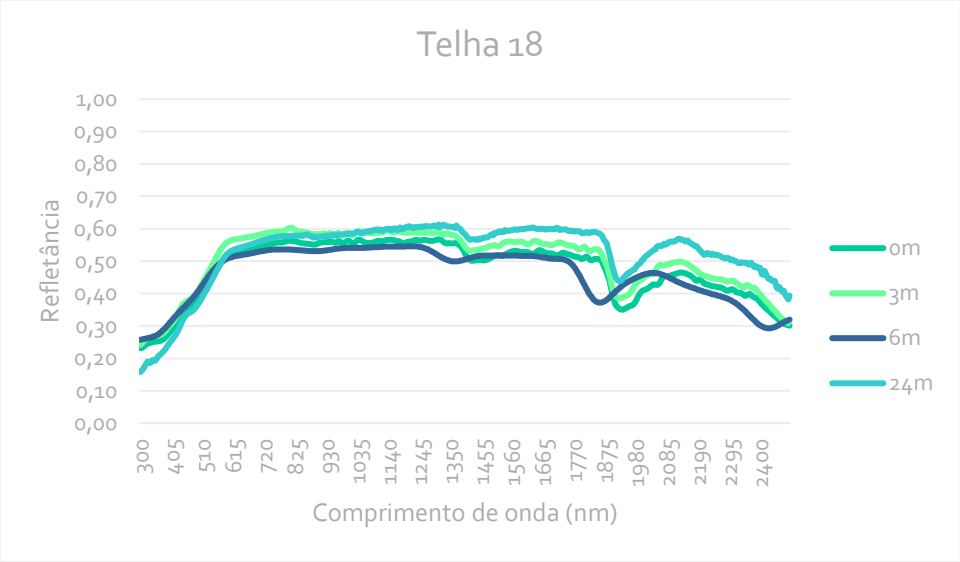

Telha 13
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

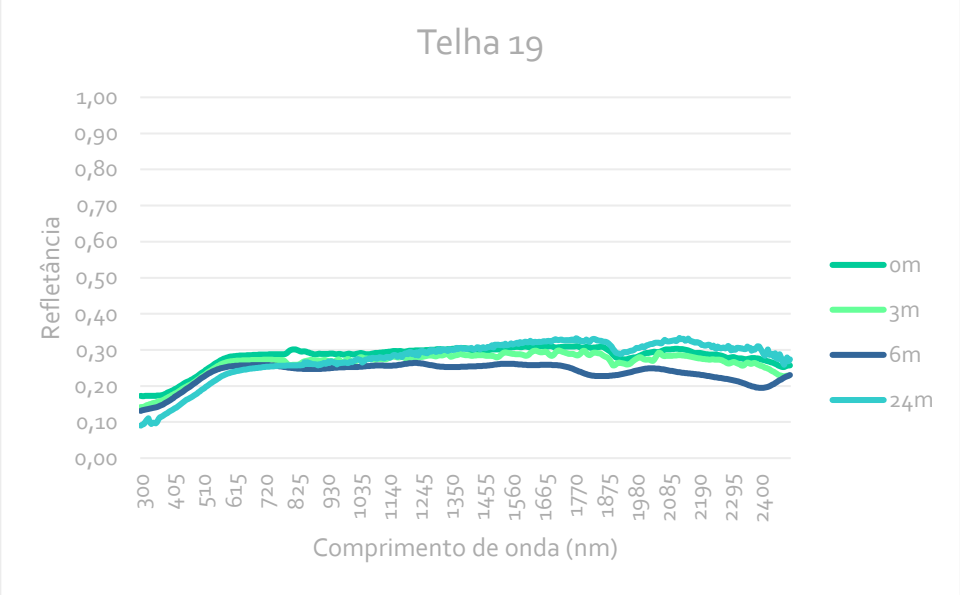

Telha 14
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m

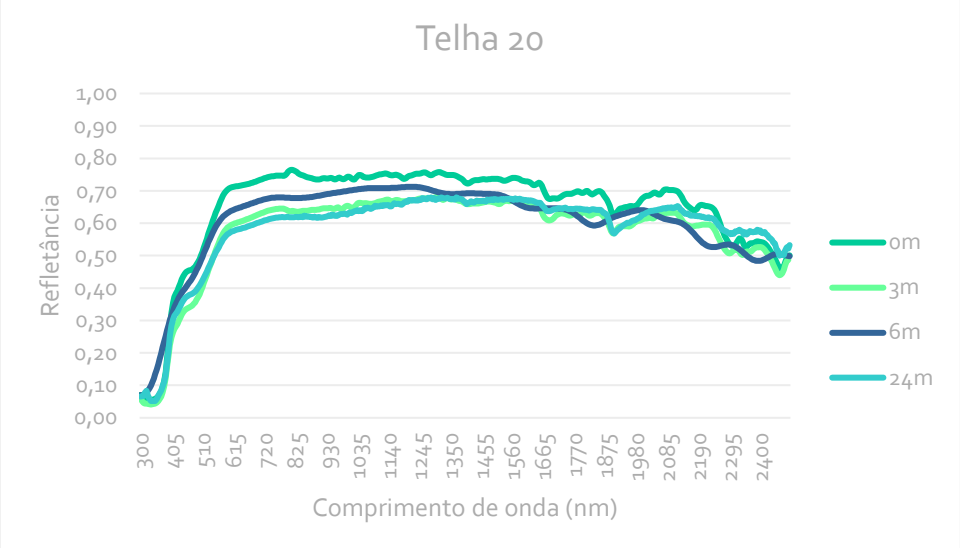

Telha 15
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

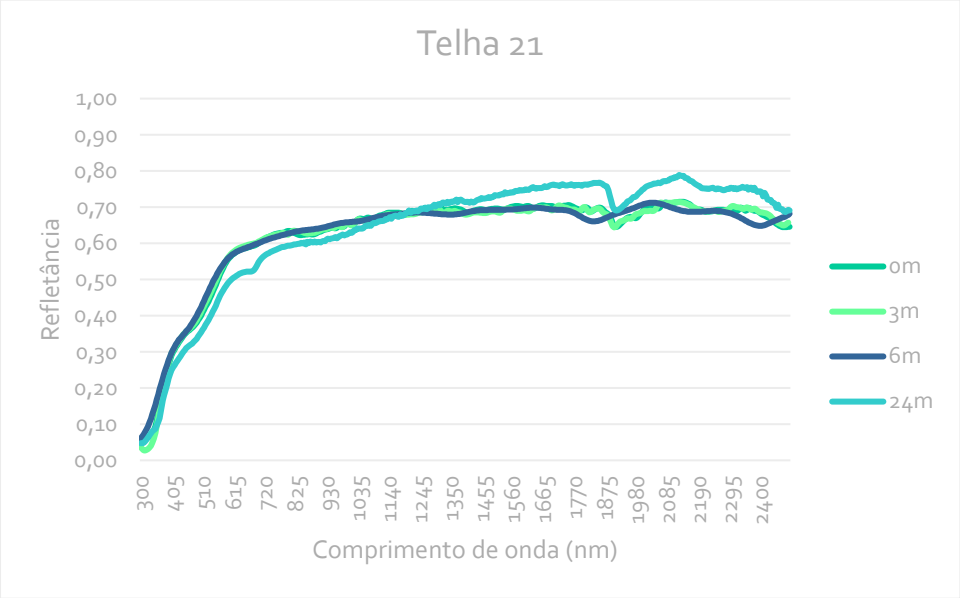

Telha 16
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

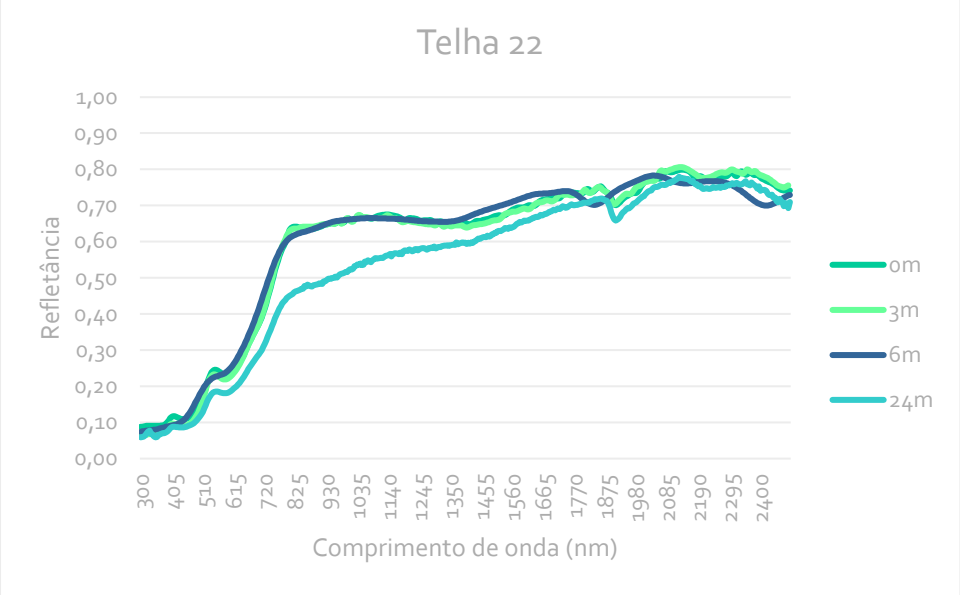

Telha 17
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

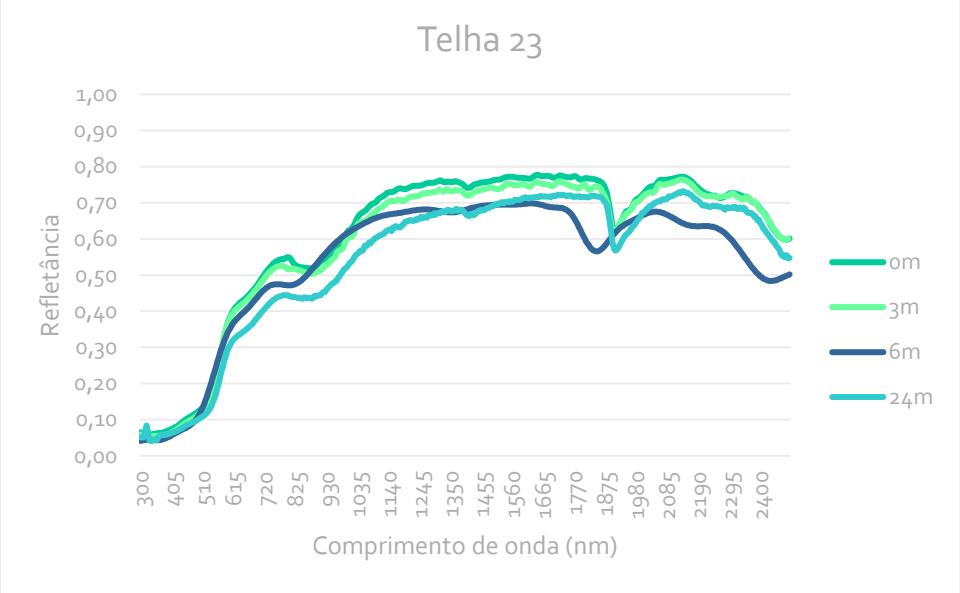

Telha 18
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

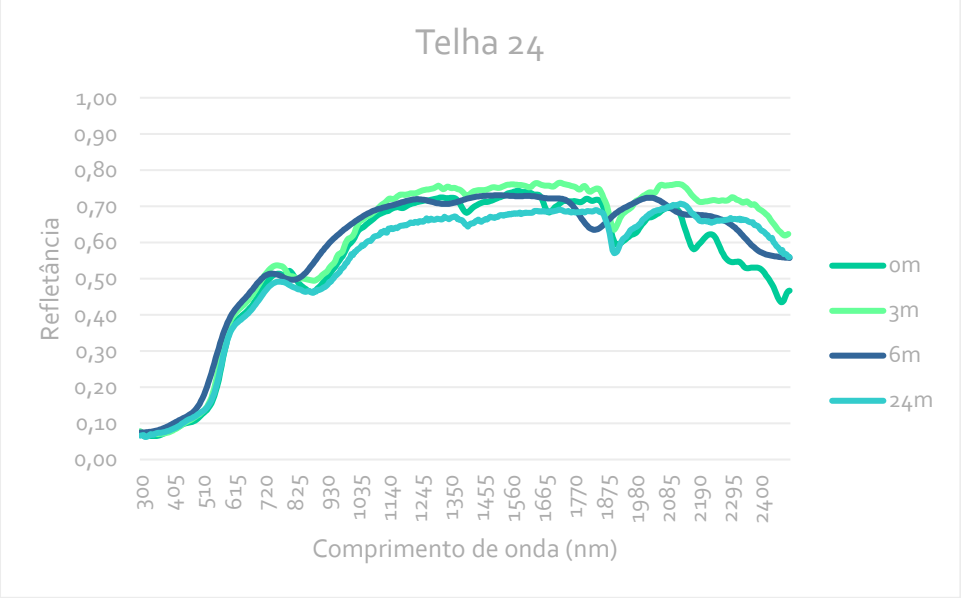

Telha 19
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

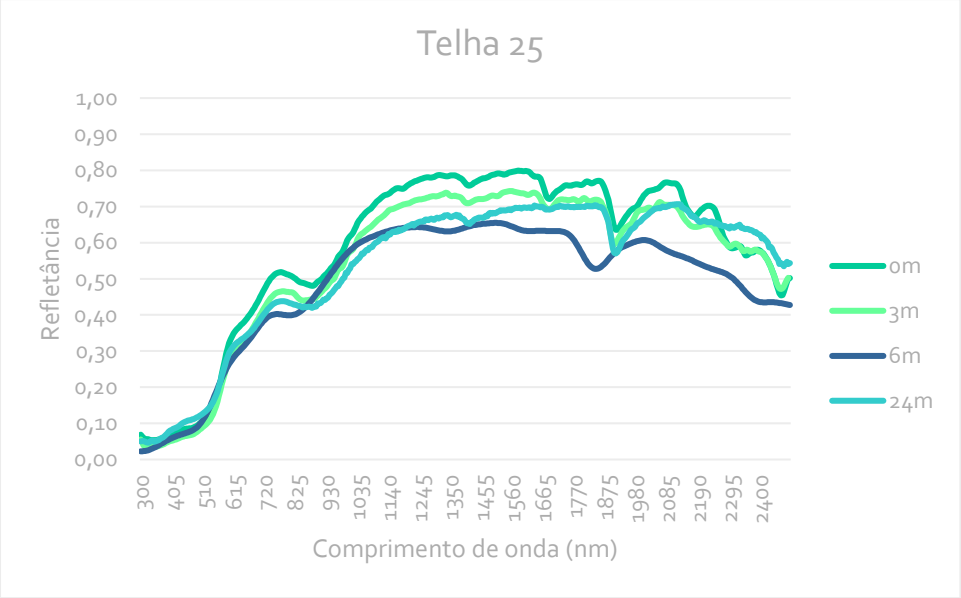

Telha 20
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

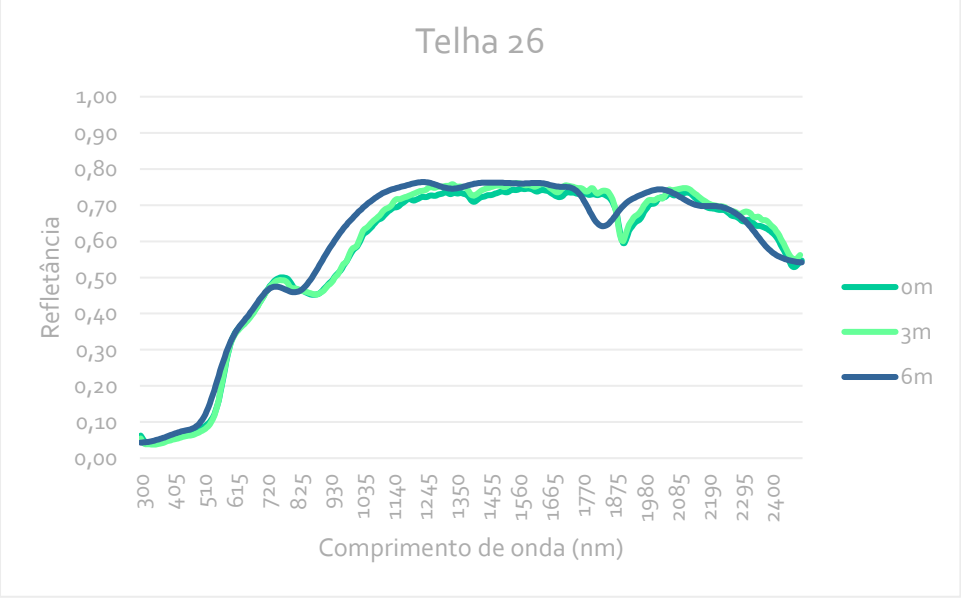

Telha 21
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

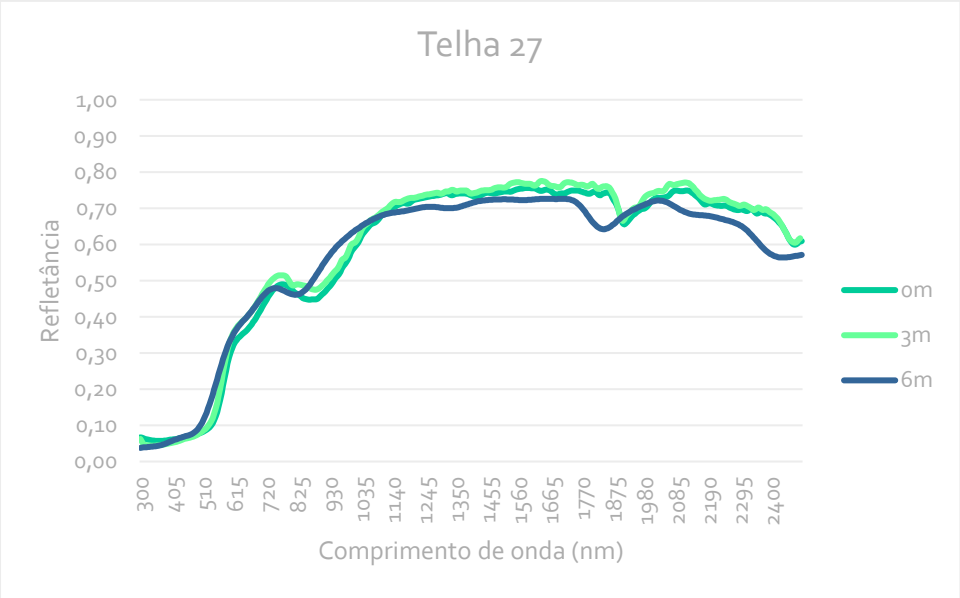

Telha 22
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

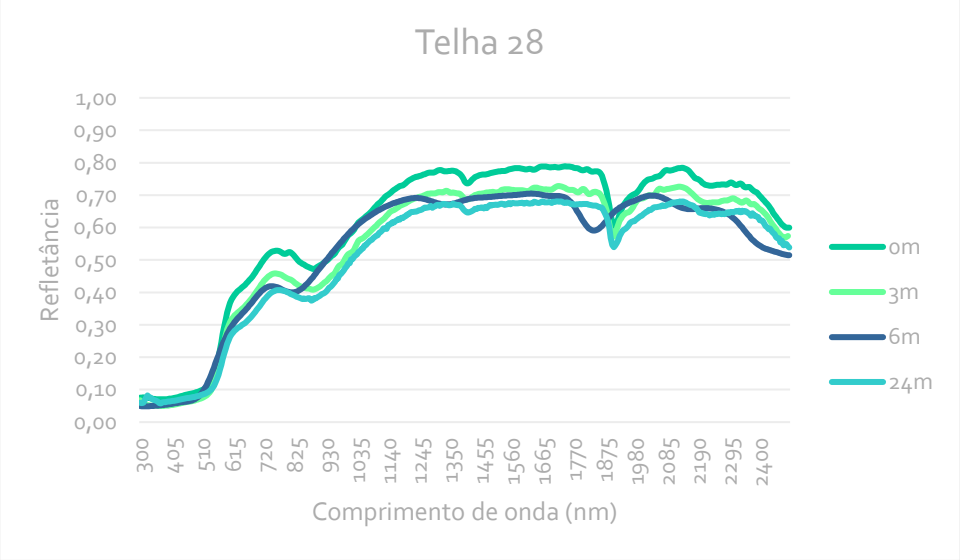

Telha 23
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m


Telha 24
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m


Telha 25
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m


Telha 26
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300 405 510 615 720 825 930 1035 1140 1245 1350 1455 1560 1665 1770 1875 1980 2085 2190 2295 2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m


Telha 27
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300
405
510
615
720
825
930
1035
1140
1245
1350
1455
1560
1665
1770
1875
1980
2085
2190
2295
2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m


Telha 28
Refletância
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
300
405
510
615
720
825
930
1035
1140
1245
1350
1455
1560
1665
1770
1875
1980
2085
2190
2295
2400
Comprimento de onda (nm)
0m
3m
6m
24m

APÊNDICE B

Comparação dos parâmetros de cor de todas as telhas expostas ao tempo aos 0 e 24 meses de exposição

TELHA 01



	D65/10°
L*	96.16
a*	-4.84
b*	7.7
C	9.1
h	122.16



	D65/10°
L*	86,05
a*	-2,38
b*	13,06
C	13,27
h	100,32

TELHA 02

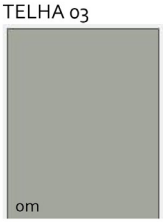


	D65/10°
L*	80.05
a*	0.35
b*	25.91
C	25.91
h	89.23



	D65/10°
L*	69,84
a*	1,38
b*	23,01
C	23,05
h	86,56

TELHA 03

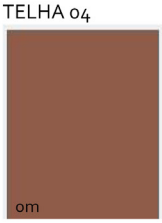


	D65/10°
L*	67.65
a*	-2.8
b*	4.41
C	5.22
h	122.4



	D65/10°
L*	63,25
a*	-1,84
b*	5,78
C	6,06
h	107,69

TELHA 04



	D65/10°
L*	44.12
a*	18.57
b*	19.37
C	26.83
h	46.21



	D65/10°
L*	43,2
a*	14,81
b*	15,32
C	21,31
h	45,97

TELHA 05



	D65/10°
L*	57.38
a*	1.74
b*	23.33
C	23.4
h	85.74



	D65/10°
L*	54,51
a*	1,8
b*	20,23
C	20,31
h	84,91

TELHA 06



	D65/10°
L*	64.29
a*	6.19
b*	32.54
C	33.13
h	79.23



	D65/10°
L*	60,8
a*	6,08
b*	29,12
C	29,75
h	78,21

TELHA 07



	D65/10°
L*	74.89
a*	4.03
b*	29.71
C	29.98
h	82.27



	D65/10°
L*	66,02
a*	4,06
b*	25,05
C	25,37
h	80,79

TELHA 08



	D65/10°
L*	39.05
a*	11.25
b*	8.14
C	13.89
h	35.88



	D65/10°
L*	38,98
a*	9,11
b*	6,5
C	11,19
h	35,5

TELHA 09

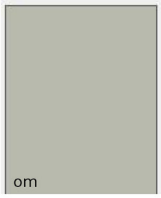


	D65/10°
L*	88.76
a*	-3
b*	16.12
C	16.39
h	100.54



	D65/10°
L*	78,63
a*	-1,3
b*	17,25
C	17,3
h	94,32

TELHA 10



	D65/10°
L*	75.11
a*	-2.94
b*	5.98
C	6.66
h	116.2

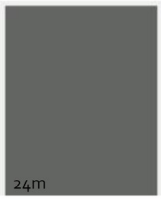


	D65/10°
L*	71,19
a*	-1,99
b*	8,38
C	8,62
h	103,37

TELHA 11



	D65/10°
L*	43.25
a*	-1.81
b*	0.03
C	1.81
h	178.94



	D65/10°
L*	42,4
a*	-1,63
b*	0,51
C	1,71
h	162,66

TELHA 12



	D65/10°
L*	37.97
a*	6.97
b*	4.87
C	8.5
h	34.94



	D65/10°
L*	38,51
a*	5,49
b*	4,04
C	6,82
h	36,38

TELHA 13



	D65/10°
L*	61.04
a*	-2.17
b*	15.03
C	15.18
h	98.21

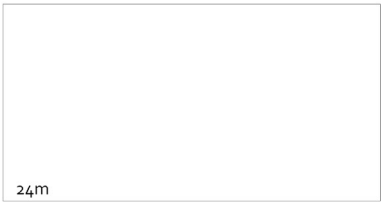


	D65/10°
L*	55,39
a*	-0,53
b*	15,4
C	15,41
h	91,95

TELHA 14



	D65/10°
L*	60.09
a*	-2.72
b*	6.56
C	7.1
h	112.54



TELHA 15



	D65/10°
L*	45.27
a*	16.74
b*	12.14
C	20.68
h	35.96



	D65/10°
L*	45,41
a*	16,75
b*	13,56
C	21,55
h	38,98

TELHA 16



	D65/10°
L*	61.85
a*	0.14
b*	25.69
C	25.69
h	89.7



	D65/10°
L*	59,82
a*	1,1
b*	24,81
C	24,84
h	87,47

TELHA 17



	D65/10°
L*	43.64
a*	-2.23
b*	-0.23
C	2.25
h	185.91



	D65/10°
L*	41,67
a*	-1,11
b*	2,13
C	2,4
h	117,67

TELHA 18

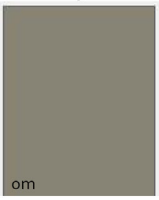


	D65/10°
L*	75.62
a*	0.49
b*	15.93
C	15.93
h	88.24



	D65/10°
L*	71,12
a*	1,69
b*	17,98
C	18,06
h	84,64

TELHA 19



	D65/10°
L*	54.93
a*	-1.17
b*	7.98
C	8.06
h	98.35



	D65/10°
L*	52,2
a*	-0,55
b*	8,89
C	8,91
h	93,51

TELHA 20



	D65/10°
L*	81.33
a*	1.82
b*	22.28
C	22.35
h	85.32



	D65/10°
L*	75,63
a*	2,33
b*	20,54
C	20,68
h	83,54

TELHA 21



	D65/10°
L*	77.64
a*	2.46
b*	18.62
C	18.78
h	82.48



	D65/10°
L*	71,69
a*	3,42
b*	19,08
C	19,38
h	79,83

TELHA 22



	D65/10°
L*	53.89
a*	0.68
b*	19.75
C	19.76
h	88.04



	D65/10°
L*	49,19
a*	1,15
b*	15,92
C	15,96
h	85,86

TELHA 23



	D65/10°
L*	55.13
a*	19.71
b*	27.56
C	33.88
h	54.43



	D65/10°
L*	49,21
a*	15,55
b*	21,53
C	26,56
h	54,16

TELHA 24



	D65/10°
L*	55.96
a*	18.89
b*	23.58
C	30.22
h	51.3



	D65/10°
L*	51,98
a*	16,91
b*	22,62
C	28,24
h	53,21

TELHA 25

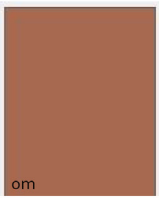


	D65/10°
L*	50.78
a*	19.93
b*	23.77
C	31.02
h	50.03

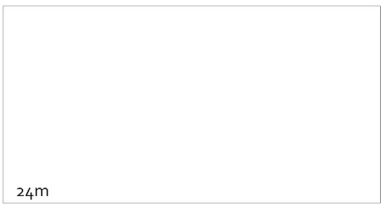


	D65/10°
L*	49,82
a*	13,72
b*	17,91
C	22,56
h	52,54

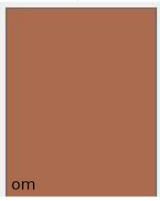
TELHA 26



	D65/10°
L*	50.53
a*	22.35
b*	23.97
C	32.78
h	47



TELHA 27



	D65/10°
L*	51.6
a*	22.64
b*	25.75
C	34.29
h	48.68



TELHA 28



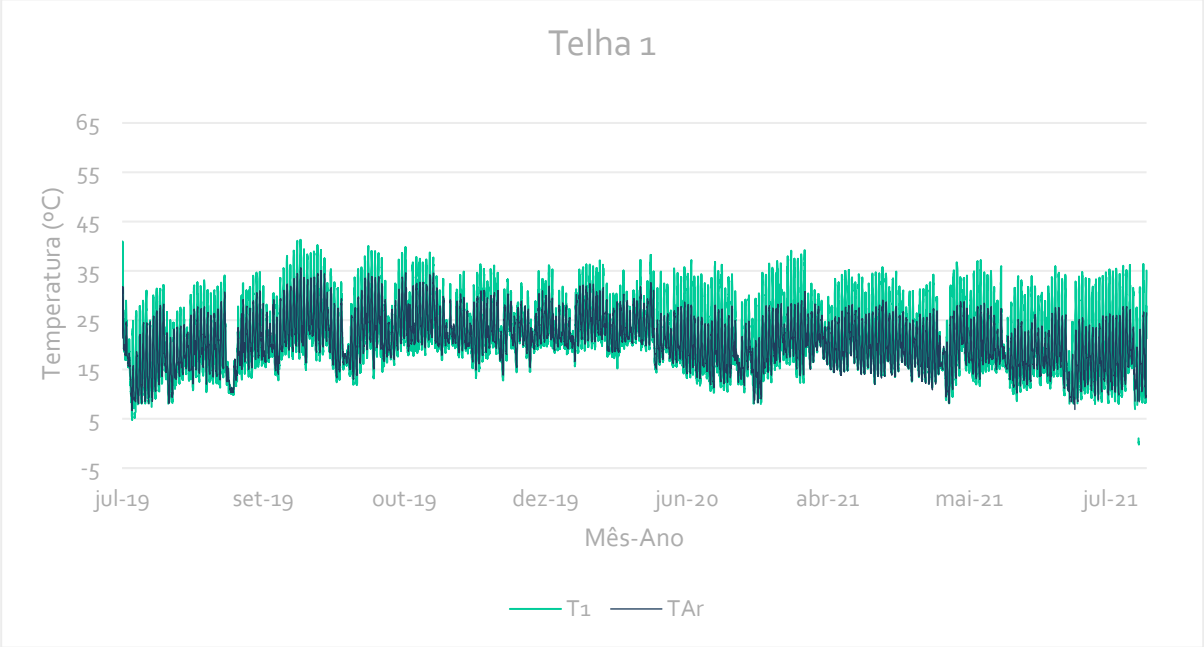
	D65/10°
L*	50.27
a*	23.56
b*	24.69
C	34.13
h	46.34

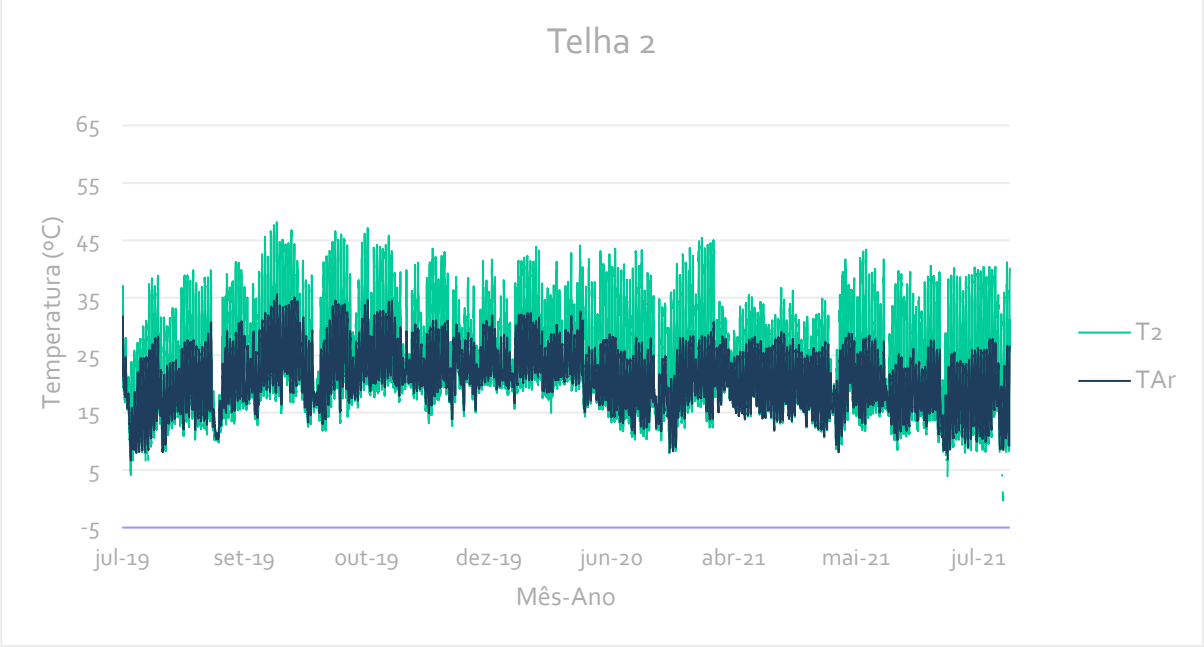


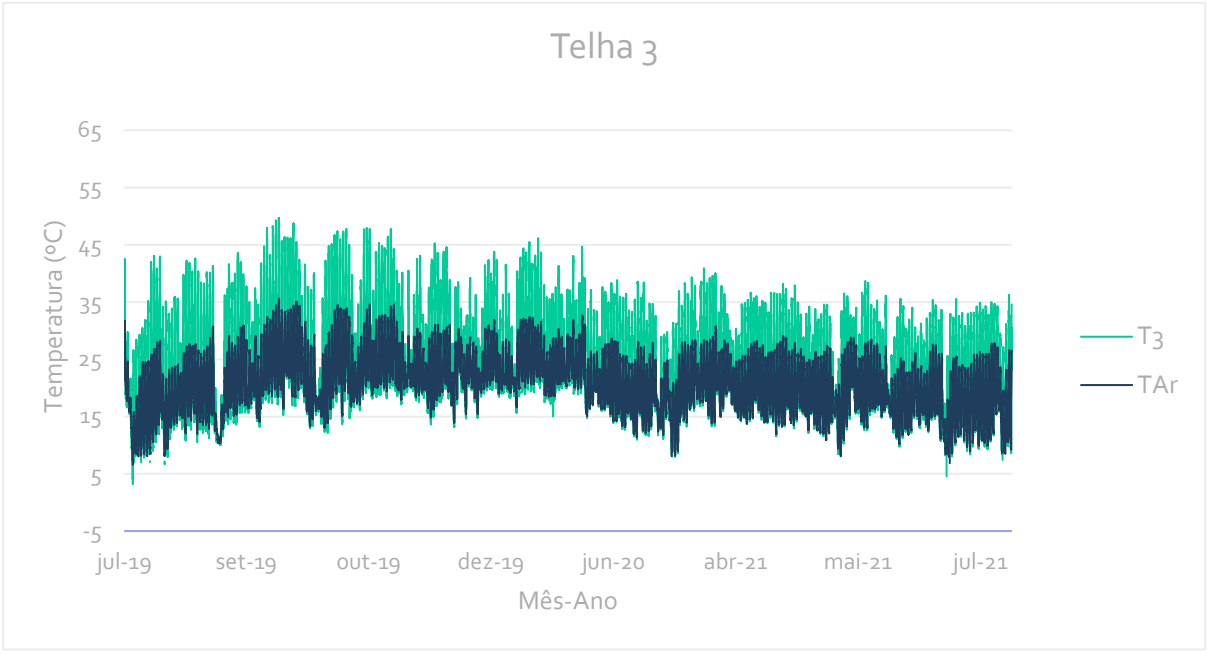
	D65/10°
L*	44,8
a*	17,46
b*	16,67
C	24,14
h	43,68

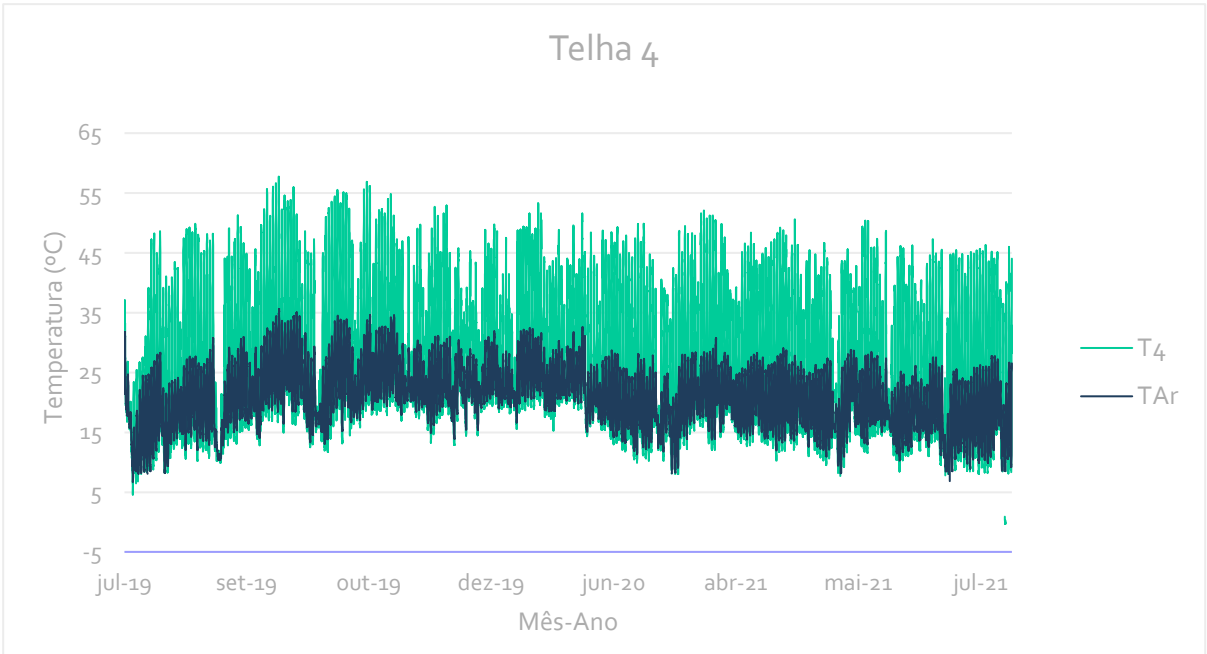
APÊNDICE C

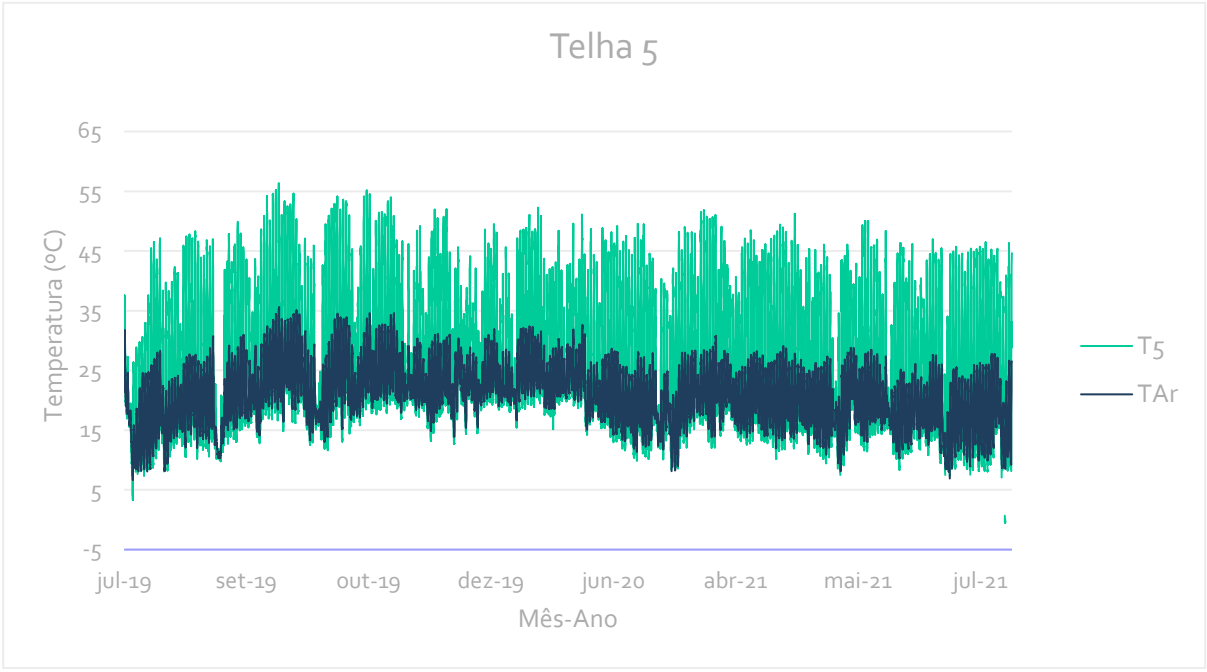
Curvas de monitoramento de temperatura superficial de todas as telhas expostas ao longo do período de exposição (24 meses)

