

# Estação de envelhecimento natural para análise de degradação da absorptância de telhas e monitoramento de temperaturas superficiais

*Natural weathering rack to assess solar absorptance degradation of tiles and surface temperature measurements*

Ana Carolina Hidalgo Araújo   
Kelen Almeida Dornelles 

## Resumo

O uso de materiais de baixa absorptância solar no envelope construtivo tem se mostrado uma estratégia eficaz para otimizar o desempenho termoenergético de edificações em locais com alta incidência de radiação solar. No entanto, a capacidade refletiva dos revestimentos se modifica ao longo do tempo, devido à degradação pela ação das intempéries e à deposição de material particulado, com prejuízos ao desempenho térmico da vedação ao longo de sua vida útil. Assim, determinar os efeitos da degradação da absorptância solar tornou-se primordial para prever a capacidade de manutenção das propriedades refletivas de telhas e tintas com o tempo. Com o objetivo de contribuir com pesquisas nessa temática, este artigo apresenta o projeto, construção e operação de uma estação de envelhecimento natural para avaliação da degradação da absorptância solar de telhas e revestimentos expostos ao tempo, em conjunto com o monitoramento simultâneo e contínuo de temperaturas superficiais com termopares. Os resultados obtidos para 28 telhas expostas por 2 anos indicam forte correlação ( $R = 0,81$ ) entre as temperaturas superficiais e a absorptância solar ao longo do tempo, assim como o potencial de uso da estação de envelhecimento natural para análise conjunta da degradação da absorptância e o desempenho térmico dos revestimentos.

**Palavras-chave:** Absorptância solar. Degradação. Envelhecimento natural. Telha.

## Abstract

*The use of materials with low solar absorptance on the building envelope has shown to be an effective strategy to optimise the thermal and energy performance of buildings located in climates with incidence of high solar energy. However, the ability of coatings to reflect solar energy changes over time, mainly due to degradation caused by natural weathering and dust or soot deposition, leading to loss of building thermal performance. Therefore, assessing the effects of solar absorptance degradation is crucial to predict the ability to maintain the reflective properties of coatings over time. With the aim of contributing with research on this subject, this paper presents the design, construction, and operation of a natural aging rack to evaluate tiles and coatings exposed to natural weathering conditions, with simultaneous and continuous surface temperature measurements with thermocouples. The results obtained for 28 tiles exposed for 2 years indicate a strong correlation ( $R^2 = 0,81$ ) between surface temperatures and solar absorptance over time, as well as the usability of the natural weathering rack to assess solar absorptance degradation of tiles and surface temperature measurements.*

**Keywords:** Solar absorptance. Degradation. Natural wathering. Tile.

<sup>1</sup>Ana Carolina Hidalgo Araújo  
<sup>1</sup>Universidade de São Paulo  
São Carlos - SP - Brasil

<sup>2</sup>Kelen Almeida Dornelles  
<sup>2</sup>Universidade de São Paulo  
São Carlos - SP - Brasil

Recebido em 26/05/21  
Aceito em 07/08/21

## Introdução

O crescente número de edificações e superfícies pavimentadas nas cidades, juntamente com a falta de arborização nessas áreas, promove maior absorção da radiação solar por superfícies urbanas, aquecendo-as significativamente e contribuindo para a formação do fenômeno chamado ilhas de calor urbanas (ICU) (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARKESSI, 2011; ROMERO *et al.*, 2019). Uma das principais características desse fenômeno é a elevação das temperaturas do ar em algumas áreas da cidade em relação ao ambiente rural em seu entorno. Esse fenômeno pode ser mais intenso em cidades de clima quente, como aquelas situadas entre as latitudes 15° Norte e 15° Sul, por exemplo, onde a radiação solar é um fator relevante para os ganhos de calor no ambiente construído (JAYASINGHE; ATTALAGE; JAYAWARDENA, 2003).

No Brasil, a radiação solar é um dos maiores contribuintes para as cargas térmicas dos edifícios. Segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), parte significativa do país é caracterizada por condições climáticas quentes, com níveis de irradiância anual bastante elevados (PEREIRA *et al.*, 2017). Nesse contexto, a energia solar absorvida pelos revestimentos no ambiente construído tem efeito direto sobre suas temperaturas superficiais, atingindo vários graus acima da temperatura do ar, o que impacta no aumento da transmissão de calor para o interior dos edifícios (JO *et al.*, 2010; UNITED..., 2007). Em consequência, as condições de conforto térmico são prejudicadas em edificações não condicionadas, assim como o consumo de energia para sistemas de refrigeração artificial aumenta de forma significativa (SYNNEFA; SANTAMOURIS; AKBARI, 2007).

Dados do Balanço Energético Nacional de 2020 (ano-base 2019) demonstram que as edificações no Brasil já são responsáveis por 52% do consumo de energia elétrica, sendo 26,1% para o setor residencial e 25,9% para o setor não residencial. O relatório destaca ainda que a maior parte desse consumo está relacionada ao funcionamento de sistemas artificiais de climatização e iluminação (EMPRESA..., 2020). Ascione (2017) afirma que o aumento significativo do consumo de energia nas últimas décadas para esses sistemas é consequência do sobreaquecimento do ambiente construído relacionado, principalmente, às mudanças climáticas e ao desenvolvimento urbano em escala global. Estratégias de projeto como a seleção de materiais, a orientação solar, a configuração de aberturas, entre outras, podem contribuir para a redução da necessidade de energia para climatização artificial em edificações, assim como para a melhora das condições climáticas urbanas em escala local.

O aumento do consumo de energia para refrigeração em edifícios e o efeito crescente do fenômeno das ICU têm influenciado a necessidade cada vez maior da avaliação de desempenho térmico de revestimentos para o ambiente construído, capazes de diminuir os ganhos de calor por essas superfícies. No caso específico de regiões ou países que apresentam características climáticas majoritariamente quentes, com alta incidência de radiação solar na maior parte do ano, como o caso do Brasil, o controle dos ganhos térmicos em edifícios através da envolvente exposta à radiação solar direta é primordial. Esse controle é possível de várias formas, sendo uma delas diminuir a absorção da radiação solar direta de paredes e coberturas mediante o uso de revestimentos de baixa absorvância solar, ou seja, que apresentem alta capacidade de refletir a radiação incidente sobre a superfície (PISELLO *et al.*, 2016; ROSADO; LEVINSON, 2019).

A absorvância solar do envelope construtivo é determinante sobre a influência da radiação solar nas edificações, uma vez que indica o quanto de energia solar é absorvida pelo envelope, com efeitos diretos sobre as temperaturas internas e os ganhos de calor dos edifícios, e o total de radiação solar refletida sem efeito sobre o desempenho térmico do edifício. Além disso, os ganhos de calor solar através do envelope construtivo influenciam diretamente as condições de conforto térmico no interior das edificações e, conseqüentemente, a necessidade de energia com sistemas de refrigeração artificial, principalmente em edifícios de baixa inércia térmica ou sem isolamento (GIVONI, 1998).

No entanto, o envelope dos edifícios em áreas urbanas está sujeito à degradação pela exposição ao intemperismo natural, assim como à deposição de material particulado presente no ar, com efeitos diretos sobre a absorvância solar dessas superfícies (PAOLINI *et al.*, 2014). Resultados de diversas pesquisas têm demonstrado que o envelhecimento natural do envelope construtivo aumenta a absorvância solar dessas superfícies em relação a suas absorvâncias originais (FERRARI *et al.*, 2017; PEREIRA, 2014; TSOKA *et al.*, 2018). Para alguns tipos de revestimentos, Tsoka *et al.* (2018) comprovaram redução da refletância em até 40% como consequência do intemperismo e do envelhecimento natural das amostras. Essas alterações ocorrem principalmente nos casos de materiais com baixa absorvância solar inicial (SLEIMAN *et al.*, 2011, 2015) e em amostras cujos acabamentos superficiais sejam tintas acrílicas (REVEL *et al.*, 2013). Nesse contexto, a durabilidade dos revestimentos do envelope construtivo tornou-se um fator de importância

fundamental para a manutenção de sua capacidade refletiva ao longo do tempo, de tal forma que seu desempenho seja adequado para minimizar os ganhos de calor solar da edificação pelo maior tempo possível (AKBARI *et al.*, 2005).

Bretz e Akbari (1997) identificaram redução média de 20% na refletância solar de 26 diferentes coberturas de edifícios durante o primeiro ano de exposição a intempéries em diversas regiões dos Estados Unidos. Alchapar e Correa (2016) avaliaram a influência do envelhecimento natural sobre o desempenho térmico de 19 telhas e tintas para cobertura de edifícios na cidade de Mendoza, Argentina. Os resultados indicaram que todos os materiais apresentaram redução da capacidade refletiva após 3 anos de exposição ao intemperismo natural. Esse período específico de 36 meses de intemperismo para avaliação baseia-se 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 3 anos de exposição natural (SLEIMAN *et al.*, 2011).

