VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE COR EM TELHAS CERÂMICAS E DE CONCRETO DECORRENTES DO INTEMPERISMO NATURAL

Ana Carolina Hidalgo Araujo (1); Kelen Almeida Dornelles (2)
(1) Doutoranda, arquiteta e engenheira civil, ana.hidalgo.araujo@usp.br, IAU-USP, São Carlos, BR
(2) Professora doutora, engenheira civil, kelend@usp.br, IAU-USP, São Carlos, Brasil

RESUMO
Na construção civil, a escolha das cores que constituirão o envelope construtivo muitas vezes são determinadas seguindo apenas fatores estéticos. Porém, em decorrência da propriedade superficial dos materiais de absortância solar, as cores das edificações também influenciam o desempenho térmico das mesmas. O objetivo principal deste trabalho foi analisar os impactos do envelhecimento natural em telhas cerâmicas e de concreto, sobre suas características de parâmetros de cor e temperatura superficial; ambos associados à variação de absortância solar. Para isso, 25 telhas foram selecionadas e expostas às intempéries, por um período de 24 meses, em uma estação de envelhecimento natural, localizada na cidade de São Carlos, SP. Verificou-se que o parâmetro de cor com maior correlação em relação à absortância solar (αsolar) é a luminosidade (L*), e que, de forma geral, quanto maior a luminosidade (L*), menor é a absortância solar (αsolar) da telha. Além disso, altos valores de absortâncias solares (αsolar), implicam em baixos valores de luminosidade (L*), o que de certa forma explica a associação visual, muitas vezes equivocada, entre as cores "*claras*" e sua baixa absorção de radiação solar. A telha com maior luminosidade (L*) e menor absortância solar iniciais (αsolar) foi a amostra que sofreu maior variação percentual de absortância solar ao final da exposição. No entanto, apesar de ter sido a amostra mais impactada pela degradação natural, esta continuou apresentando as menores temperaturas superficiais dentre todas as amostras selecionadas, mesmo após os 24 meses de intemperismo. Portanto, pode-se concluir que nem sempre a amostra com menor degradação percentual ao longo do tempo é mais recomendada quando se pensa em conforto térmico nas edificações. Em relação às cores, não foi possível determinar uma linha de tendência para as alterações dos parâmetros a*, b*, C e h ao longo de 24 meses de exposição ao tempo, para as 25 telhas selecionadas neste trabalho. Por fim, conclui-se que a correta especificação das cores e o controle das propriedades ópticas dos materiais do envelope construtivo é uma estratégia de baixo custo e eficiente para se controlar os ganhos térmicos de uma edificação.

Palavras-chave: parâmetros de cor, absortância solar, desempenho térmico, telhas.

ABSTRACT
The choice of colors that will constitute the constructive envelope is often determined following only aesthetic factors. However, due to the solar absorbance of materials, the colors of buildings also influence their thermal performance. The main objective of this work was to analyze the impacts of natural aging in ceramic and concrete tiles, on their color parameters and surface temperature; both associated with the variation of solar absorbance. For this, 25 tiles were selected and exposed to the weather, for a period of 24 months, in a natural aging rack, located in the city of São Carlos, SP. As main results, we highlight that the color parameter with the highest correlation in relation to solar absorbance (αsolar) is luminosity (L*), and that, in general, the greater the luminosity (L*), the lower the solar absorbance (αsolar) of the tile. High values of solar absorbance (αsolar) imply low values of luminosity (L*), which in a way explains the visual association, often mistaken, between "*light*" colors and their low absorption of solar radiation. The tile with the highest luminosity (L*) and lowest initial solar absorbance (αsolar) was the sample that suffered the greatest percentage variation in solar absorbance at the end of exposure. However, despite being the sample most impacted by natural degradation, it continued to show the lowest surface temperatures among all selected samples, even after 24 month of natural weathering. So, the sample with the lowest percentage degradation over time is not always the most recommended when thinking about thermal comfort. It was not possible to determine a trend line for changes in the parameters a*, b*, C and h over 24 months of exposure to weather. Finally, it is concluded that the correct specification of the colors and the control of the optical properties of the materials of the constructive envelope is a low cost and efficient strategy to control the thermal gains of a building.

Keywords: color parameters, solar absorbance, thermal performance, tile

1. INTRODUÇÃO

As cores podem ser definidas como o resultado dos estímulos luminosos sobre os objetos. A luz visível corresponde a uma pequena faixa do espectro eletromagnético, cujo comprimento de onda abrange o intervalo de 380 nm a 780 nm (Figura 1). Essa radiação, quando incide sobre os corpos, tem uma parcela refletida e outra absorvida. A parcela da luz visível refletida é convertida em impulsos elétricos através da retina humana, responsável pela sensibilidade à luz e que se relaciona diretamente com a visão cromática. É nessa membrana nervosa fotossensível que as células fotorreceptoras estão localizadas (cones e bastonetes), e, de onde saem as fibras nervosas que formam o nervo óptico, responsável por conduzir os impulsos elétricos ao córtex visual do cérebro (SILVEIRA, 2015).