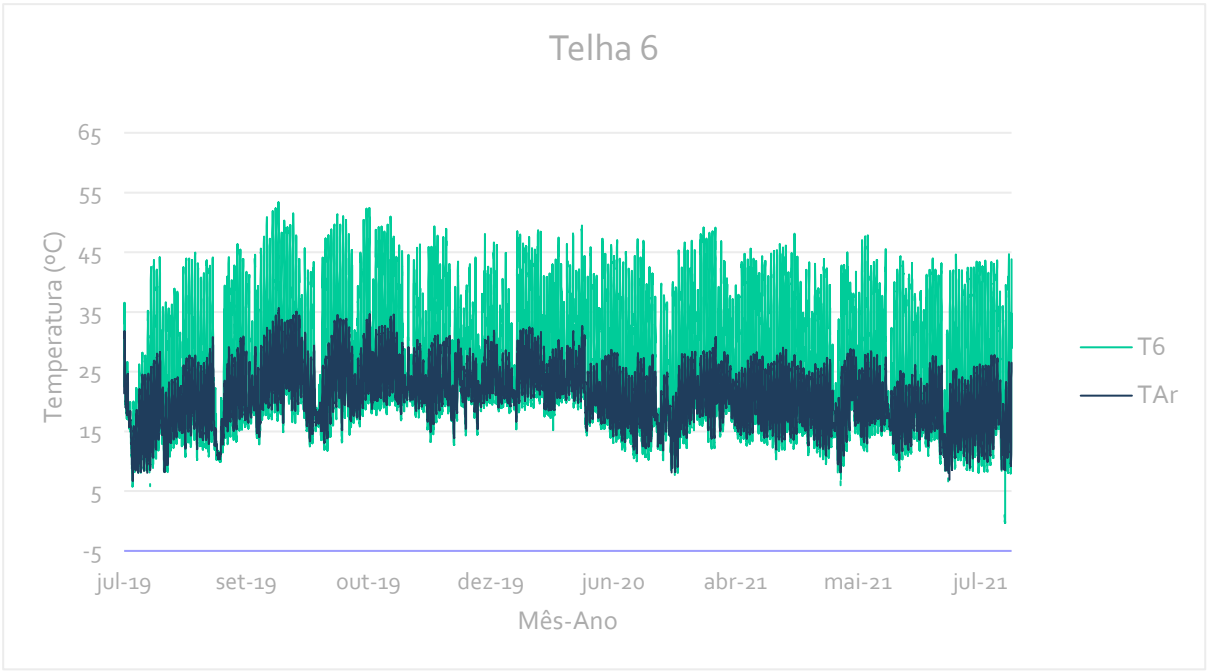


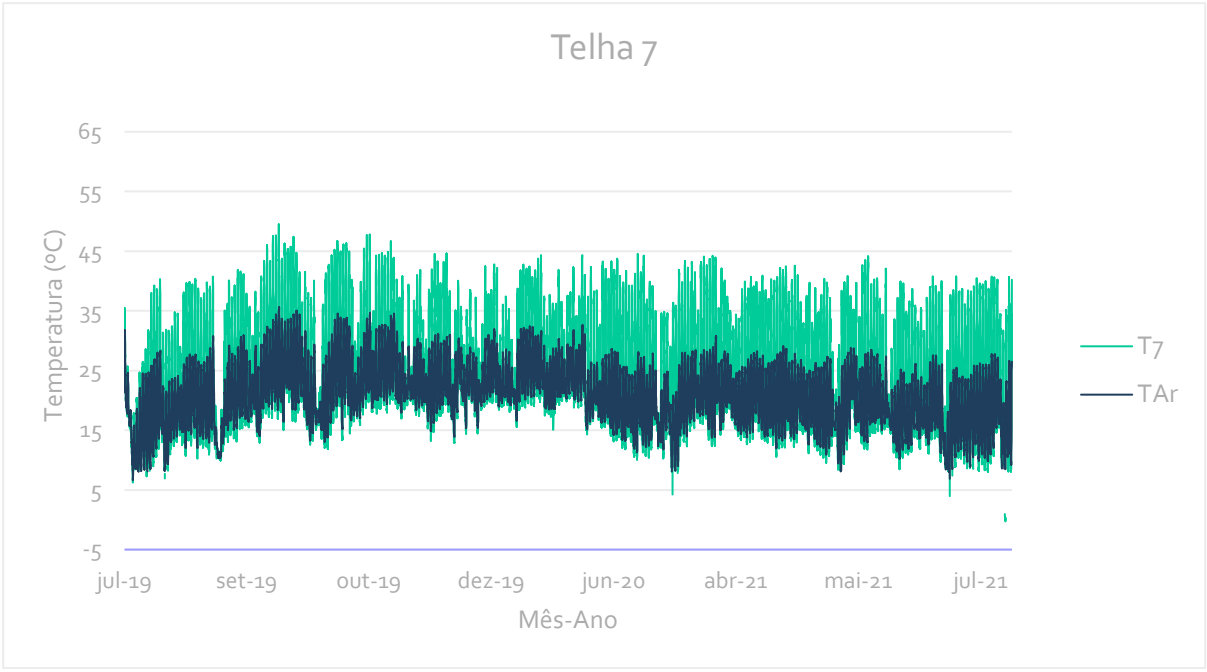


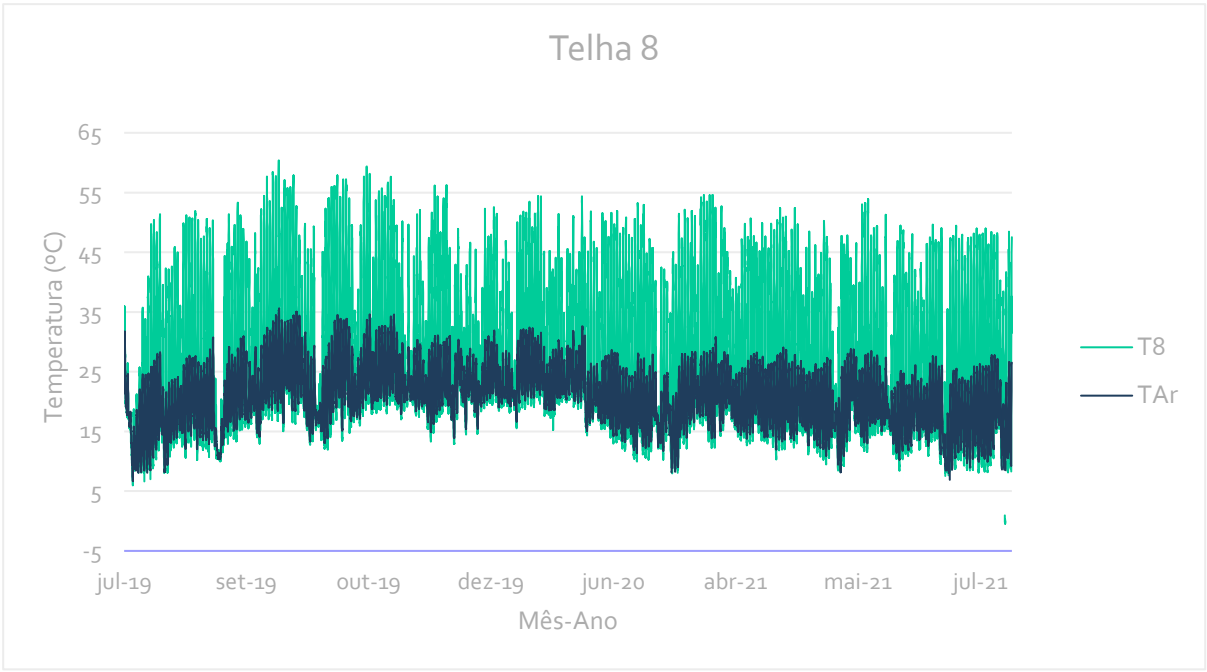

Telha 3
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T3
TAr

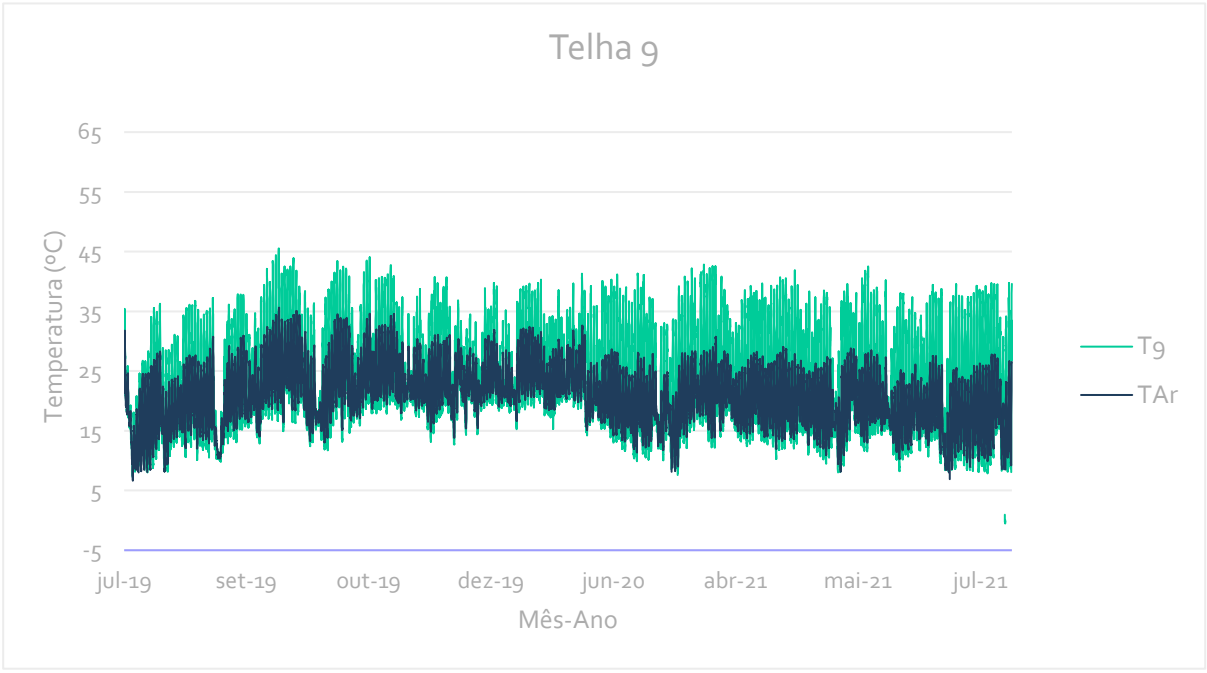

Telha 4
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T4
TAr

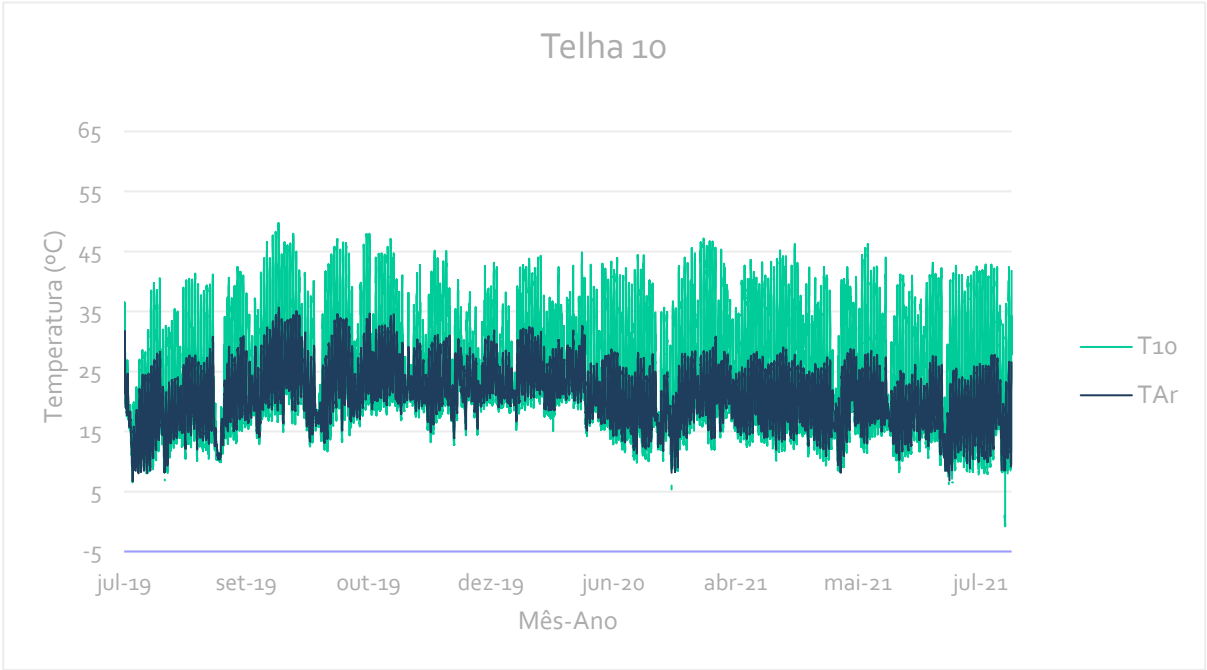

Telha 5
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (°C)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T5
TAr

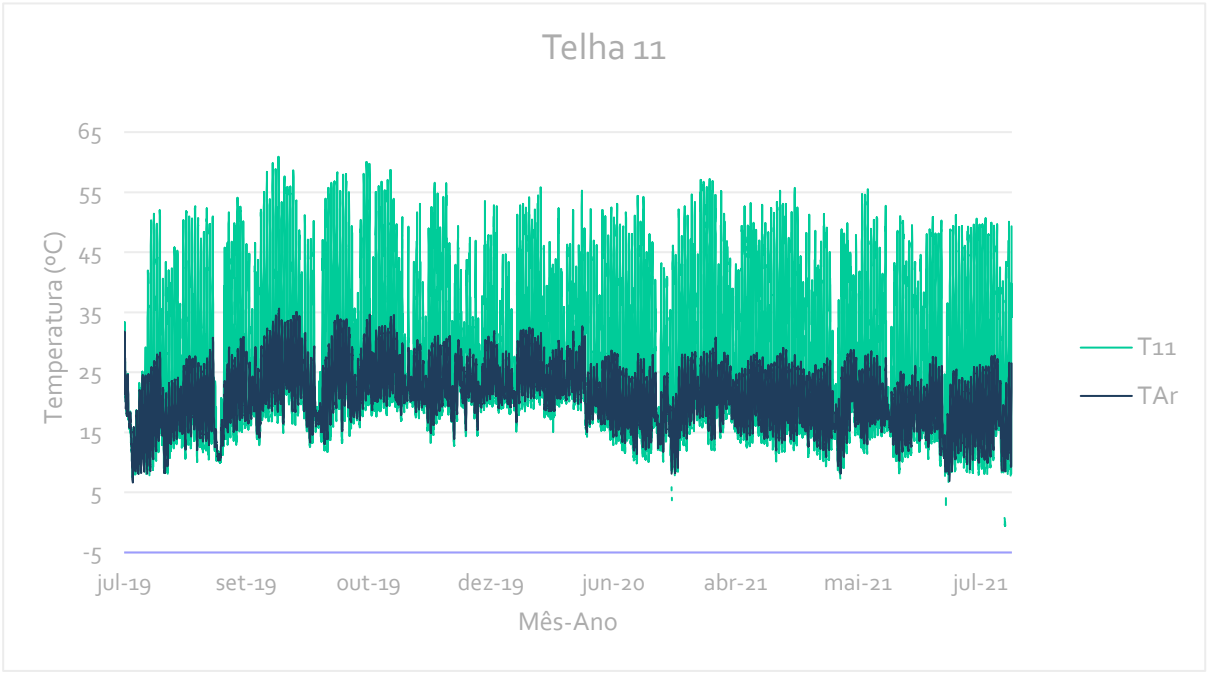

Telha 6
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (°C)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T6
TAr

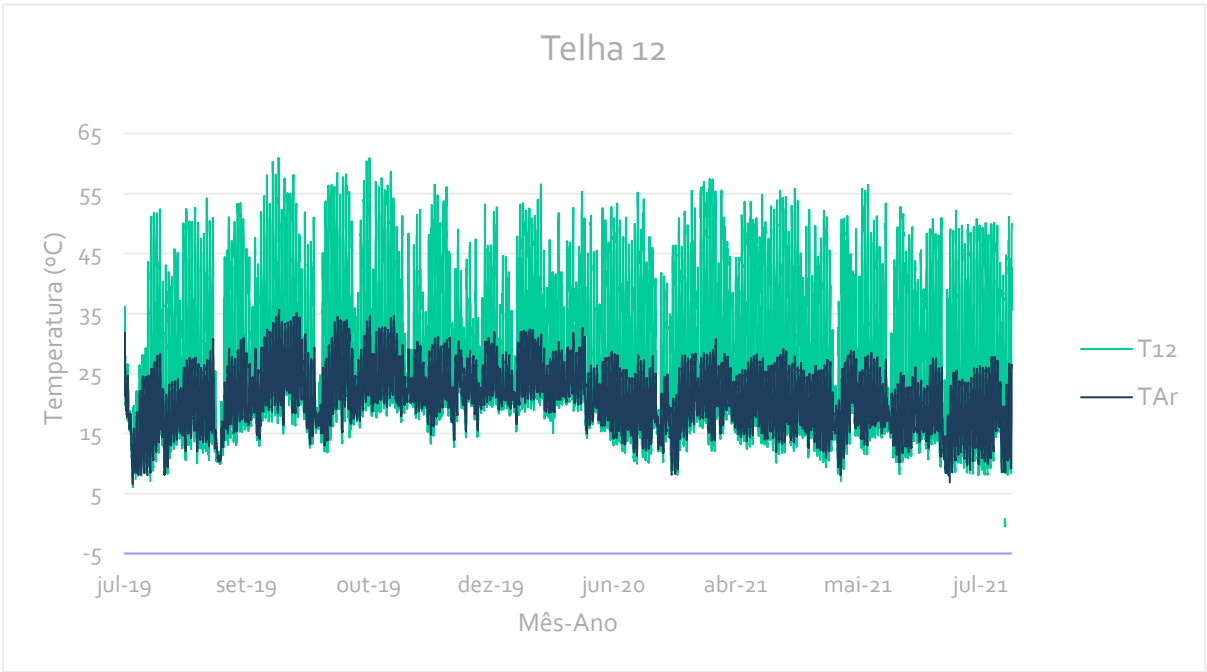

Telha 7
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (°C)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T7
TAr

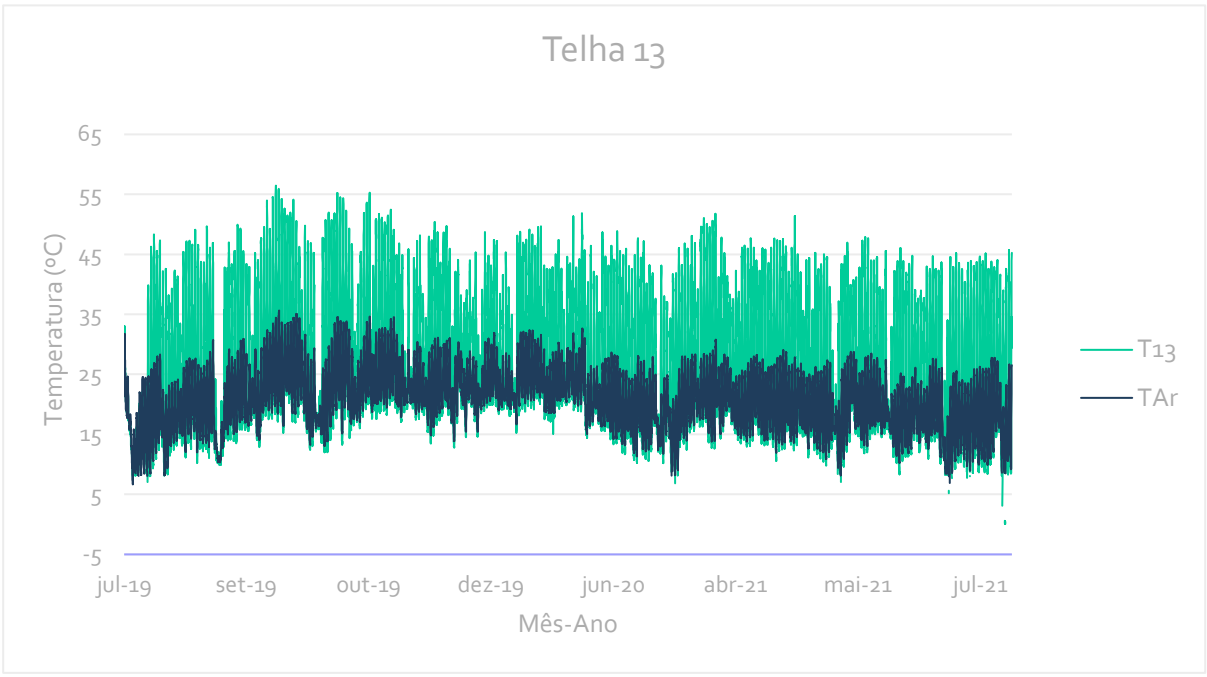

Telha 8
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (°C)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T8
TAr

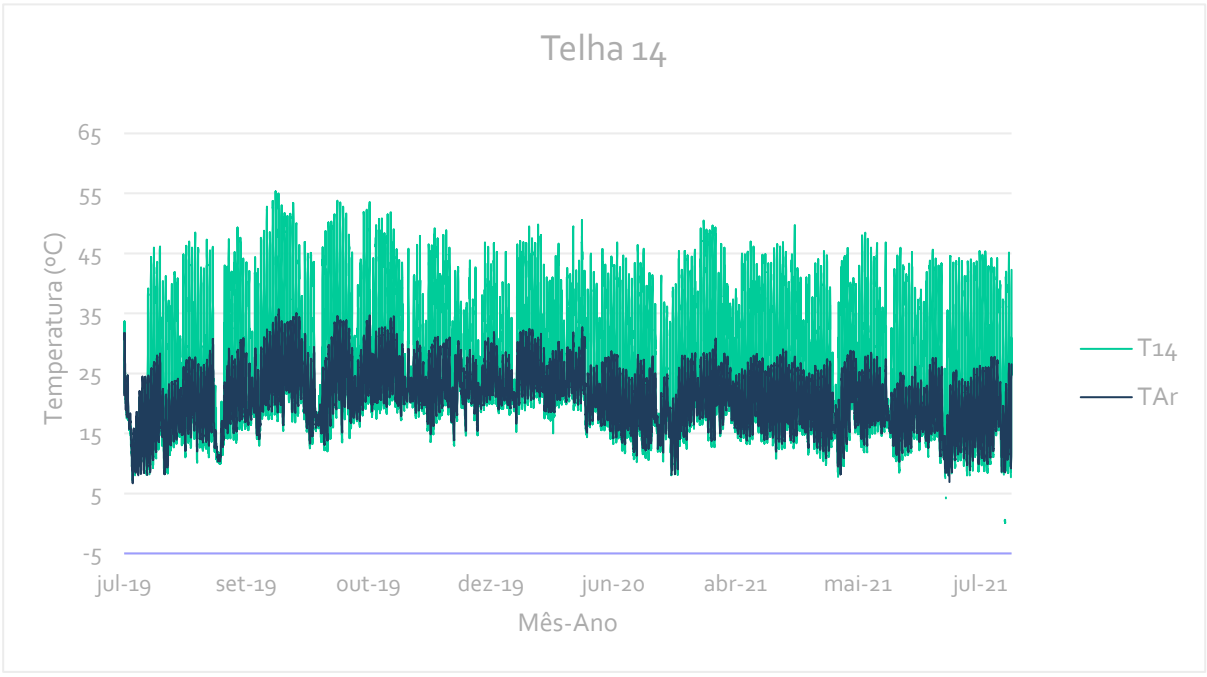

Telha 9
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T9
TAr

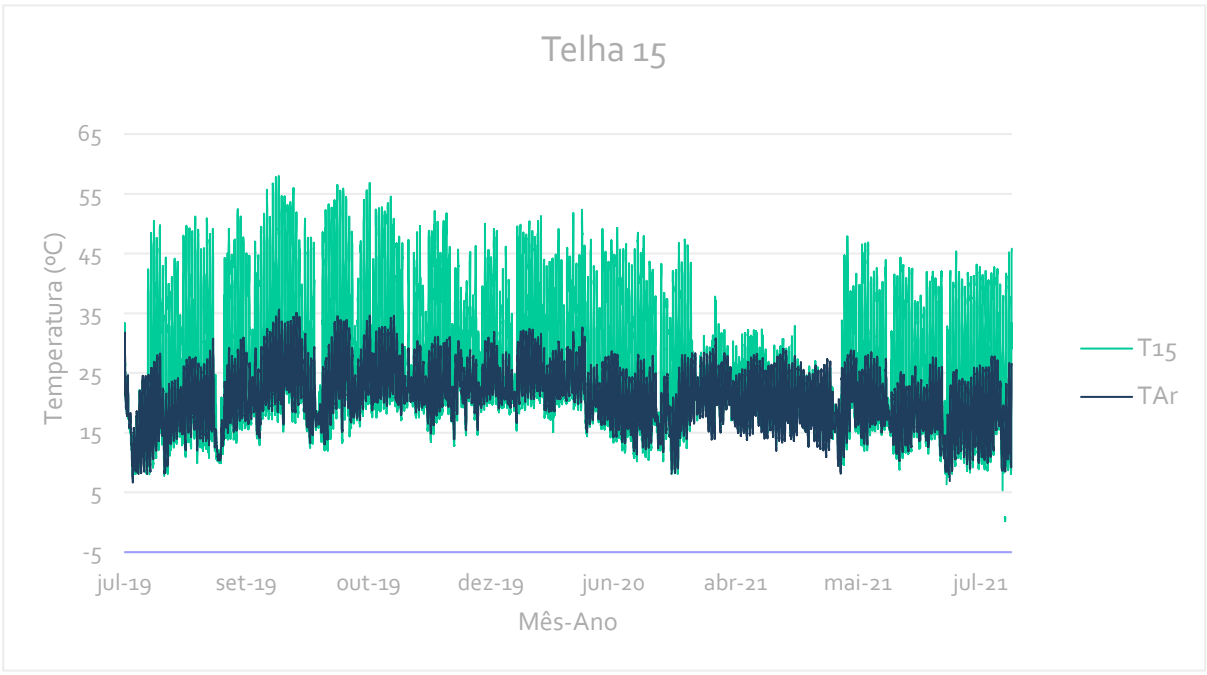

Telha 10
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T10
TAr

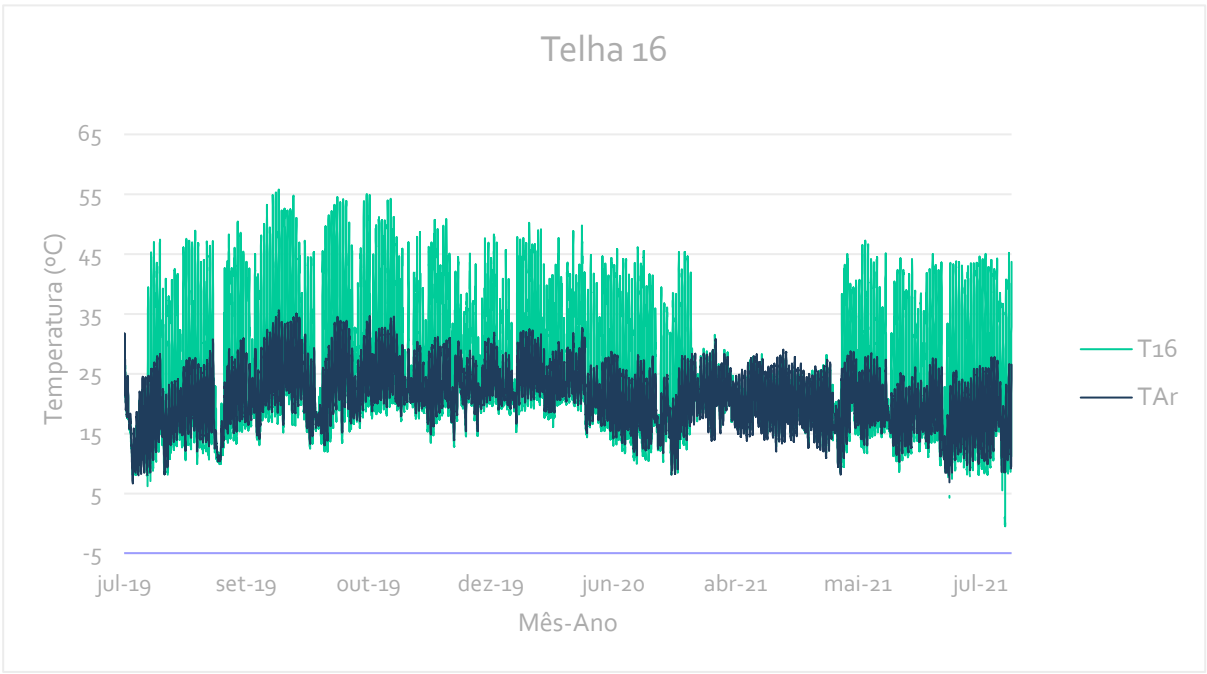

Telha 11
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T11
TAr

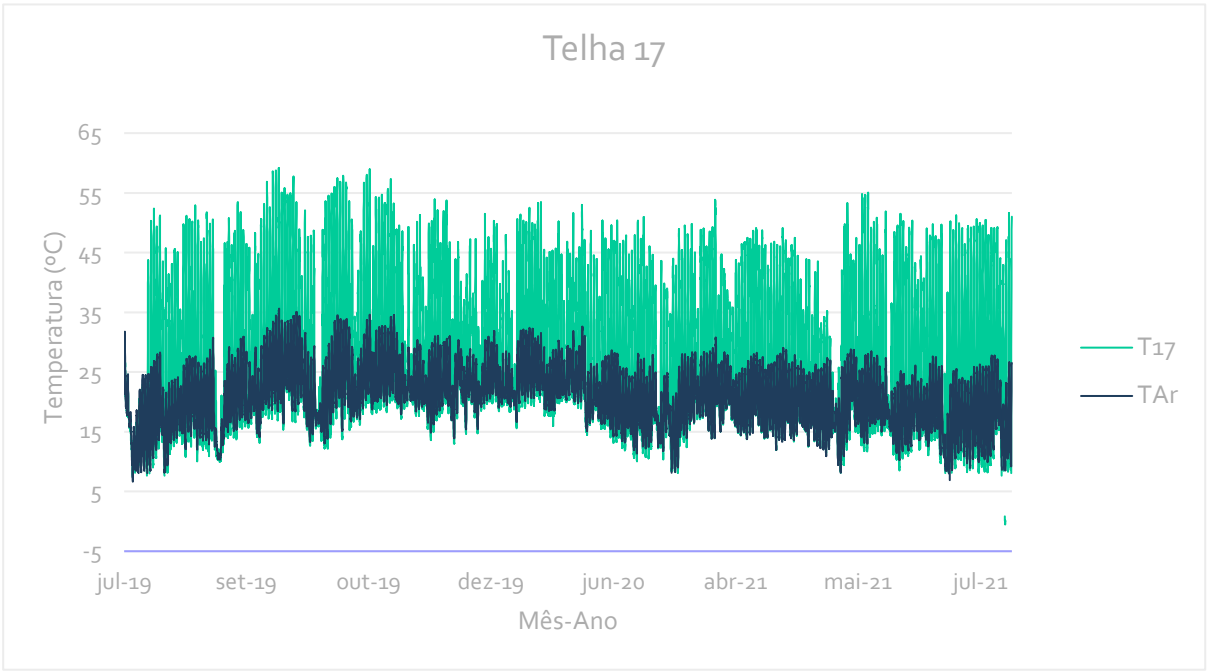

Telha 12
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T12
TAr

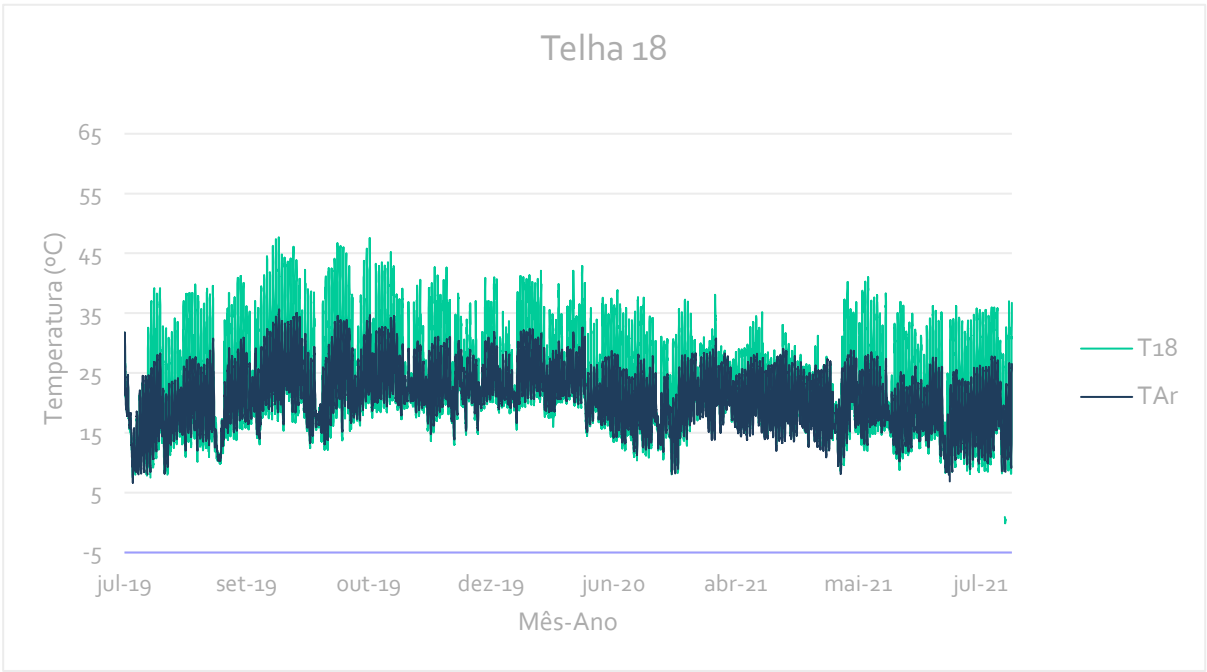

Telha 13
Temperatura (°C)
65
55
45
35
25
15
5
-5
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T13
TAr

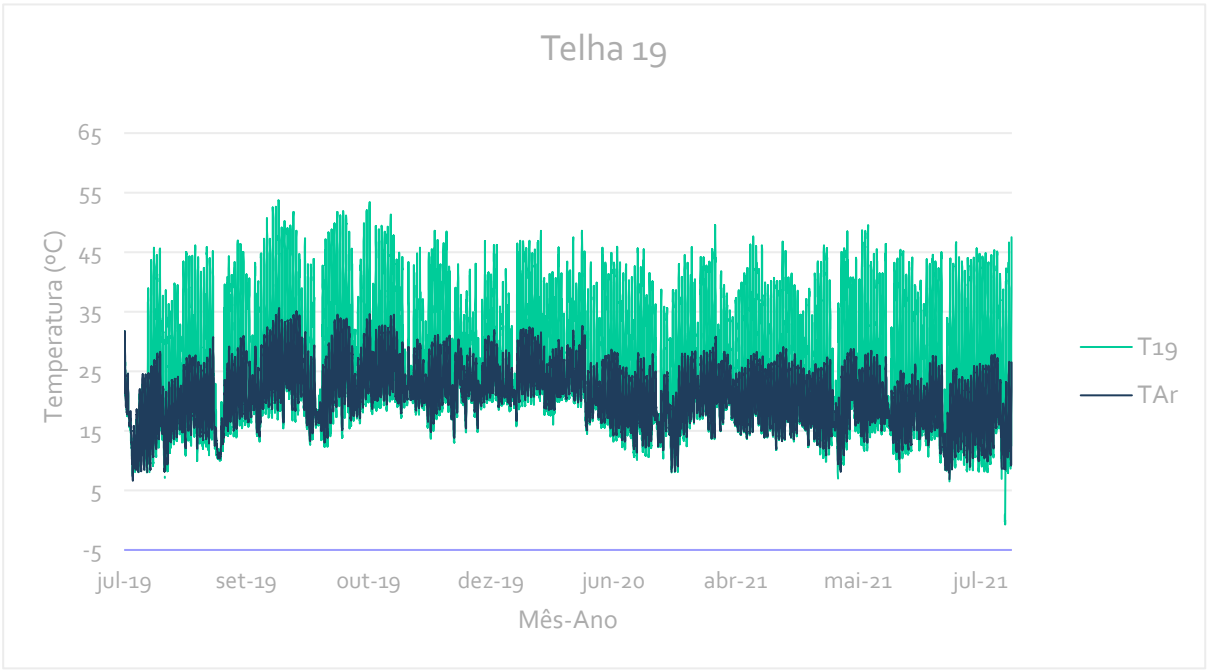

Telha 14
Temperatura (°C)
65
55
45
35
25
15
5
-5
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T14
TAr

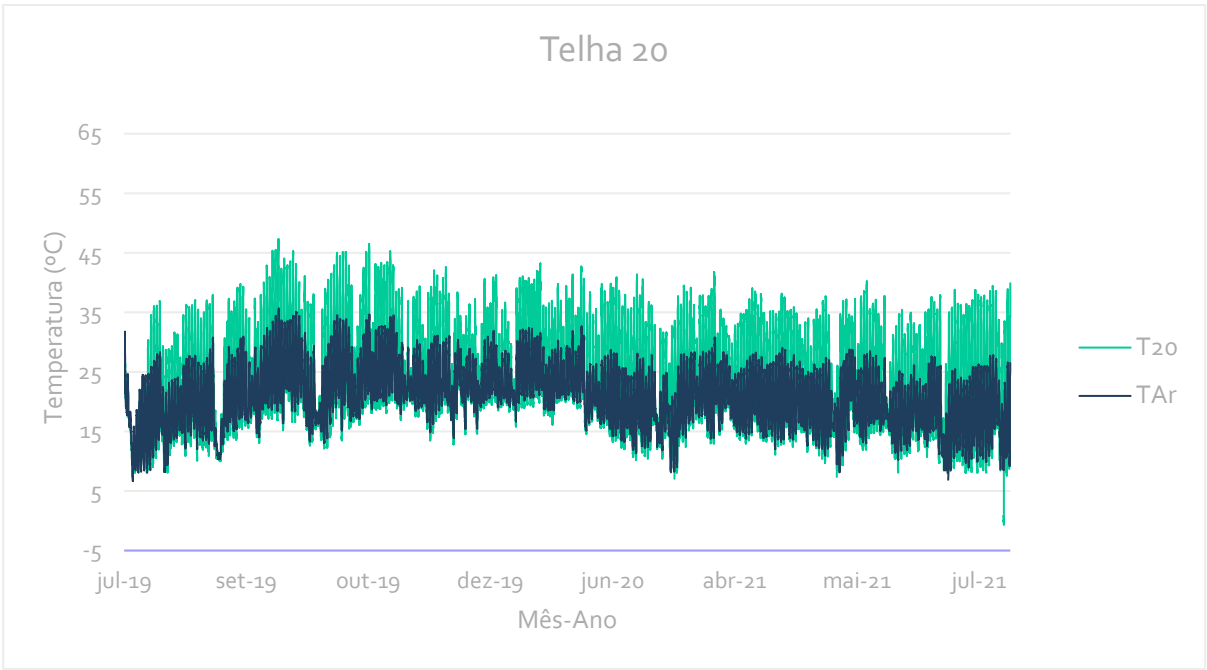

Telha 15
Temperatura (ºC)
65
55
45
35
25
15
5
-5
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T15
TAr