Em pesquisa realizada na Itália, De Masi, Ruggiero e Vanoli (2018) observaram redução da refletância solar de coberturas brancas de 0,19 absoluto (0,67 para 0,48) após 1 ano de exposição na cidade de Benevento, em condições climáticas mediterrâneas. Em um estudo realizado por Mastrapostoli *et al.* (2016), foi estimada redução de 72% no consumo de energia com refrigeração para um edifício localizado em Atenas, Grécia, após a pintura da cobertura com tinta refletiva branca, quando comparada com a mesma cobertura envelhecida após 4 anos, a qual apresentou 25% de redução na refletância solar. Em outras palavras, o envelhecimento natural dos materiais do envelope construtivo pode aumentar consideravelmente a energia térmica absorvida por paredes e coberturas em decorrência, principalmente, do escurecimento de suas superfícies (ALCHAPAR; CORREA; CANTÓN, 2014). O conhecimento, portanto, do comportamento dos revestimentos ao longo do tempo quando expostos ao intemperismo natural tornou-se fundamental para o projeto de edifícios com adequado desempenho termoenergético. Soma-se a esse fator a necessidade de desenvolvimento de novos materiais que mantenham seu alto potencial de reflexão da radiação solar quando expostos a intempéries, o que poderia ser combinado com a capacidade de autolimpeza desses revestimentos (PAOLINI *et al.*, 2014).

Diferentemente do que ocorre no Brasil, nos cenários norte-americano e europeu a avaliação do envelhecimento de materiais para cobertura com alta refletância solar e emitância térmica (chamados também de materiais frios, ou “*cool materials*”) é um tema recorrente desde a década de 1990 (ANDERSON, 1992; BYERLEY; CHRISTAN, 1994; BRETZ; AKBARI, 1997) e tem se intensificado nos últimos anos. No Brasil foi recentemente publicada emenda à norma de desempenho de edifícios NBR 15575-1 (ABNT, 2021), a qual recomenda a observação do efeito eventual da degradação dos revestimentos de paredes e coberturas sobre os valores de absortância solar durante a análise de desempenho térmico dos edifícios. Essa recomendação em caráter normativo, até então inexistente em território nacional, tem como objetivo principal considerar o comportamento da unidade habitacional (UH) ao longo de sua vida útil (ABNT, 2021). Para isso, a emenda à NBR 15575-1 (ABNT, 2021) apresenta sugestões para a análise da degradação, as quais incluem:

- (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.

Assim, com o objetivo de auxiliar pesquisadores em estudos do desempenho de revestimentos ao longo do tempo, este artigo apresenta o projeto de uma estação de envelhecimento natural baseada nos sistemas norte-americanos denominados *weathering racks* para avaliação dos efeitos da degradação sobre a absortância solar de revestimentos. Complementarmente, esse projeto inclui a possibilidade de monitoramento contínuo das temperaturas superficiais de telhas e revestimentos expostos ao tempo, sendo uma inovação em relação às estações de envelhecimento natural comumente utilizadas. A estação de envelhecimento apresentada neste trabalho se encontra em operação desde julho de 2019, e os resultados iniciais do estudo de degradação da absortância solar para telhas são apresentados.

## Estações de envelhecimento natural para materiais de construção

O principal objetivo da avaliação do envelhecimento natural (ou degradação) de revestimentos é estudar como as diferentes propriedades dos materiais que os compõem respondem à exposição aos agentes presentes no ambiente externo ao longo do tempo (WYPYCH, 2013). Para isso, alguns fatores precisam ser

levados em consideração, entre eles o local de exposição e as condições climáticas características, a duração do tempo de exposição, as características dos produtos que serão avaliados, o tipo de estrutura e sua configuração que servirá para a exposição das amostras, de tal forma que o sistema permita replicar o mais próximo possível a maneira com que o produto será utilizado em situação real.

Para a seleção do local de exposição aos agentes externos, a variabilidade das condições de exposição dos produtos precisa ser compreendida, como aquelas oriundas do ciclo ao longo do dia, as variações nas estações do ano, assim como as diferenças climáticas ano a ano. Além disso, cada local de exposição apresenta uma combinação diferente de fatores de degradação que precisam ser considerados. Regiões desérticas, regiões de clima tropical, regiões litorâneas e zonas industriais apresentam características atmosféricas muito específicas, e, segundo Wypych (2013), diferentes mecanismos de degradação estão em operação em cada um desses locais, como radiação ultravioleta, temperatura, umidade relativa, pluviosidade e concentração de poluentes.

Nesse contexto, o intemperismo (do inglês, *weathering*), ou envelhecimento, se relaciona com a exposição de materiais ao ambiente natural ou a condições artificiais de envelhecimento acelerado em câmaras climáticas que simulam os parâmetros externos que contribuem para a degradação (JACQUES, 2000). Segundo Santamouris, Synnefa e Karlessi (2011), a degradação dos materiais é primariamente induzida pela ação conjunta da radiação, do calor e da umidade. A radiação solar que atinge a superfície terrestre varia em intensidade, distribuição de energia espectral, com as estações do ano, localização e de acordo com os agentes atmosféricos presentes no local, como aerossóis e poluentes. Os comprimentos de onda mais curtos de radiação solar (UV), que apresentam maior concentração energética, são absorvidos pela maioria dos materiais poliméricos, com forte potencial para quebra das ligações químicas. O aumento na temperatura resultante da exposição à radiação solar também pode afetar diretamente a degradação dos materiais. Esse efeito depende diretamente da fonte de calor e das propriedades características das amostras avaliadas, como a refletância, a absorvância, a emitância e a condutividade térmica. Além disso, as variações na temperatura das amostras também causam tensões internas devido às expansões térmicas diferenciais. Já a absorção de vapor de água em um material provoca expansão volumétrica e tensões mecânicas, que são potencializadas quando ciclos úmido-seco ocorrem com frequência (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011; WYPYCH, 2013).

De acordo com Jacques (2000) e Berdahl *et al.* (2008), diversos outros fatores podem influenciar a durabilidade de um material, principalmente aqueles utilizados no envelope construtivo. Em telhados, por exemplo, a ação do vento induz a geração de forças que podem causar fadiga, fissura ou quebra de telhas. Os gases atmosféricos e poluentes transportados às superfícies por deposição seca ou úmida podem interagir com o material e provocar oxidação ou corrosão da superfície. Além disso, o crescimento biológico de fungos, algas, bactérias e outros microrganismos é comum em materiais de construção e telhas, dependendo das condições ambientais e do tempo de exposição (SHIRAKAWA *et al.*, 2020).

Para o adequado estudo da degradação dos materiais de construção existem procedimentos normatizados para a realização de testes de envelhecimento, os quais podem ser conduzidos tanto em ambiente externo, sob condições naturais de exposição, como em câmaras climáticas de envelhecimento acelerado. Para os dois casos existem diversas variáveis que precisam ser determinadas e levadas em consideração. Especificamente, as estações de envelhecimento natural 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 planejarem 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. Finalmente, o período de exposição e a duração do teste devem ser determinados em função dos objetivos do experimento e dos parâmetros a serem medidos (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011).

A norma internacional *G7/G7M Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials* (AMERICAN..., 2013) apresenta os procedimentos a serem adotados ao se realizarem testes de envelhecimento natural em ambiente externo de materiais não metálicos, grupo ao qual pertence a maior parte dos revestimentos do envelope construtivo. Na norma são apresentadas recomendações sobre:

- (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.

Essas recomendações são variáveis e dependerão principalmente do tipo de material ou revestimento que será estudado, assim como das propriedades dos materiais em cujo efeito da degradação ao longo do tempo se pretende avaliar. Para o caso específico da estação de envelhecimento apresentada neste artigo foram seguidas as recomendações da norma G7/G7M (AMERICAN..., 2013), assim como aquelas presentes em diversas referências sobre construção de estações de envelhecimento natural para estudos de degradação de revestimentos.

## Materiais e métodos

A avaliação do envelhecimento natural de telhas deve simular a degradação que ocorre naturalmente ante as intempéries. Para isso, foi construída uma estação de envelhecimento natural com base em referências internacionais, como os modelos apresentados pela G7/G7M (AMERICAN..., 2013), pelo *Weathering Testing Guide Book* (ATLAS..., 2001), por Wypych (2013) e pela Q-LAB Corporation (2006). Tal estação de envelhecimento permite a exposição das amostras de acordo com os padrões de angulações, no caso de telhas, recomendados pelos fabricantes. Além disso, tanto as amostras quanto o local de exposição devem ser preservados para que não alterem ou invalidem o processo analisado (WYPYCH, 2013).

Para a validação da estação de envelhecimento desenvolvida foi observado o envelhecimento de diferentes tipos de telhas ao longo de 24 meses de exposição natural. Cada telha foi subdividida em cinco partes, uma maior – para monitoramento da temperatura – e quatro menores – para medições em laboratório. Ao longo de todo o período, as temperaturas superficiais inferiores dessas amostras foram monitoradas diariamente por um sistema de captação de dados, descrito na seção Monitoramento das Temperaturas Superficiais, abaixo. Já suas refletâncias foram medidas em laboratório, periodicamente, a fim de se avaliarem as alterações decorrentes do intemperismo (ver seção Medições de Absortância Solar).