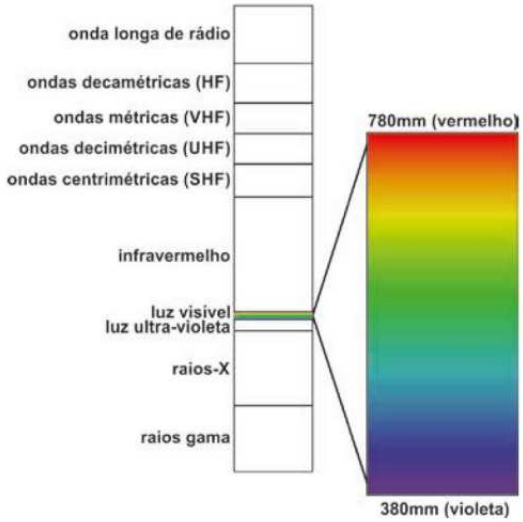

Figura 1 – Faixa do espectro eletromagnética na qual a radiação é visível (SILVEIRA, 2015).

A percepção de uma determinada cor pelo olho humano não pode ser especificada apenas através do seu comprimento de onda. Segundo Pereira (2000), a interpretação da cor pelo nosso cérebro, chamada de "*resposta cromática*", pode ser entendida através de três atributos: o matiz, a claridade e a saturação. O matiz é a variedade do comprimento de onda da luz refletida, ou seja, é propriamente o que usualmente chamamos de "*cor*". A claridade diz respeito à quantidade de luz que atinge a retina, ou seja, é a escala do claro ao escuro de uma mesma cor. Por fim, a saturação está atrelada à pureza da cor, ou seja, à intensidade, vivacidade e palidez – quanto mais saturada, mais pura e intensa.

A determinação das cores através da percepção visual é um método muito subjetivo, pois há muitas variáveis fisiológicas e culturais envolvidas. Para se diferenciar as cores de forma mais precisa, foram desenvolvidas classificações utilizando-se dados numéricos a fim de se identificar objetivamente uma cor através de um sistema referencial. A CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*), organização internacional de caráter normativo cujos campos de pesquisa envolvem a iluminação elétrica, a visão, a luz e a colorimetria (CIE, INMETRO, 2020), definiu três espaços de cor para a comunicação e expressão das cores: o CIE XYZ; o CIE L*C*h; e o CIE L*a*b*.

Segundo o site da Empresa Japonesa *Konica Minolta*[1], as variáveis dos espaços de cor CIE L*C*h e CIE L*a*b*, citados 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). O CIE L*a*b*, também conhecido como CIELAB, é o espaço de cor mais utilizado atualmente para avaliação das cores, pois além de correlacionar um número a uma cor, permite identificar de forma mais precisa inconsistências ou desvios de uma cor padrão.

Na construção civil, as cores normalmente são associadas principalmente à estética da edificação. Porém, além de ferramenta de embelezamento e acabamento, as cores também se relacionam com o desempenho térmico das construções. Apesar de simplista, é de conhecimento popular que as cores "*claras*" absorvem menos radiação solar que cores "*escuras*", "*esquentando*" menos quando expostas ao sol. Este fenômeno diz respeito às propriedades ópticas dos materiais, ou seja, às características superficiais de absortância solar e a emitância térmica.

[1] Disponível em: < https://sensing.konicaminolta.us/br/blog/entendendo-o-espaco-de-cor-lab/> Acesso em 11 de abril de 2023

Segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), a absortância solar (α) pode ser definida como o quociente da taxa de radiação solar absorvida, por uma superfície, pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. Já a emitância térmica (E) é o quociente da taxa de radiação emitida, pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura. Portanto, a utilização de materiais com baixa absortância solar e alta emitância térmica, também chamados de "*frios*", são considerados uma estratégia de resfriamento passivo bastante eficaz, principalmente para regiões de clima quente, como ocorre em grande parte do Brasil.

Segundo Alchapar e Correa (2016), as características intrínsecas dos materiais que determinam o seu comportamento térmico são: as propriedades físicas (condutividade térmica, densidade e calor específico); e as propriedades ópticas (refletância solar e emitância térmica), já citadas anteriormente. No entanto, as propriedades ópticas são as únicas que podem variar ao longo do tempo em decorrência de interferências externas, como o intemperismo. Este envelhecimento natural dos materiais, principalmente do envelope construtivo, impacta diretamente na forma como percebemos a sua "*cor*" ao longo do tempo.

Segundo Bretz e Akbari (1997), a deposição de *sujeira* (material particulado) e o crescimento microbiano, podem modificar de forma permanente a refletividade de um material incialmente "*frio*", sendo que a radiação ultravioleta, as altas temperaturas e os poluentes são os principais responsáveis pela degradação dos revestimentos do envelope construtivo. Cheng *et al.* (2012), também destacam a radiação ultravioleta, a poluição atmosférica, o crescimento microbiano e a umidade como fatores que contribuem para a perda da capacidade refletiva de materiais inicialmente "*frios*". Alinhado com os autores anteriores, Morini *et al*. (2014), ressaltam a incidência de radiação ultravioleta, as altas temperaturas, a umidade e a deposição de *sujeira* (material particulado) como principais agentes no processo de degradação natural dos materiais do envelope construtivo. Conclui-se que as principais causas do envelhecimento natural dos materiais, decorrentes da exposição ao tempo, se referem à capacidade de retenção de material particulado e fuligem por essas superfícies, à facilidade de crescimento biológico e à incidência de radiação ultravioleta. Destaca-se que a forma como os materiais vão se degradar está intimamente relacionado ao seu local de instalação, em decorrência do comportamento climático específico e da característica geológica da região.