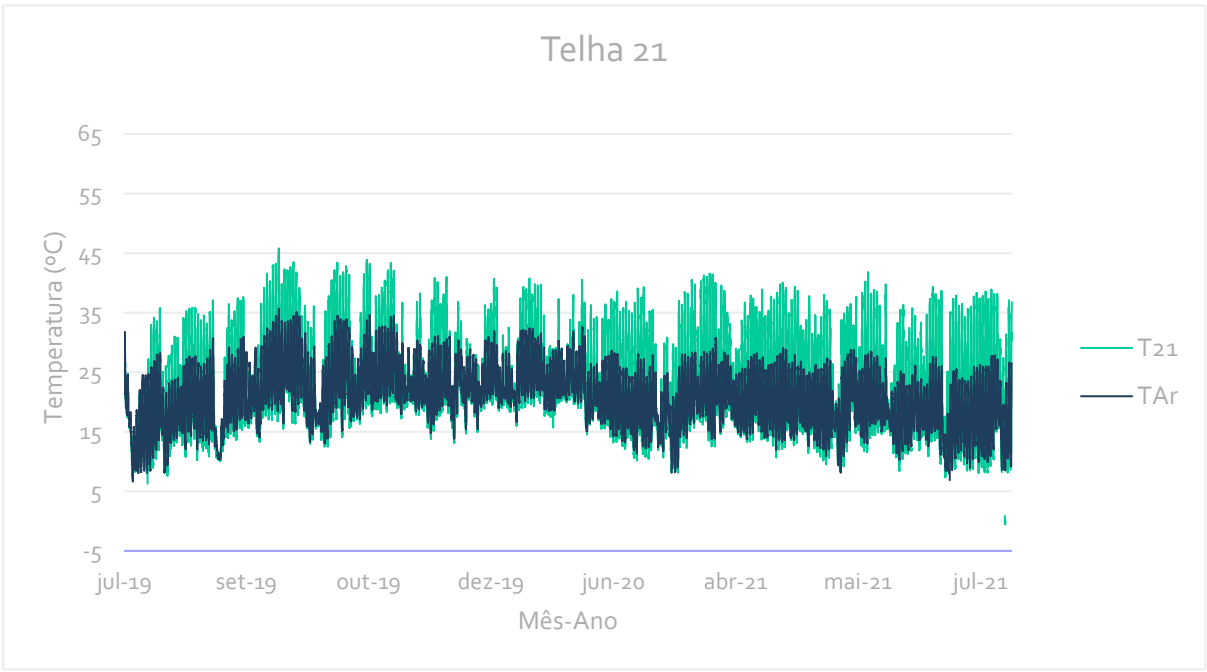

Telha 16
Temperatura (ºC)
65
55
45
35
25
15
5
-5
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T16
TAr

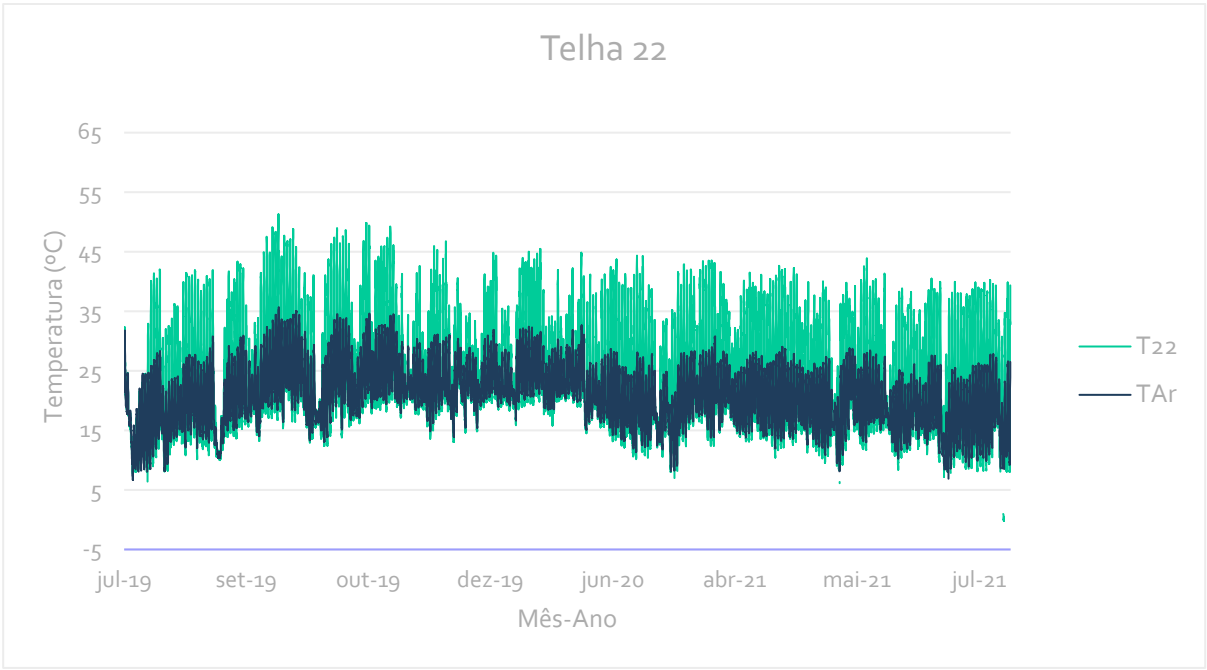

Telha 17
Temperatura (ºC)
65
55
45
35
25
15
5
-5
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T17
TAr

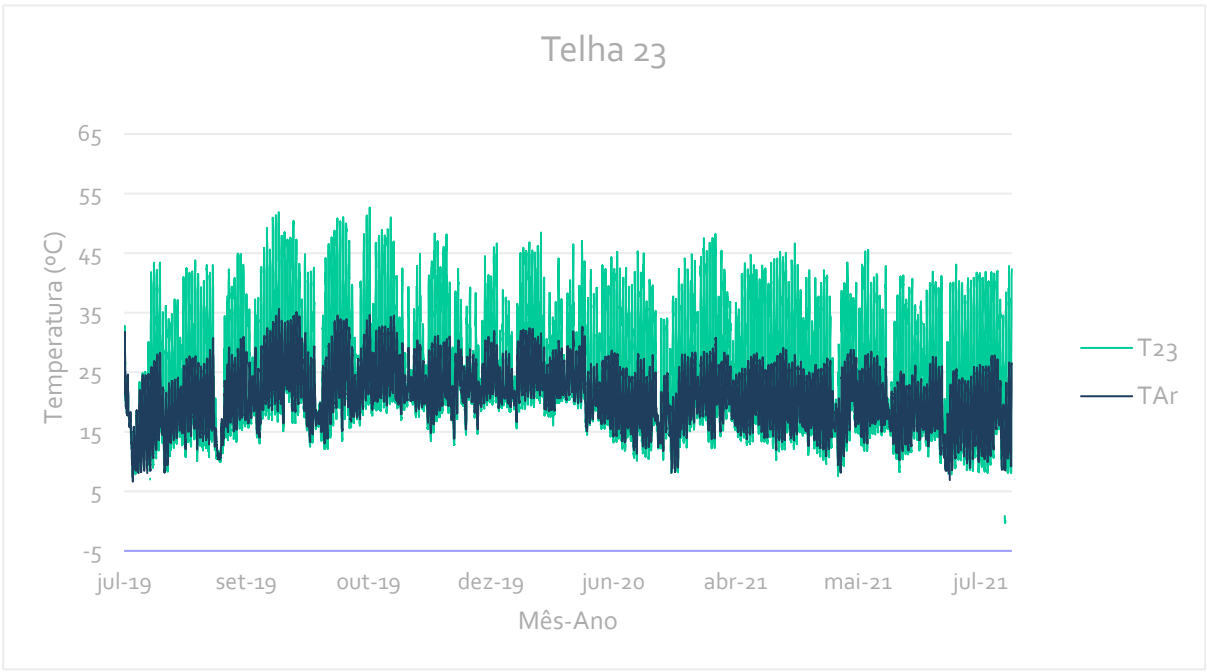

Telha 18
Temperatura (ºC)
65
55
45
35
25
15
5
-5
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T18
TAr

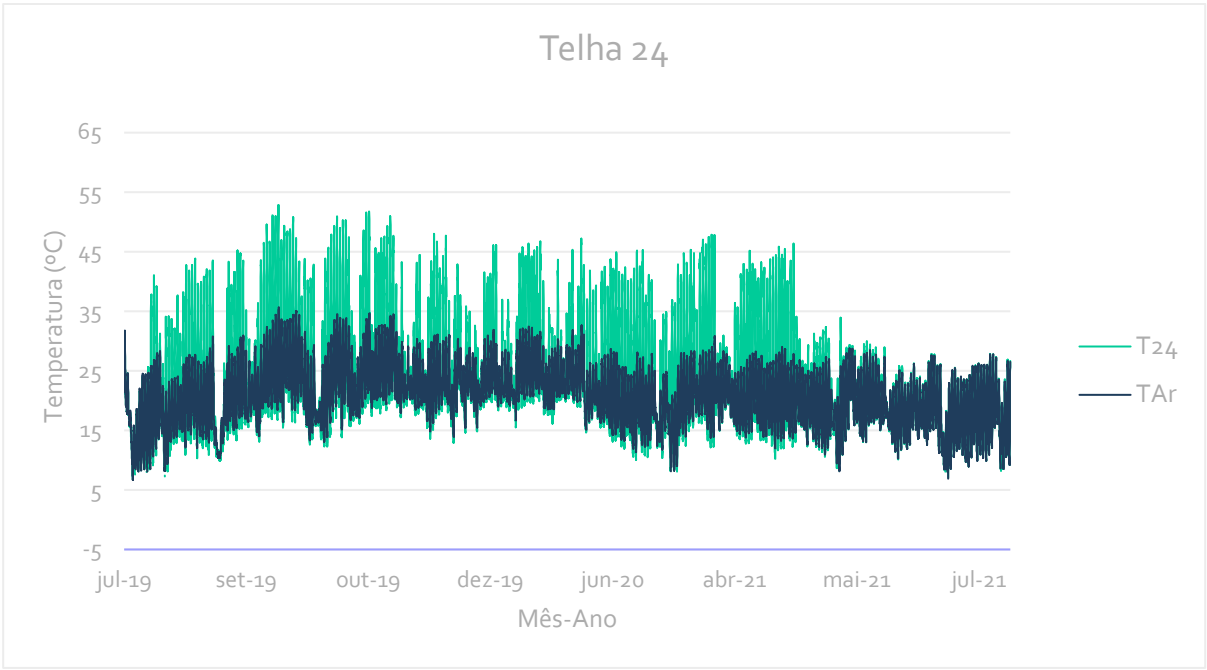

Telha 19
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T19
TAr

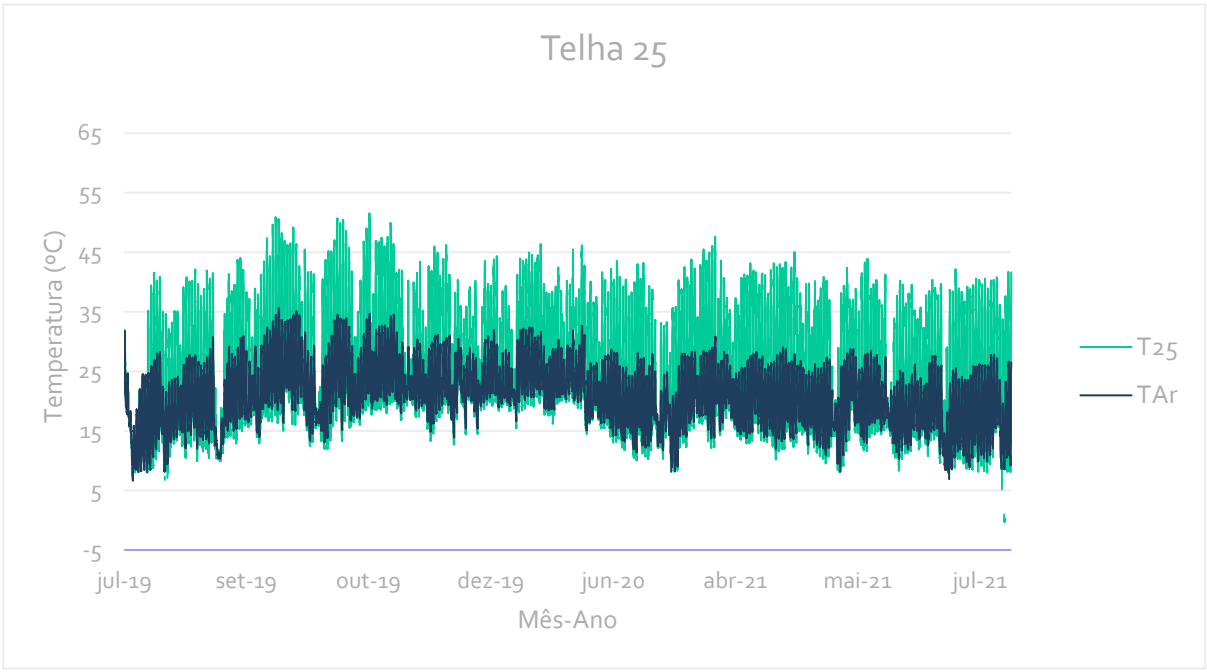

Telha 20
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T20
TAr

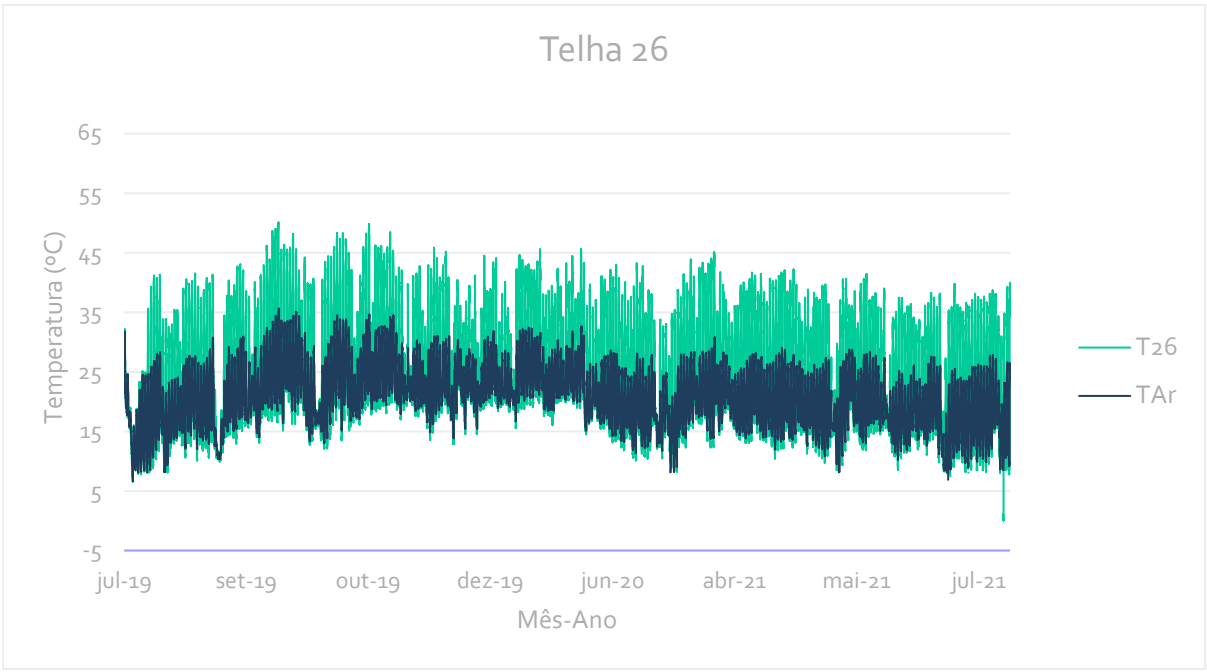

Telha 21
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T21
TAr

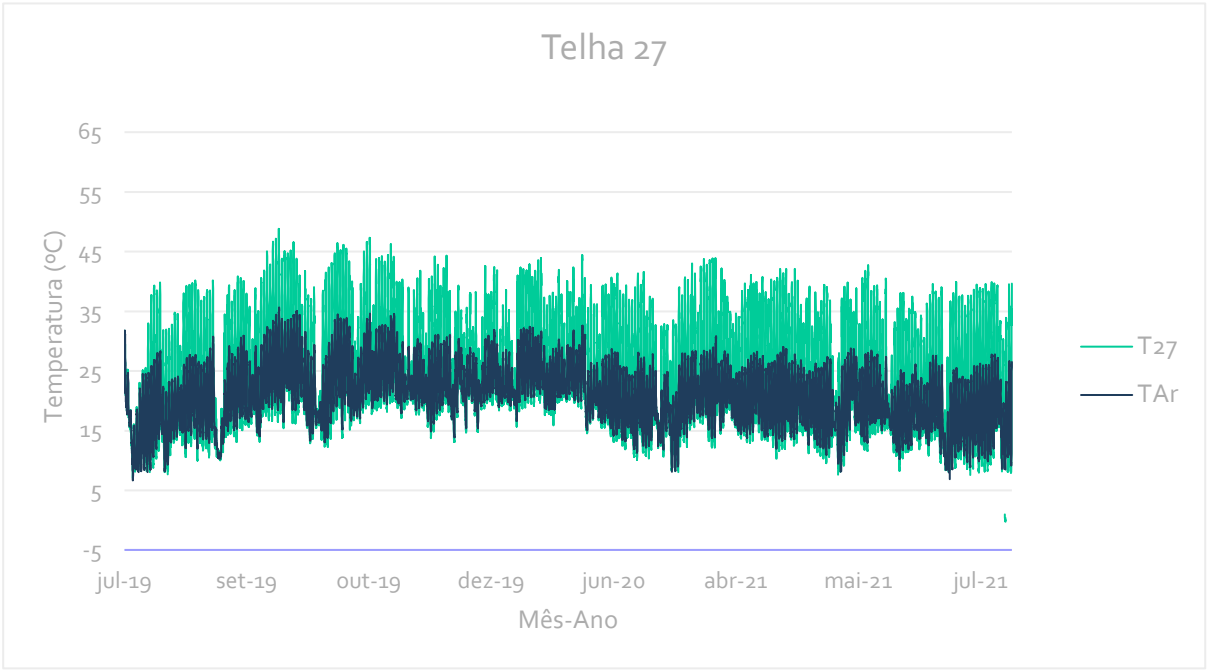

Telha 22
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T22
TAr

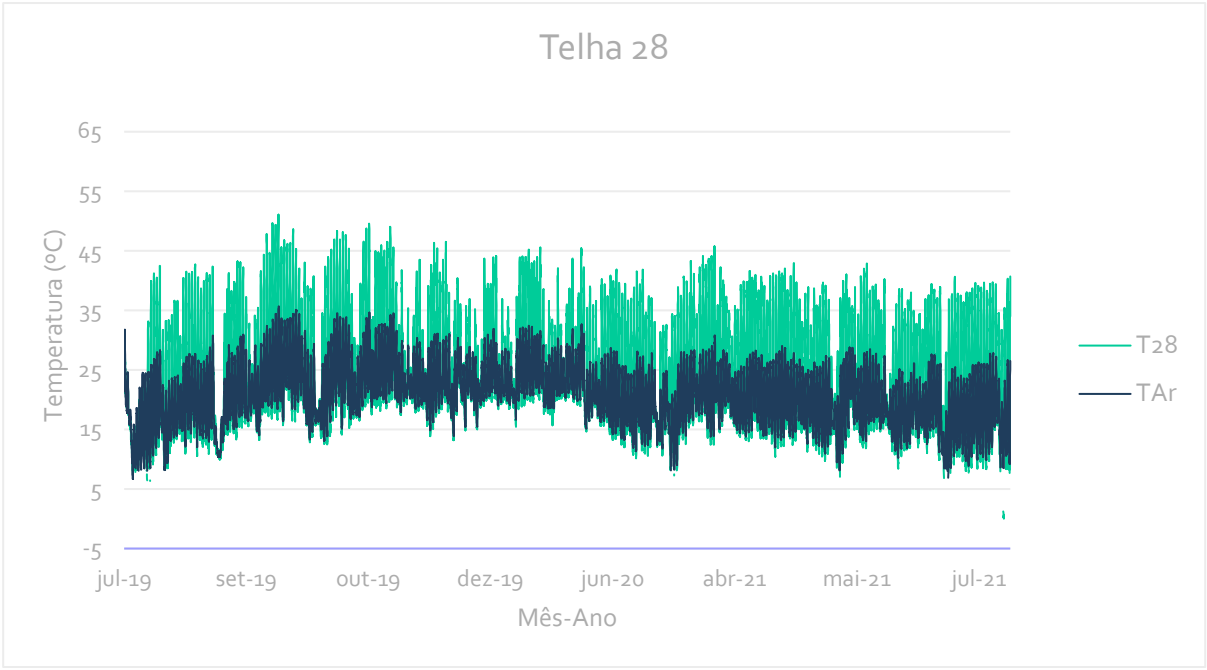

Telha 23
Temperatura (°C)
65
55
45
35
25
15
5
-5
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T23
TAr


Telha 24
Temperatura (°C)
65
55
45
35
25
15
5
-5
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T24
TAr


Telha 25
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T25
TAr

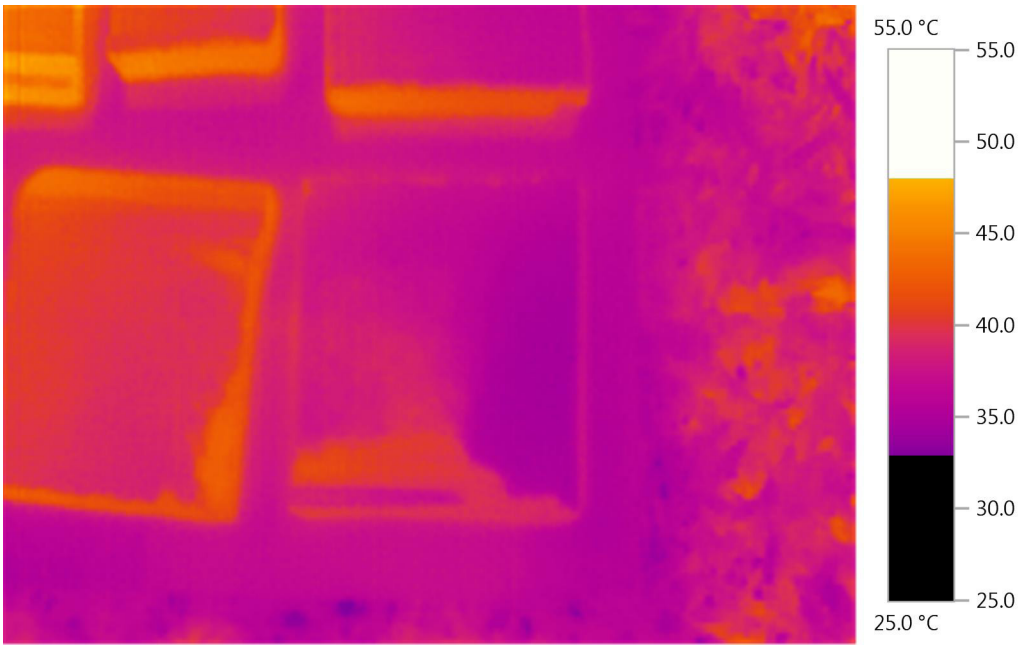

Telha 26
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T26
TAr


Telha 27
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T27
TAr

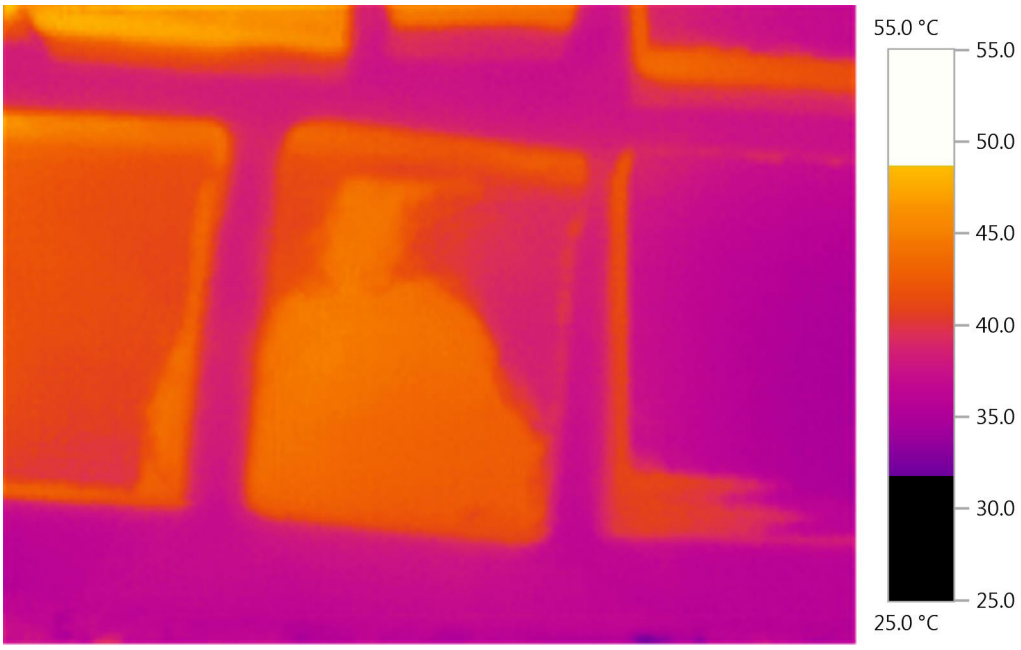

Telha 28
65
55
45
35
25
15
5
-5
Temperatura (ºC)
jul-19
set-19
out-19
dez-19
jun-20
abr-21
mai-21
jul-21
Mês-Ano
T28
TAr

APÊNDICE D

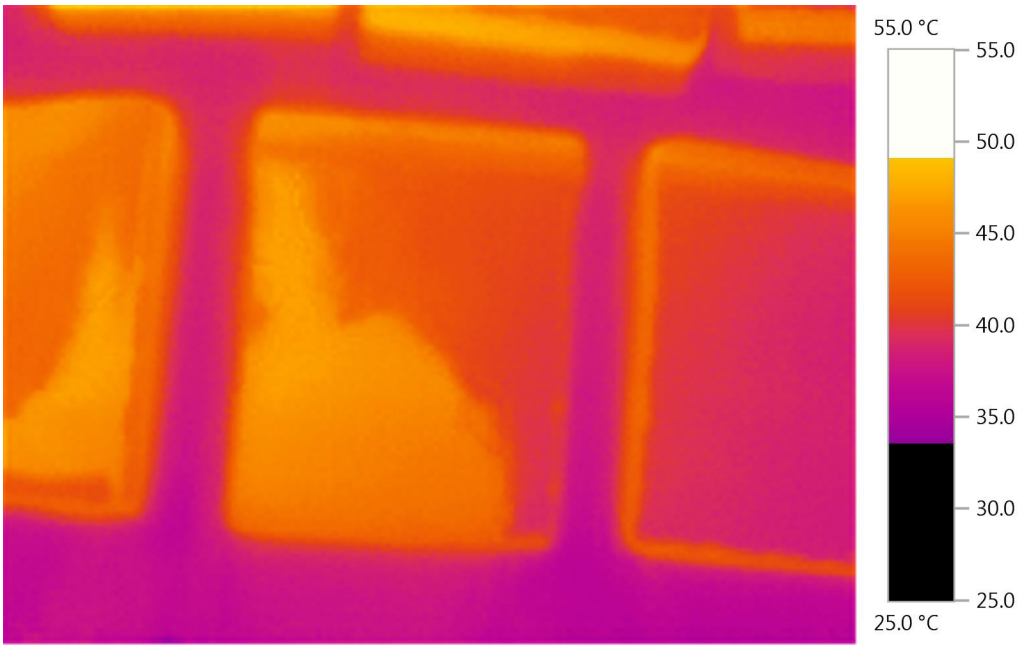
Imagens termográficas de temperatura superficial de todas as amostras ao final do período de exposição (24 meses)