Experimento similar foi desenvolvido por Pereira (2014), no entanto seu objetivo principal era a verificação da confiabilidade de dados obtidos por simulação computacional (PEREIRA, 2014). Em sua pesquisa, a autora selecionou cinco tipos de tintas e posicionou-as “[...] sobre uma plataforma horizontal com isolamento térmico (poliestireno expandido de 10 cm de espessura) na face interior [...]” (PEREIRA, 2014, p. 53). Essa plataforma foi instalada na cobertura de um dos edifícios da Universidade Federal de Santa Catarina, ficando exposta a intempéries por um período de 12 meses. Para cada tipo de tinta selecionada, a autora produziu quatro amostras de dois tamanhos distintos, sendo uma amostra de cada tamanho limpa uma vez por mês, e as demais sem nenhum tipo de limpeza. As amostras maiores foram utilizadas para monitorar as temperaturas superficiais das tintas com sensores do tipo termopar (tipo T). Já as amostras pequenas foram utilizadas para as medições de propriedades radiantes.

## Seleção das amostras de telhas

Para a primeira pesquisa realizada na estação de envelhecimento natural, ainda em andamento, foram selecionadas 28 diferentes telhas (Figura 1), divididas em três grupos de materiais: telhas cerâmicas esmaltadas (numeradas de 1 a 12), telhas de concreto (13 a 19) e telhas cerâmicas convencionais (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. As telhas de concreto apresentam colorações diferentes, cuja pigmentação é realizada diretamente na massa, tingindo toda telha, 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 se difere do processo das telhas esmaltadas porque sua aplicação ocorre por meio de uma camada de tinta em pó derivada de aquecimento em altas temperaturas. Já a telha cerâmica número 24 é a única amostra entre as cerâmicas que possui resina transparente aplicada em sua superfície para impermeabilização da peça.

Para as medidas de refletância espectral em espectrofotômetro, e posterior cálculo da absortância solar, é necessário que sejam extraídas amostras de pequenas dimensões de cada telha, pois o compartimento do equipamento apresenta restrições em relação ao tamanho máximo das amostras (ideal entre 5 cm e 10 cm de lado) e em relação a sua planicidade. Assim, a lateral das telhas foi cortada e foram extraídas amostras

menores em dimensões aproximadas entre 5 cm e 10 cm (Figura 2a), no total de quatro amostras para cada telha (para as medidas de 0, 3, 6 e 24 meses de exposição). A parte maior da telha, que não foi cortada em partes menores, também foi exposta na base de envelhecimento (Figura 2b). Nestas peças maiores, o processo de envelhecimento natural da telha ocorre de forma mais homogênea que nas amostras menores, aproximando-se ao que ocorre nas coberturas de edificações. Portanto, com esses elementos é possível avaliar o impacto da degradação da absorvância nas temperaturas superficiais das telhas, cujo espaço livre na superfície inferior acomoda melhor os termopares.

Figura 1 - Telhas selecionadas para exposição ao tempo



Figura 2 - Amostras extraídas das telhas para exposição ao tempo



(a) Amostras menores para laboratório

(b) Parte maior para termopares

## Projeto da estação de envelhecimento natural

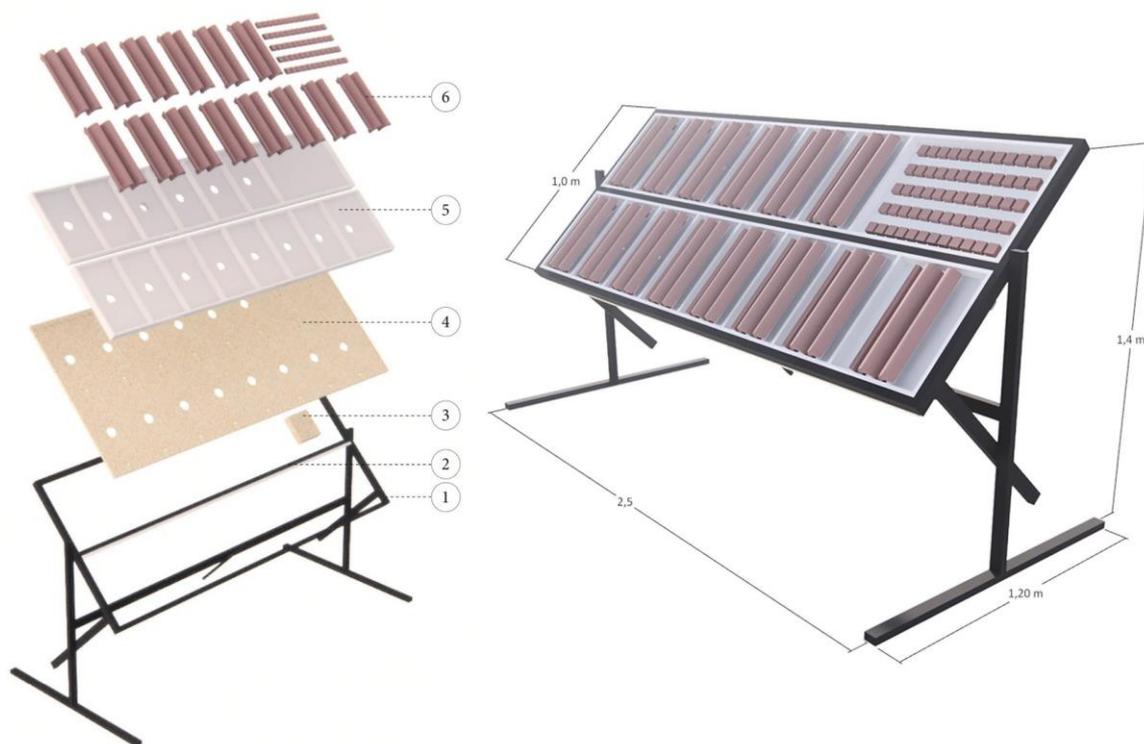
O projeto da estação foi desenvolvido com base nas recomendações da G7/G7M (AMERICAN..., 2013) e nas demais referências citadas. Uma das premissas no desenvolvimento do projeto da estação de envelhecimento era desenhar uma mesa adaptável a diferentes tipos de telhas, de tal forma que o sistema de travamento permitisse um giro de 0° a 80° da superfície de exposição, abrangendo todas as angulações possíveis determinadas pelos fabricantes. Com isso, a mesa desenvolvida poderia ser utilizada em diversas pesquisas, economizando tempo e material.

Assim como na pesquisa de Pereira (2014), discutido anteriormente, buscou-se também permitir o monitoramento simultâneo e contínuo das temperaturas superficiais inferiores das telhas, de tal forma que o desempenho térmico dos revestimentos pudesse ser avaliado ao longo do tempo, considerando-se as variações cíclicas de dia e noite e as diferentes épocas do ano. Esse é um diferencial importante da estação de envelhecimento proposta, em comparação com as estações comumente utilizadas em estudos de degradação dos materiais. Na Figura 3 é apresentada uma vista geral da estação projetada e uma vista explodida com detalhamento de todos os componentes e camadas que fazem parte da estrutura, conforme descrito no Quadro 1.

## Execução da estrutura da estação

Na Figura 4 é apresentado o passo a passo das etapas de execução da estação de envelhecimento natural, a qual foi inteiramente construída pelos técnicos do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP, em São Carlos. A materialidade do sistema consiste em uma estrutura de tubos de aço galvanizado, soldado e pintado (Figuras 4a a 4e), e placas de madeira do tipo OSB (Figura 4g), parafusadas no aço galvanizado, cuja função é vedar os vazios deixados pela estrutura metálica e servir de base de apoio para expor as amostras. A fim de garantir o isolamento térmico entre a estrutura metálica e as telhas – e entre telhas –, todo o suporte formado pelo aço galvanizado e pelo OSB foi forrado com placas de isopor, com espessura de 15 mm (Figura 4f), coladas com silicone. Após a montagem final da estrutura da mesa, recortes circulares (Figura 4h) foram realizados nas extremidades da mesa e nos centros de cada nicho que receberia determinada telha. Utilizando uma furadeira e uma serra-copo, tais aberturas foram feitas para escoar a água pluvial que poderia ficar acumulada nas arestas da estrutura metálica e permitir a passagem de toda a instalação prevista para realizar as medições desejadas (Figura 4i).

Figura 3 - Projeto da estação de envelhecimento



Quadro 1 - 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, 30x40 - 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 ( <i>Oriented Strand Board</i> )
4	Suporte	Apoiar as amostras a serem analisadas.	Chapa de OSB ( <i>Oriented Strand Board</i> )
5	Divisórias	Isolar as amostras de qualquer superfície que pudesse interferir no monitoramento das temperaturas.	Placas de isopor com espessura de 15 mm
6	Amostras	Objeto de análise.	Telhas de diferentes materiais e acabamentos

Essa estação de envelhecimento foi projetada não só com o objetivo de expor as amostras ao tempo, mas principalmente com o de acompanhar o comportamento da temperatura das superfícies inferiores das telhas, de forma contínua, ao longo de todo o experimento. O sistema de monitoramento de temperatura foi projetado a fim de proteger os termopares que ficariam conectados às telhas ao longo do tempo. Para isso, uma canaleta metálica – para organizar os termopares – e uma caixa para armazenamento desses fios foram instaladas na parte inferior da placa de OSB (Figura 4j). O contato do termopar com a superfície inferior da telha se dá através da passagem circular, conforme especificado anteriormente. Dessa forma, o sensor de medição das temperaturas superficiais ficou protegido das intempéries, evitando interferências na leitura dos dados.