Algumas pesquisas já avaliaram os impactos do envelhecimento natural sobre os parâmetros de cor dos materiais do envelope construtivo, principalmente para tintas. Silva (2017), avaliou a durabilidade de pinturas frias e convencionais após três anos de exposição ao tempo, em três cidades do estado de São Paulo (Pirassununga, São Paulo e Ubatuba). O espaço de cor utilizado para fazer essa avaliação foi o CIELAB. Segundo a autora, de modo geral, observou-se uma alteração na aparência das pinturas decorrentes do aumento na absortância solar inicial (α) e uma diminuição da luminosidade (L*) em todas as amostras, sendo que as localizadas em Ubatuba, apresentaram as maiores variações em relação às situações iniciais, em decorrência, provavelmente, da alta umidade, maior incidência de raios ultravioleta e salinidade do ar.

Já na pesquisa de Shirakawa (2018), a autora avaliou o impacto do intemperismo na alteração da absortância solar de uma tinta branca convencional, para quatro cidades brasileiras, ao longo de um ano de exposição ao tempo (São Paulo - SP, Pirassununga - SP, São Sebastião - SP, Belém - PA). Assim como na pesquisa de Silva (2017), o espaço de cor utilizado foi o CIELAB. Como resultados, verificou-se que, principalmente em Pirassununga – SP, a absortância solar sofreu um acréscimo em função da redução da luminosidade (L*), e, sua superfície apresentou maior tendência ao vermelho (a* positivo) e ao amarelo (b* positivo). Essa tendência pode ser entendida como uma consequência da localização das amostras, já que a "*terra vermelha*" é uma característica específica da região de Pirassununga.

Diferentemente das pesquisas citadas acima, as quais avaliaram as alterações dos parâmetros de cor especificamente para tintas, neste artigo, a avaliação do impacto do envelhecimento natural sobre os parâmetros de cor se dá através de amostras de telhas cerâmicas (convencionais e esmaltadas) e de concreto. A escolha para se analisar especificamente estruturas de cobertura se deu em decorrência de sua angulação mais horizontalizada em relação ao solo. Assim, o impacto do intemperismo natural é mais significativo que nos elementos de vedação vertical, como as paredes, em consequência de sua maior exposição à radiação solar, ao longo do dia, e mais facilidade de deposição de material particulado. Além disso, para localizações de baixa latitude, aproximadamente 60% do calor transferido para uma edificação de baixo pavimento, localizada em região de clima extremamente quente, é recebido pelas coberturas (MAESTRI, 2017). Portanto, a correta especificação de telhas e o conhecimento de seu comportamento superficial, ao longo do tempo, é essencial para promover um bom desempenho termoenergético para edificações de baixos pavimentos, durante toda sua vida útil. Aqui, pretende-se demonstrar que a associação das cores a estes elementos de cobertura vão muito além do fator estético, e que, para telhas convencionais – ou seja, sem acréscimo de pigmentos "*frios*", como a titânia (TiO_2) – as cores podem ser utilizadas com a finalidade de se viabilizar uma edificação mais eficiente, promovendo conforto térmico aos usuários no interiores das construções, reduzindo o gasto energético excedente com climatização artificial, e, consequentemente, mitigando a formação das ilhas de calor urbanas.

2. OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho é analisar os impactos do envelhecimento natural de telhas cerâmicas (convencionais e esmaltadas) e de concreto, expostas às intempéries por um período de 2 anos, sobre suas características de parâmetros de cor (CIELAB) e temperatura superficial, associado à variação de absortância solar das amostras selecionadas.

3. MÉTODO

A pesquisa caracteriza-se como experimental, com medições em laboratório e em campo. A metodologia incluiu três fases: Etapa I - Seleção das telhas e montagem no sistema de envelhecimento; - Etapa II - Medição dos parâmetros de cor, da absortância solar e da temperatura superficial das amostras para dois estágios de envelhecimento (0 meses e 24 meses); Etapa III – Análise e tratamento dos dados. Os dados compartilhados neste artigo foram obtidos a partir do estudo realizado por Araujo (2022).

3.1. Etapa I: seleção das amostras e envelhecimento natural

Foram selecionadas 25 telhas, dos tipos cerâmico e concreto, com acabamentos superficiais distintos (com ou sem pigmentação/esmalte). Esta amostragem pode ser dividida em 3 grupos (Figura 2, Tabela 1): cerâmicas esmaltadas coloridas (numeradas de 1 a 12), concreto (13 a 18) e cerâmicas pigmentadas e convencionais (19 a 25). As cores nas telhas cerâmicas esmaltadas são obtidas através da aplicação de uma resina acrílica esmaltada, apenas sobre as suas superfícies, após a queima das telhas. Já no caso das telhas de concreto, a pigmentação é feita diretamente da massa, antes da cura do concreto, tingindo a peça como um todo. Paras as telhas cerâmicas coloridas (telhas 19, 20 e 21), a pigmentação ocorre através da aplicação de uma camada de tinta em pó, fixada durante a queima da telha. Já a telha cerâmica número 23 é a única amostra do grupo analisado que possui uma resina transparente aplicada em sua superfície para impermeabilização da peça.



Figura 2 – Telhas selecionadas (adaptado de ARAUJO, 2022).