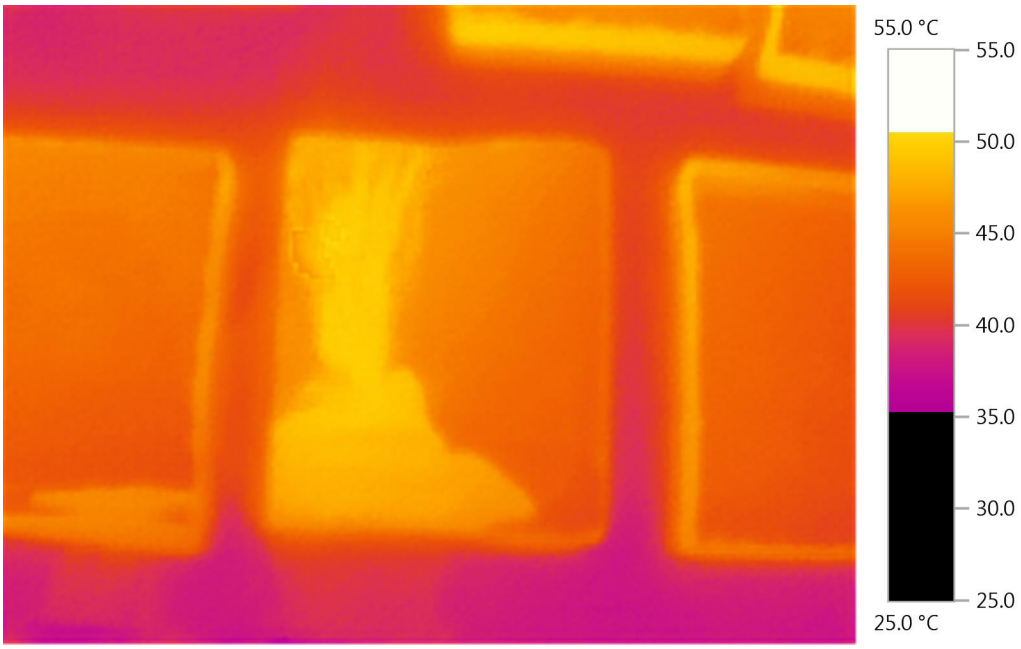
Telha 1 - 0 meses



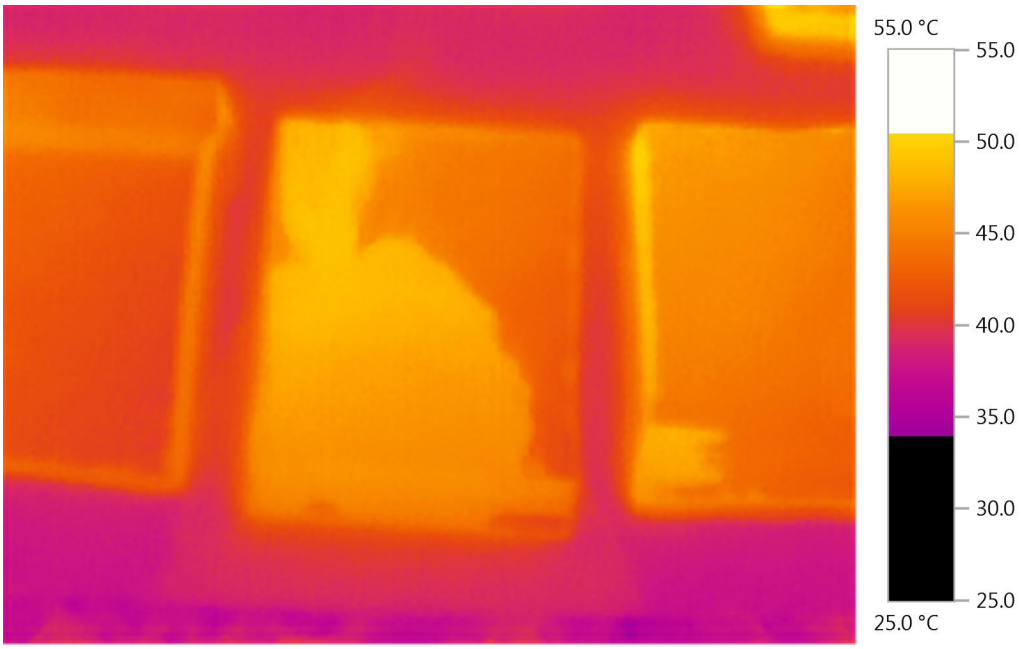
Telha 2 - 0 meses



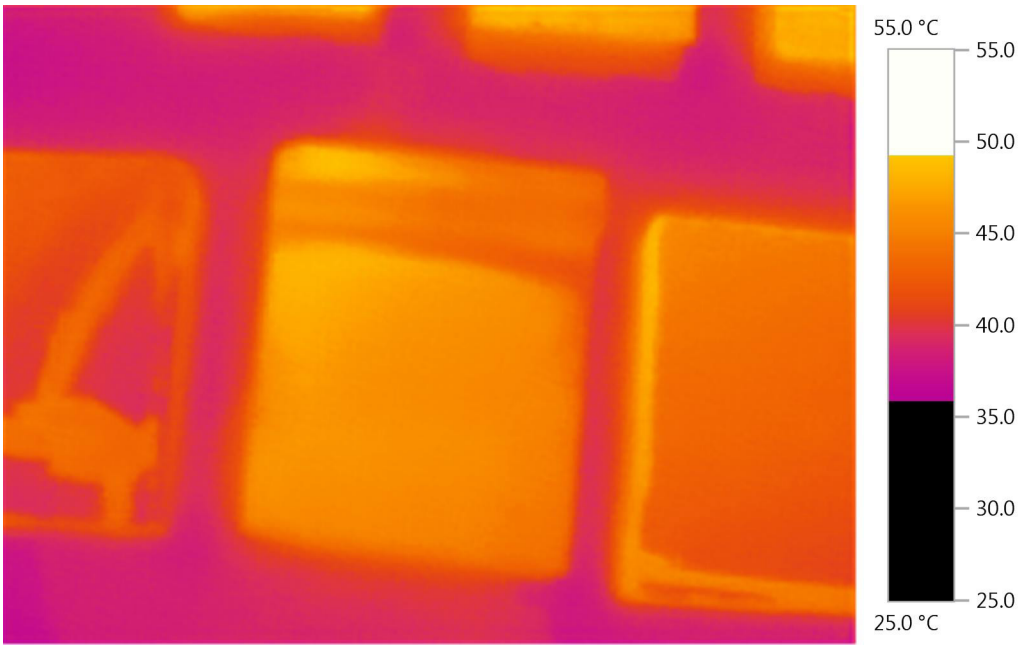
Telha 3 - 0 meses



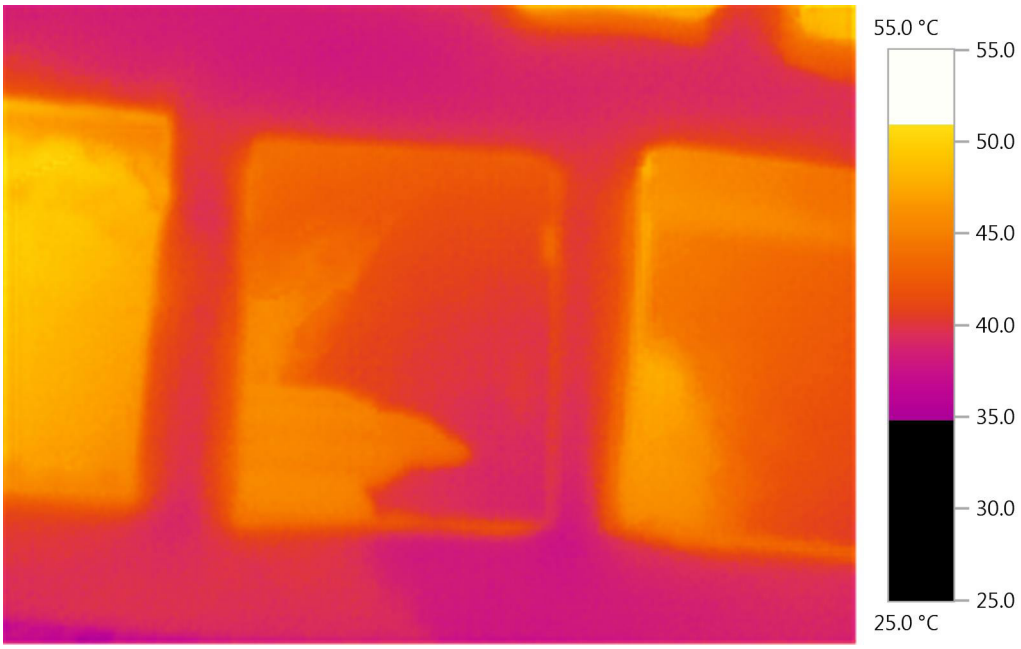
Telha 4 - 0 meses



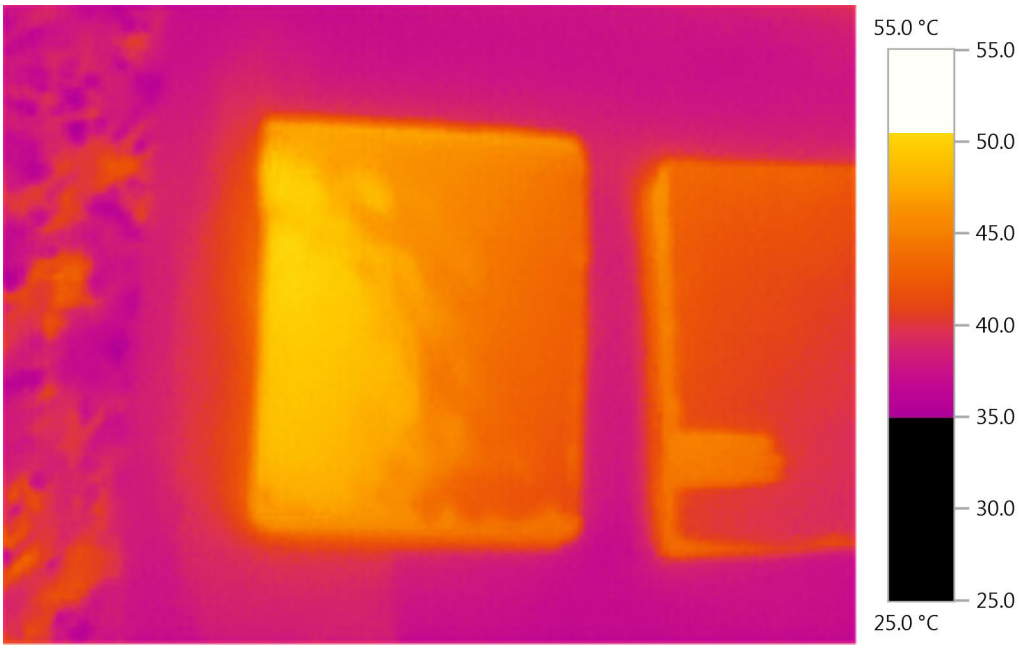
Telha 5 - 0 meses



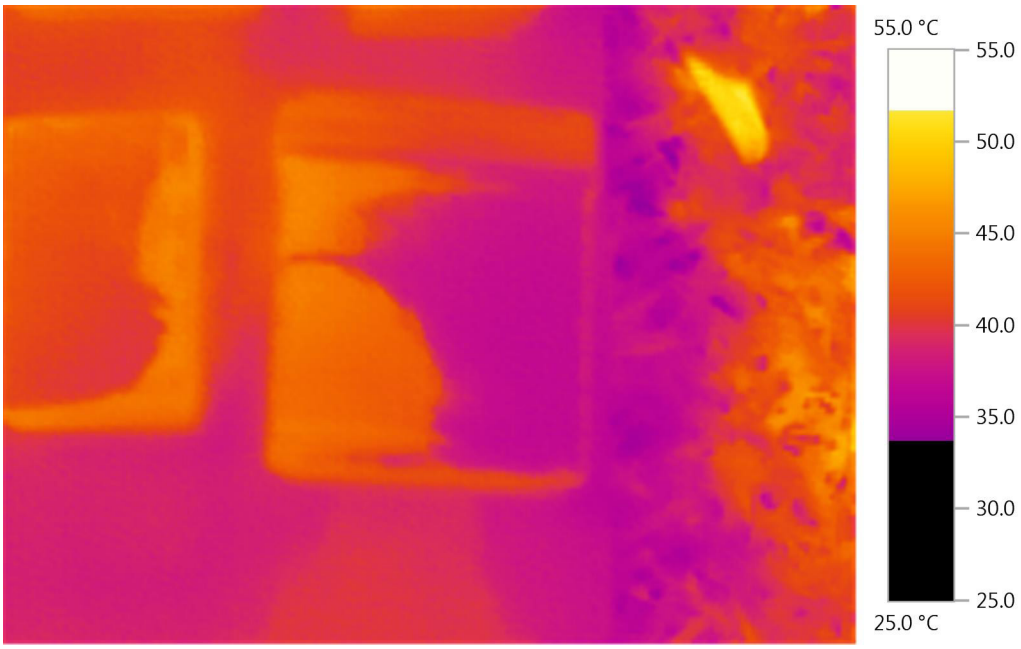
Telha 6 - 0 meses



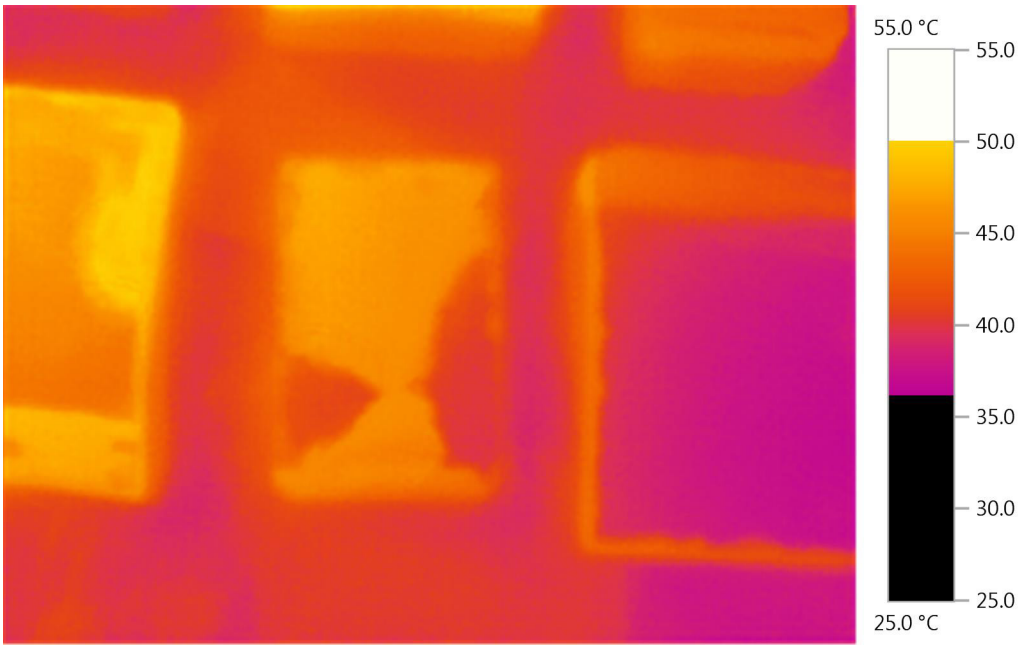
Telha 7 - 0 meses



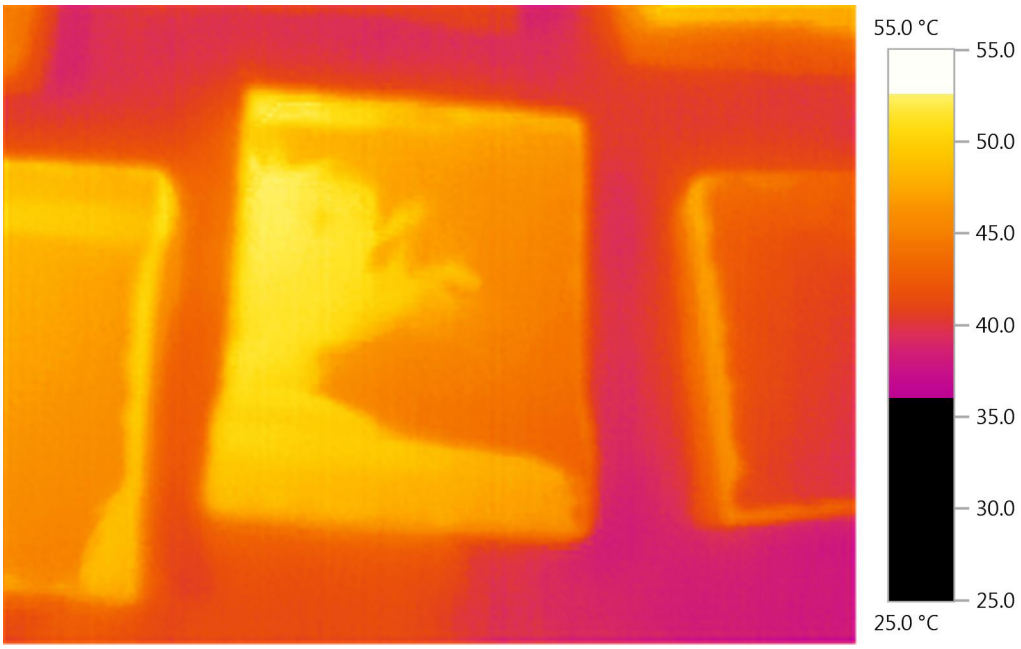
Telha 8 - 0 meses



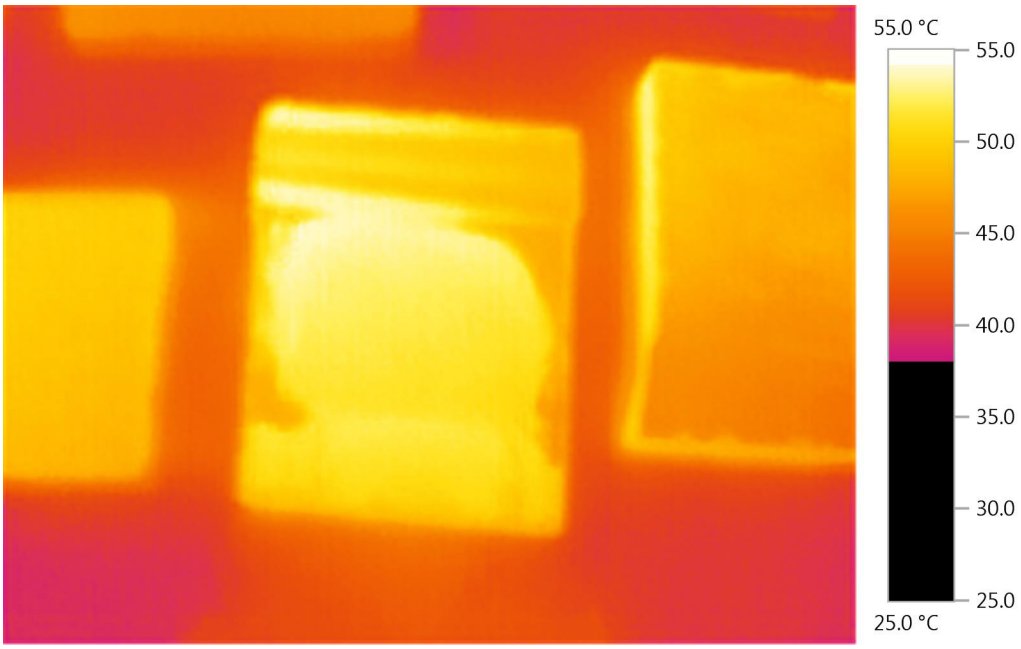
Telha 9 - 0 meses



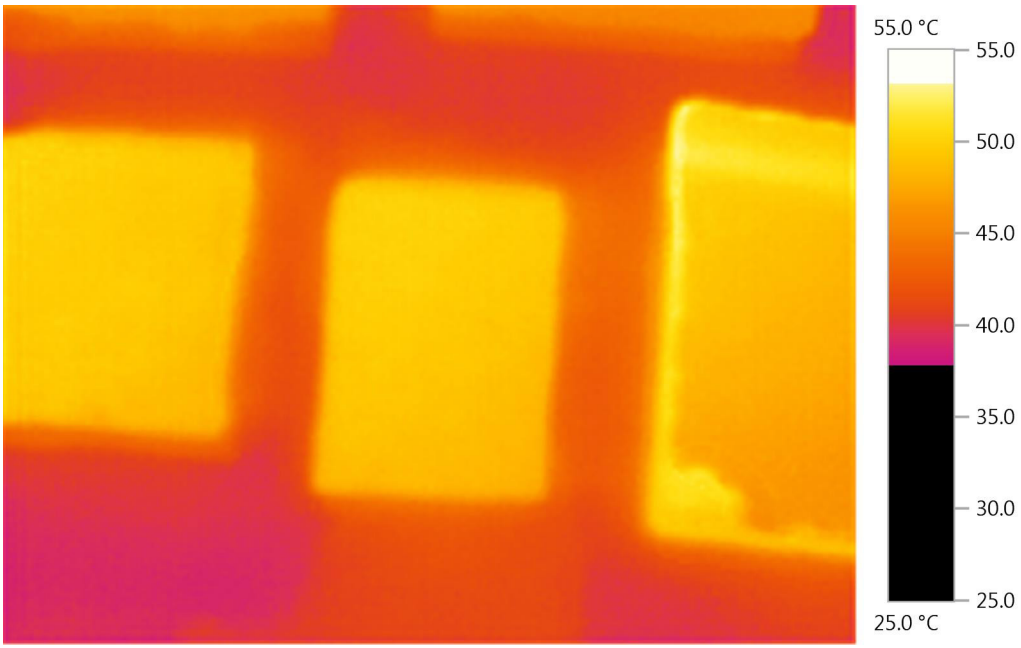
Telha 10 - 0 meses



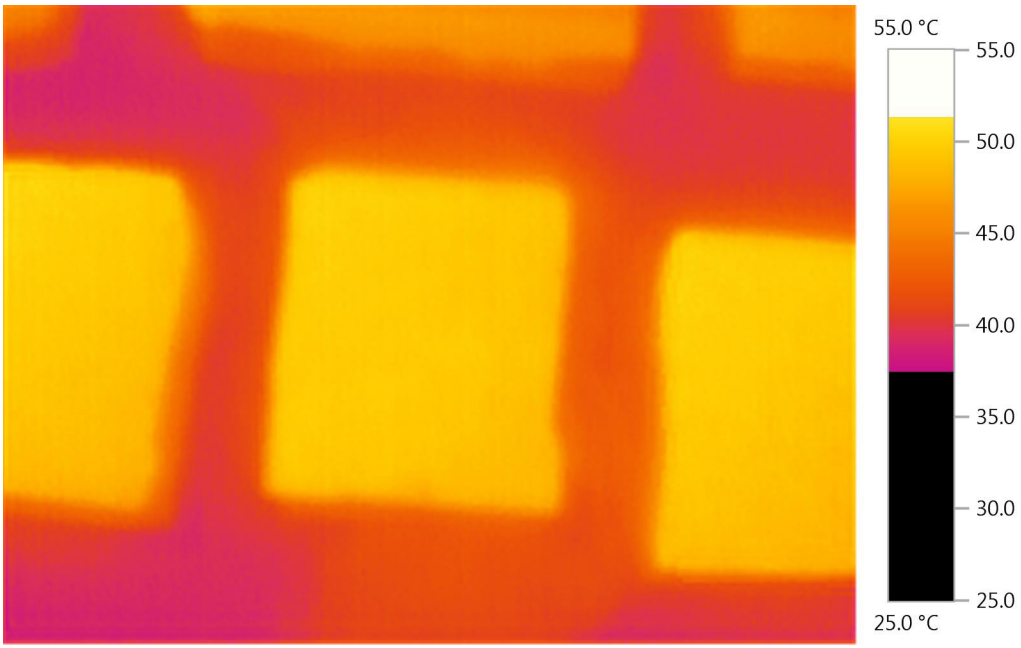
Telha 11 - 0 meses



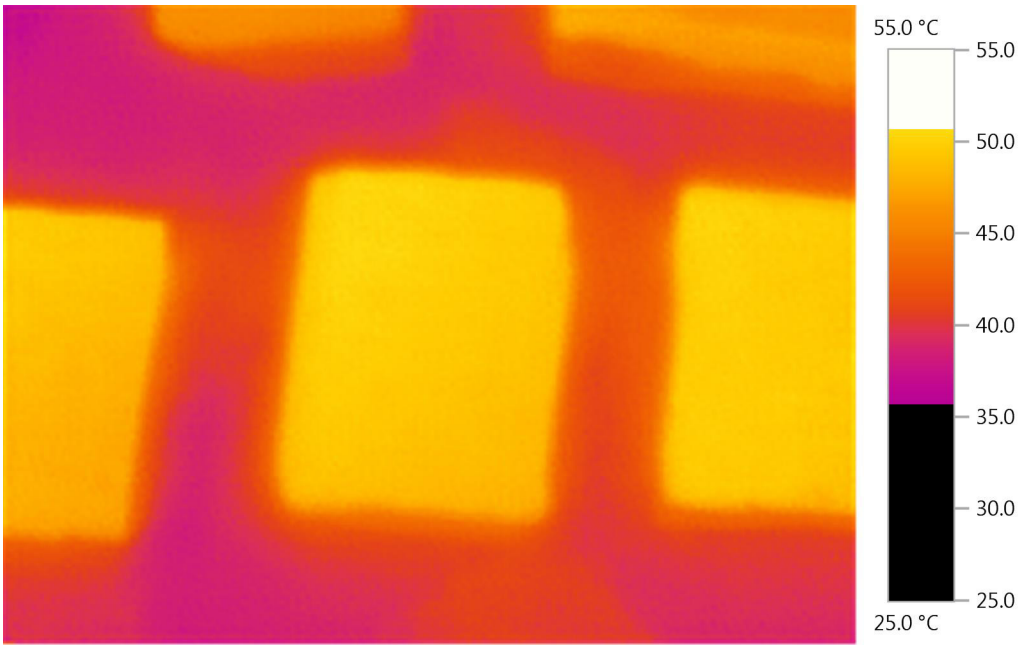
Telha 12 - 0 meses



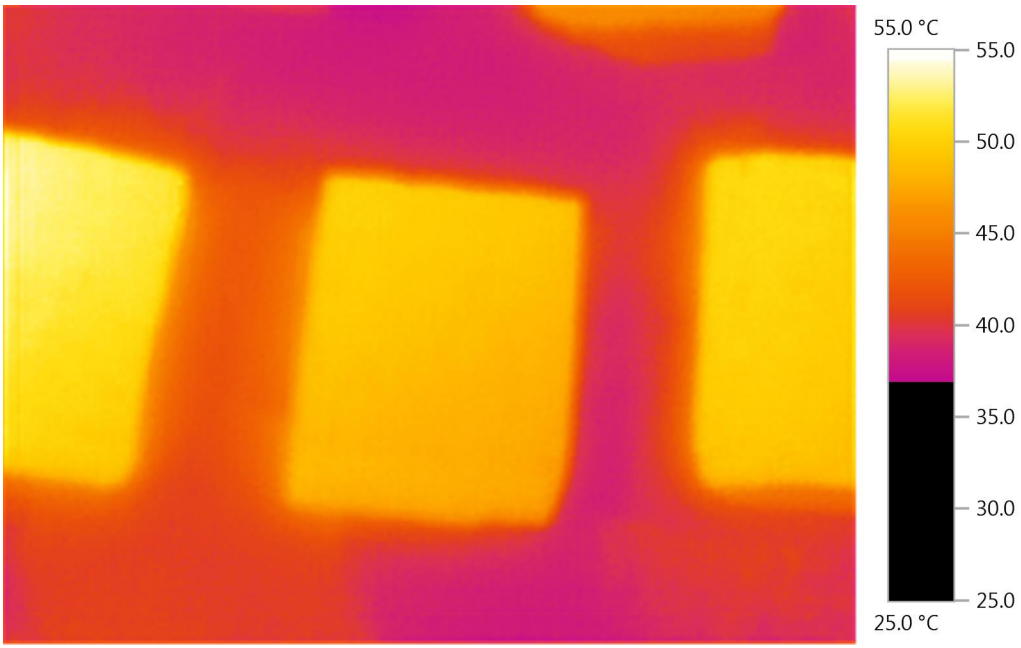
Telha 13 - 0 meses



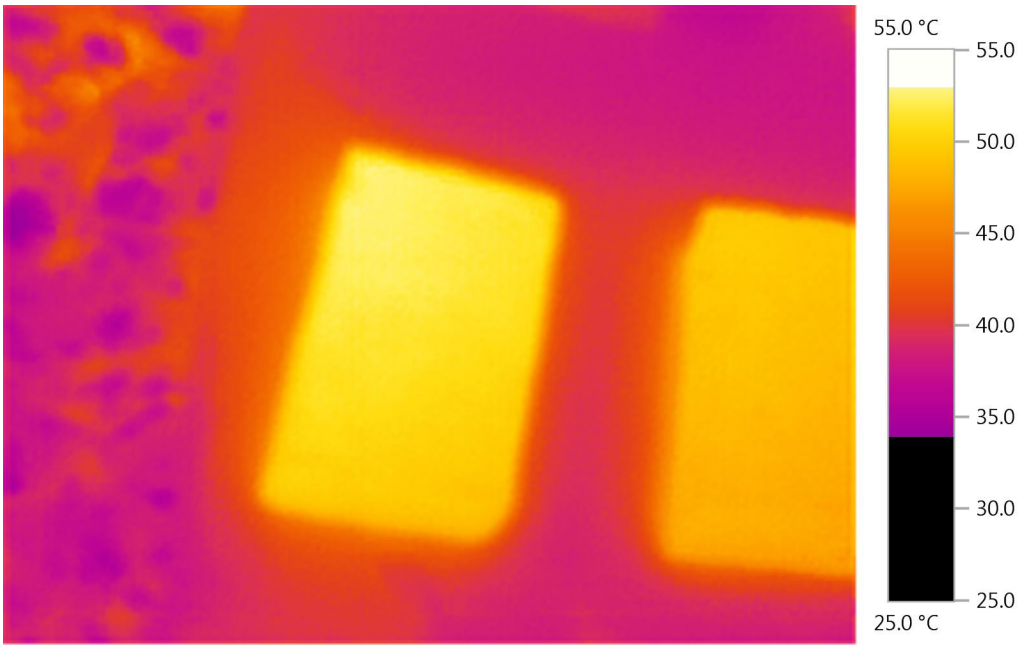
Telha 14 - 0 meses



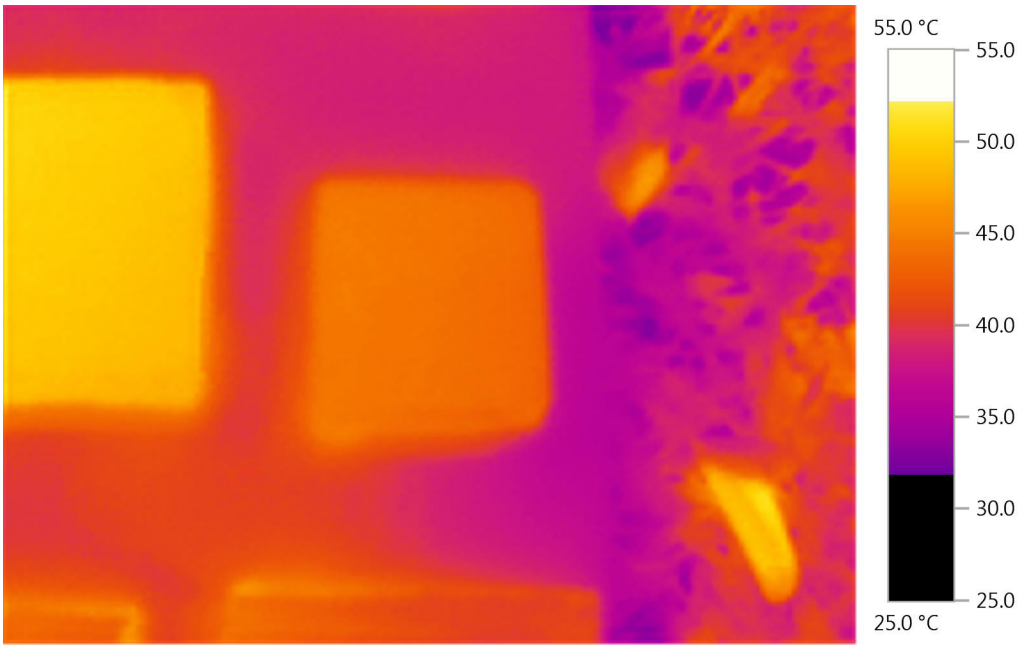
Telha 15 - 0 meses



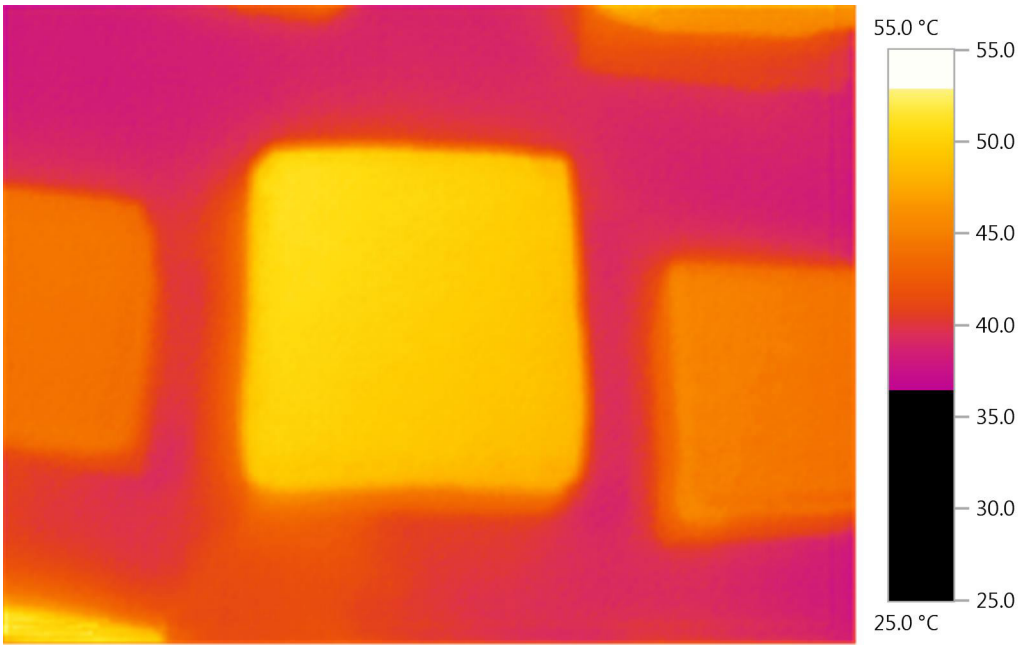
Telha 16 - 0 meses



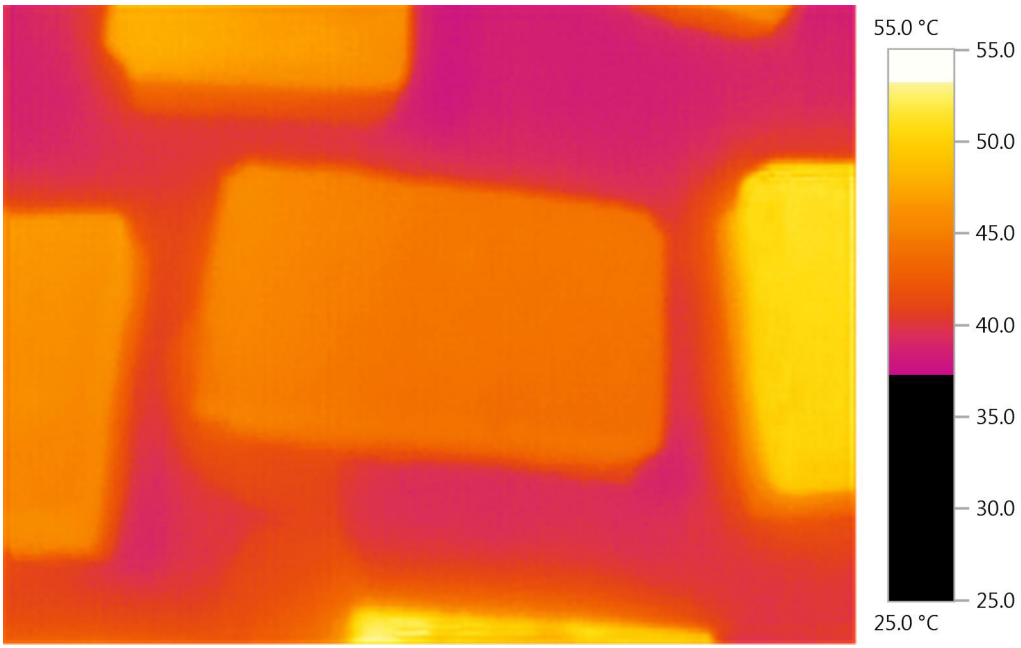
Telha 17 - 0 meses



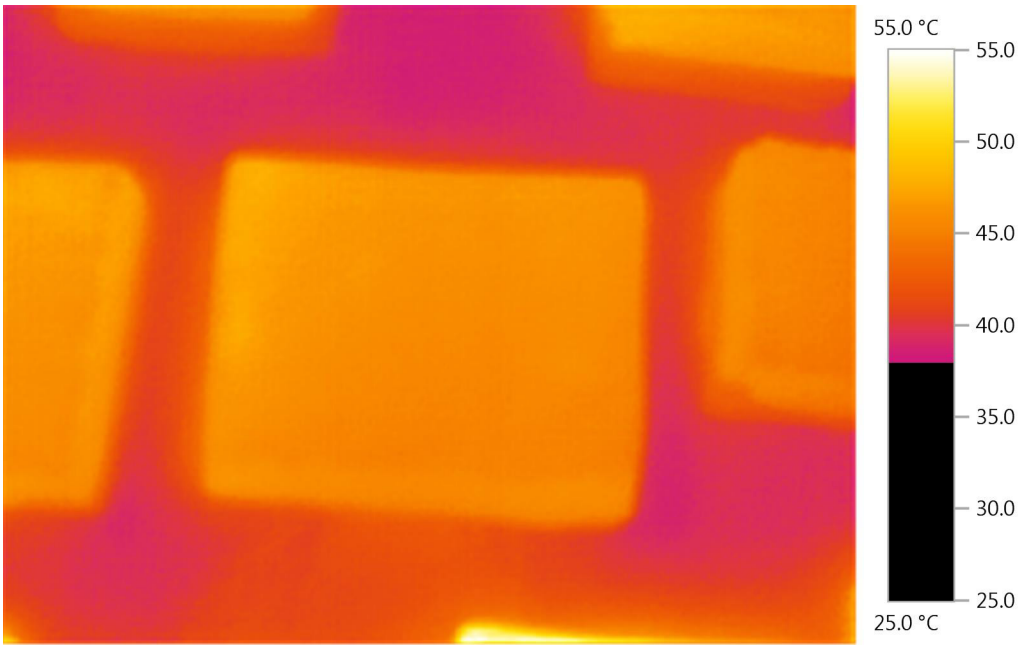
Telha 18 - 0 meses



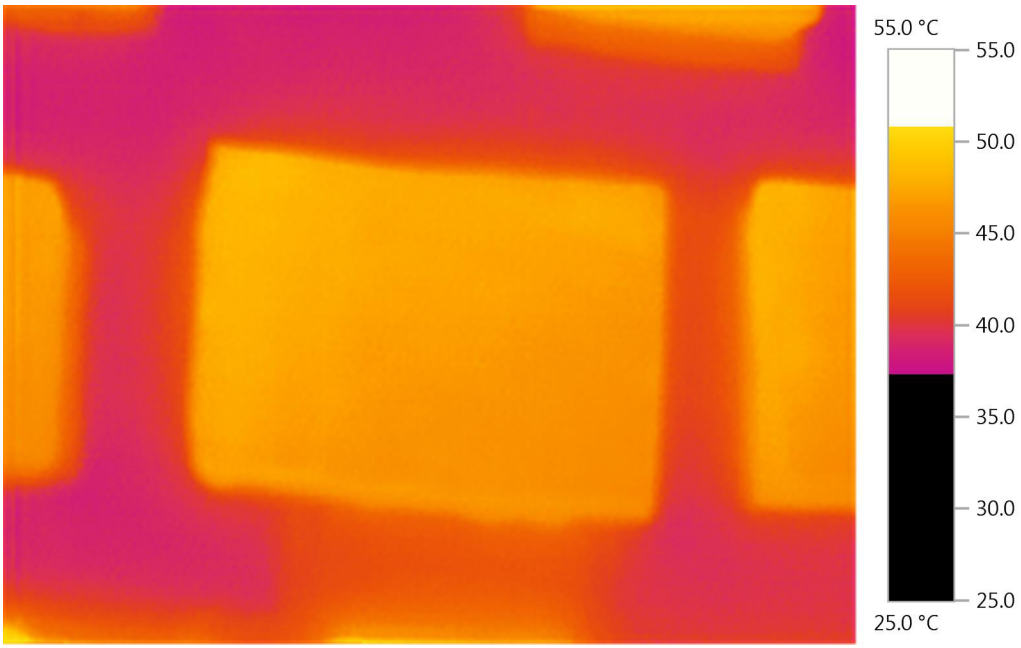
Telha 19 - 0 meses