Assim, a mesa foi projetada com os objetivos de analisar as alterações das propriedades ópticas das superfícies externas das telhas e de monitorar a temperatura nas superfícies inferiores. O primeiro objetivo é possibilitado por meio de amostras menores, expostas em uma das extremidades da mesa e fixadas com silicone na base de isopor. Essas telhas foram recortadas nas dimensões limitantes do equipamento de medição de refletância em laboratório. Já as telhas maiores, isoladas uma das outras com tiras de isopor, foram objeto de análise no experimento de monitoramento das temperaturas, possibilitado mediante a utilização dos termopares.

Após o processo de montagem do sistema (Figura 4), a estrutura foi alocada na Área I do câmpus (Figura 5), sem a presença de vegetação alta, que pudesse sombrear de forma significativa as amostras analisadas. Além disso, a proximidade a uma avenida de grande movimento e a consequente exposição das superfícies aos materiais particulados presentes no ar tornam a análise de envelhecimento das telhas ainda mais fiel à degradação ocorrida habitualmente nos sistemas de cobertura urbanos em cidades de médio porte, já que a maioria das áreas urbanas está sujeita à poluição atmosférica proveniente de veículos automotores, atividades industriais, entre outros. No entanto, é importante frisar que cada cidade possui especificidades relacionadas ao material particulado de seu território e, conseqüentemente, distintas características do ambiente atmosférico urbano, assim como da incidência de radiação solar global sobre as superfícies. Sendo assim, o modo como o envelhecimento ocorre em diferentes localidades pode influenciar substancialmente em casos comparativos extremos. Esse fator deve ser considerado nas análises dos resultados.

Após o transporte da estrutura montada para o local final da exposição, as amostras foram instaladas, conforme previsto em projeto, e a estação de envelhecimento começou a funcionar (Figura 6). As peças maiores, recortadas de modo a manter a curvatura da telha, receberam as instalações dos termopares para o monitoramento das temperaturas superficiais ao longo do tempo. Já as amostras menores não possuíam sistema de monitoramento de temperatura conectado a elas, pois seriam removidas para análises em laboratório das alterações das propriedades ópticas das telhas expostas. Em função da limitação de tamanho das amostras pelo espectrofotômetro, tais peças foram recortadas das telhas originais com o único intuito de mensurar a alteração da absorvância das superfícies através da retirada de uma amostra de cada telha periodicamente, totalizando 24 meses de experimento.

Figura 4 - Passo a passo da execução da estrutura da estação

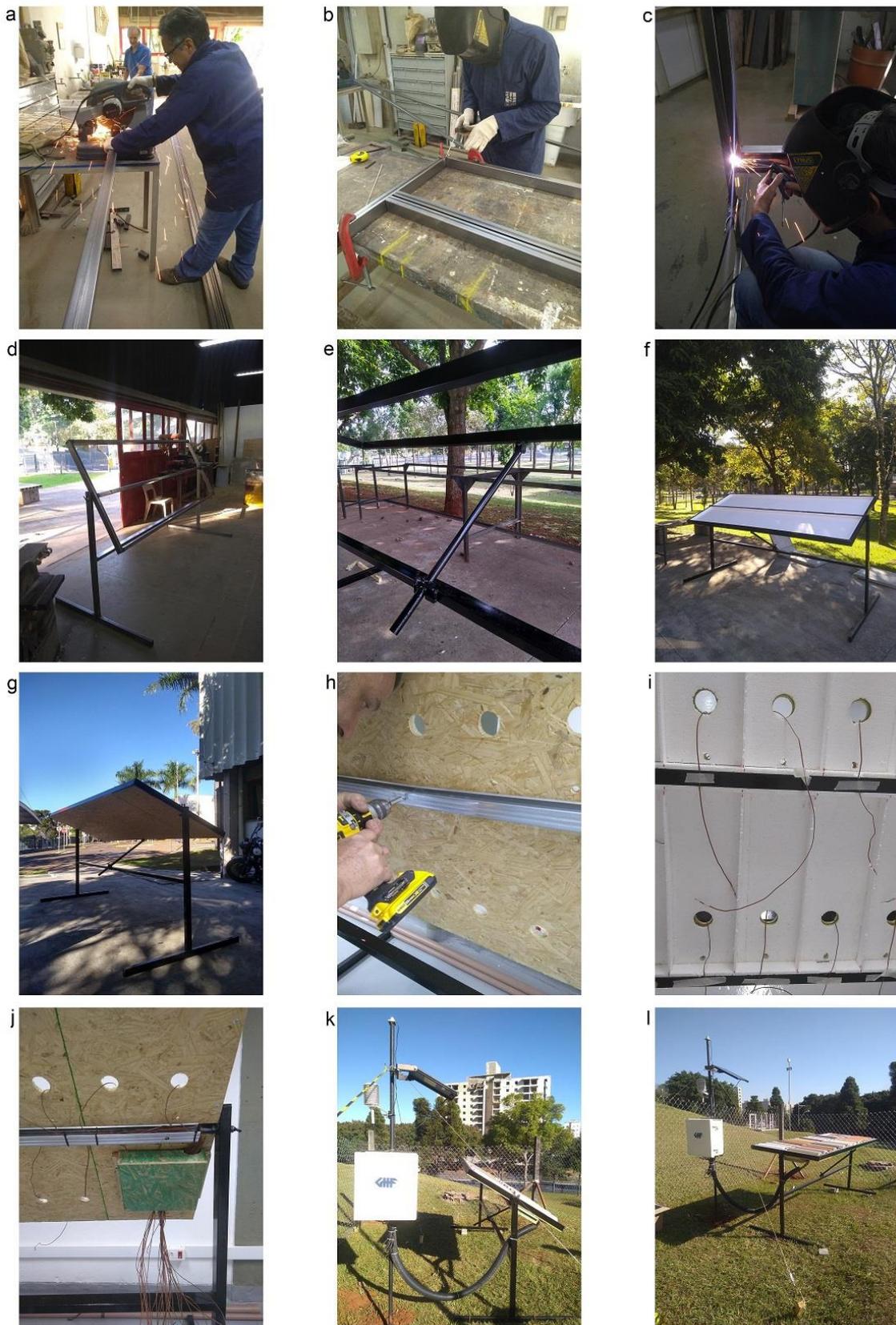


Figura 5 - Localização da estação de envelhecimento natural



Fonte: adaptado de Google Maps (2019).

Figura 6 - Estação de envelhecimento finalizada e em funcionamento



### Monitoramento das temperaturas superficiais

Com a finalidade de avaliar a influência do envelhecimento natural de telhas sobre suas absorções ao longo do tempo, e sua relação com os ganhos térmicos das coberturas em edificações, pode-se correlacionar a variação das temperaturas superficiais com a alteração da capacidade refletiva de cada telha. Foi então instalado um sistema de monitoramento contínuo das temperaturas superficiais das telhas expostas ao tempo (Figura 7a), para análise simultânea dos efeitos da degradação da absorção no desempenho térmico. O monitoramento das temperaturas superficiais foi realizado com sensores termopares do tipo T (Cobre-Constantan), aderidos às superfícies inferiores das telhas. A ligação do termopar com a telha foi feita com pasta térmica e fita adesiva metálica de baixa emissividade, a fim de minimizar interferências externas no monitoramento dos dados (Figura 7b).

Figura 7 - Sistema de ligação dos termopares nas telhas



(a) Sistema de aquisição dos dados



(b) Ligação do termopar do tipo T na telha

Simultaneamente, foi realizado o monitoramento das condições climáticas locais, como base de comparação para avaliação do comportamento das amostras selecionadas. Foram acoplados ao sistema de termopares equipamentos para medições complementares (Figura 8), sendo um piranômetro do tipo SP Lite (Kipp & Zonen) o responsável por medir a incidência de radiação solar global no local, e uma sonda HMP 35C (Vaisala) para medir a temperatura e a umidade relativa do ar. Ambos os equipamentos se conectam ao sistema de aquisição de dados (Figura 7a), onde estão conectados todos os termopares ligados às telhas expostas ao tempo.

O sistema de coleta dos dados é composto de uma bateria do tipo nobreak (12V, 7Ah), alimentada por um painel solar de 12 V (Figura 8), um *data logger* do tipo CR10X, responsável por coletar e armazenar os dados medidos, e dois multiplexadores, que aumentam as saídas do *data logger*, de forma a permitir a medição simultânea de todas as amostras. Esse sistema, programado no software PC 20 (Campbell), realiza todas as medições a cada minuto e, posteriormente, calcula a média dos valores obtidos a cada 30 min.

### Medições de absorvância solar

Foram realizadas medidas de reflexão espectral das amostras em espectrofotômetro com esfera integradora, para posterior cálculo da absorvância solar. Esse tipo de análise, de alta precisão, varre a região espectral relativa ao ultravioleta, visível e infravermelho, possibilitando escolher exatamente as regiões do espectro solar que interessam.