Tabela 1 – Materialidade e cores das telhas selecionadas (adaptado de ARAUJO, 2022).

Telha	Material	Cor*	Telha	Material	Cor*
T1	Cerâmica esmaltada	**Branca**	**T14**	Concreto pigmentada	**Vermelho**
T2	Cerâmica esmaltada	**Marfim**	**T15**	Concreto pigmentada	**Mostarda**
T3	Cerâmica esmaltada	**Cinza**	**T16**	Concreto pigmentada	**Canela**
T4	Cerâmica esmaltada	**Caramelo**	**T17**	Concreto pigmentada	**Marfim**
T5	Cerâmica esmaltada	**Verde**	**T18**	Concreto convencional	-
T6	Cerâmica esmaltada	**Ravena**	**T19**	Cerâmica pigmentada	**Branca**
T7	Cerâmica esmaltada	**Palha**	**T20**	Cerâmica pigmentada	**Marfim**
T8	Cerâmica esmaltada	**Bordô**	**T21**	Cerâmica pigmentada	**Vigo**
T9	Cerâmica esmaltada	**Areia**	**T22**	Cerâmica convencional	-
T10	Cerâmica esmaltada	**Cinza Dark**	**T23**	Cerâmica resinada	-
T11	Cerâmica esmaltada	**Grafite**	**T24**	Cerâmica convencional	-
T12	Cerâmica esmaltada	**Café**	**T25**	Cerâmica convencional	-
T13	Concreto pigmentada	**Damasco**	*Nome da cor dado pelo fabricante		

As telhas selecionadas foram expostas em uma estação de envelhecimento desenvolvida por Araujo e Dornelles (2022), por um período de 24 meses, de julho de 2019 a julho de 2021. Segundo Araujo (2022), os dados obtidos na estação desenvolvida indicaram que há forte correlação (R^2 = 0,9346) entre a equação empírica apresentada na NBR 15575-1 (ABNT, 2021), para o cálculo do envelhecimento estimado, após 3 anos de exposição, e os dados medidos em laboratório. Portanto, este equipamento apresentou resultados bastante confiáveis para a avaliação do efeito do intemperismo natural sobre a absortância solar inicial das amostras expostas.

Como os equipamentos utilizados para realizar as aferições de absortância solar (obtida através da refletância solar) e parâmetros de cor têm uma limitação em relação ao tamanho das amostras a serem medidas, a lateral mais retilínea das telhas selecionadas foram recortadas a fim de se obter 4 peças menores, que pudessem ser medidas em laboratório, conforme os diferentes estágios de intemperismo natural. Estas foram fixadas na estação de envelhecimento utilizando-se silicone, a fim de garantir sua imobilização. Já a peça maior, que não foi subdividida, foi instalada na estação de envelhecimento a fim de se monitorar, de forma contínua, a temperatura superficial dessas amostras através de sensores do tipo termopar (tipo T), ao longo de todo o período de exposição ao tempo.

3.2. Etapa II: medições em laboratório

Para a análise da variação dos parâmetros de cor, em telhas cerâmicas e de concreto, decorrentes do intemperismo natural, é necessário que se avalie outras variáveis, de forma conjunta, para se compreender o processo do envelhecimento superficial das telhas como um todo. Neste artigo, foram aferidas três características superficiais das amostras selecionadas: os parâmetros de cor, a absortância solar, e, a temperatura das telhas quando expostas ao sol. Para isso, as amostras menores, expostas na estação de envelhecimento, foram levadas ao laboratório para estas medições nos estágios de 3, 6 e 24 meses de exposição. Aqui, serão comparados apenas os dados iniciais, das telhas novas, aos finais, após 2 anos de exposição ao tempo.

O ensaio para a aferição dos parâmetros de cor das amostras selecionadas foi realizado conforme a norma ASTM D2244-15 (ASTM, 2015). O equipamento utilizado foi o colorímetro portátil *Colorium 2*, da marca *Delta Color*, pertencente ao Laboratório de Conforto Ambiental (LCA) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP São Carlos (IAU-USP). As variáveis calculadas pelo equipamento são: luminosidade ou claridade (L*), coordenada vermelho/verde (a*), coordenada amarelo/azul (b*), saturação (C*) e tonalidade ou matiz (h). Estes dados de saída do colorímetro abrangem ambos espaços de cor CIE L*C*h e o CIE L*a*b*, especificados pela CIE.

Para a determinação da absortância solar, é necessário primeiro medir a reflexão espectral das telhas selecionadas. O equipamento utilizado para esta aferição foi o espectrofotômetro com esfera integradora, cuja leitura varre toda a região do espectro solar, englobando as faixas de radiação ultravioleta, visível e infravermelha. As medições relativas aos estágios iniciais e finais de envelhecimento foram realizadas em dois equipamentos distintos, em decorrência do fechamento de alguns laboratórios por causa da pandemia da Covid-19. Conforme descrito no trabalho de Araujo (2022), o espectrofotômetro *Varian* modelo CARY 5G, do Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica da Universidade Federal de São Carlos foi utilizado para as medições das telhas novas, e, o espectrofotômetro da *PerkinElmer*, modelo *Lambda* 1050, da Universidade Federal de Santa Catarina, para as medições após 24 meses de exposição ao tempo.