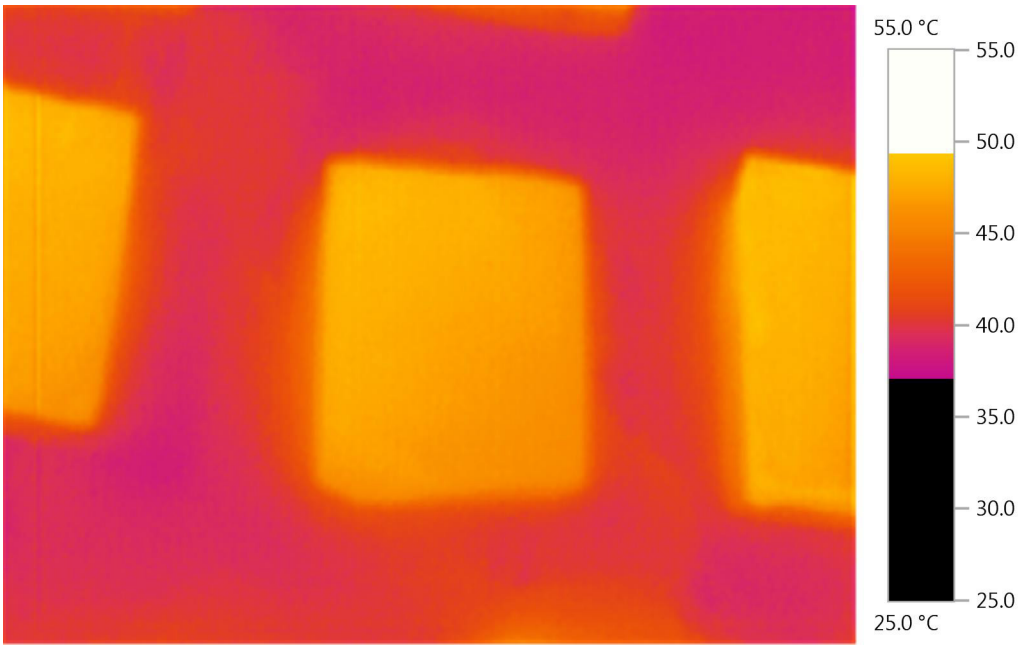
Telha 20 - 0 meses



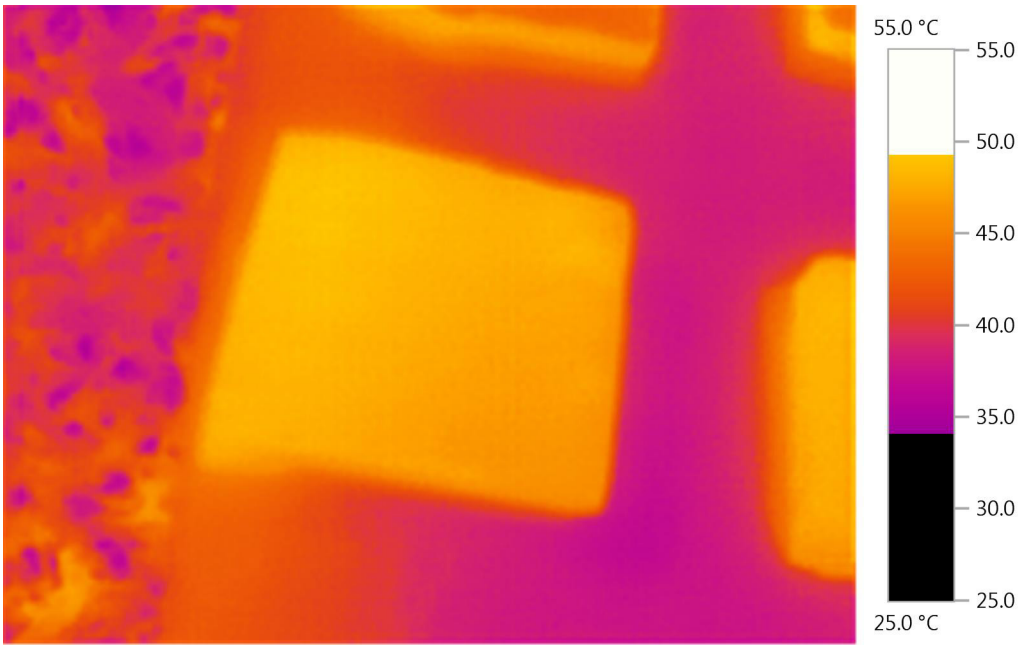
Telha 21 - 0 meses



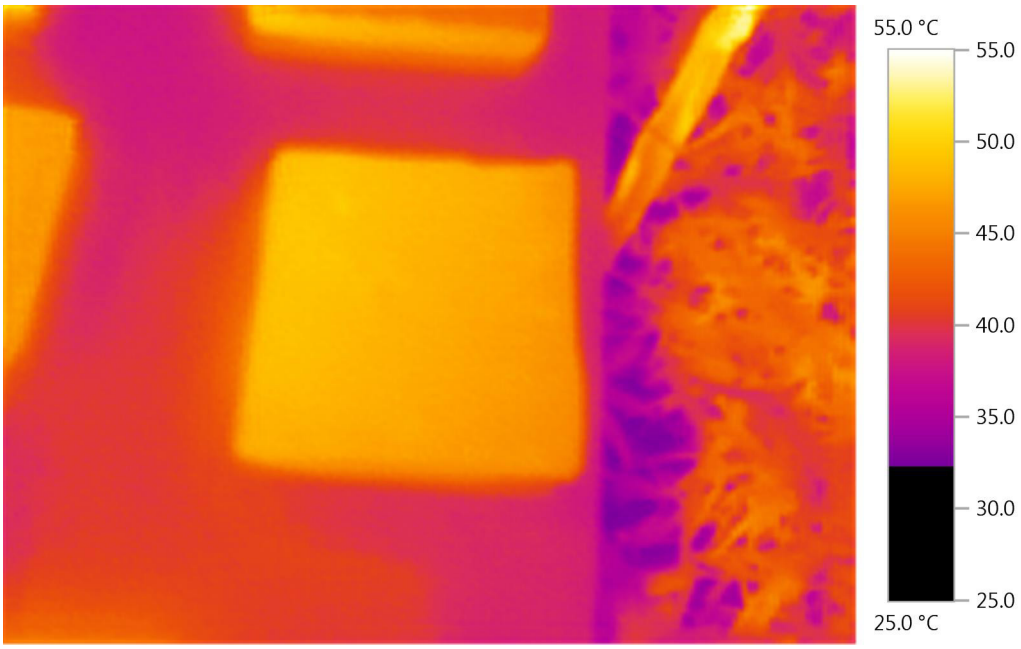
Telha 22 - 0 meses



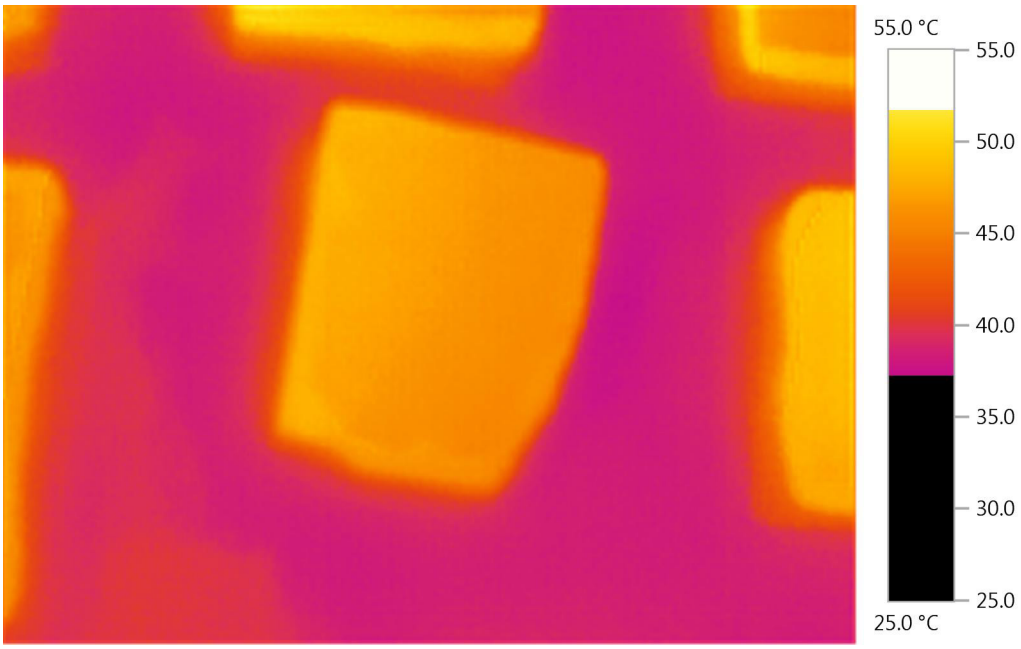
Telha 23 - 0 meses



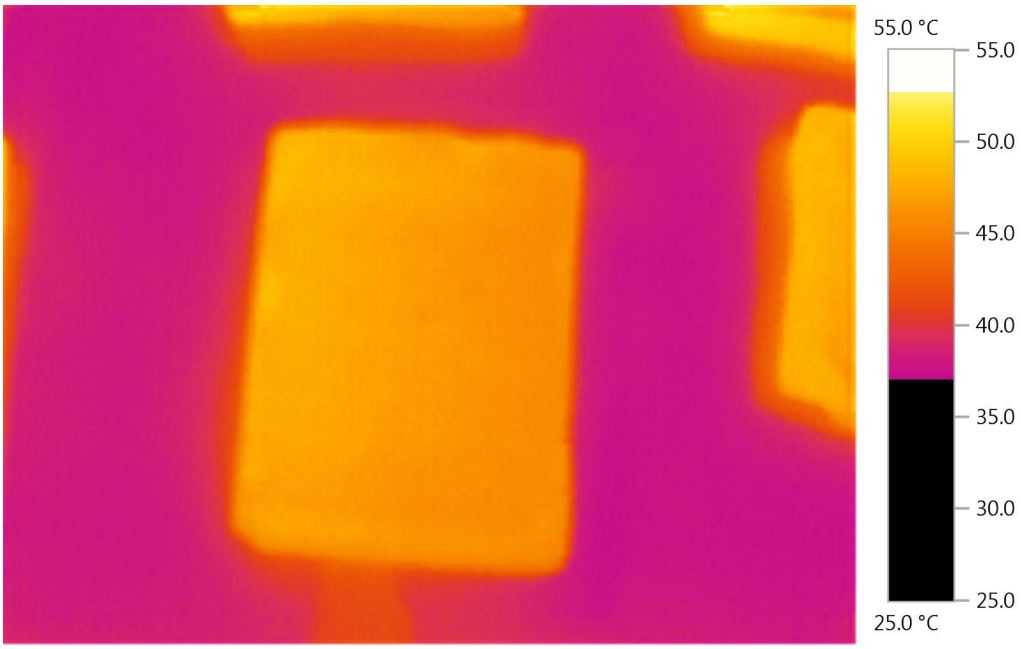
Telha 24 - 0 meses



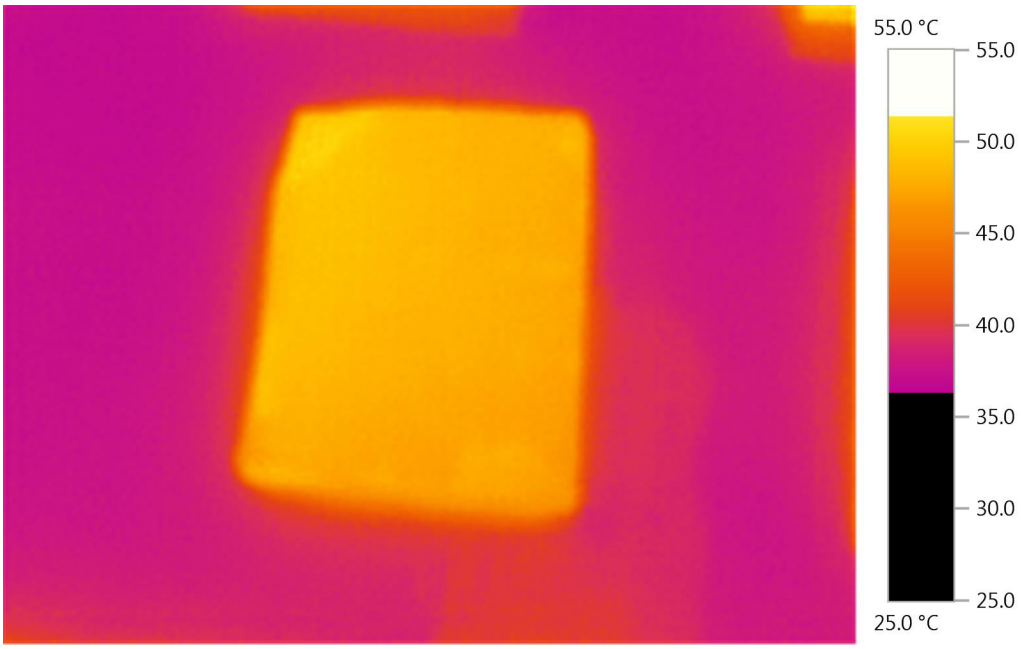
Telha 25 - 0 meses



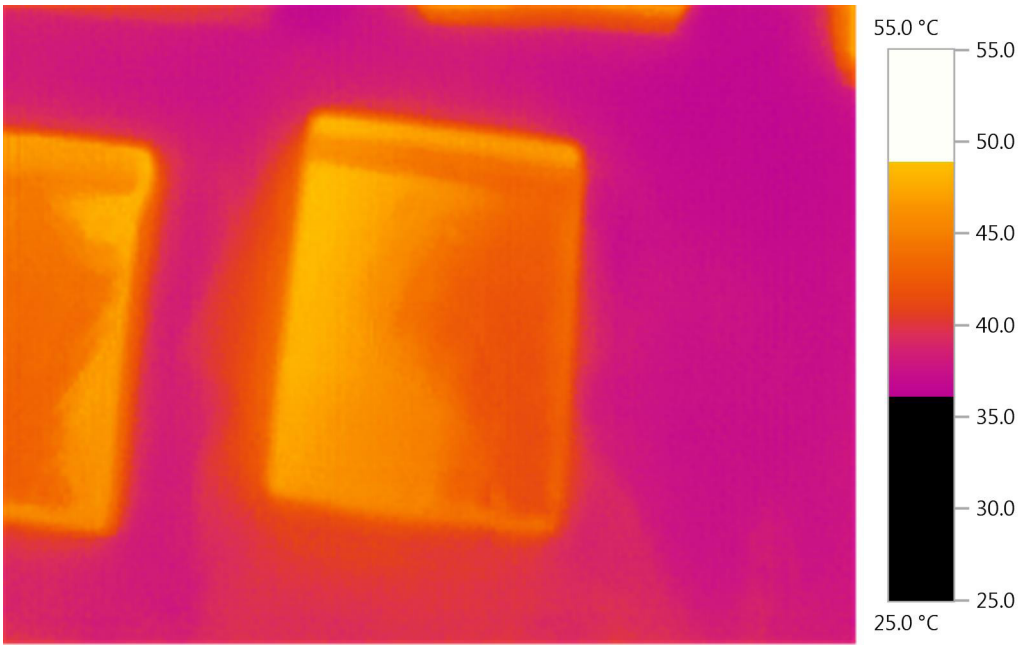
Telha 26 - 0 meses



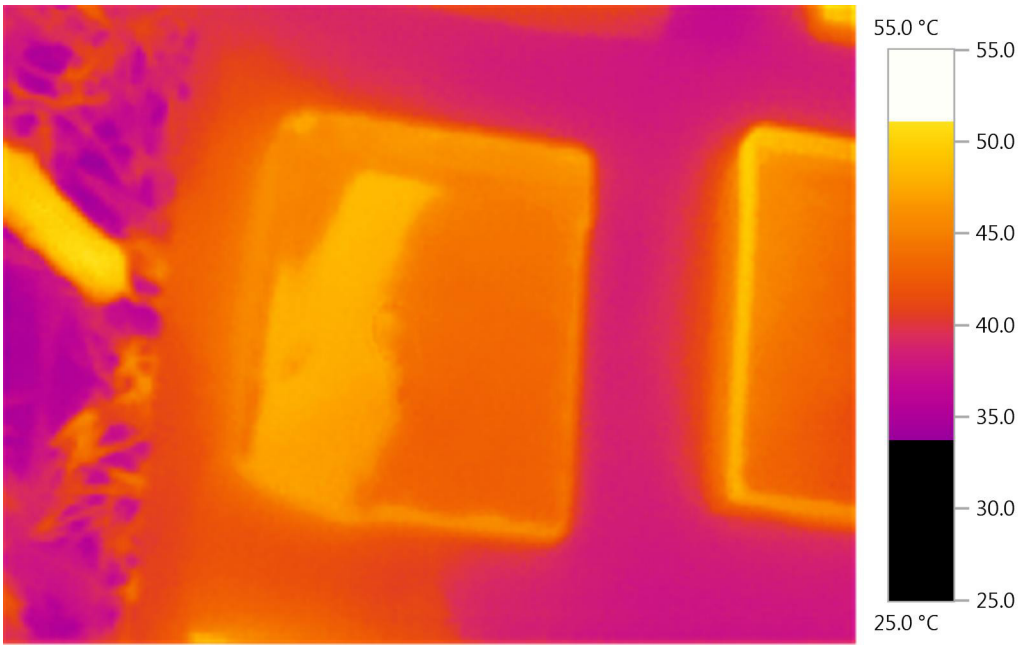
Telha 27 - 0 meses



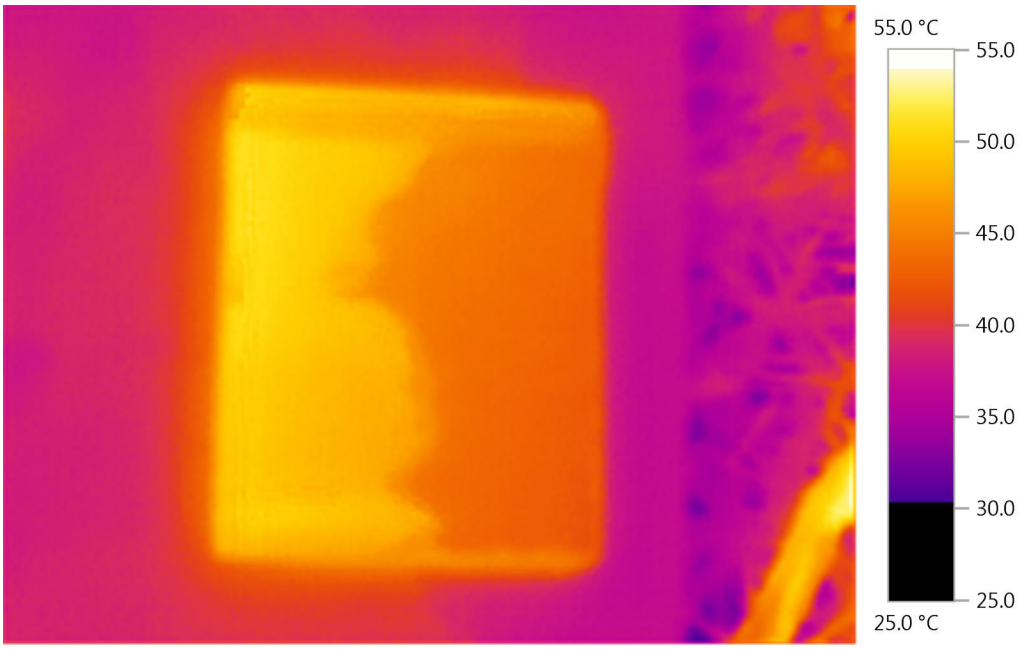
Telha 28 - 0 meses



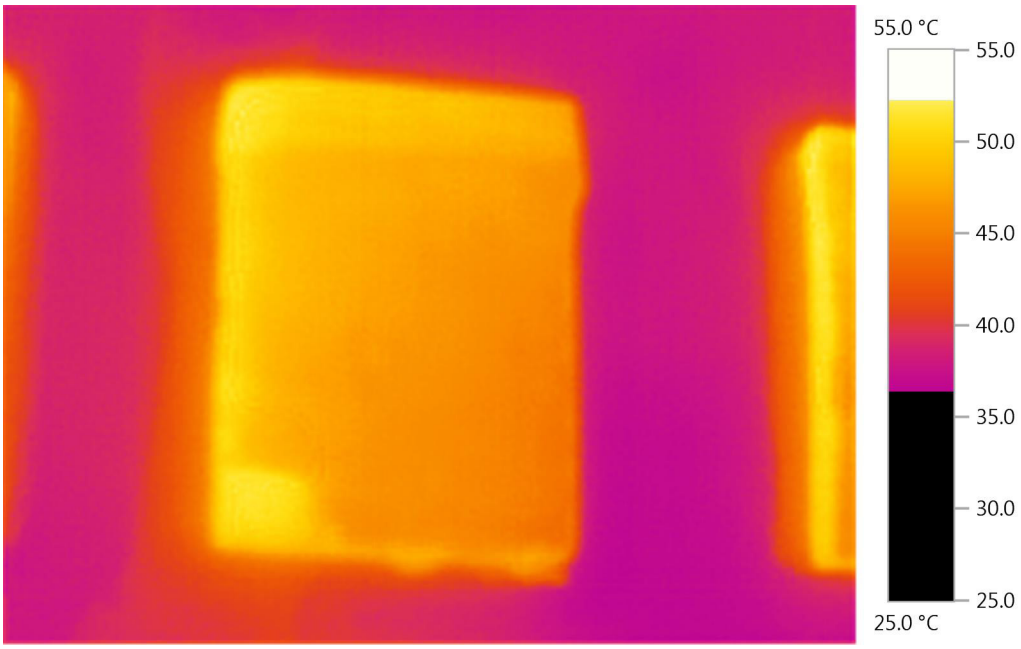
Telha 1 - 24 meses



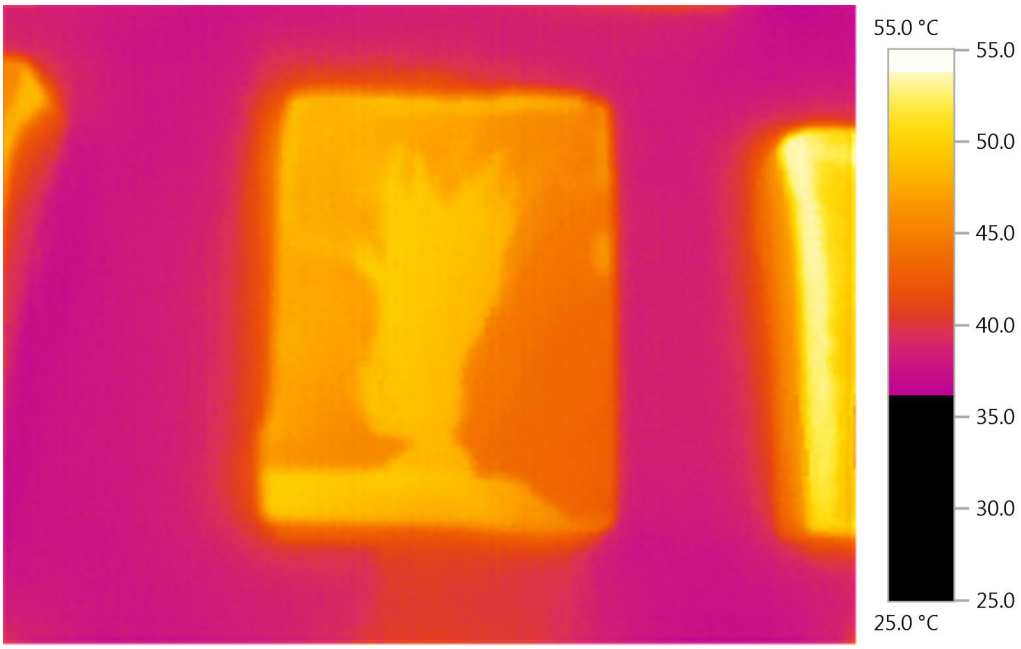
Telha 2 - 24 meses



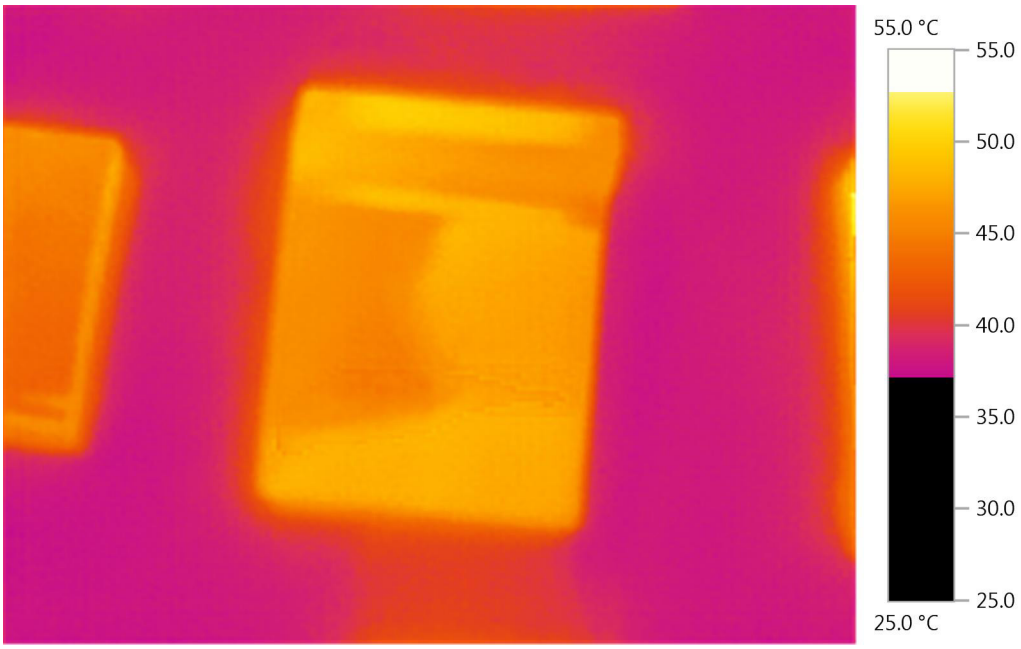
Telha 3 - 24 meses



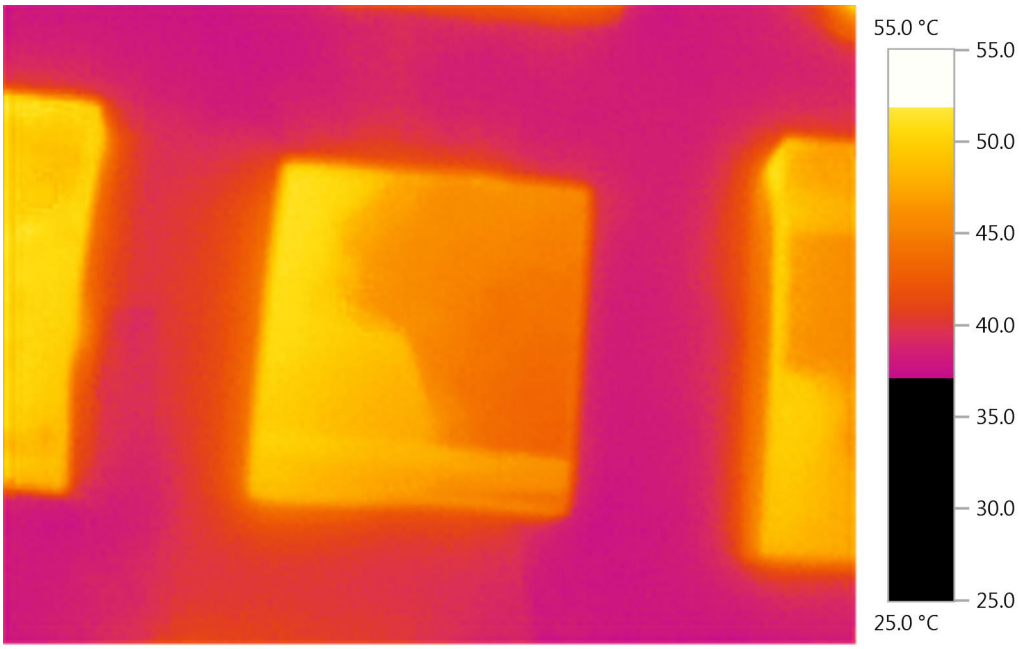
Telha 4 - 24 meses



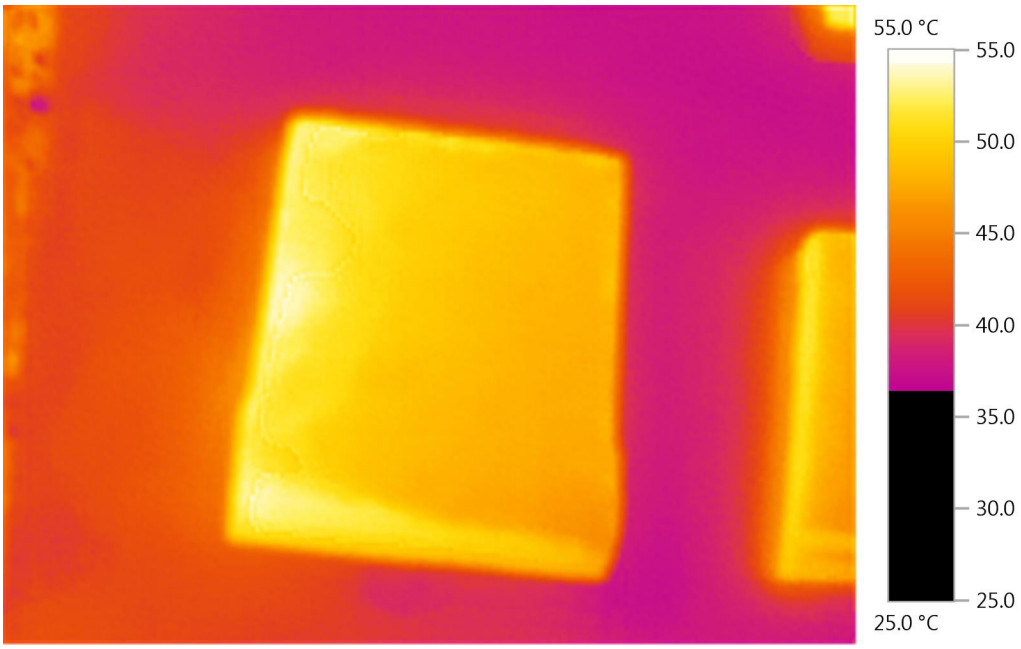
Telha 5 - 24 meses



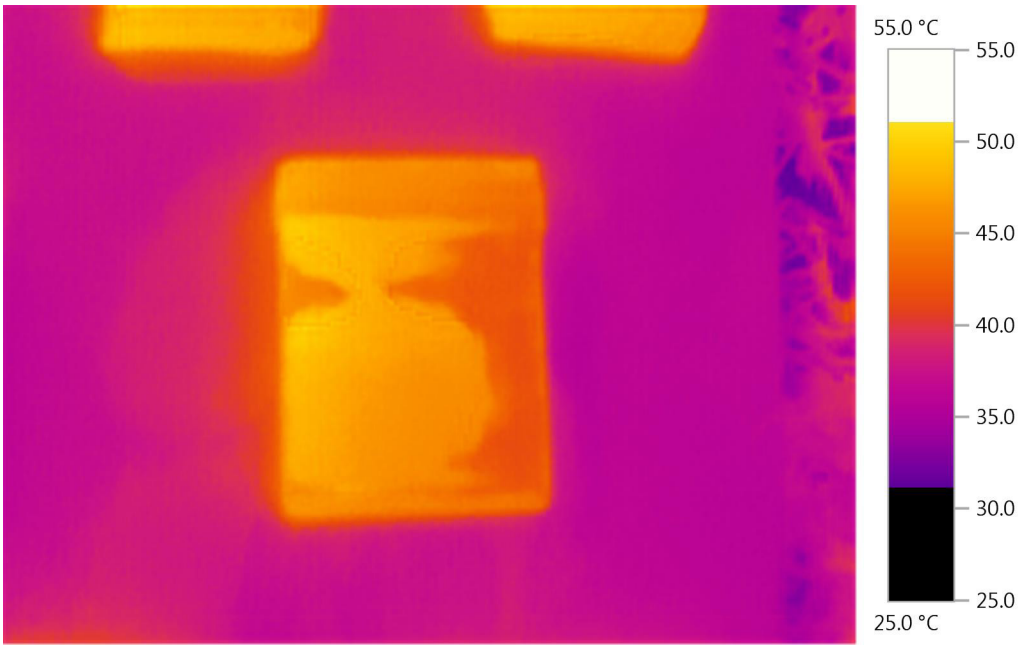
Telha 6 - 24 meses



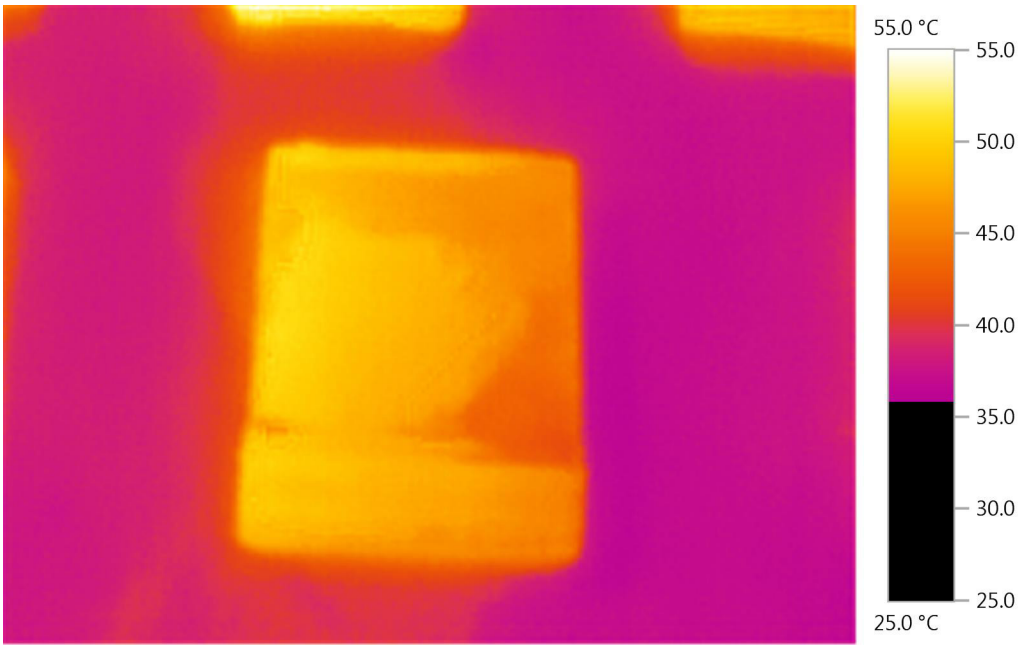
Telha 7 - 24 meses



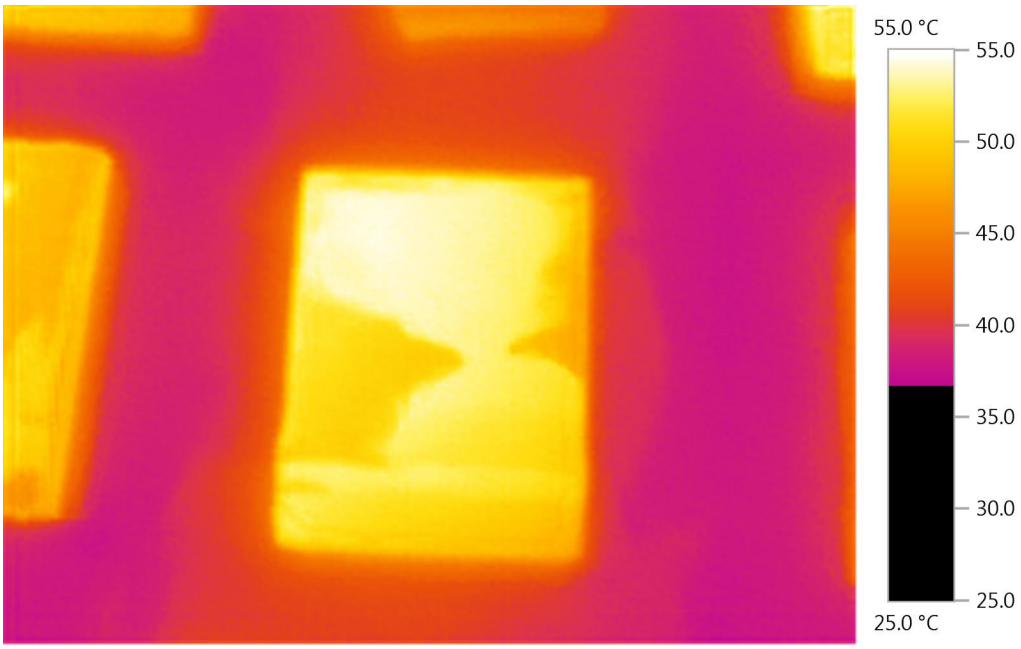
Telha 8 - 24 meses



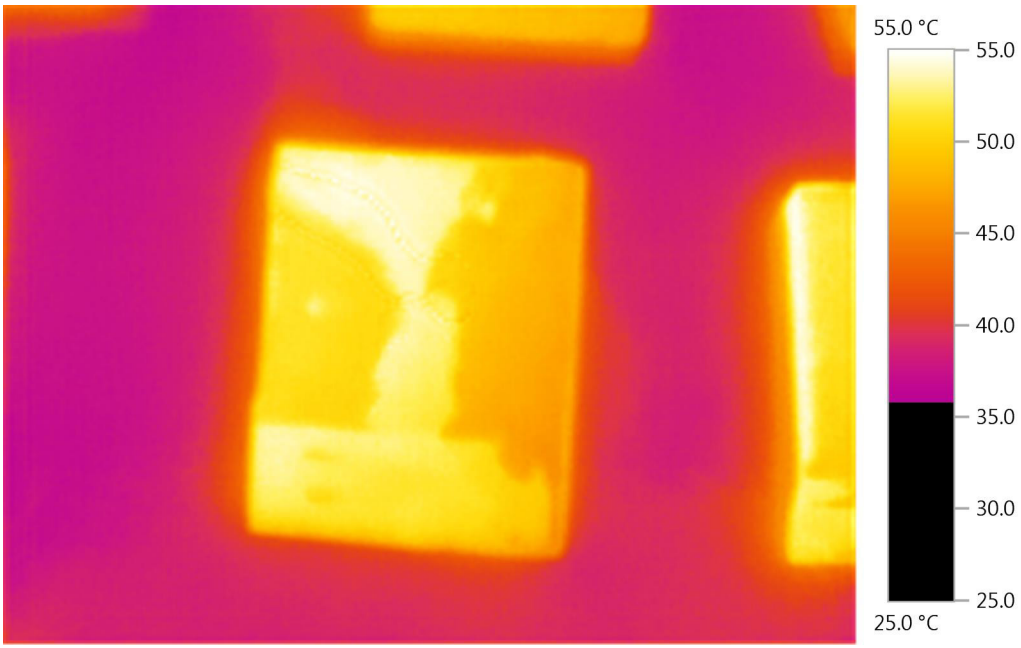
Telha 9 - 24 meses



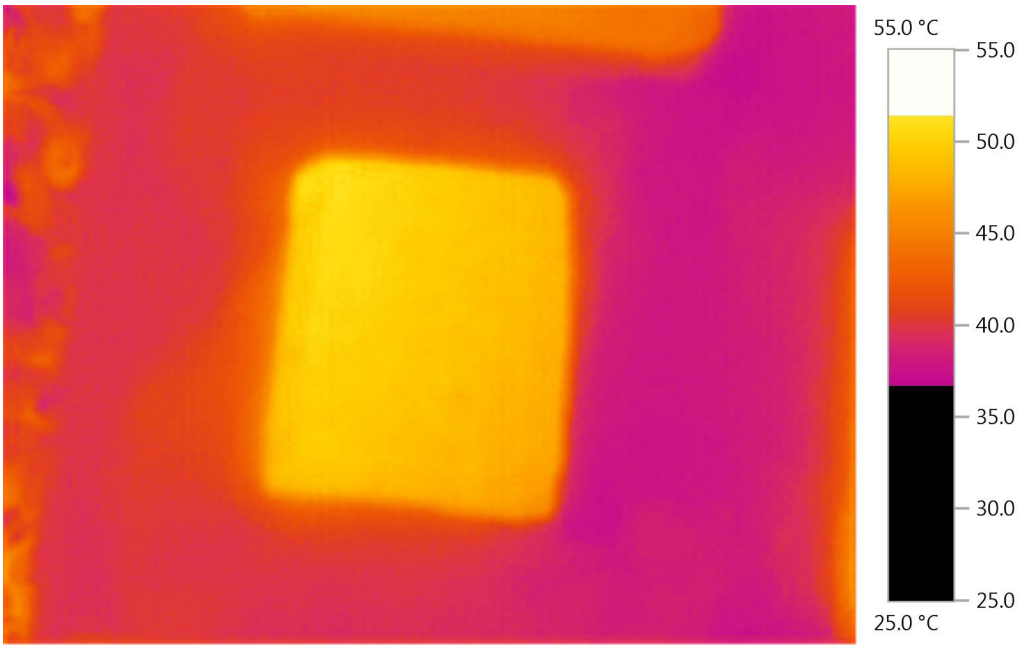