As medições de refletância espectral 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 9a), 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 9b), para as medições após 24 meses de exposição ao tempo. Ambos os equipamentos utilizam esfera integrada de 150 mm de diâmetro para detecção da refletância difusa. Para todas as medições, adotou-se o procedimento apresentado na E903 (AMERICAN..., 2020a) na faixa espectral de 300 nm a 2500 nm, com intervalos de 5 nm, e posterior ajuste ao espectro solar padrão apresentado na G173-13 (AMERICAN..., 2020b). A refletância solar ( $\rho_{solar}$ ) de cada telha é calculada mediante a integração das curvas de refletância espectral, e a absorvância solar ( $\alpha_{solar}$ ), a partir da Equação 1.

$$\alpha_{solar} = 1 - \rho_{solar} \quad \text{Eq. 1}$$

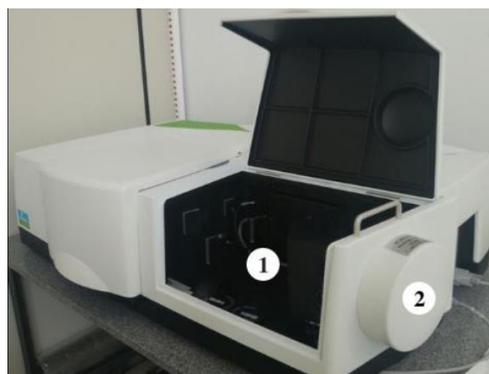
Figura 8 - Sistema de medição complementar e alimentação da estação de envelhecimento



Figura 9 - Espectrofotômetros utilizados nas medições de refletância espectral



(a) Varian CARY 5G (UFSCar)



(b) Perkin Elmer Lambda 1050 (UFSC)

Fonte: (b) Krelling *et al.* (2019).

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. Dessa forma, buscou-se uma alternativa de equipamento de mesmas características técnicas do 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.

### Efeitos da degradação da absorvância solar no desempenho térmico das telhas

O funcionamento da estação de envelhecimento se iniciou em 13 de julho de 2019. Desde então, o equipamento para coleta de dados realiza o monitoramento das temperaturas superficiais das telhas, para análise de sua variação ao longo do tempo. Além disso, as amostras menores de cada telha para avaliação da degradação da absorvância também têm estado expostas na estação desde o início do funcionamento do sistema de monitoramento das temperaturas. Para demonstrar a possibilidade de análise conjunta dos efeitos da degradação da absorvância solar sobre o desempenho térmico de telhas são apresentados dados

comparativos para quatro diferentes estágios de envelhecimento, ao longo de 24 meses de exposição das amostras. Os dados retratam as situações superficiais das telhas nos dias 14 de julho de 2019 (0m), 13 de outubro de 2019 (3m), 14 de janeiro de 2020 (6m) e 14 de julho de 2021 (24m). As telhas permanecerão na estação para obter resultados após 3 anos de exposição ao tempo, o que será alcançado em 14 de julho de 2022.

A emenda à NBR 15575-1 (ABNT, 2021) apresenta valores teóricos de absorvância à radiação solar obtidos a partir de uma equação empírica (Equação 2), supondo 3 anos de envelhecimento natural ( $\alpha_{t=3}$ ). Assim, os valores de absorvância solar das telhas avaliadas nesta pesquisa foram utilizados na Equação 2 para a estimativa da absorvância solar após 3 anos de exposição, sendo comparados com os valores medidos aos 24 meses.

$$\alpha_{t=3} = 0,07. (\alpha_{t=0})^2 + 0,59. \alpha_{t=0} + 0,27 \tag{Eq. 2}$$

Onde:

$\alpha_{t=3}$  é a absorvância à radiação solar da superfície externa após degradação de 3 anos;

(adimensional);

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

t é o tempo de exposição da superfície, expresso em anos.

## Resultados e discussão

As absorvâncias das telhas para os quatro estágios de exposição ao intemperismo natural (0m, 3m, 6m e 24m) são apresentadas na Figura 10 e na Tabela 1, assim como a diferença (%) na alteração da absorvância solar entre os meses 0m e 3m ( $\Delta_{3m-0m}$ ), 0m e 6m ( $\Delta_{6m-0m}$ ) e 0m e 24m ( $\Delta_{24m-0m}$ ).

Amostras das telhas números 14, 26 e 27 que seriam utilizadas para a medição de absorvância solar aos 24 meses de exposição foram danificadas na superfície e, por isso, excluídas dessa etapa de medição em laboratório. As medições de temperaturas dessas telhas continuaram normalmente, uma vez que as peças maiores não foram danificadas e serão utilizadas para a medição de absorvância aos 3 anos.

Figura 10 - Absorvância solar das telhas em quatro diferentes estágios de exposição ao tempo

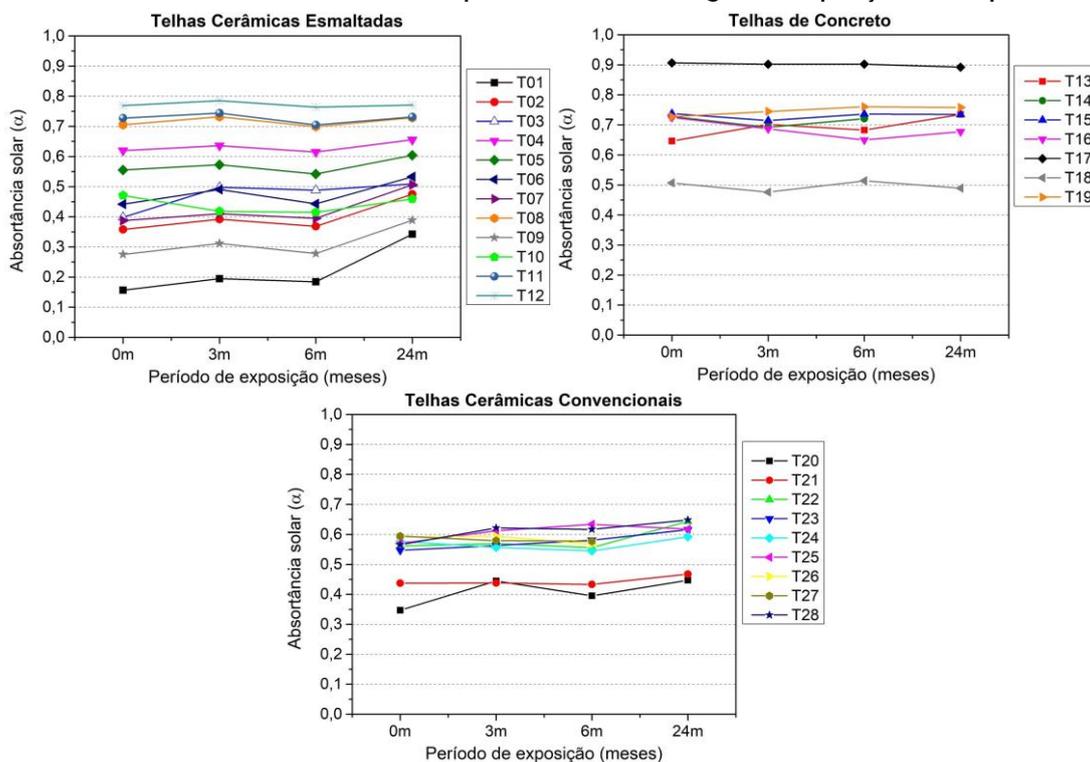


Tabela 1 - Absortância solar das telhas novas (0m), aos 3 meses, 6 meses e 24 meses de exposição, e diferenças (em %) na absortância após 3 meses, 6 meses e 24 meses

Telha	$\alpha_{\text{solar-0m}}$	$\alpha_{\text{solar-3m}}$	$\alpha_{\text{solar-6m}}$	$\alpha_{\text{solar-24m}}$	$\Delta_{3m-0m} (\%)$	$\Delta_{6m-0m} (\%)$	$\Delta_{24m-0m} (\%)$
1	0,16	0,19	0,18	0,34	24%	18%	118%
2	0,36	0,39	0,37	0,48	10%	3%	33%
3	0,40	0,50	0,49	0,51	25%	22%	28%
4	0,62	0,64	0,61	0,66	3%	-1%	6%
5	0,56	0,57	0,54	0,60	3%	-2%	9%
6	0,44	0,49	0,44	0,53	11%	0%	21%
7	0,39	0,41	0,39	0,51	6%	2%	31%
8	0,71	0,73	0,70	0,73	4%	-1%	3%
9	0,27	0,31	0,28	0,39	13%	1%	41%
10	0,47	0,42	0,41	0,46	-11%	-12%	-2%
11	0,73	0,74	0,70	0,73	2%	-3%	1%
12	0,77	0,79	0,76	0,77	2%	-1%	0%
13	0,65	0,70	0,68	0,74	9%	6%	14%
14	0,73	0,69	0,72	-	-5%	-1%	-
15	0,74	0,71	0,74	0,73	-3%	0%	0%
16	0,72	0,69	0,65	0,68	-5%	-10%	-7%
17	0,91	0,90	0,90	0,89	0%	-1%	-2%
18	0,51	0,48	0,51	0,49	-6%	1%	-3%
19	0,73	0,74	0,76	0,76	2%	4%	4%
20	0,35	0,44	0,39	0,45	28%	14%	29%
21	0,44	0,44	0,43	0,47	0%	-1%	7%
22	0,56	0,57	0,56	0,64	1%	-1%	15%
23	0,55	0,56	0,58	0,62	3%	6%	13%
24	0,58	0,56	0,55	0,59	-3%	-5%	3%
25	0,57	0,61	0,63	0,62	7%	11%	8%
26	0,59	0,59	0,57	-	0%	-4%	-
27	0,59	0,58	0,58	-	-3%	-3%	-
28	0,57	0,62	0,62	0,65	10%	9%	15%