Os dois equipamentos citados acima utilizam a esfera integradora de 150 mm de diâmetro para detecção da refletância difusa. Para ambas situações, inicial e final, utilizou-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). Após estas medições no equipamento, a refletância solar (ρ_{solar}) de cada telha é calculada a partir da integração das curvas de refletância espectral, e, a absortância solar (αs_{olar}) a partir da Equação 1.

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

Neste artigo, os dados obtidos através do monitoramento contínuo das amostras, medidos pelos sensores termopares do tipo T, instalados na Estação de Envelhecimento, não foram utilizadas. Aqui, a fim de se analisar de forma didática os efeitos da degradação da absortância solar sobre os parâmetros de cor, e, o impacto dessa degradação sobre as temperaturas superficiais superiores das telhas selecionadas, optou-se por utilizar imagens termográficas. O equipamento utilizado foi a câmera termográfica, modelo *Testo 870* com resolução de infravermelho de 120x160 pixels e sensibilidade térmica < 100 mK a +30°C, pertencente ao LCA do IAU-USP. As amostras foram expostas à insolação por 1 hora, no mesmo dia e horário, a fim de se realizar um registro térmico sob mesmas condições climáticas.

4. RESULTADOS

Após os 24 meses de exposição ao tempo, foi possível verificar a olho nu (Figura 3) os impactos da exposição ao tempo sobre as superfícies das telhas selecionadas a partir das imagens geradas pelo colorímetro. Porém, não é possível identificar, com precisão, quais as variáveis dos parâmetros de cor que mais se alteraram em decorrência do envelhecimento natural, e, quais as relações entre estas variações com a absortância solar das amostras e suas temperaturas superficiais. Por isso, análises comparativas entre estes fatores é essencial para um entendimento global do processo de variação dos parâmetros de cor, em telhas cerâmicas e de concreto, decorrentes do intemperismo ao longo de 2 anos.



Figura 3 – Percepção visual entre os estágios iniciais (0 meses) e finais (24 meses) das amostras, medidos no colorímetro portátil.

A primeira análise realizada foi a identificação do parâmetro de cor cuja variação ao longo do tempo tivesse maior correlação com a variação de absortância solar, antes, e após os 24 meses de envelhecimento. A partir do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (R^2), para todas as telhas, verificou-se que a variável relativa ao parâmetro de cor com maior correlação com a absortância solar é a luminosidade (L*), conforme apresentado na tabela 2. Segundo Paranhos *et al.* (2014), $0,6 > R^2 > 0,9$, demonstram que há forte correlação entre ambas variações de forma inversamente proporcional, já que a inclinação da linha de tendência traçada no gráfico é decrescente (Gráfico 1).

Tabela 2 – Coeficiente de correlação de Pearson calculado para todas as telhas relacionando os valores de absortância solar com os parâmetros de cor, medidos em colorímetro portátil (luminosidade - L*; coordenada vermelho/verde - a*; coordenada amarelo/azul - b*; saturação - C*; e, matiz - h.

	$\alpha s_{olar} - L^*$	$\alpha s_{olar} - a^*$	$\alpha s_{olar} - b^*$	$\alpha s_{olar} - C$	$\alpha s_{olar} - h$
0 meses	**0,7835**	0,0385	0,1215	0,0451	>0,01
24 meses	**0,8075**	0,0518	0,2112	0,1061	0,0173

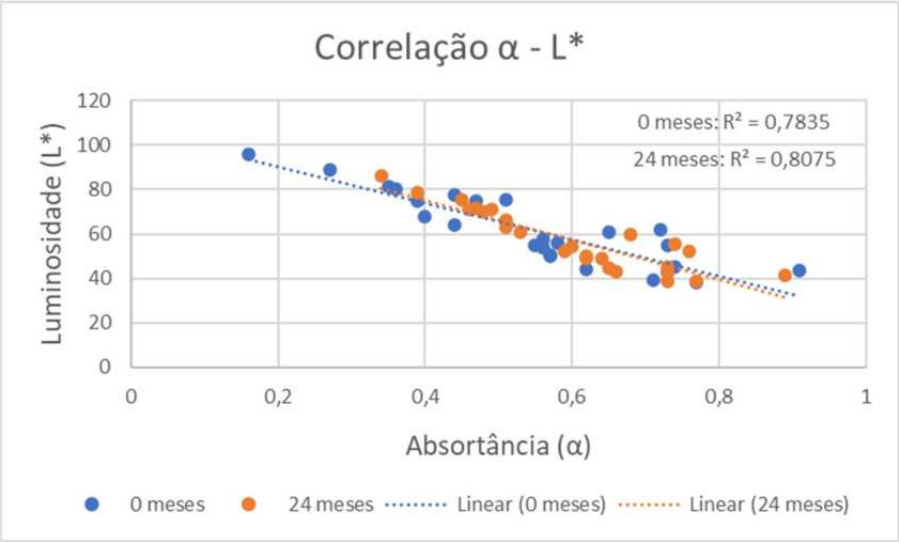

Gráfico 1 – Correlação entre a variação de absortância solar (α) e luminosidade (L*).