Telha 10 - 24 meses



Telha 11 - 24 meses

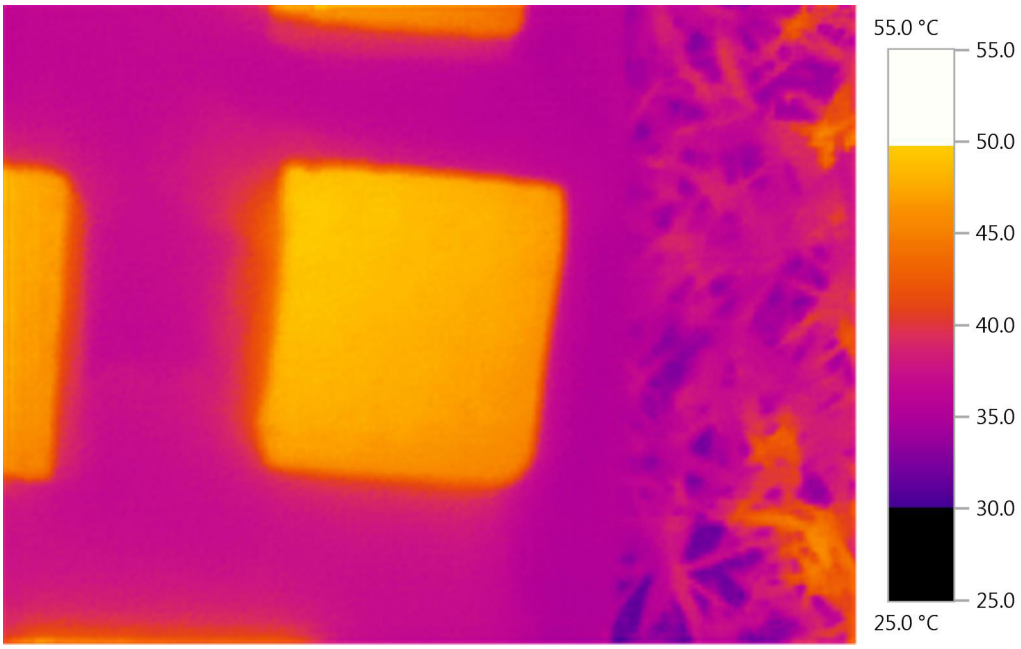


Telha 12 - 24 meses

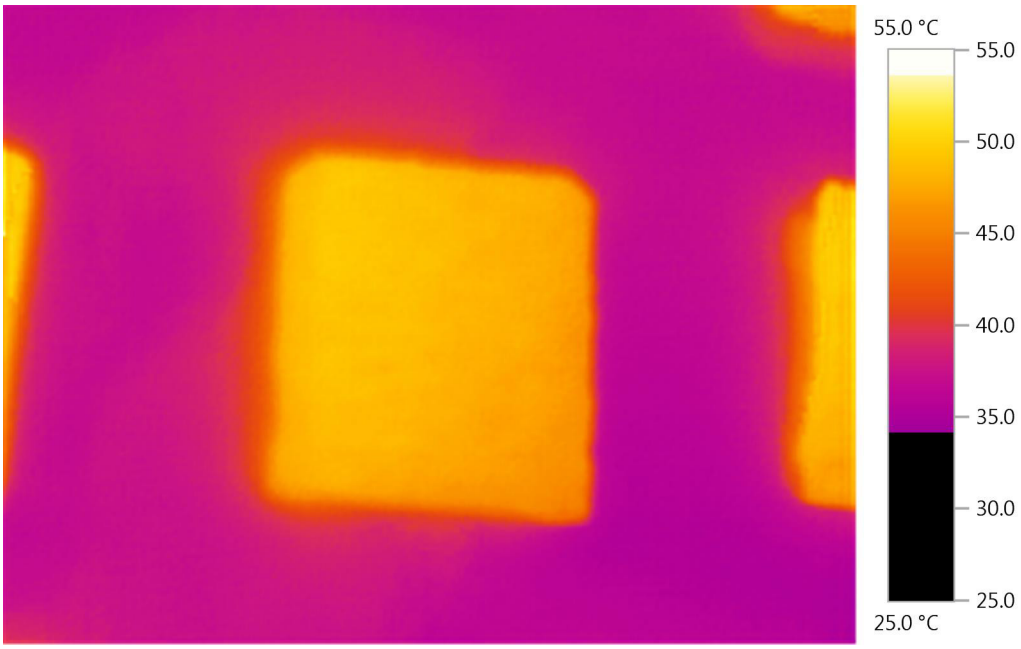


Telha 13 - 24 meses

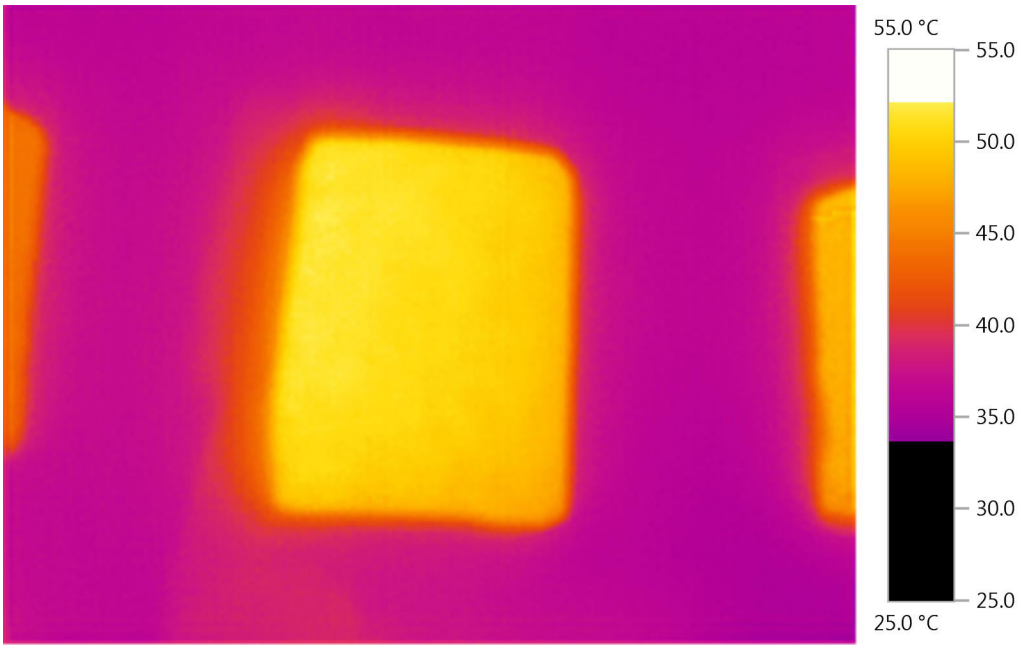
Telha 14 - 0 meses



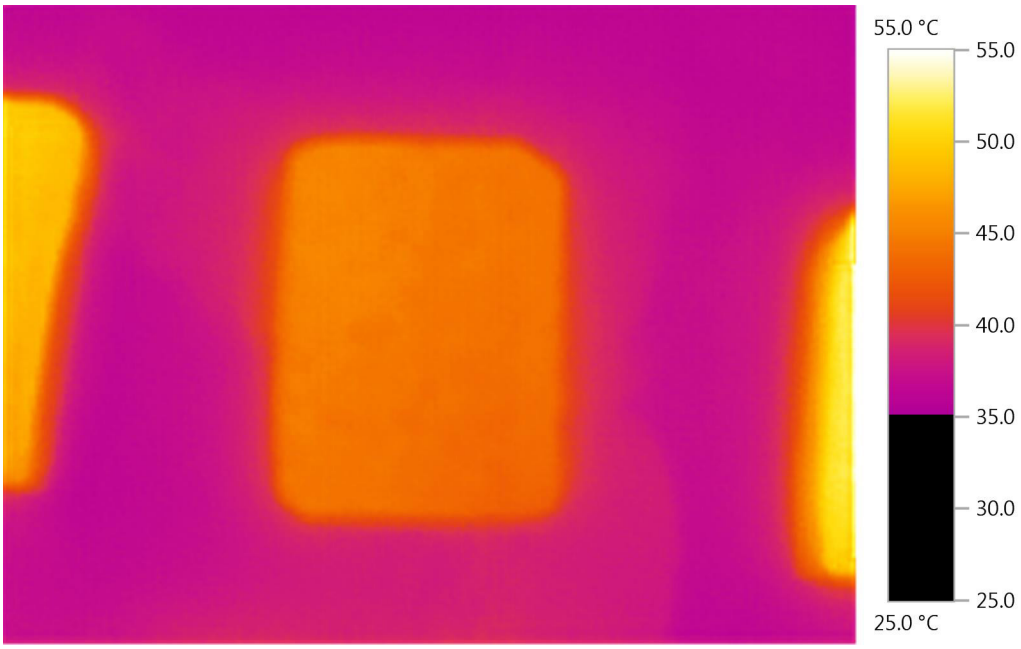
Telha 15 - 24 meses



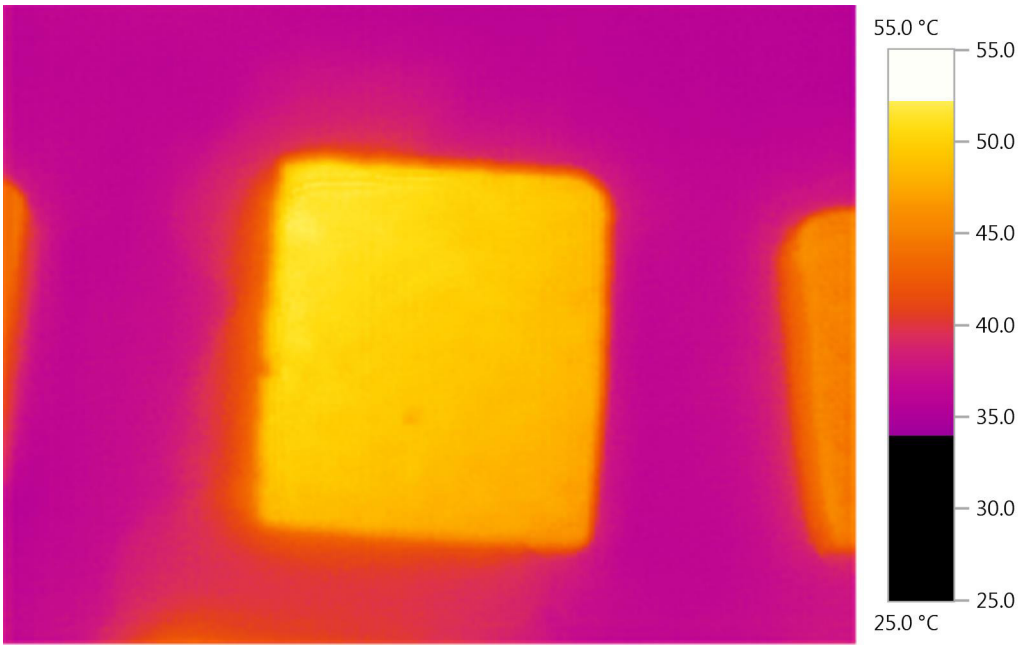
Telha 16 - 24 meses



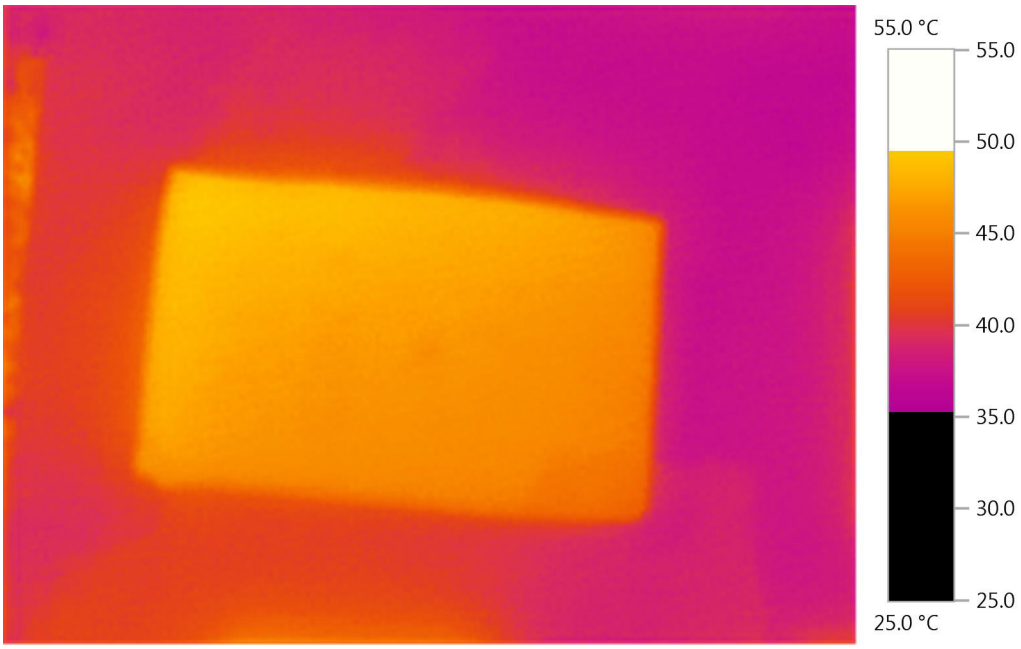
Telha 17 - 24 meses



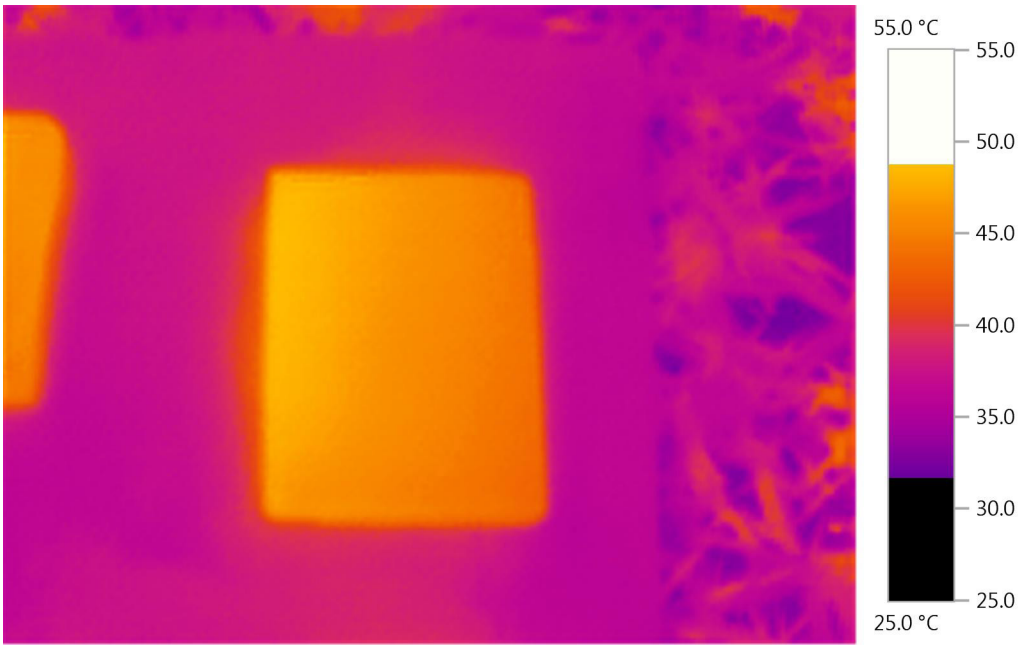
Telha 18 - 24 meses



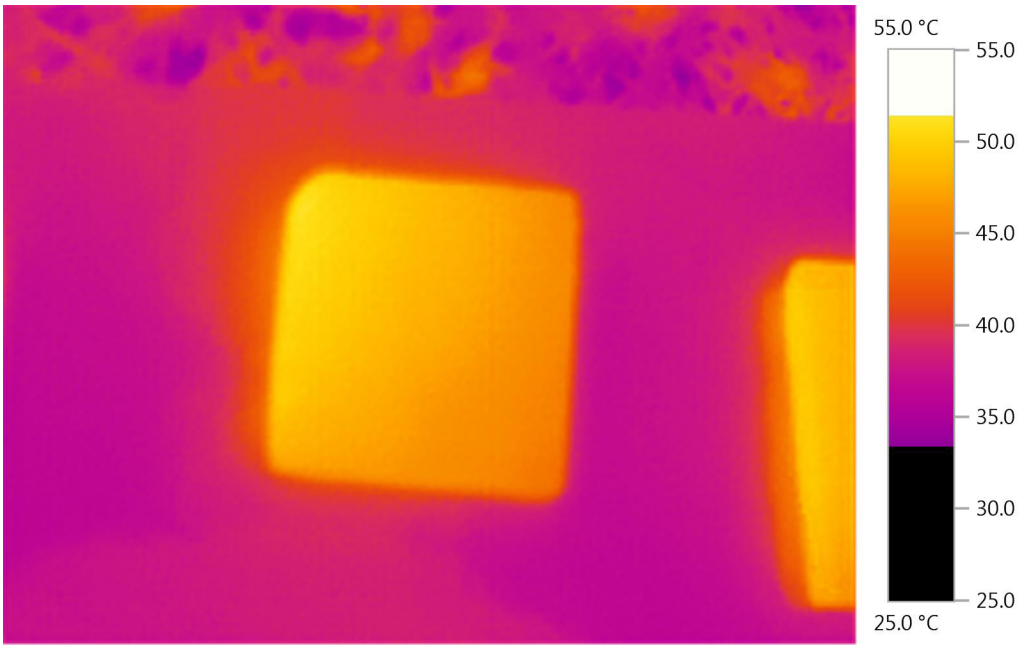
Telha 19 - 24 meses



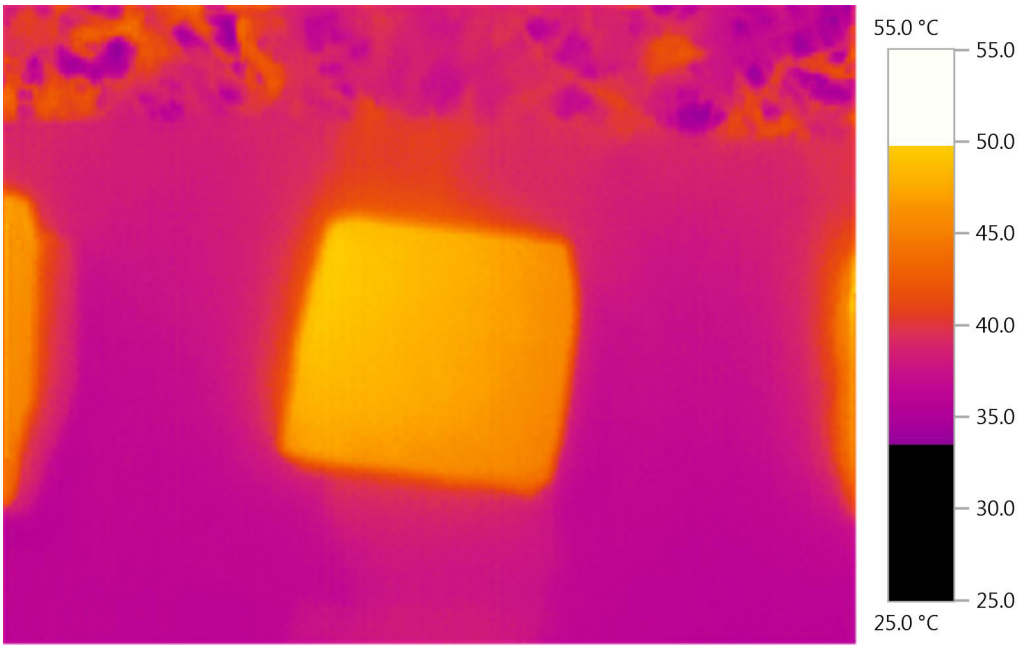
Telha 20 - 24 meses



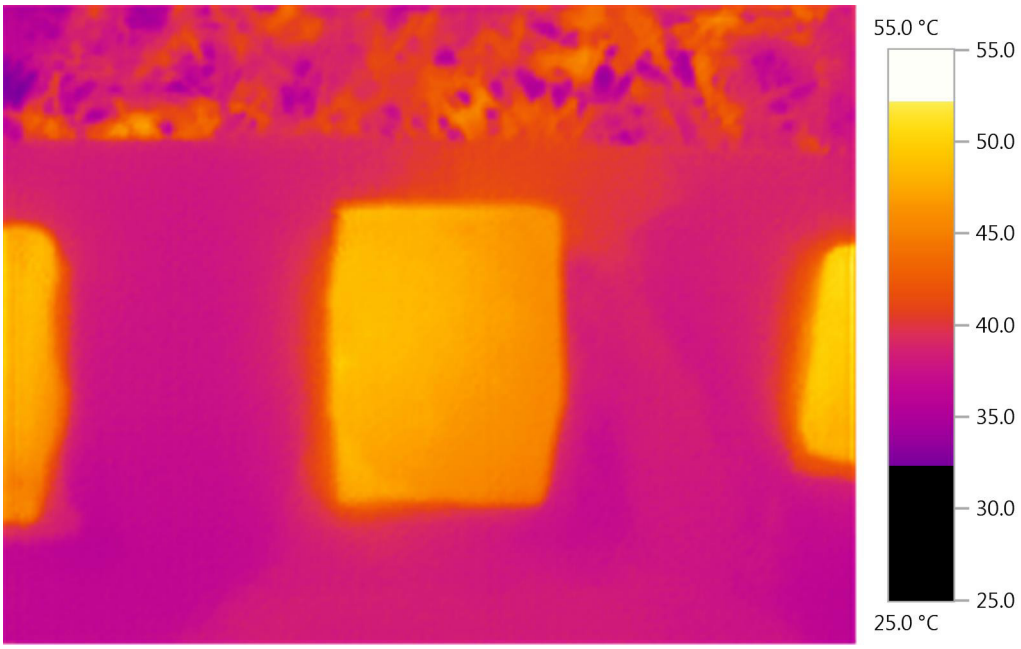
Telha 21 - 24 meses



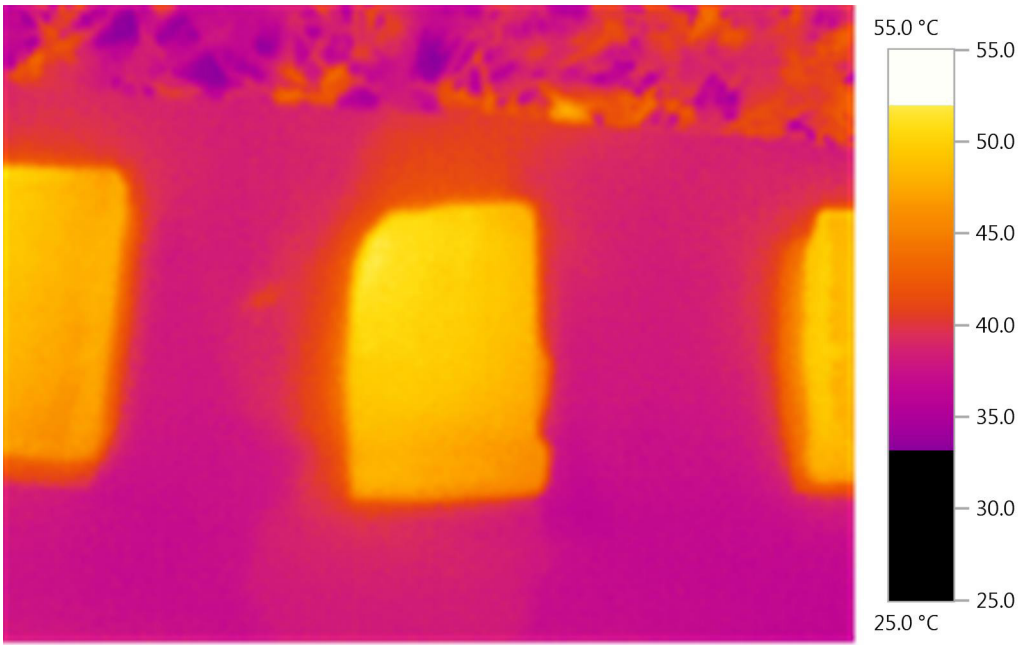
Telha 22 - 24 meses



Telha 23 - 24 meses



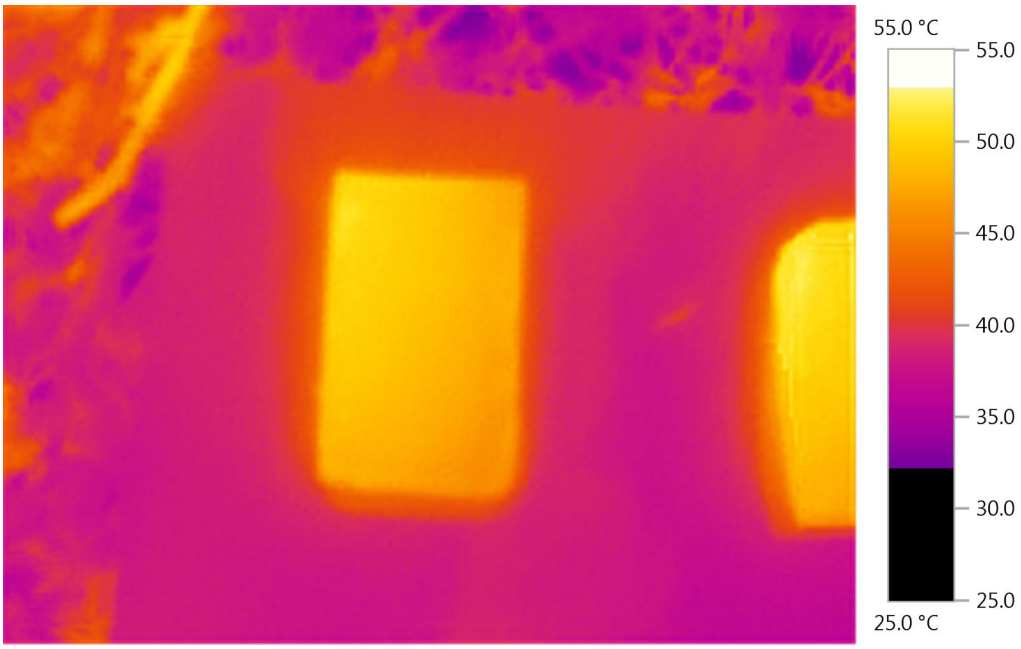
Telha 24 - 24 meses



Telha 25 - 24 meses

Telha 26 - 0 meses

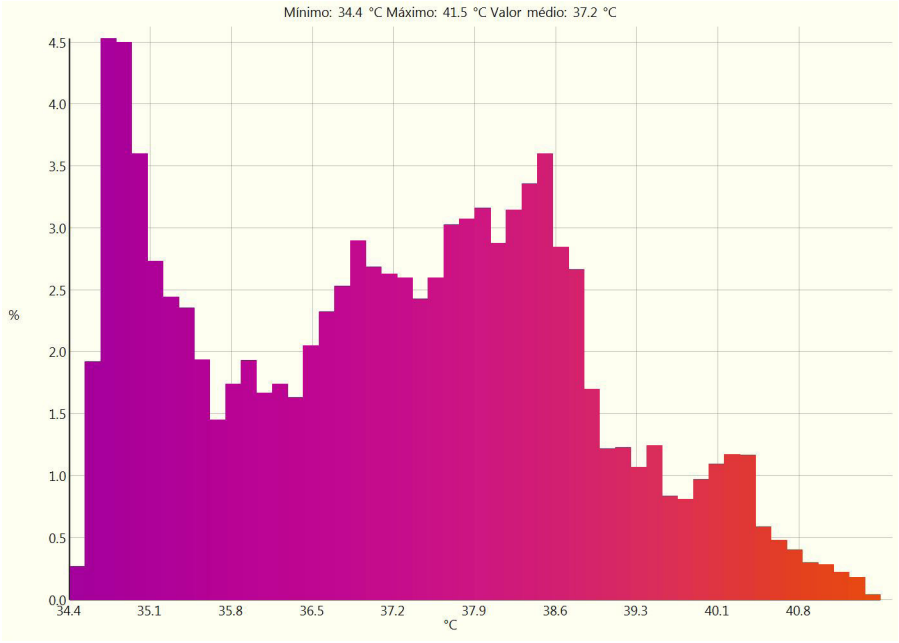
Telha 27 - 0 meses



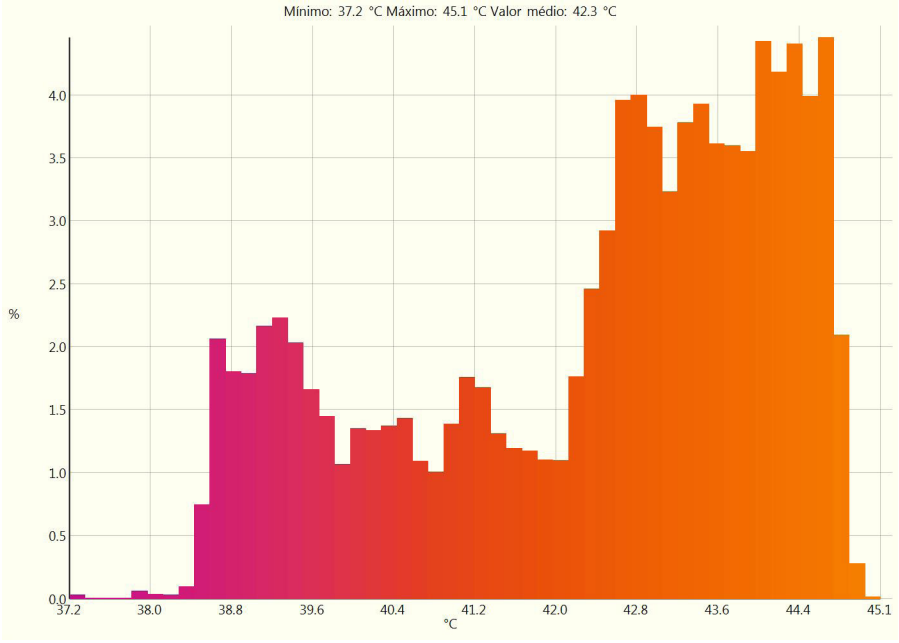
Telha 28 - 24 meses

APÊNDICE E

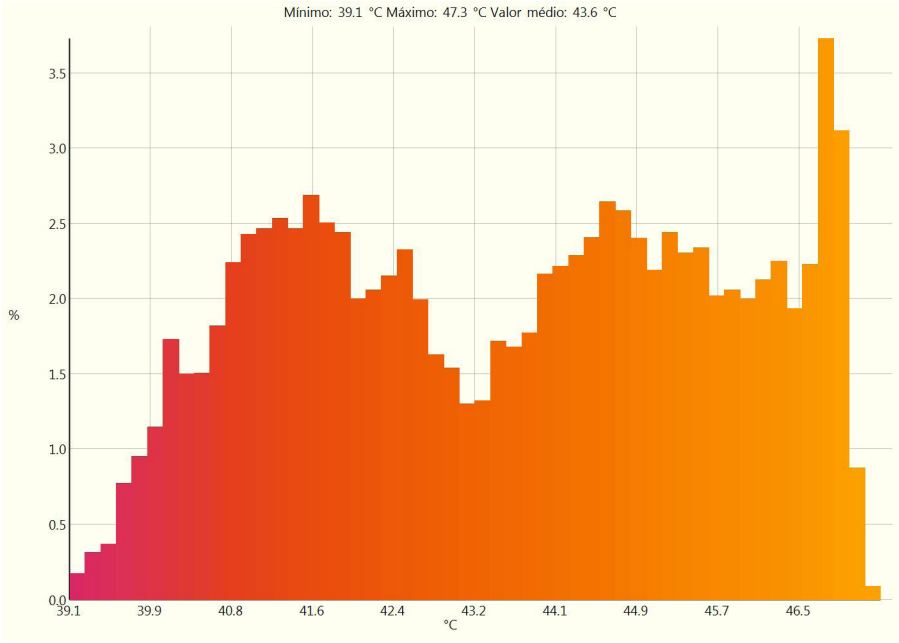
Histogramas da temperatura superficial das faces superiores de todas as telhas expostas ao final dos 24 meses de exposição