Para a análise complementar dos resultados para os quatro diferentes estágios de exposição das amostras são apresentadas as curvas de refletância espectral para as telhas T01 (cerâmica esmaltada), T16 (concreto), T20 (cerâmica convencional colorida) e T28 (cerâmica natural) (Figura 11). Nos dados apresentados na Tabela 1 e nos gráficos da Figura 11 observou-se que nos primeiros 3 meses de exposição houve aumento da absortância solar para a maioria das telhas, cuja variação ficou entre 1% e 28% de acréscimo. Esse 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. Tal fato justifica o aumento da absortância solar nas telhas de coloração mais clara, principalmente, e a diminuição da absortância solar nas telhas de coloração mais escura, decorrentes majoritariamente da deposição desse material particulado na superfície das amostras. Esse 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), em que se observa aumento da absortância em revestimentos de cores claras e diminuição naqueles de cores mais escuras.

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 a recuperar os valores originais. Esse comportamento aos 6 meses provavelmente seja em decorrência da limpeza natural do material particulado acumulado na superfície, através do escoamento da água da chuva. Por fim, os resultados após 2 anos de exposição das telhas indicam que a maioria apresentou aumento da absortância ao final do período, tendo apenas 4 amostras apresentado redução da absortância solar em relação à original (T10, T16, T17 e T18), com redução mais significativa para a amostra T16 (-7%). As demais reduções de absortância foram pouco significativas (entre 2% e 3%). A amostra que apresentou maior efeito da degradação da absortância foi a telha cerâmica esmaltada de cor branca (T01), com aumento de 118% na absortância solar após 24 meses ( $\alpha_{t=0} = 0,16$  para  $\alpha_{t=24} = 0,34$ ).

Em etapas futuras da pesquisa serão obtidos dados de absorvância solar após 3 anos de exposição na estação de envelhecimento natural, conforme recomendação da NBR 15575-1 (ABNT, 2021). Para fins de análise comparativa entre dados medidos e estimados de degradação após 3 anos, os dados obtidos para as telhas quando novas (0m) foram utilizados para o cálculo da absorvância solar aos 36 meses, com base na Equação 2, conforme apresentado na NBR 15575-1 (ABNT, 2021). A Figura 12, 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 (coeficiente de determinação  $R = 0,97$ ), os quais demonstram tendência de degradação da absorvância das telhas após longo período de exposição a intempéries. Após 36 meses de exposição das amostras na estação de envelhecimento natural, os resultados medidos em laboratório serão comparados novamente com os estimados pela equação (ABNT, 2021).

Figura 11 - Curvas de refletância espectral das telhas T01-cerâmica esmaltada, T16-concreto, T20-cerâmica colorida e T28-cerâmica natural aos 0, 3, 6 e 24 meses de exposição

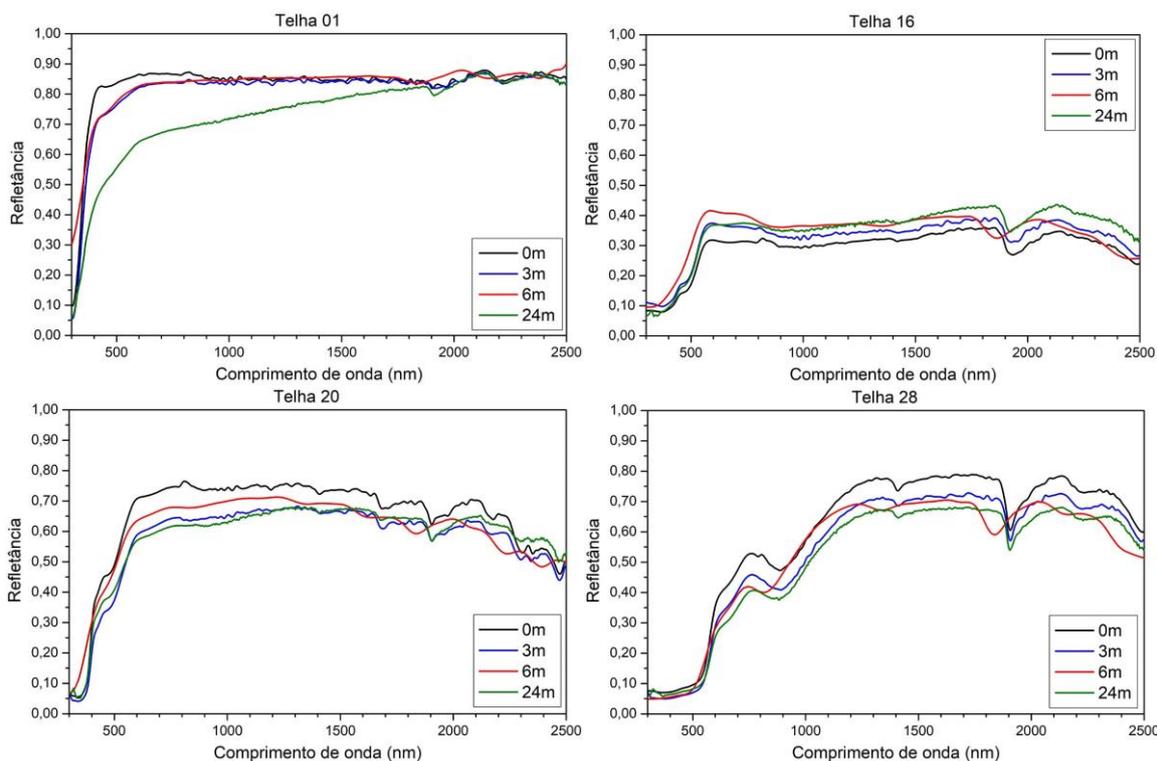
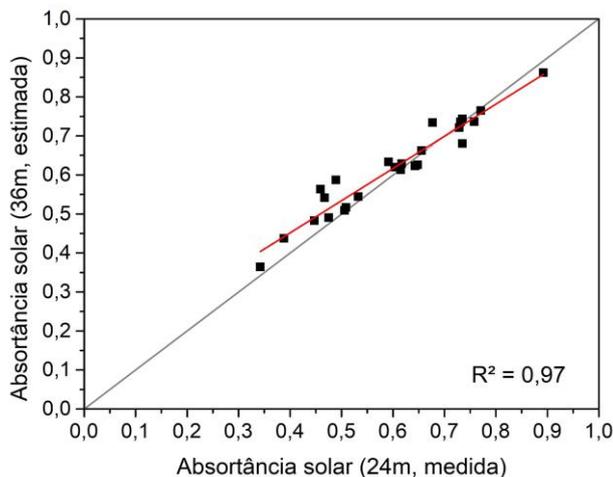
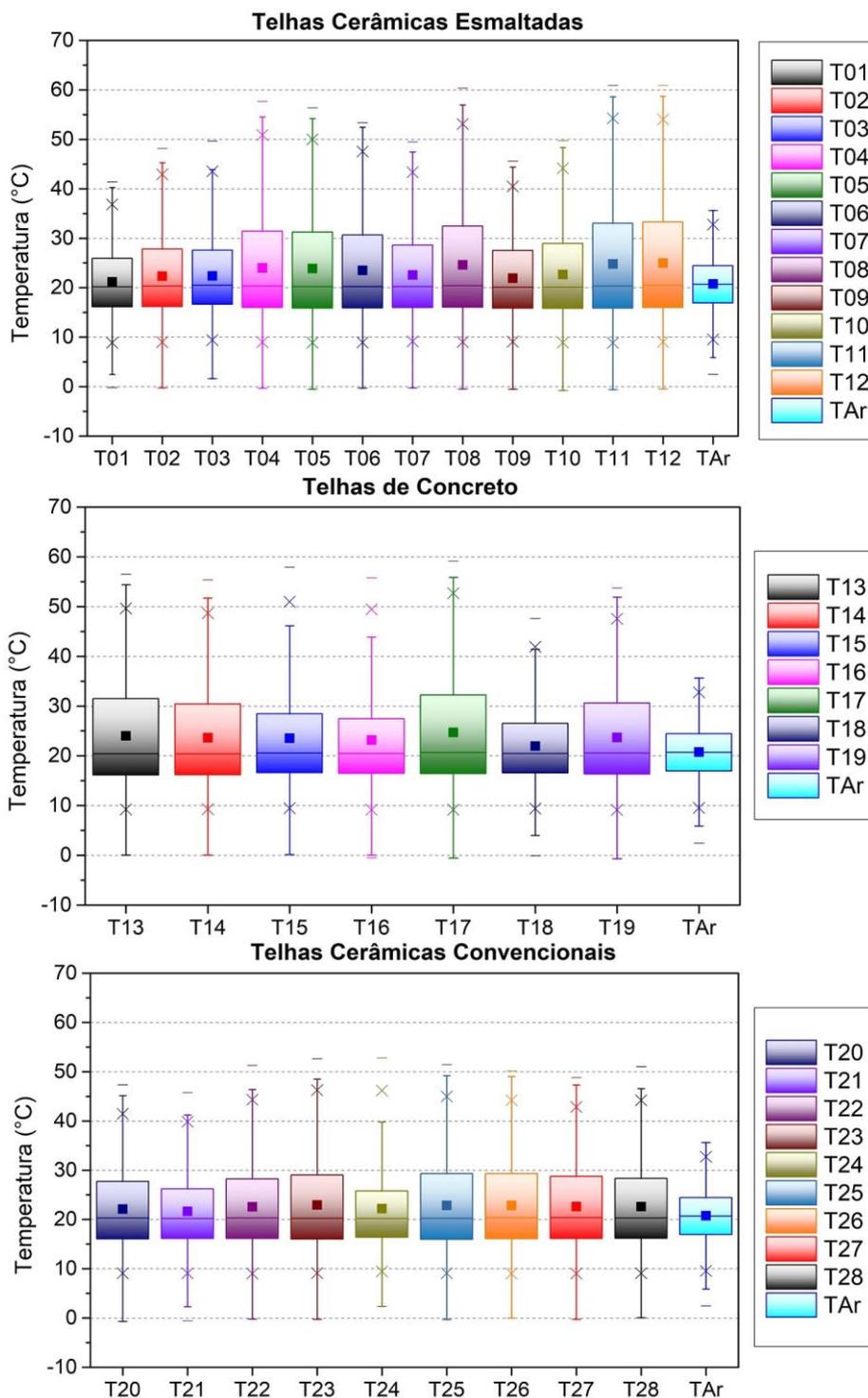