Das 25 telhas analisadas, apenas 3 apresentaram um aumento em relação ao valor de L* inicial (T12, T14 e T23), ou seja, tornaram-se mais "*claras*". As absortâncias solares destas telhas, ao invés de diminuírem, segundo a lógica da linha de tendência do gráfico 1, aumentaram em menos de 2% após 24 meses de intemperismo. A telha que teve maior variação de L* (ΔL^*_{T7} = -11,8%) não coincide com a telha que teve uma maior variação de α ($\Delta\alpha_{T1}$=112,5%). Portanto, pode-se afirmar que, de modo geral, as telhas apresentaram um escurecimento de suas superfícies (com exceção das T12, T14 e T23), porém, a taxa de variação entre a luminosidade e a absortância solar, apesar de forte, nem sempre é coincidente.

Em relação às demais variáveis relativas aos parâmetros de cor (a*, b*, C e h), não se pode afirmar que há uma forte correlação nas variações de seus valores, como há entre a α e a L*. No caso das variações relativas à coordenada vermelho/verde (a*), duas telhas cerâmicas esmaltadas (T5 e T7) apresentaram um leve acréscimo de pigmentação vermelha e 1 apresentou um acréscimo de 294% relativo à cor vermelha (T2). Das 6 telhas de concreto analisadas, duas (T15 e T17) apresentaram um aumento de 686% e 245%, respectivamente, indicando um altíssimo aumento de pigmentação vermelha em suas superfícies. Por fim, no grupo das telhas cerâmicas pigmentadas ou convencionais, todas as amostras pigmentadas (T19, T20 e T21) apresentaram um aumento moderado (Δa^*_{T19} = -28%; Δa^*_{T20} = 39%) e alto (Δa^*_{T20} = -69%) em relação à presença de "*vermelho*" em suas superfícies. As demais telhas que não foram citadas acima, totalizando 17 amostras, apresentaram um decréscimo na coordenada vermelho/verde, variando de -2% a -57%. Estes dados demonstram que não há uma tendência homogênea e evidente na variação da coordenada vermelho/verde para as 25 telhas expostas na cidade de São Carlos, SP.

Já em relação à coordenada amarelo/azul, a tendência ao amarelamento se apresentou em 10, das 25 amostras. 4 destas telhas pertencem ao grupo cerâmico esmaltado, os quais apresentaram muita heterogeneidade entre as variações medidas para os estágios iniciais e finais de envelhecimento (Δb^*_{T1} = 70%; Δb^*_{T3} = 31%; Δb^*_{T9} = 7%; Δb^*_{10} = 40%; e, Δb^*_{11} = 1600%). Das 6 telhas de concreto, 4 apresentaram uma leve tendência ao amarelamento (Δb^*_{T13} = 2%; Δb^*_{T14} = 12%; Δb^*_{T17} = 13%; Δb^*_{T18} = 11%) e, apenas uma telha do grupo cerâmico pigmentado e convencional teve um aumento de valor na sua coordenada amarelo/azul (Δb^*_{T20} = 2%). No geral, as quinze telhas que não sofreram um acréscimo de pigmentação amarela em relação às suas superfícies, apresentaram um decréscimo moderado na coordenada amarelo/azul variando de -8% a -32%. A única amostra que destoa desta faixa é a telha T16, que apresentou uma redução de -1026%, indicando um acréscimo altíssimo de pigmentação azul.

Por fim, as variáveis relativas à saturação (C) e matiz (h) foram os parâmetros que apresentaram, de forma geral, menor variação percentual em relação ao envelhecimento de todas as telhas analisadas (> Δ% ±40%). Das 25 amostras, 10 apresentaram um aumento em suas saturações, e, apenas 4 um aumento em seus matizes. A telha T1, esmaltada na cor branca, apresentou a maior variação de saturação (ΔC_{T1} = 46%) e a segunda maior variação de matiz (Δh_{T1} = 18%) dentre todas as amostras. Porém, este comportamento não se repetiu em outras telhas cujas absortâncias solares iniciais também eram mais baixas. Portanto, não se pode afirmar que para todas as telhas cujas absortâncias solares iniciais são baixas, haverá um acréscimo de saturação ou um decréscimo no matiz.

Conforme analisado, a associação entre o impacto do envelhecimento natural de telhas sobre os parâmetros de cor aferidos nas amostras nem sempre é evidente. Com exceção da luminosidade (L*), as demais variáveis relativas às cores não apresentaram nenhuma correlação forte com a variação de absortância solar,

ao longo do tempo. As coordenadas vermelho/verde, amarelo/azul e a saturação, foram os parâmetros que apresentaram medidas mais dispersas, não sendo possível determinar uma tendência única para o grupo amostral selecionado. Já o matiz foi a variável de cor que se alterou de forma mais homogênea para todos os grupos analisados, apresentando uma tendência de diminuição de sua tonalidade ao longo do temo para 21, das 25 telhas analisadas.

A fim de aprofundar a relação entre o impacto do intemperismo natural sobre as superfícies das telhas, expõe-se, na figura 4, as variações das temperaturas superficiais das amostras cujos valores de absortância solar são os máximos e mínimos de cada grupo, juntamente com seus parâmetros de cor. As telhas selecionadas foram: T1 (α0= 0,16; α24= 0,34) e T12 (α0= 0,77; α24= 0,77), cerâmica esmaltada; T16 (α0= 0,91; α24= 0,89) e T17 (α0= 0,51; α24= 0,49), concreto; e, T19 (α0= 0,35; α24= 0,45) e T25 (α0= 0,57; α24= 0,65), cerâmica colorida e convencional. Ambas comparações foram feitas para os estágios iniciais (0 meses) e finais (24 meses) de envelhecimento.