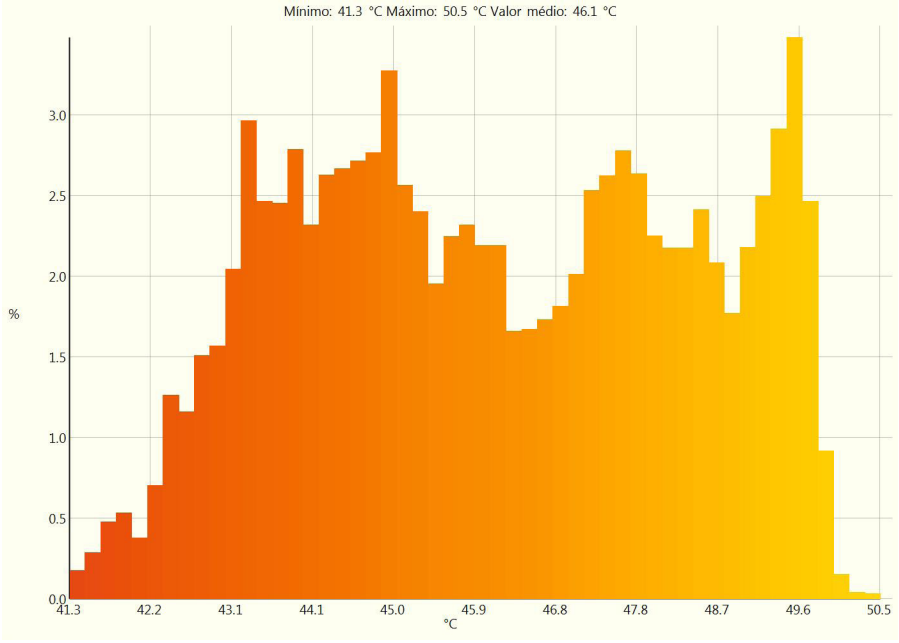
Telha 1 - 0 meses



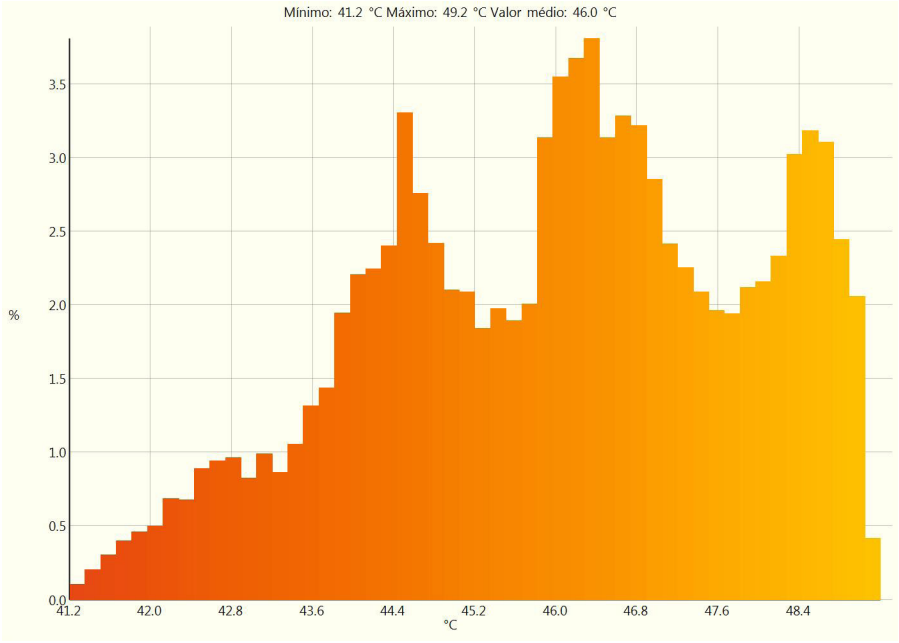
Telha 2 - 0 meses



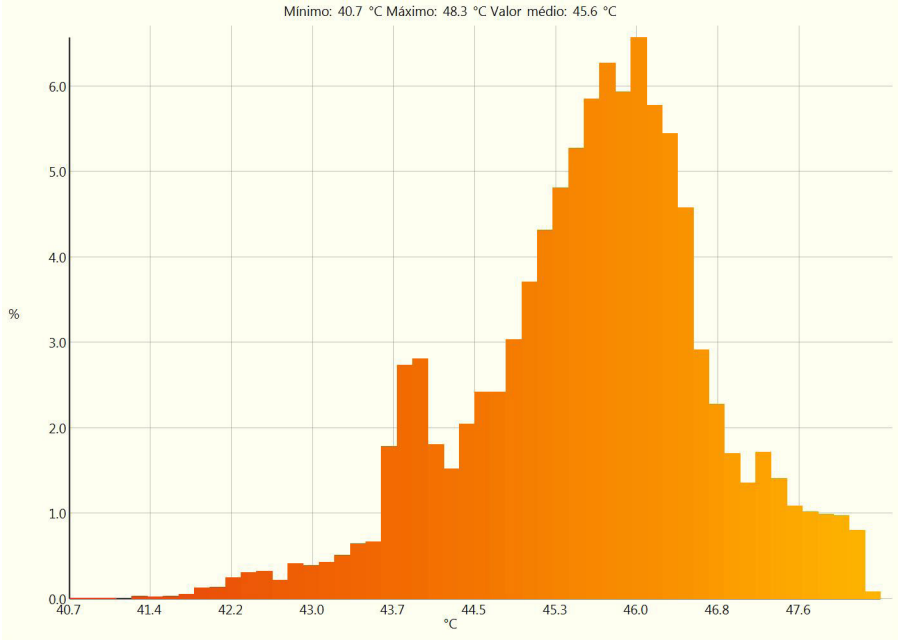
Telha 3 - 0 meses



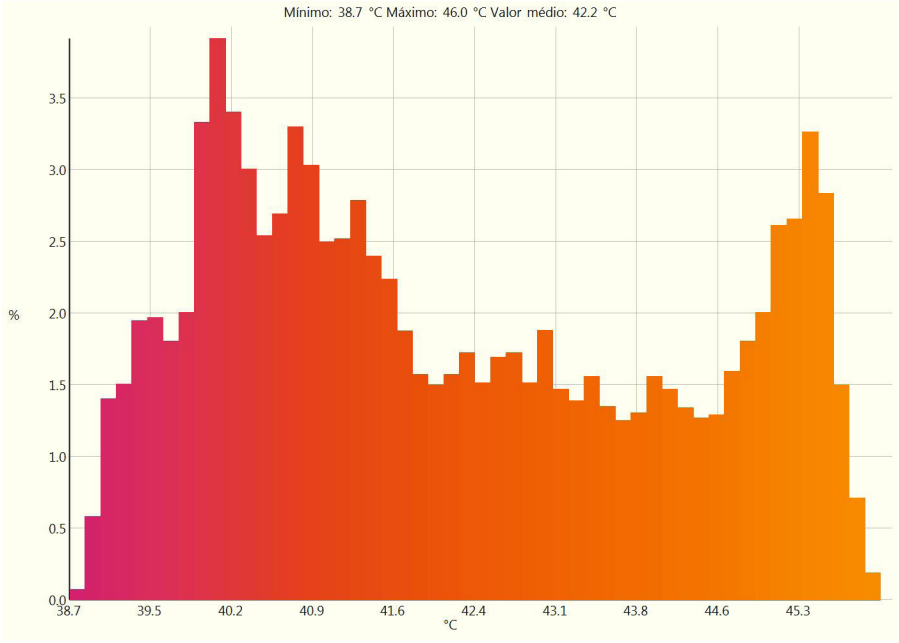
Telha 4 - 0 meses



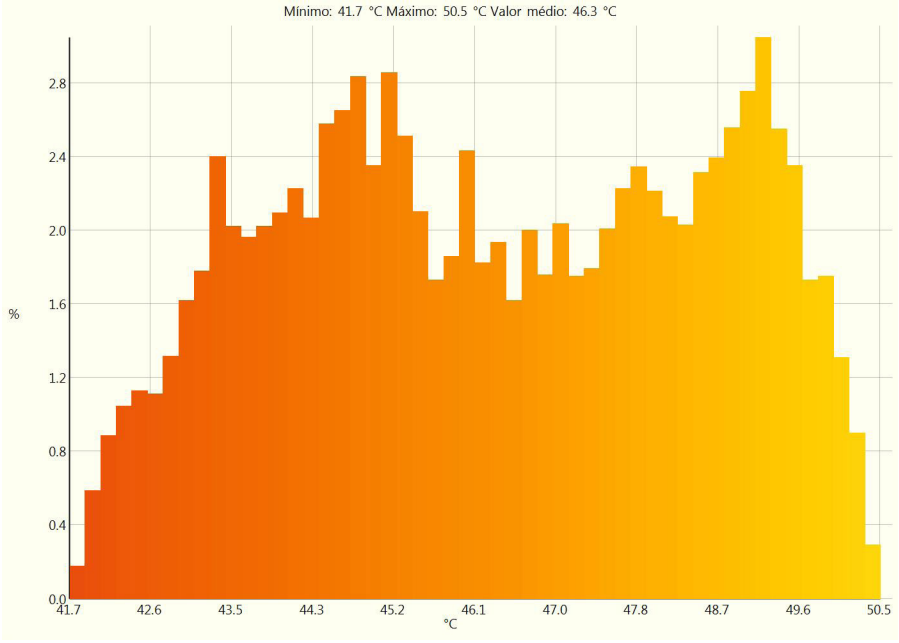
Telha 5 - 0 meses



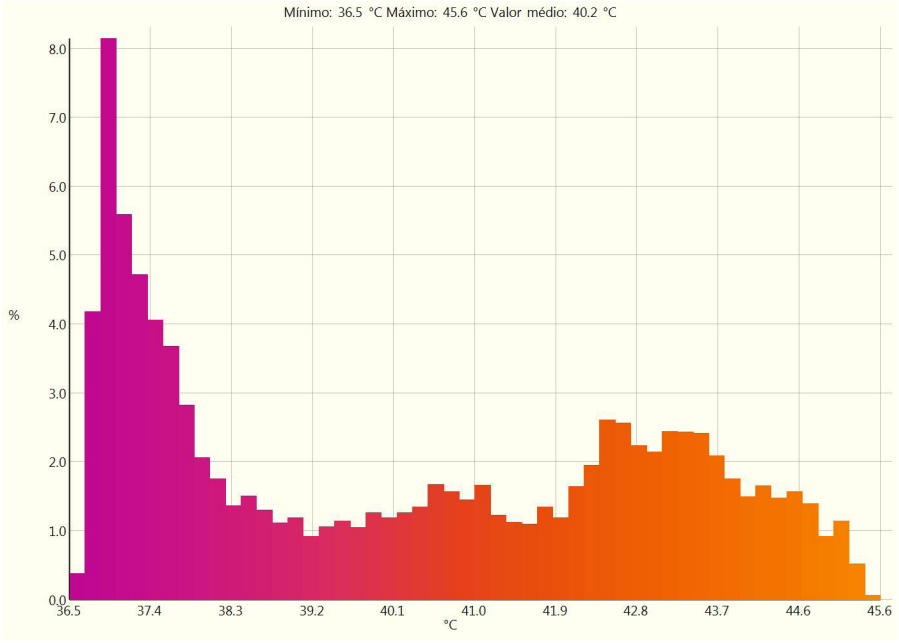
Telha 6 - 0 meses



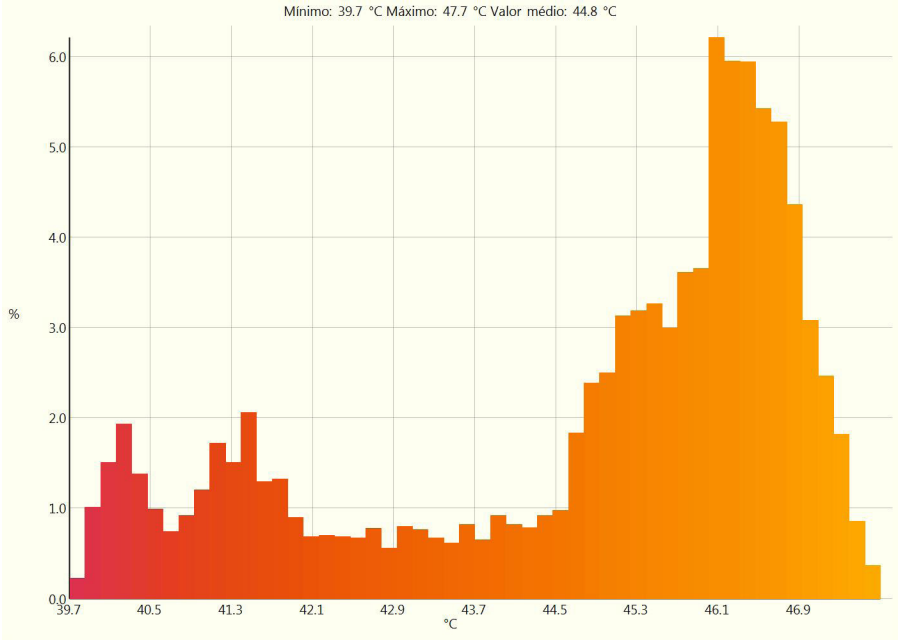
Telha 7 - 0 meses



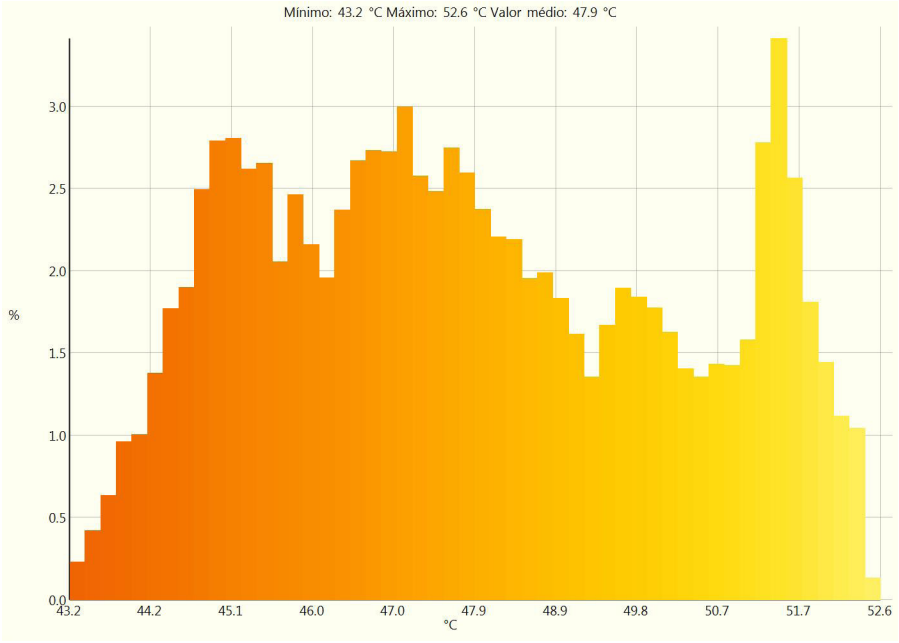
Telha 8 - 0 meses



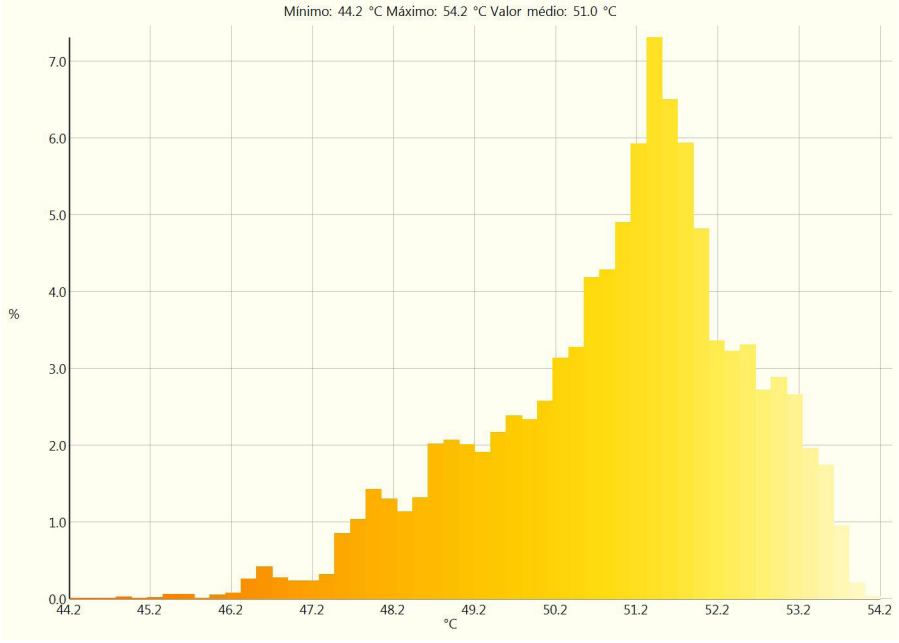
Telha 9 - 0 meses



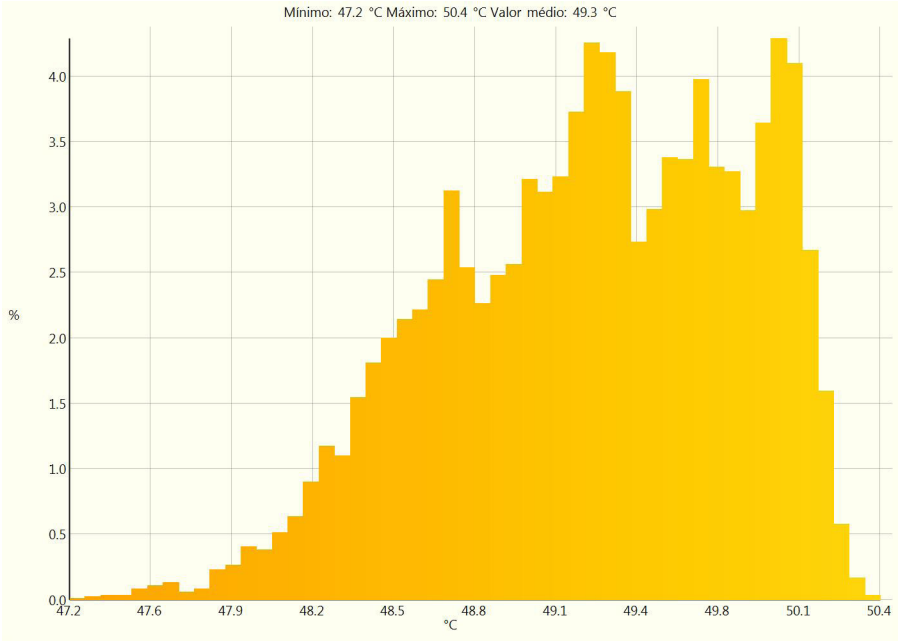
Telha 10 - 0 meses



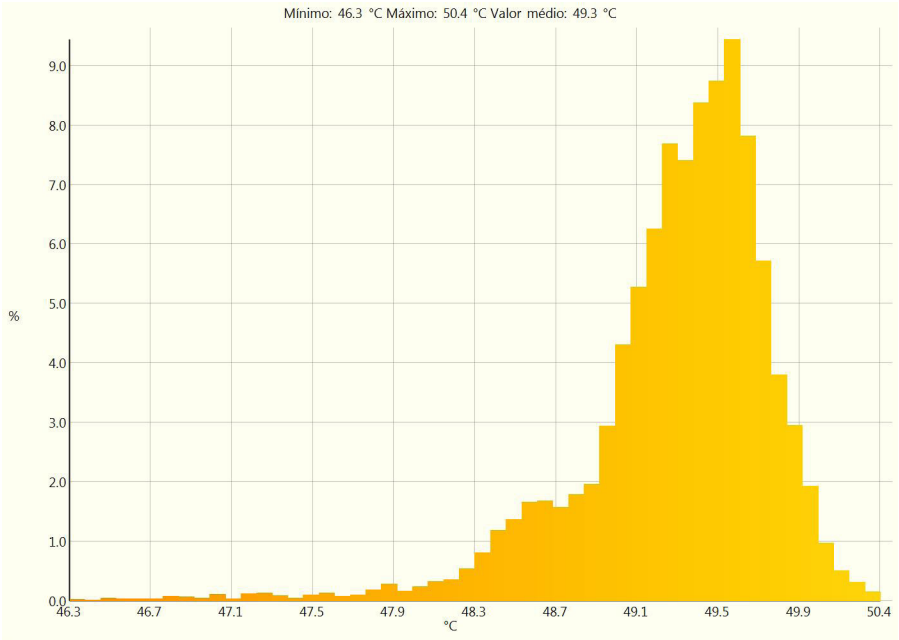
Telha 11 - 0 meses



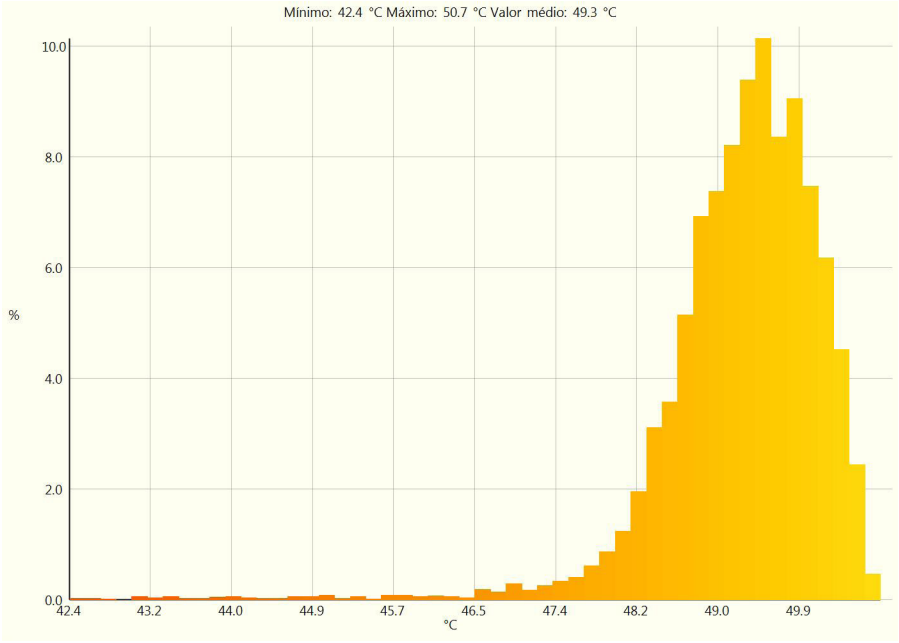
Telha 12 - 0 meses



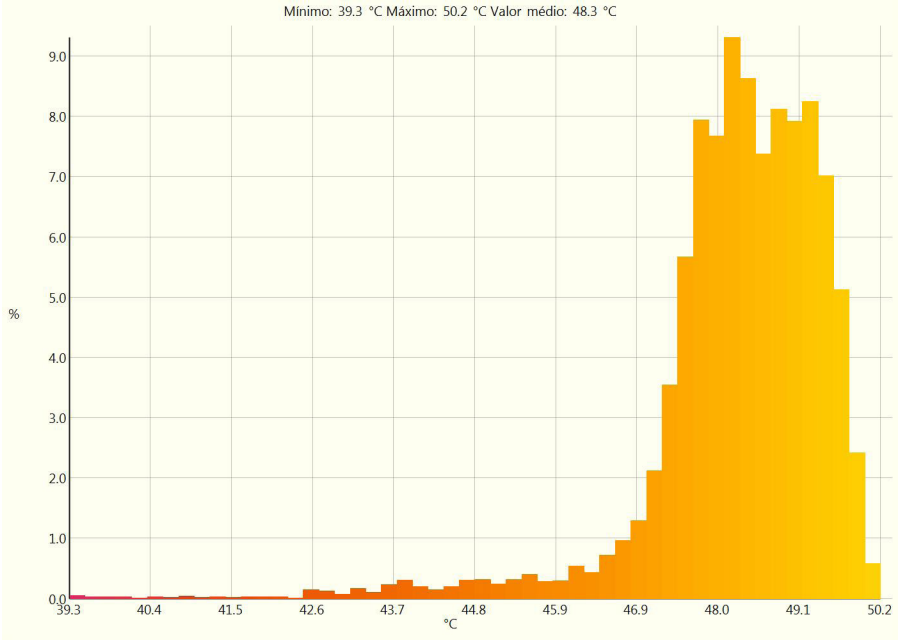
Telha 13 - 0 meses



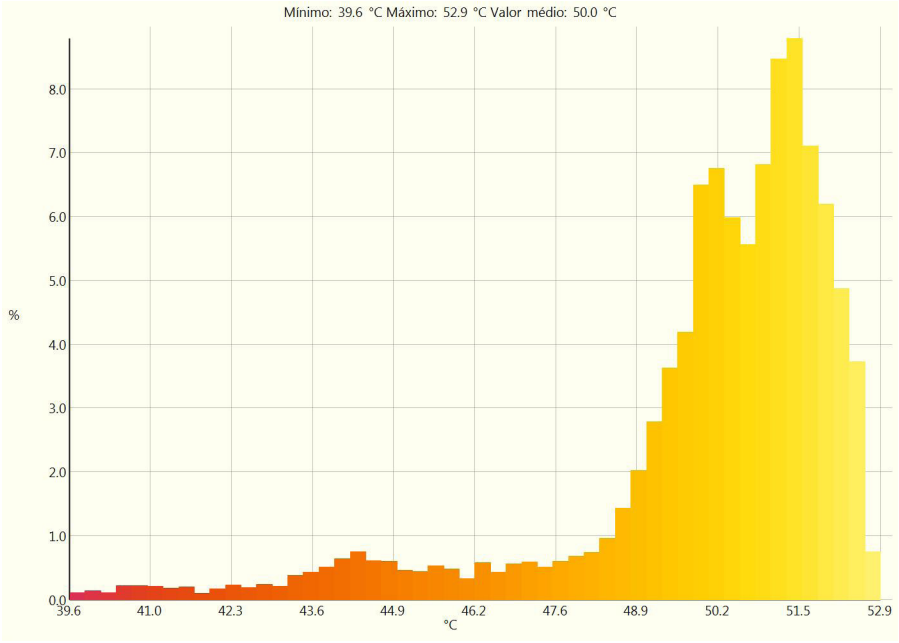
Telha 14 - 0 meses



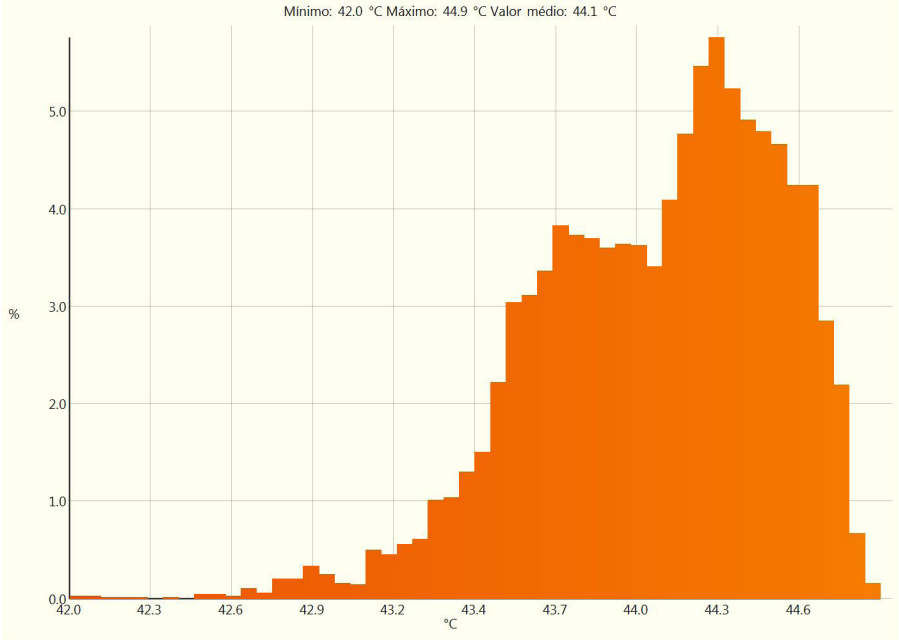
Telha 15 - 0 meses



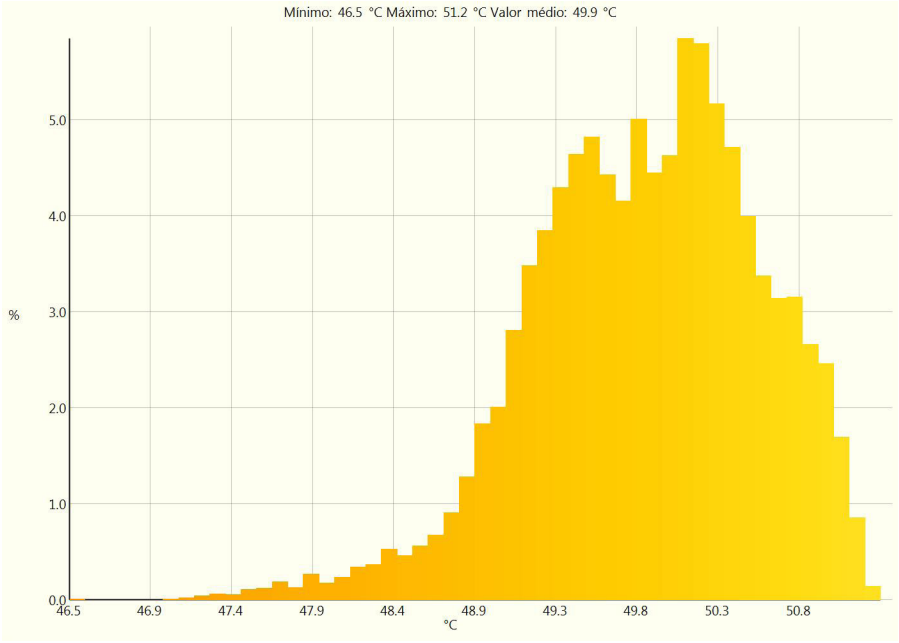
Telha 16 - 0 meses



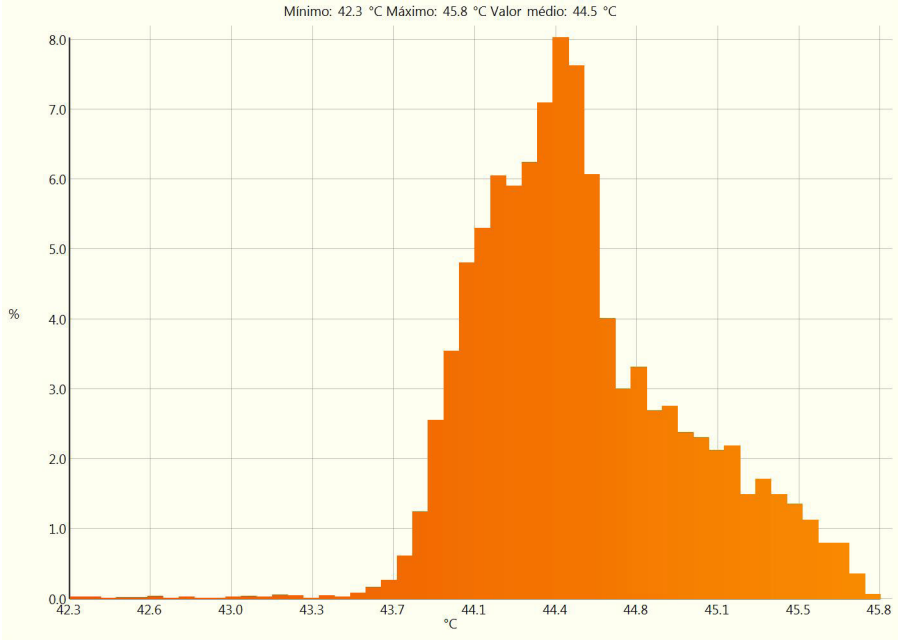
Telha 17 - 0 meses



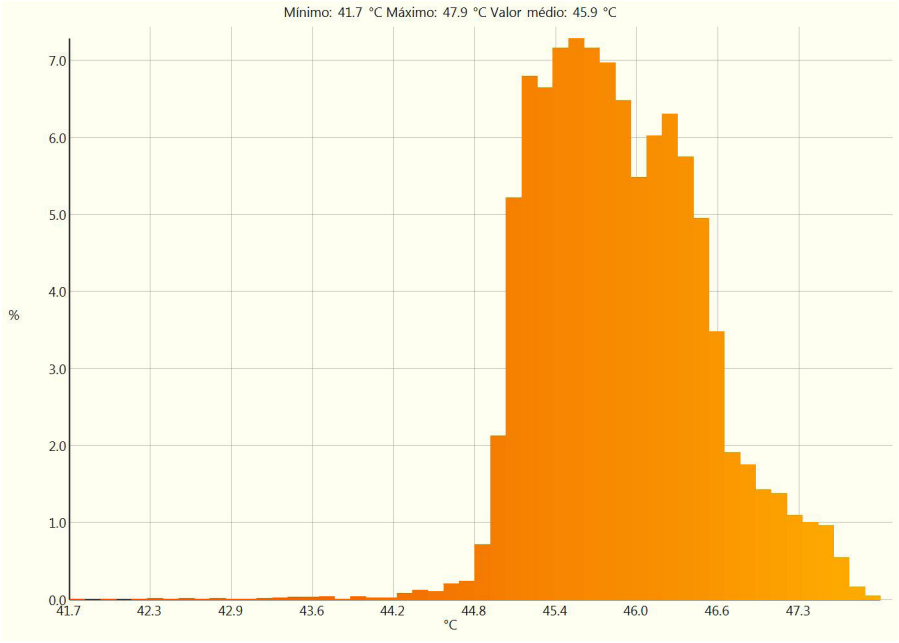
Telha 18 - 0 meses



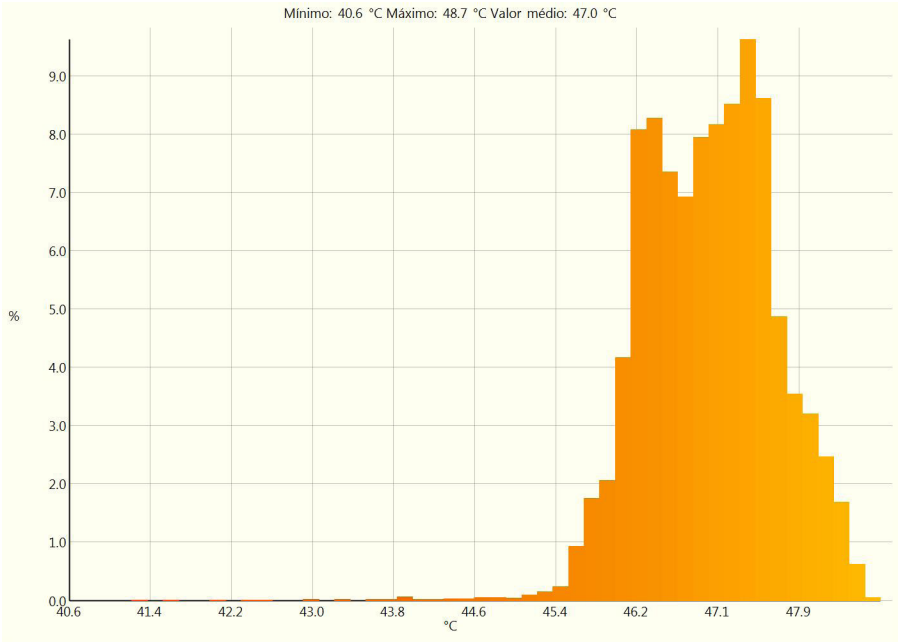
Telha 19 - 0 meses



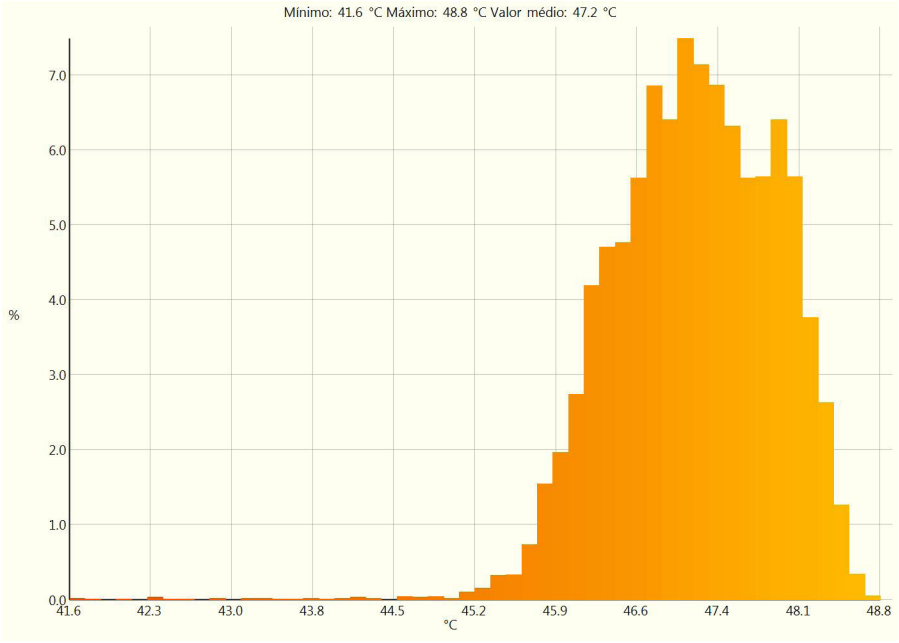
Telha 20 - 0 meses



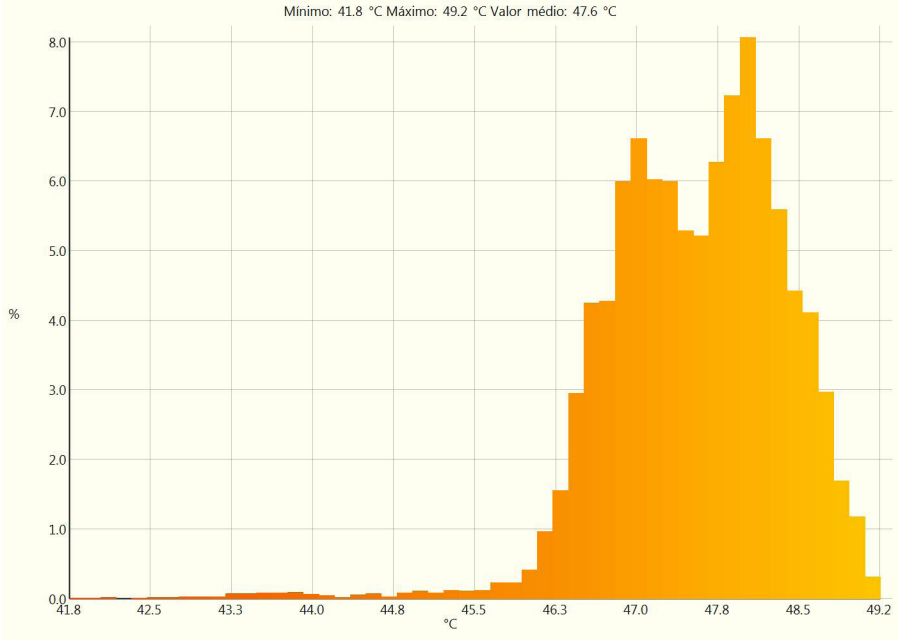
Telha 21 - 0 meses



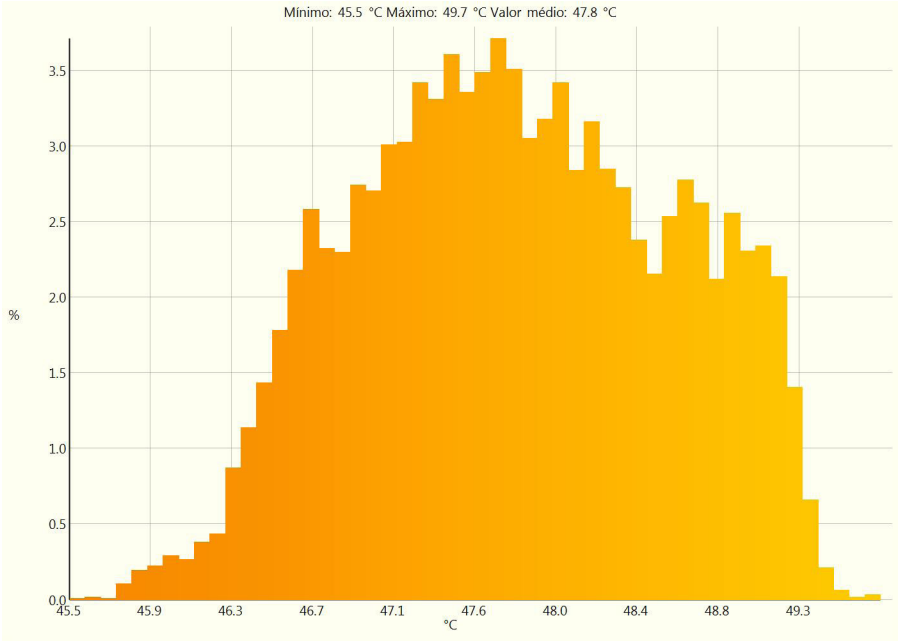
Telha 22 - 0 meses



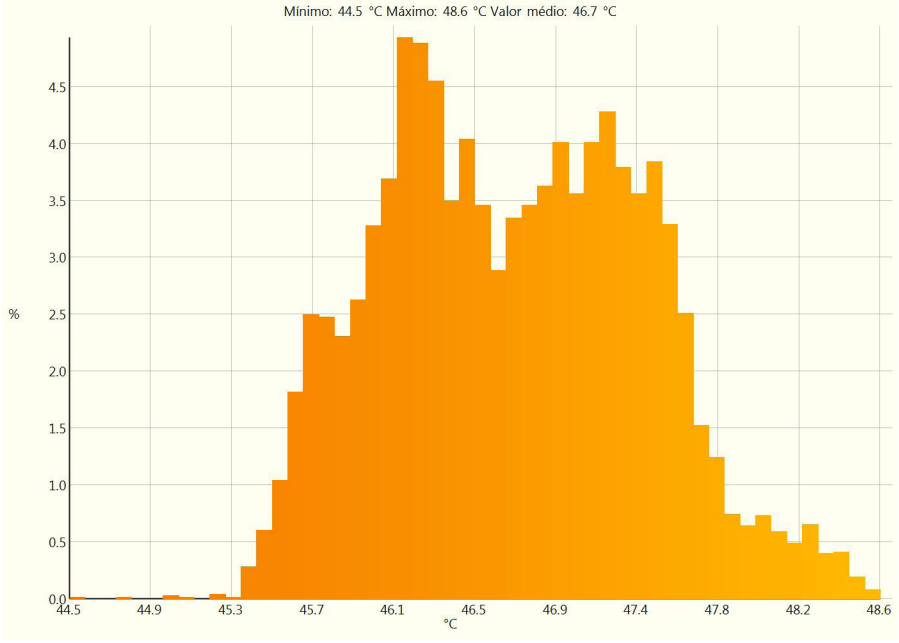
Telha 23 - 0 meses



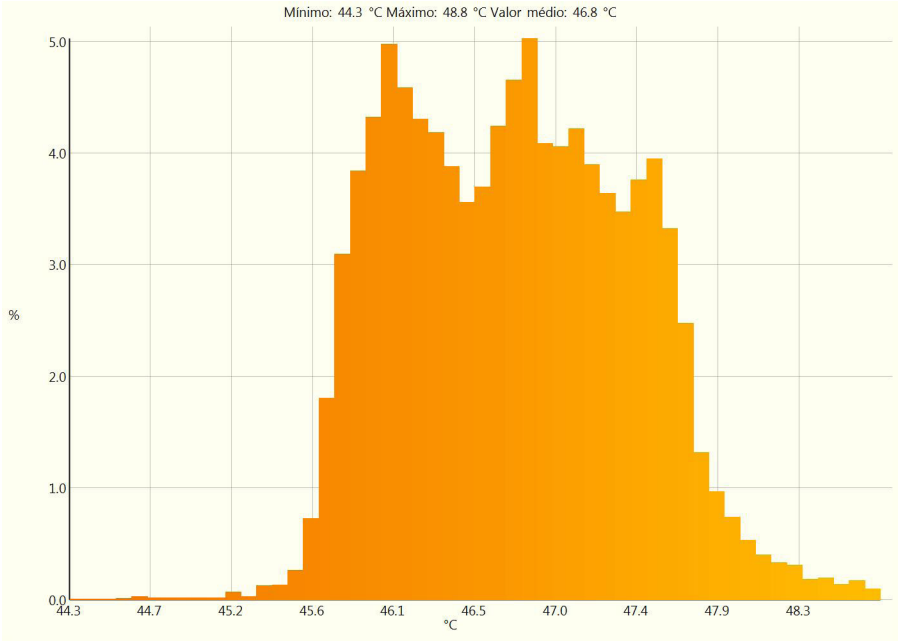
Telha 24 - 0 meses



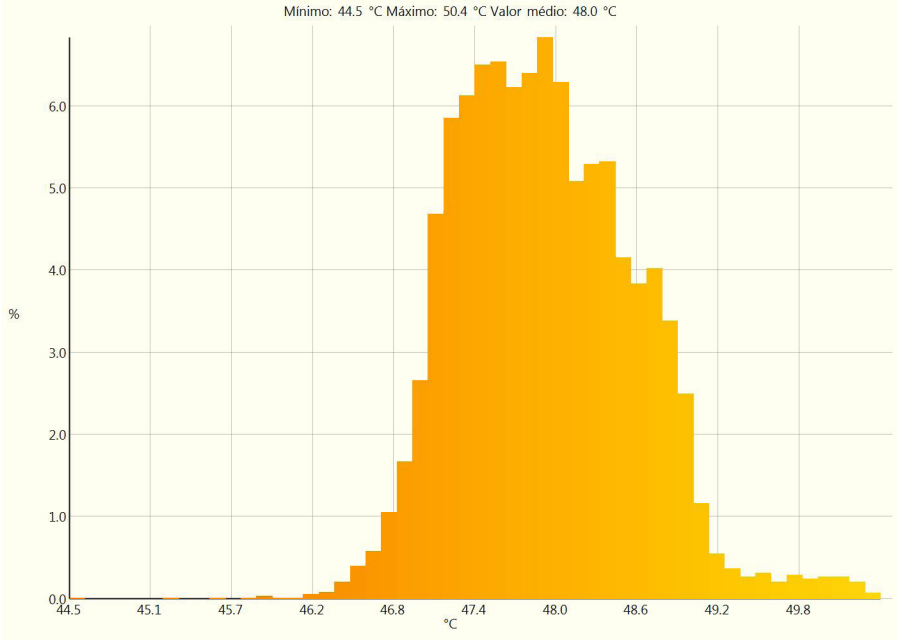
Telha 25 - 0 meses



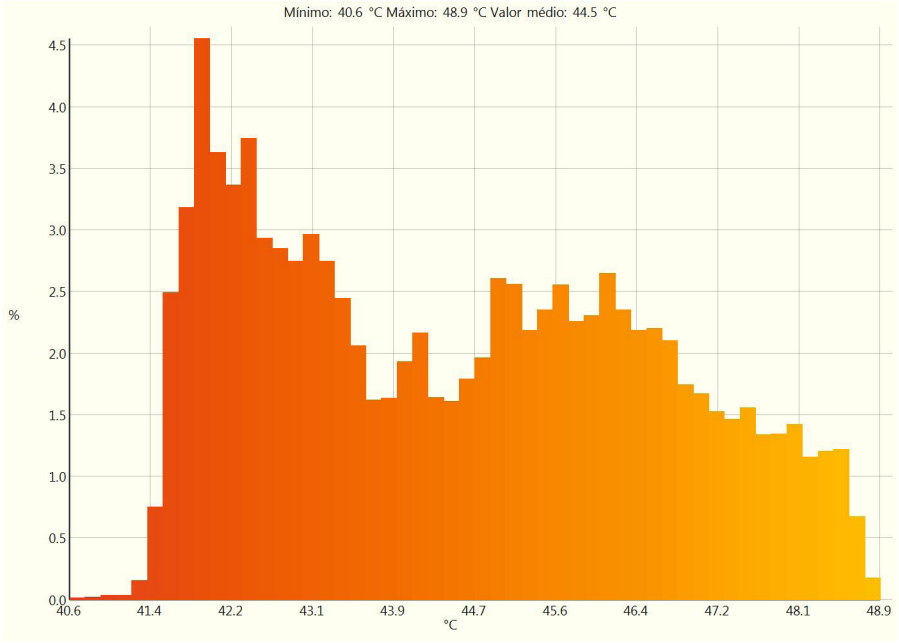
Telha 26 - 0 meses