Figura 12 - Correlação entre absorvâncias medidas aos 24 meses e estimadas para 36 meses



Para a análise conjunta dos efeitos da degradação da absorvância solar sobre o desempenho térmico das telhas apresentam-se na Figura 13 os diagramas de caixa com as variações das temperaturas superficiais das telhas ao longo dos 2 anos de exposição natural para as telhas cerâmicas esmaltadas, telhas de concreto e telhas cerâmicas convencionais.

Figura 13 - Variações das temperaturas superficiais ao longo de 24 meses para os três grupos de telhas (cerâmicas esmaltadas, telhas de concreto e telhas cerâmicas naturais) em comparação com a temperatura do ar ( $T_{Ar}$ )

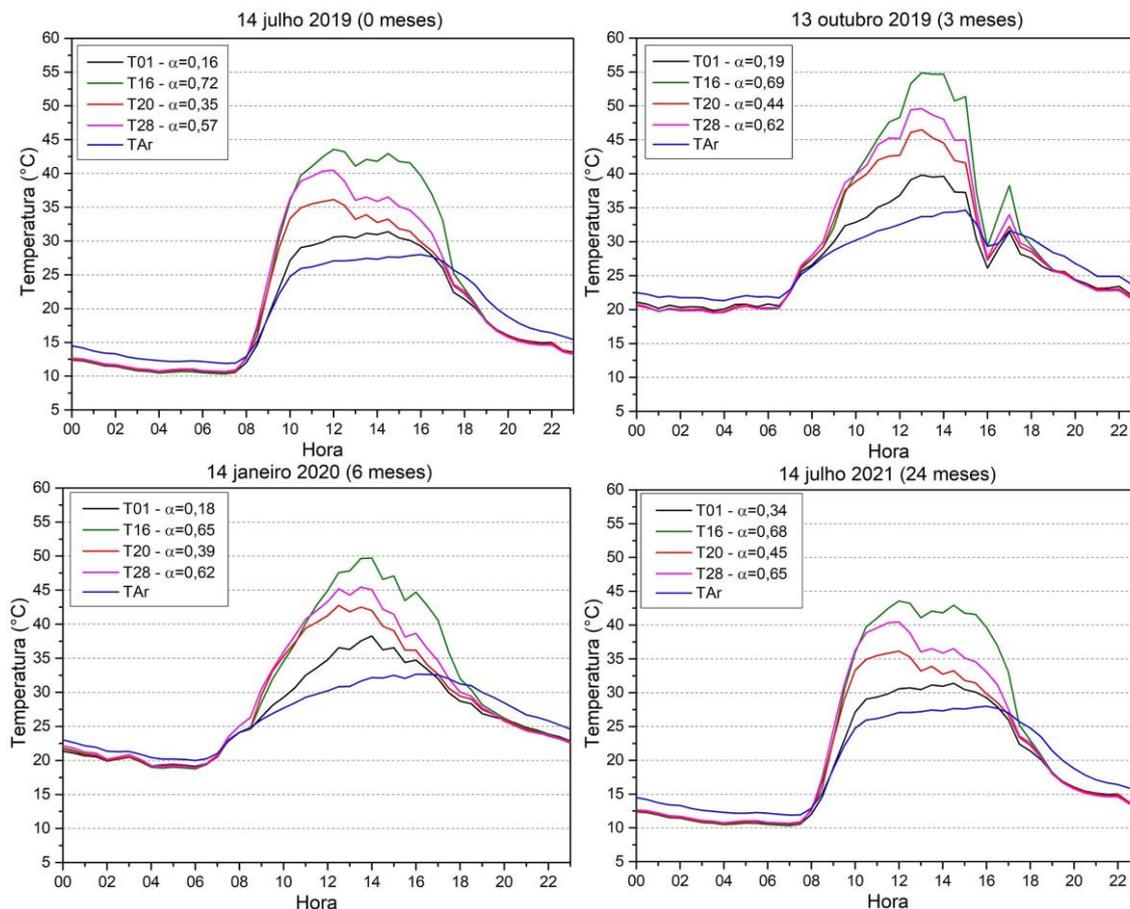


Observa-se que as temperaturas superficiais das telhas apresentaram variações significativas no período, dependendo do efeito conjugado entre absorvância solar da superfície e tipo de material de cada telha e respectiva espessura, características que influenciam diretamente a transmitância (U) e capacidade térmica (CT) das telhas. Entre o grupo de telhas cerâmicas esmaltadas (T01 a T12) observa-se que a telha branca (T01) apresentou a menor temperatura máxima, assim como a menor amplitude térmica. Essa telha apresentou a menor absorvância solar medida em laboratório nos quatro estágios de avaliação (0, 3, 6 e 24 meses), característica que influenciou diretamente as temperaturas superficiais no período.

Entre as telhas de concreto, a amostra de número 17 apresentou a maior absorvância solar ( $\alpha_{t=0} = 0,91$  e  $\alpha_{t=24} = 0,89$ ) e, portanto, as maiores temperaturas superficiais máximas. Por outro lado, a telha de concreto T18, com a menor absorvância desse grupo ( $\alpha_{t=0} = 0,51$  e  $\alpha_{t=24} = 0,99$ ), apresentou as menores temperaturas máximas. Finalmente, no grupo de telhas cerâmicas convencionais, as telhas com menores temperaturas máximas foram T24, T21 e T20, nessa ordem. Cabe destacar que, apesar de a telha T24 não ser a que apresentou menor absorvância solar neste grupo, ela é a única entre as telhas cerâmicas convencionais que possui uma camada de resina transparente na superfície exposta ao sol, o que pode ter contribuído com a capacidade refletiva dessa amostra.

Para a análise comparativa complementar das temperaturas superficiais para os quatro diferentes estágios de exposição das amostras são apresentadas as variações de temperaturas para as telhas T01 (cerâmica esmaltada), T16 (concreto), T20 (cerâmica convencional colorida) e T28 (cerâmica natural) ao longo de um dia relativo a cada estágio de exposição (0m: 14/07/2019; 3m: 13/10/2019; 6m: 14/01/2020; e 24m: 14/07/2021) na Figura 14.

Figura 14 - Variações da temperatura superficial das telhas quando novas (14/07/2019), após 3 meses (13/10/2019), aos 6 meses (14/01/2020) e após 24 meses de exposição (14/07/2021)



Com base nesses resultados, pode-se inferir que a absorvância solar é determinante sobre as temperaturas superficiais das telhas, combinada com as demais características térmicas (transmitância e capacidade térmica), uma vez que os sensores foram instalados na superfície inferior de cada amostra. Para o início da exposição das amostras ao intemperismo, quando ainda novas, as temperaturas superficiais das 4 telhas se relacionaram com suas absorvâncias, sendo a telha T16 ( $\alpha_{t=0} = 0,72$ ) a que apresentou as maiores temperaturas do período, e a telha T01 ( $\alpha_{t=0} = 0,16$ ), as menores temperaturas superficiais. Esse comportamento se manteve ao longo dos 24 meses de exposição das amostras, assim como para as demais telhas.

Na Figura 15 é apresentada a correlação existente entre as temperaturas superficiais máximas com as absorvâncias de cada telha quando novas e após 24 meses de exposição ao tempo. O resultado indica que há forte correlação ( $R = 0,81$ ) das temperaturas superficiais em função da absorvância solar da superfície ao longo do tempo, o que comprova que, quanto maior a absorvância da telha, maior sua temperatura superficial quando exposta ao sol.