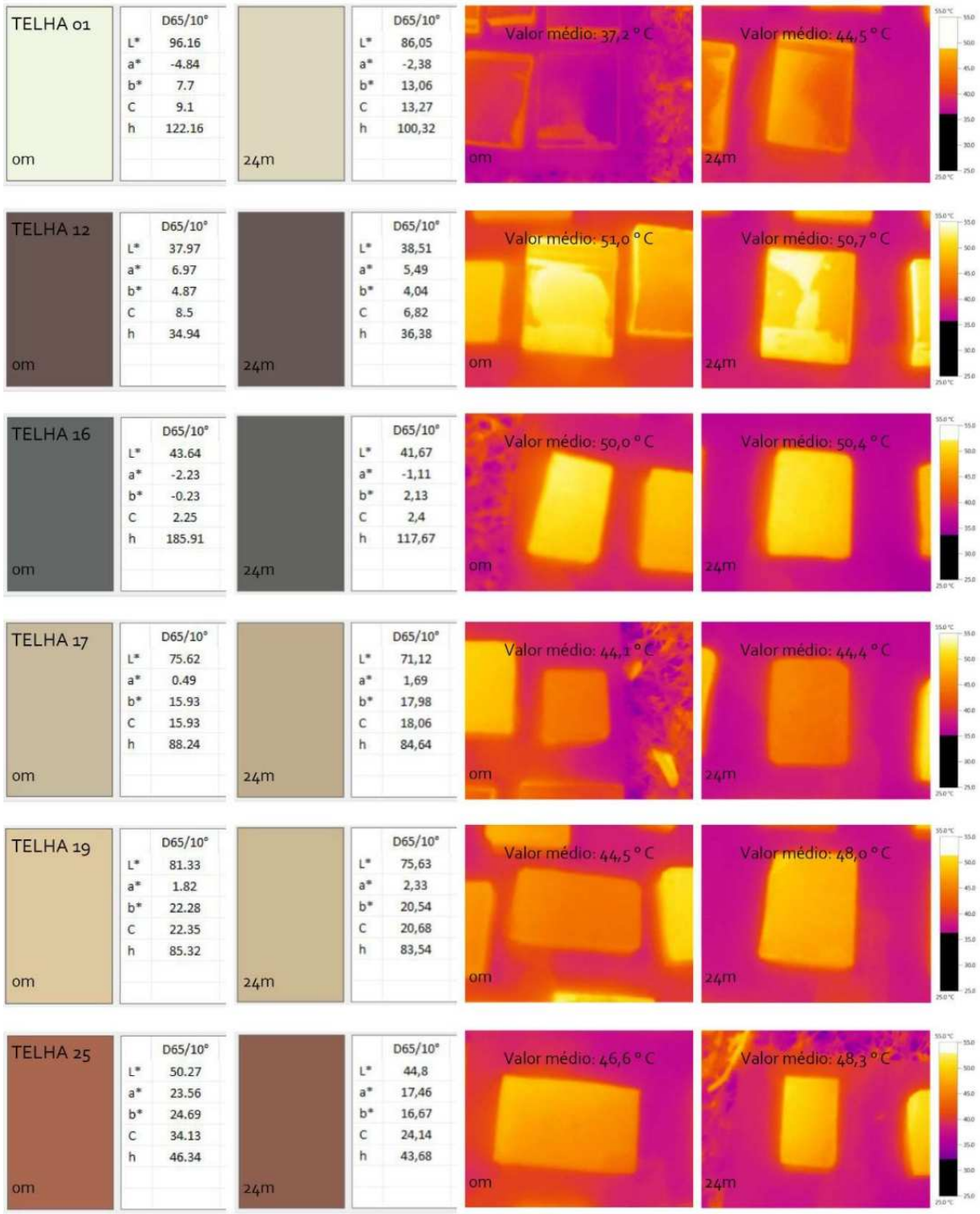

Figura 4: Comparação dos parâmetros de cor e temperatura superficial das telhas T1 e T12-cerâmica esmaltada, T16 e T17- concreto, T19-cerâmica colorida e T25-cerâmica convencional aos 0 e 24 meses de exposição (adaptado de ARAUJO, 2022).

Dentre as 6 amostras comparadas acima, a telha T1 é a mais refletiva, apresentando menor absortância solar e maior luminosidade iniciais. Consequentemente, é a amostra com temperaturas superficiais mais baixas, tanto no estágio inicial quando após os 24 meses de intemperismo. Justamente por essa característica, é a telha que mais se degradou ao longo do tempo, apresentando as maiores variações de absortância solar e luminosidade (ΔL^*= -10,5%; $\Delta \alpha$ = 112,5%, respectivamente). Este comportamento da telha refletiva T1, já era esperado, pois outras pesquisas já evidenciaram que o maior impacto do envelhecimento natural ocorre justamente nas amostras com menores absortâncias solares iniciais. Então, pode-se concluir que, quanto mais "*clara*" for uma superfície, maior será o seu "*escurecimento*" ao longo do tempo em decorrência do acúmulo de material particulado (Akbari *et al*., 2005; Synnefa *et al*., 2007; Mastrapostoli *et al*., 2016; Shi *et al*., 2019).