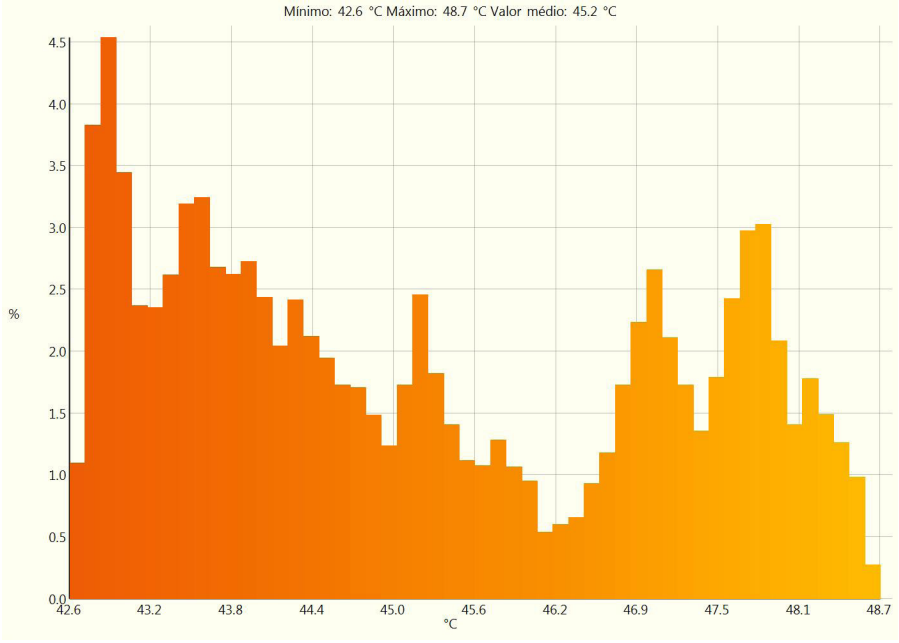
Telha 27 - 0 meses



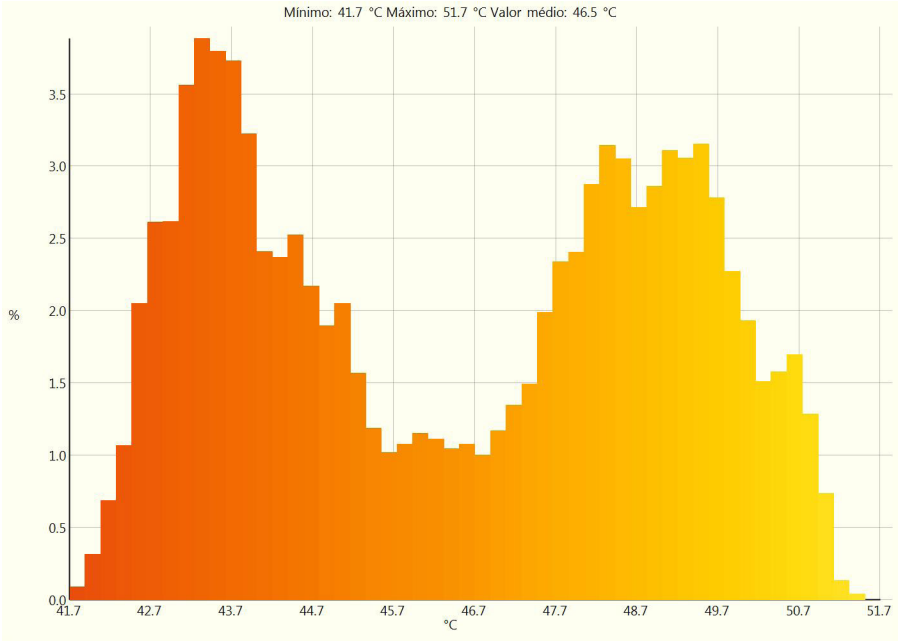
Telha 28 - 0 meses



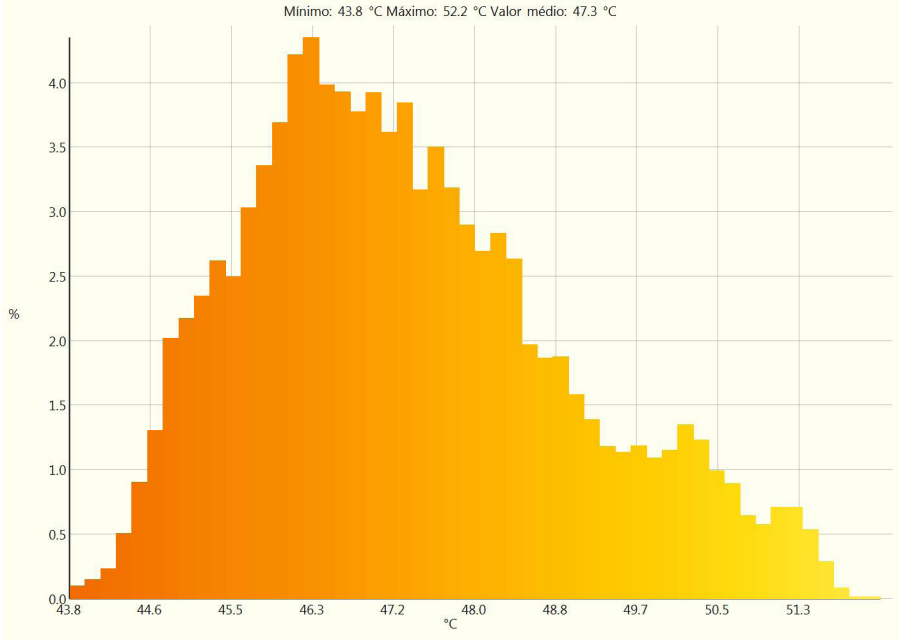
Telha 1 - 24 meses



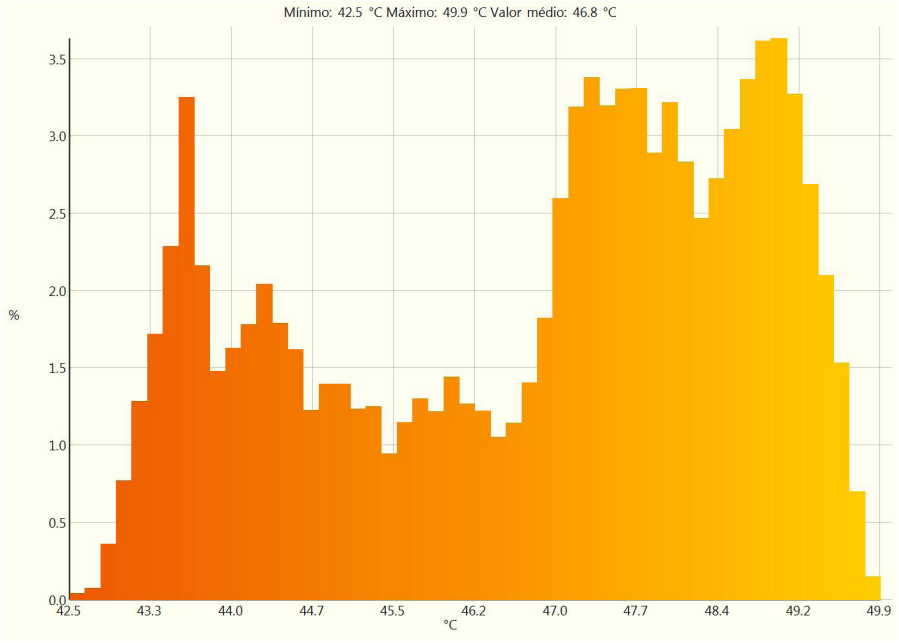
Telha 2 - 24 meses



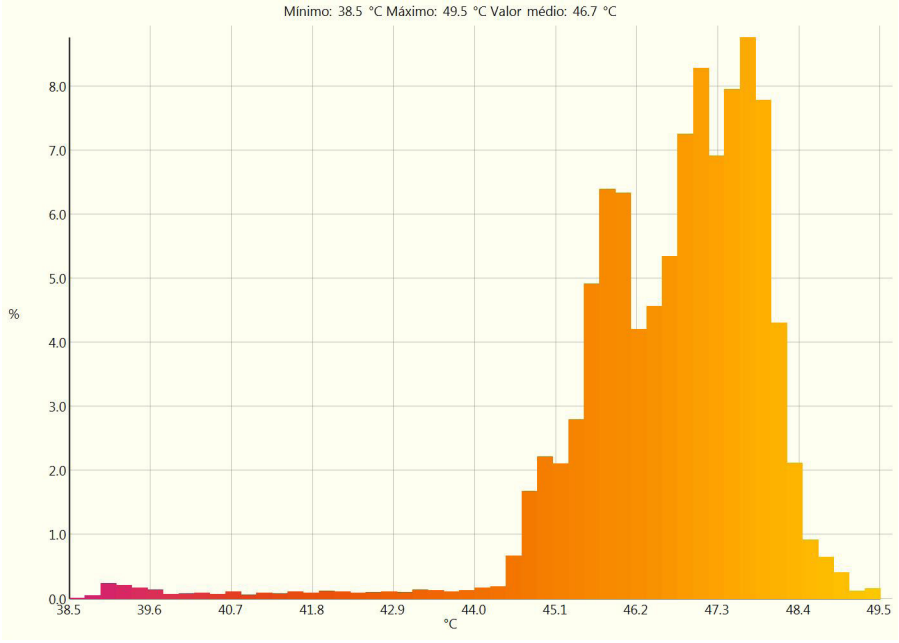
Telha 3 - 24 meses



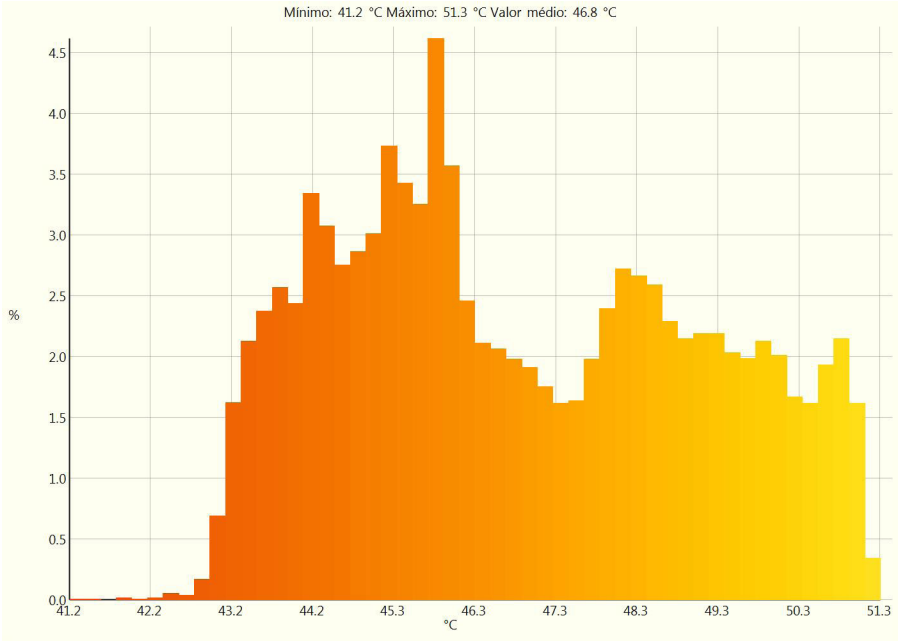
Telha 4 - 24 meses



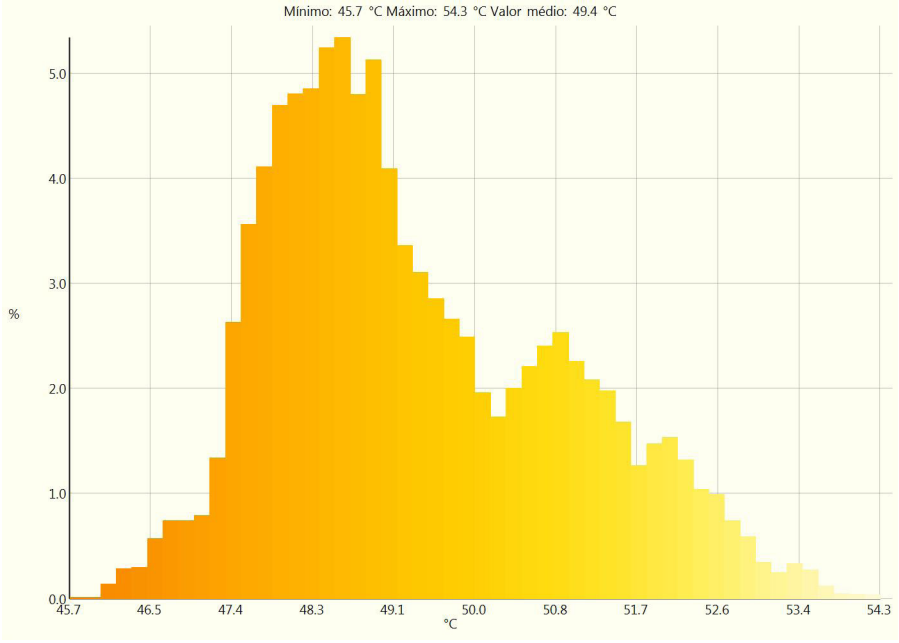
Telha 5 - 24 meses



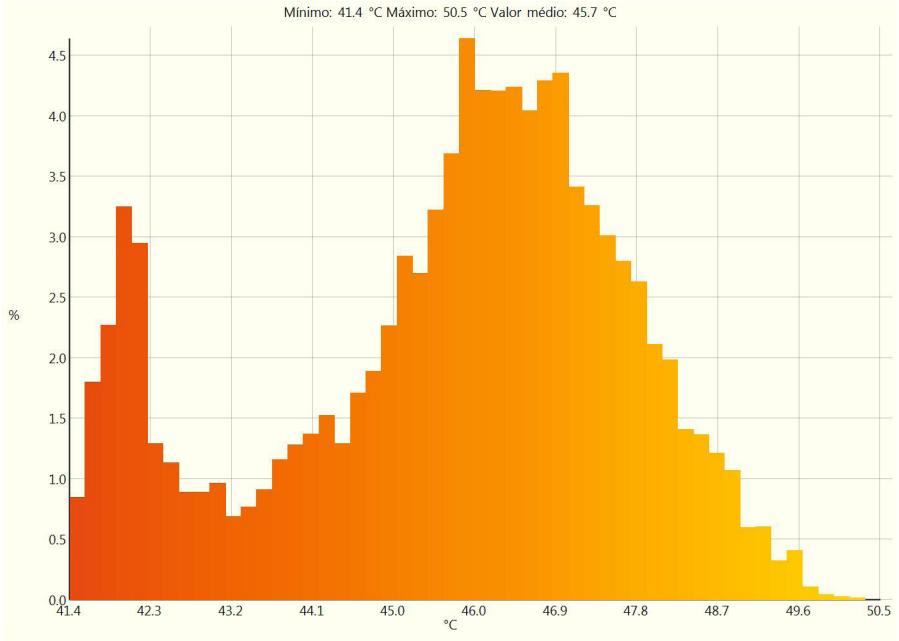
Telha 6 - 24 meses



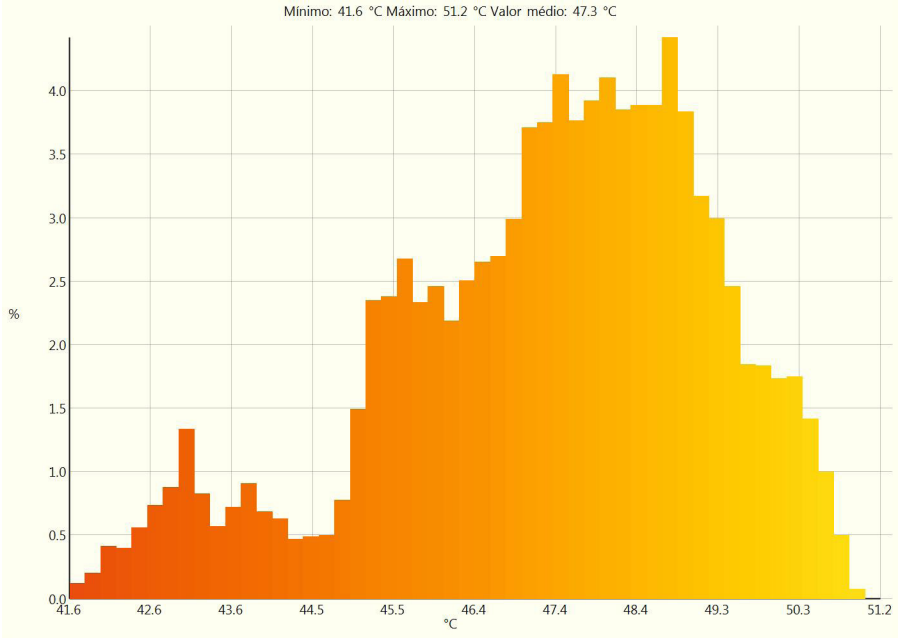
Telha 7 - 24 meses



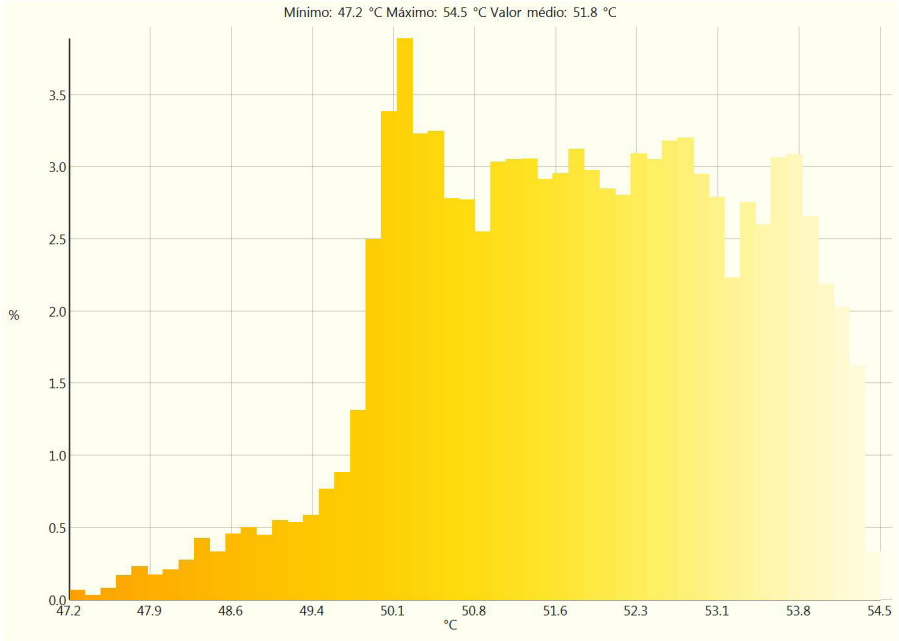
Telha 8 - 24 meses



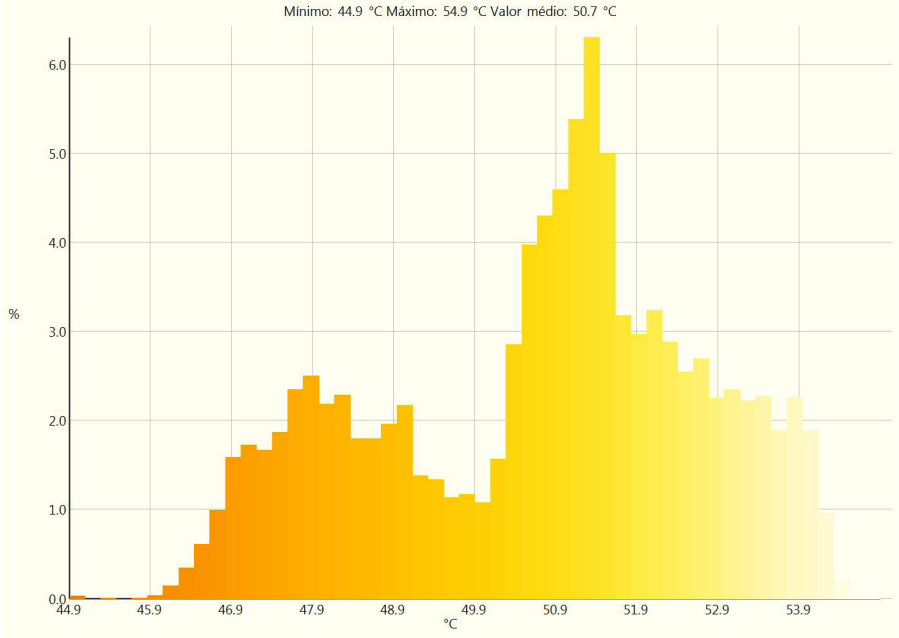
Telha 9 - 24 meses



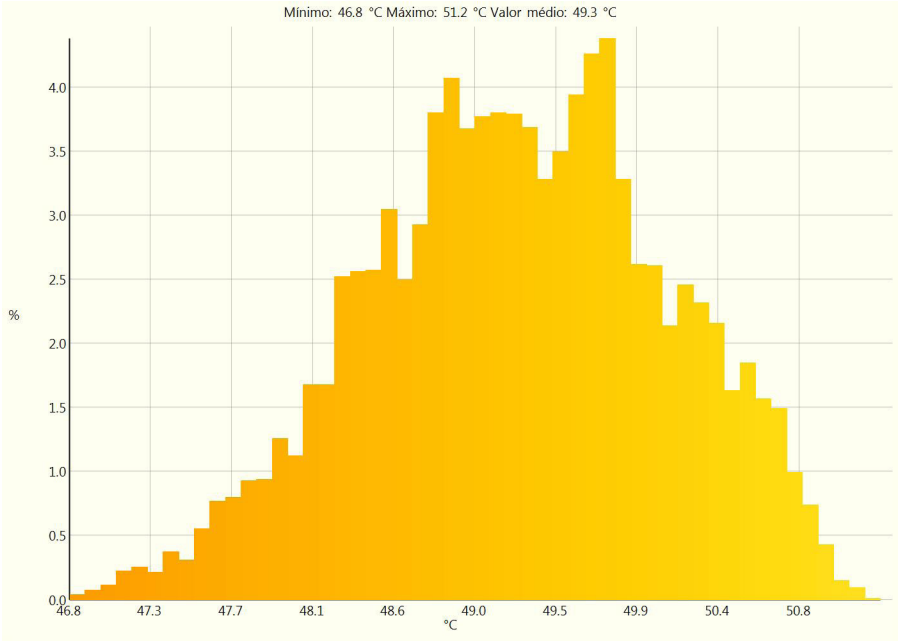
Telha 10 - 24 meses



Telha 11 - 24 meses

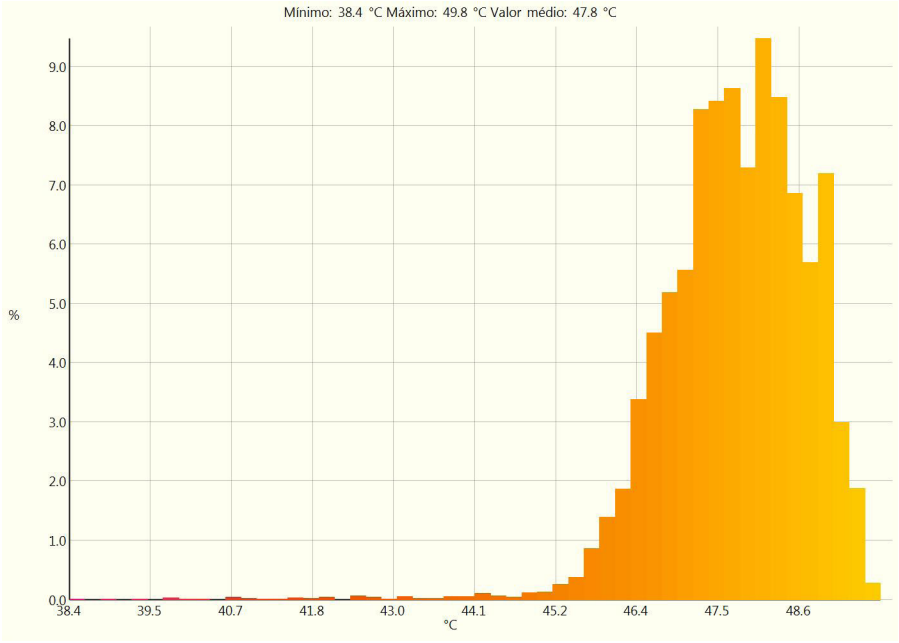


Telha 12 - 24 meses

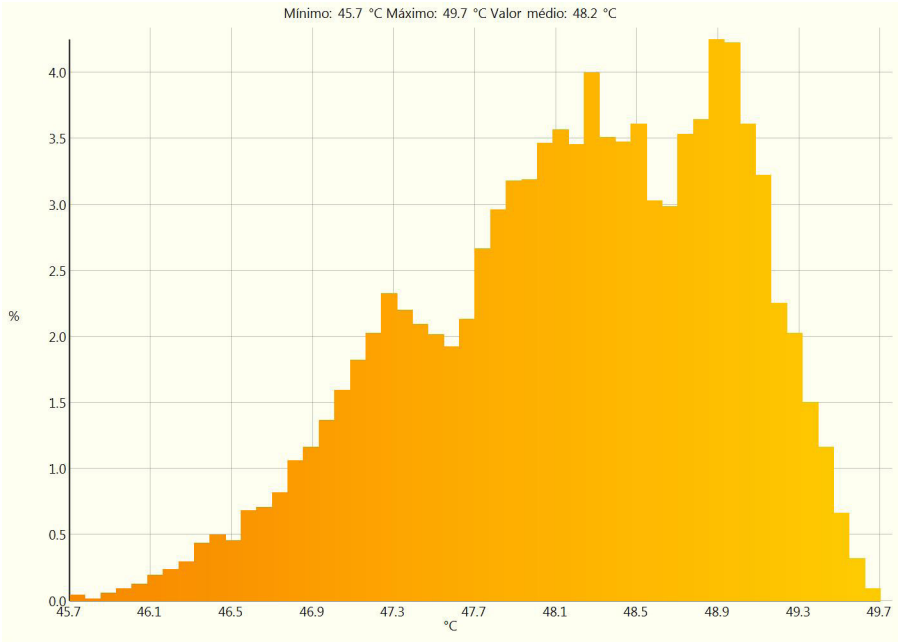


Telha 13 - 24 meses

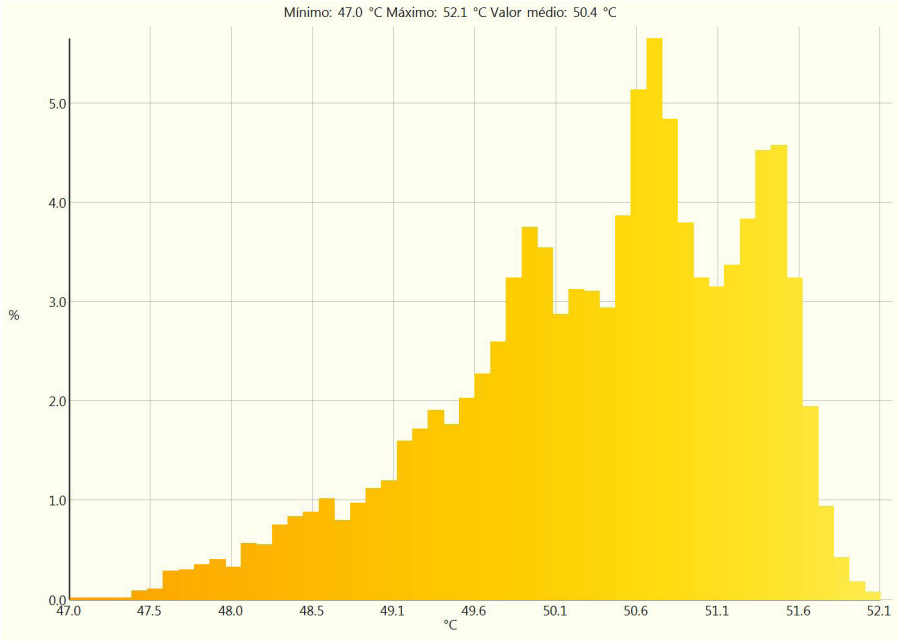
Telha 14 - 0 meses



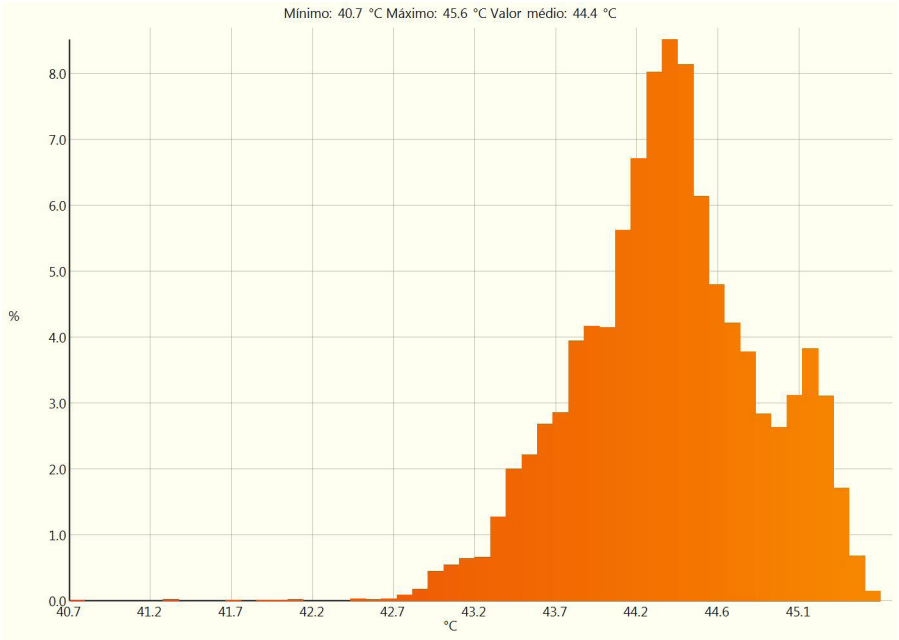
Telha 15 - 24 meses



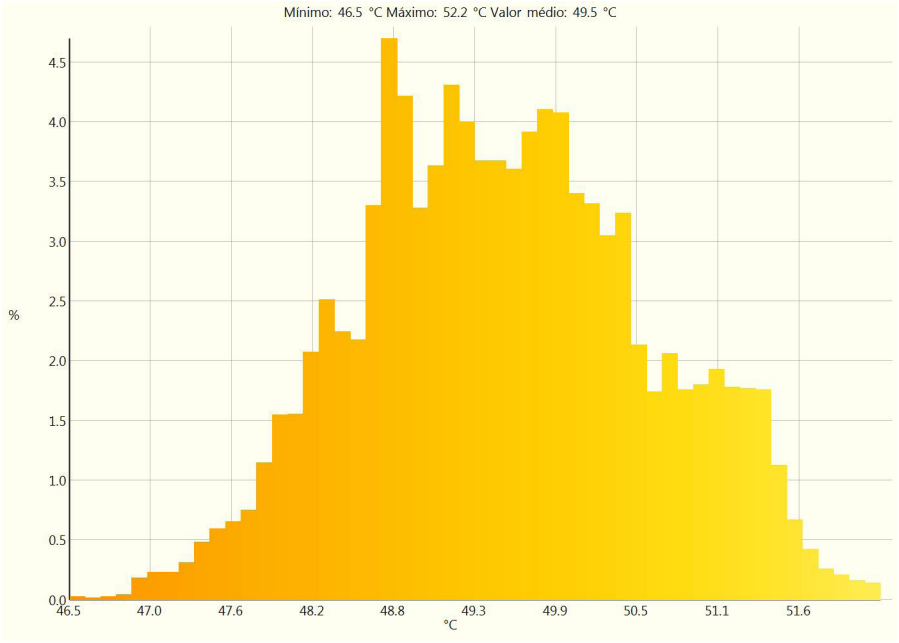
Telha 16 - 24 meses



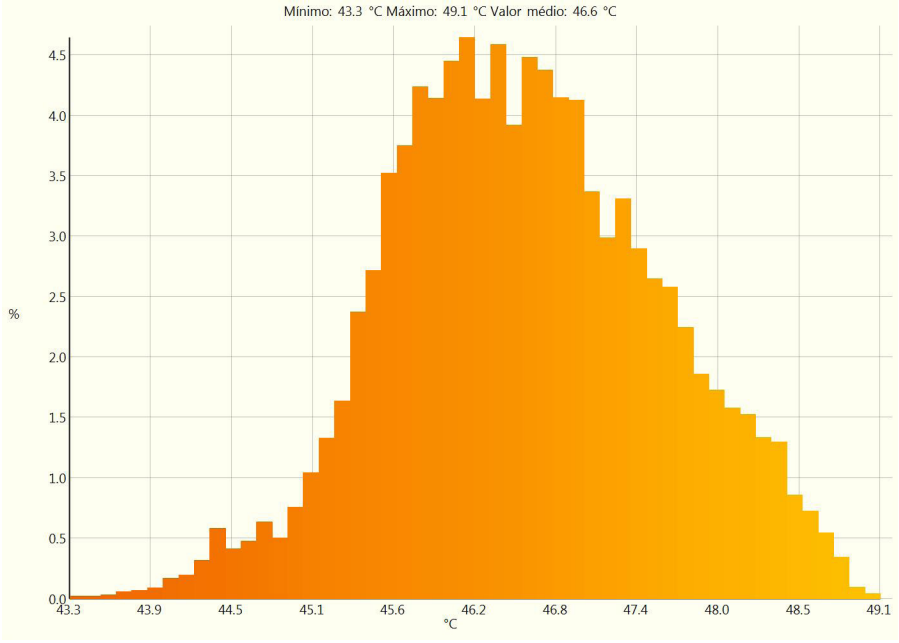
Telha 17 - 24 meses



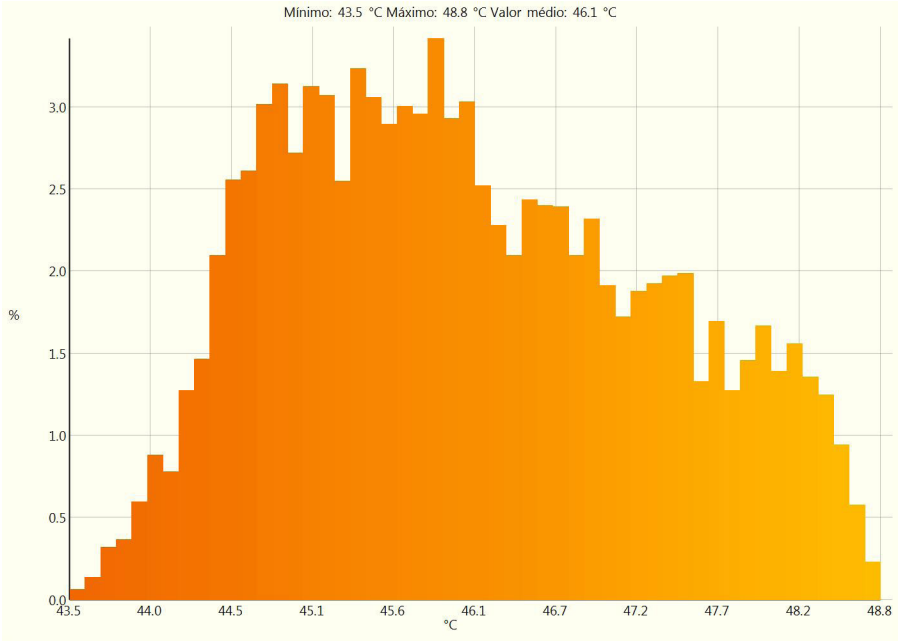
Telha 18 - 24 meses



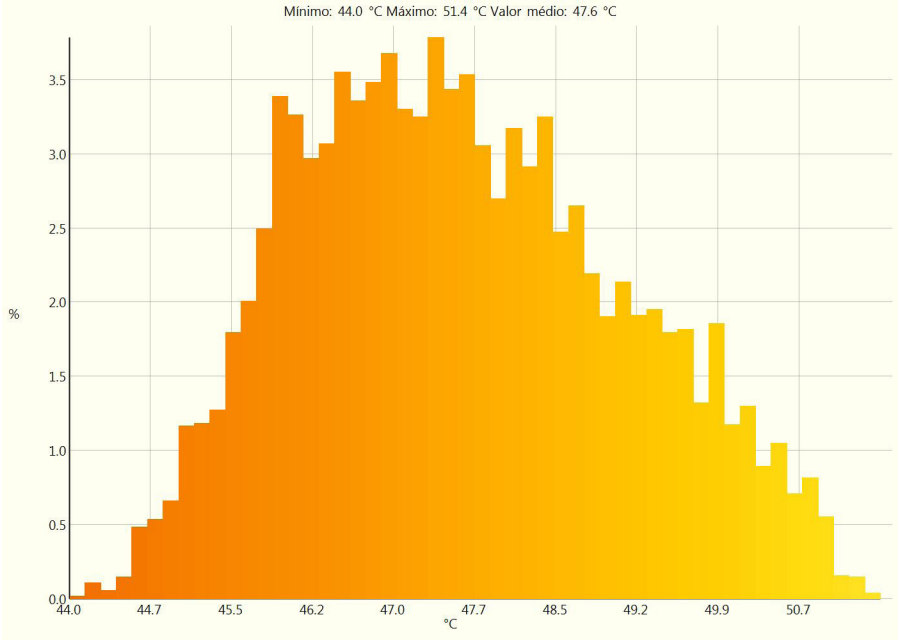
Telha 19 - 24 meses



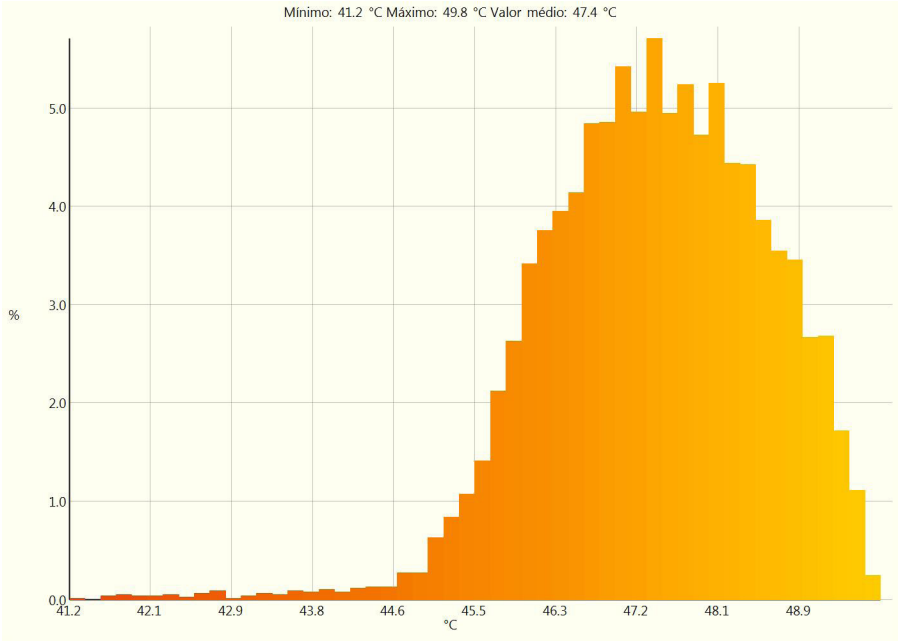
Telha 20 - 24 meses



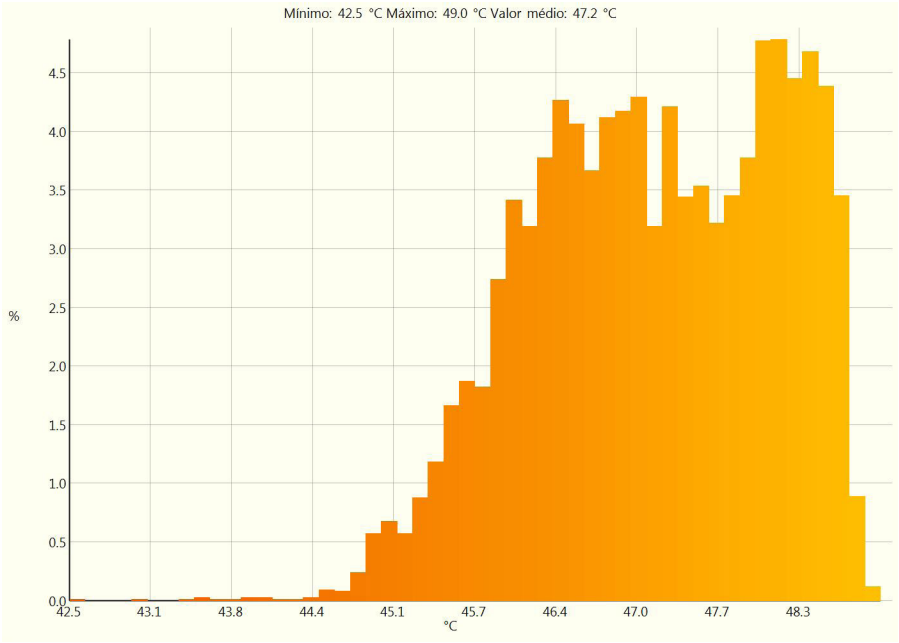
Telha 21 - 24 meses



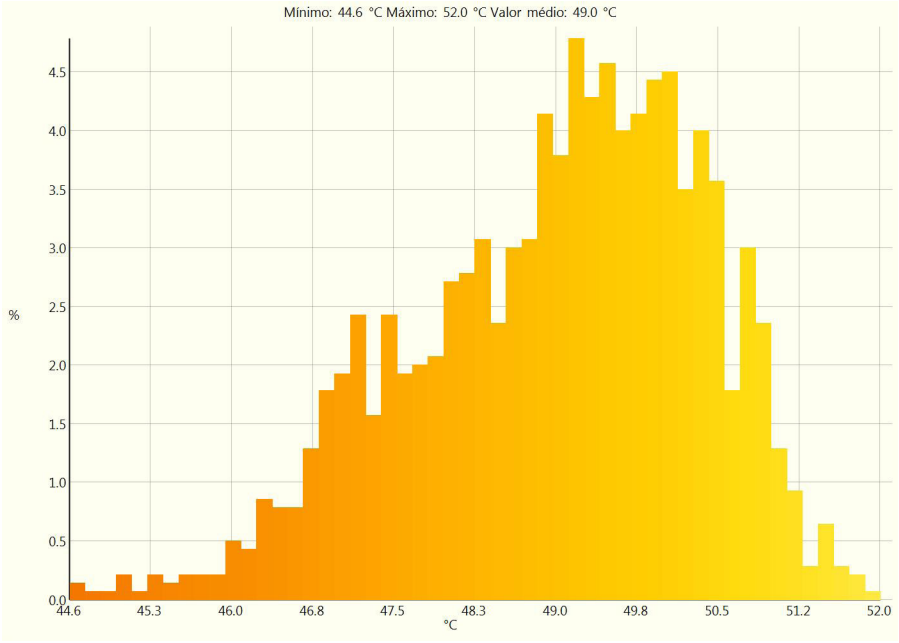
Telha 22 - 24 meses



Telha 23 - 24 meses



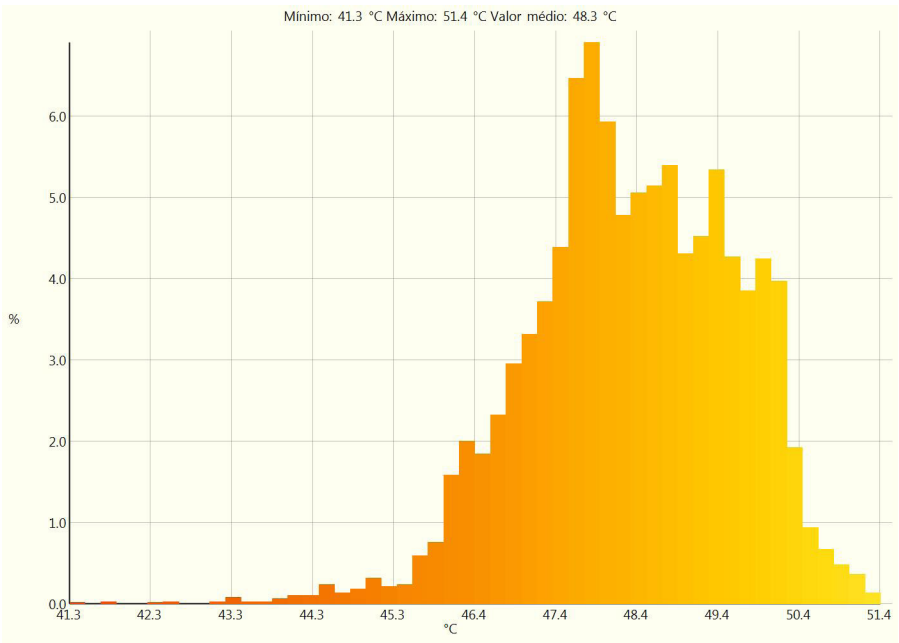
Telha 24 - 24 meses



Telha 25 - 24 meses

Telha 26 - 0 meses

Telha 27 - 0 meses



Telha 28 - 24 meses