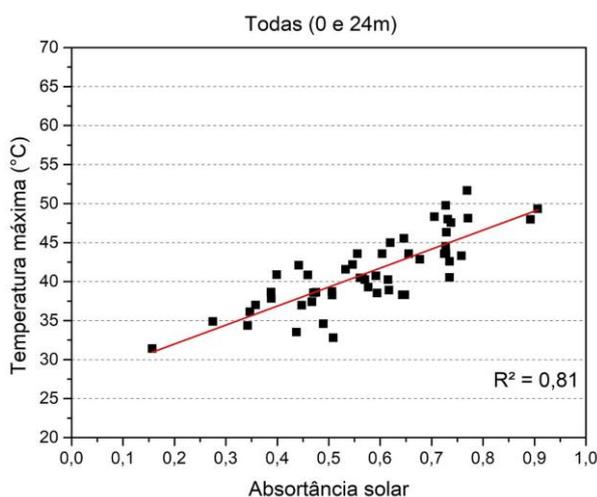
Mesmo com resultados preliminares, ao final dos primeiros 24 meses de exposição a intempéries foi possível validar o funcionamento do sistema de medição desenvolvido neste trabalho e a aplicabilidade para a análise simultânea de degradação da absorvância solar e sua relação com o desempenho térmico das telhas analisadas. Através da correlação dos dados medidos em laboratório (absorvâncias) e dos dados medidos em campo (temperaturas superficiais) foi possível desenvolver uma análise conjunta dos efeitos da degradação da absorvância solar ao longo do tempo sobre as temperaturas superficiais das telhas e, conseqüentemente, estimar de forma mais coerente o quanto esse processo de degradação pode interferir no desempenho térmico das edificações.

Análises futuras serão realizadas mediante a coleta de dados contínua, de forma a validar o sistema para funcionamento durante 3 anos completos de exposição das amostras, segundo recomendações da norma de desempenho de edifícios NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

## Considerações finais

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 têm comprovado 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, e, conseqüentemente, sobre a necessidade de energia 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 absorvância solar, torna-se primordial a possibilidade de facilitar esse tipo de análise. Assim, a fim de preencher parte dessa lacuna e na intenção de compartilhar uma metodologia de análise conjunta dos efeitos da degradação da absorvância e sua relação com o desempenho térmico de revestimentos é que se apresentou este trabalho.

Figura 15 - Correlação entre absorvâncias e temperaturas superficiais máximas



A estação de envelhecimento natural desenvolvida neste estudo apresentou-se como uma forma viável, simples e confiável de avaliação dos efeitos da degradação da absorvância solar ao longo do tempo sobre o desempenho térmico de telhas, considerando-se os resultados obtidos ao longo de 24 meses de exposição. Através da capacidade da estrutura 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, esse 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.

Espera-se que com os resultados a serem alcançados após 3 anos completos de exposição das telhas a intempéries se obtenha uma avaliação mais precisa dos efeitos que o envelhecimento natural das telhas causa sobre a absorvância solar e o desempenho térmico delas, com a possibilidade de estender essas análises para o efeito conjugado sobre o desempenho termoenergético de edificações.

## Referências

- AKBARI, H. *et al.* **Aging and weathering of cool roofing membranes**. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005. Report LBNL-58055. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/860745>. Acesso em: 14 fev. 2021.
- ALCHAPAR, N.; CORREA, E. Aging of roof coating: 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.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E903**: standard test method for solar absorptance, reflectance and transmittance of materials using integrating spheres. West Conshohocken, 2020a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G173-03**: standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface [S]. West Conshohocken, 2020b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G7/G7M-13**: standard practice for atmospheric environmental exposure testing of nonmetallic materials. West Conshohocken, 2013.
- ANDERSON, R. W. **Preliminary evaluation of radiation control coatings for energy conservation in buildings**. Oak Ridge National Laboratory Report, 1992. Disponível em: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1096718/>. Acesso em: 12 fev. 2021.
- ASCIONE, F. Energy conservation and renewable technologies for buildings to face the impact of the climate change and minimize the use of cooling. **Solar Energy**, v. 154, n. 15, p. 34-100, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações: parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: edificações habitacionais: desempenho. Rio de Janeiro, 2021.
- ATLAS ELECTRIC 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.
- BERDAHL, P. *et al.* Weathering of roofing materials: an overview. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 423-433, 2008.
- BRETZ, S.; AKBARI, H. Long-term performance of high-albedo roof coatings. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 159-167, 1997.
- BYERLEY, A. E.; CHRISTAN, J. E. The long-term thermal performance of radiation control coatings. In: SUMMER STUDY ON ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS, 5., Berkeley, 1994. **Proceedings [...]** Berkeley: American Council for an Energy Efficiency Economy, 1994.
- DE MASI, R. F.; RUGGIERO, S.; VANOLI, G. P. Acrylic white paint of industrial sector for cool roofing application: experimental investigation of summer behavior and aging problem under Mediterranean climate. **Solar Energy**, v. 169, p. 468-487, 2018.

DORNELLES, K. A. Effect of aging on solar reflectance of white cool roof coatings: natural weathering and the influence on building energy needs for different climate conditions in Brazil. **Journal of Architectural Environment & Structural Engineering Research**, v. 4, n. 2, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Brasileiro 2020**: ano 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](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. *et al.* Effect of aging processes on solar reflectivity of clay roof tiles. **Advances in Building Energy Research**, v. 8, n. 1, p. 28-40, 2014.

FERRARI, C. *et al.* How accelerated biological aging can affect solar reflective polymeric based building materials. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 923, 2017.

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1998.

GOOGLE MAPS. **Campus USP São Carlos**. Disponível em: <https://www.google.com/maps/@-22.0029268,-47.8992921,309m/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 12 ago. 2019

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

JAYASINGHE, M. T. R.; ATTALAGE, R. A.; JAYAWARDENA, A. I. Roof orientation, roofing materials and roof surface colour: their influence on indoor thermal comfort in warm humid climates. **Energy for Sustainable Development**, v. 7, n. 1, p. 16-27, 2003.

JO, J. H. *et al.* An integrated empirical and modeling methodology for analyzing solar reflective roof technologies on commercial buildings. **Building and Environment**, v. 45, p. 453-460, 2010.

KRELLING, A. F. *et al.* Influência do envelhecimento, limpeza e pintura da superfície de telhas de fibrocimento sobre o desempenho térmico da cobertura. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., João Pessoa, 2019. **Anais [...]** João Pessoa, 2019.

MASTRAPOSTOLI, E. *et al.* 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.

PAOLINI, R. *et al.* Effect of ageing on solar spectral reflectance of roofing membranes: natural exposure in Roma and Milano and the impact on the energy needs of commercial buildings. **Energy and Buildings**, v. 84, p. 333-343, 2014.

PEREIRA, C. D. **Influência da refletância e da emitância de superfícies externas no desempenho térmico de edificações**. Florianópolis, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017.

PISELLO, A. L. *et al.* Local climate change and urban heat island mitigation techniques: the state of the art. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 22, p. 1-16, 2016.

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.

REVEL, G. M. *et al.* Nanobased coatings with improved NIR reflecting properties for building envelope materials: development and natural aging effect measurement. **Cement Concrete Composites**, v. 36, p. 128-135, 2013.

ROMERO, M. A. B. *et al.* **Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas**. Brasília: Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, ETB, 2019.

ROSADO, P.; LEVINSON, R. Potential benefits of cool walls on residential and commercial buildings across California and The United States: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. **Energy and Buildings**, v. 199, p. 588-607, 2019.

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.

- SHIRAKAWA, M. A. *et al.* Effects of natural aging on the properties of a cool surface exposed in different Brazilian environments. **Energy and Buildings**, v. 221, p. 110031, 2020.
- SLEIMAN, M. *et al.* 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.
- SLEIMAN, M. *et al.* Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance: part III: Interlaboratory study of an accelerated aging method for roofing materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 143, p. 581-590, 2015.
- SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. **Energy and Buildings**, v. 39, p. 1167-1174, 2007.
- TSOKA, S. *et al.* Modeling performance of cool pavements and the effect of their aging on outdoor surface and air temperatures. **Sustainable Cities and Society**, v. 42, p. 276-288, 2018.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM. **Building and climate change**: status, challenges and opportunities. 2007. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7783>. Acesso em: 24 jan. 2021.
- WYPYCH, G. **Handbook of material weathering**. 5. ed. Toronto: ChemTec, 2013.

**Ana Carolina Hidalgo Araújo**

Instituto de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de São Paulo | Av. Trabalhador São-Carlense, 400, Centro | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13566-590 | Tel.: (16) 3373-8299 | E-mail: [carolhidalgo4@gmail.com](mailto:carolhidalgo4@gmail.com)

**Kelen Almeida Dornelles**

Instituto de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de São Paulo | Tel.: (16) 3373-9285 | E-mail: [kelen@usp.br](mailto:kelen@usp.br)

**Ambiente Construído**

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

[www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido](http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido)

[www.scielo.br/ac](http://www.scielo.br/ac)

E-mail: [ambienteconstruido@ufrgs.br](mailto:ambienteconstruido@ufrgs.br)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.