Por outro lado, as telhas com menores valores de luminosidade inicial (L*), T12 e T16, foram as que apresentaram menor variação de luminosidade ao final do intemperismo (ΔL^*= 1,4%; ΔL^*= -4,5%, respectivamente). Este comportamento evidencia que a perda de luminosidade (L*) é mais intensa para telhas inicialmente "*claras*", ou "*frias*". Porém, apesar de não terem sofrido grandes variações de L*, as grandes perdas de saturação na T12 (ΔC= -20,0%), e do matiz na T16 (Δh= -37,0%), indicam que houve um desbotamento expressivo das mesmas, ao longo do tempo. Isso pode ser explicado pela deposição de material particulado sobre essas superfícies mais "*escuras*", que, juntamente com a incidência dos raios ultravioleta, tendem a desbotar e "*clarear*" essas amostras.

A telha T12, amostra com menor luminosidade (L*) e maior absortância solar inicial, dentre as 6 amostras selecionadas, apresentou a menor variação entre sua temperatura superficial inicial e final. Este comportamento pode ser entendido como uma consequência de sua coloração mais "*escura*", já que os impactos de envelhecimento natural sobre suas características ópticas iniciais não são tão intensos quanto em amostras inicialmente "*claras*", como é o caso da T1. No entanto, este fato não é um indicativo de que a telha T12 tenha um bom desempenho térmico ao longo do tempo, afinal, mesmo sendo a amostra que menos se degradou, continuou apresentando a maior temperatura superficial para ambos estágios de envelhecimento.

Por fim, o grupo das telhas cerâmicas pigmentadas e convencionais, apresentou valores de temperatura médios em relação às telhas cerâmicas esmaltadas e de concreto. A telha T19 seguiu o comportamento térmico esperado, já apresentado nas análises anteriores. Esta, por apresentar uma maior luminosidade tanto no estágio inicial, quanto final, em relação à T25, continuou apresentando temperaturas levemente mais baixas que a última. Portanto, pode-se concluir que os valores relativos à luminosidade (L*) é a variável de cor com maior impacto sobre as absortâncias solares e as temperaturas superficiais das amostras.

5. CONCLUSÕES

A partir do exposto, é possível afirmar que a determinação das cores nas coberturas e fachadas extrapola o fator estético e influencia, de forma bastante relevante, as temperaturas superficiais das edificações. Este artigo se propôs a compreender de forma mais aprofundada quais os parâmetros de cor com maior correlação com a absortância solar (αs_{olar}), e, de que forma essa relação impacta nas temperaturas superficiais das amostras analisadas.

Verificou-se que o parâmetro de cor com maior correlação em relação à absortância solar (αs_{olar}) é a luminosidade (L*) ($R^2 = 0,78$ e $R^2 = 0,80$, para os estágios de 0 meses e 24 meses, respectivamente). De forma geral, mas nem sempre, quanto maior a luminosidade (L*), menor é a absortância solar (αs_{olar}) da telha, e, consequentemente, menor será a sua temperatura superficial quando exposta ao sol. Além disso, altos valores de absortâncias solares (αs_{olar}), implicam em baixos valores de luminosidade (L*), o que de certa forma explica a associação visual, muitas vezes equivocada, entre as cores "*claras*" e sua baixa absorção de radiação solar.

A telha com maior luminosidade (L*) e menor absortância solar iniciais(αs_{olar}), a T1, foi a amostra que sofreu maior variação percentual de absortância solar ao final dos 24 meses de exposição. No entanto, apesar de ter sido a amostra mais impactada pela degradação natural ($\Delta\alpha_{T1}$=112,5%), a T1 continuou apresentando as menores temperaturas superficiais dentre todas as amostras selecionadas, mesmo ao final do período exposto ao tempo. Portanto, pode-se concluir que nem sempre a amostra com menor degradação percentual ao longo do tempo é mais recomendada quando se pensa em conforto térmico a partir da determinação das temperaturas superficiais das telhas.

Especificamente em relação às cores, não foi possível determinar uma linha de tendência para as alterações dos parâmetros a*, b*, C e h ao longo de 24 meses de exposição ao tempo, para as 25 telhas selecionadas neste trabalho. Conforme comentado anteriormente, apenas a luminosidade (L*) apresentou uma linha de tendência significativa para a realização das análises feitas neste trabalho. Por fim, conclui-se que a correta especificação das cores e o controle das propriedades ópticas dos materiais do envelope construtivo é uma estratégia de baixo custo e eficiente para se controlar os ganhos térmicos de uma edificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

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.

ARAUJO, Ana Carolina Hidalgo. **Absortância solar e o envelhecimento natural de telhas expostas ao tempo**. 2022. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. doi:10.11606/D.102.2022.tde-06062022-143613. Acesso em: 2023-04-13.

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. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000200603

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2244-15**: Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates. West Conshohocken, 2015.

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 37º tilted surface [S]. West Conshohocken, 2020b.

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

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.

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.

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

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.

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.

PEREIRA, C. P. A. **A cor no desenho industrial: fundamentos para o projeto cromático de produtos**. 2000. 183p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Curso de PósGraduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000

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.

SILVEIRA, Luciana Martha. **Introdução à teoria da cor**. 2. ed. – Curitiba: Ed. UTFPR, 2015.

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

AGRADECIMENTOS

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