

Envelhecimento de pavimentos de concreto pigmentado e consequências sobre o albedo

Ageing of pigmented concrete pavements and consequences on albedo

Luiz Fernando Kowalski(1); Érico Masiero(2)

1 Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, SP, Brasil.

E-mail: luizfernando.lfk@gmail.com | ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2450-3561>

2 Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, SP, Brasil.

E-mail: erico@ufscar.br | ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8665-335X>

Revista de Arquitetura IMED, Passo Fundo, vol. 10, n. 1, p. 126-147, janeiro-junho, 2021 - ISSN 2318-1109

DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2021.v10i1.4411>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editora-chefe: Grace Tibério Cardoso

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

Pavimentos frios podem ser considerados instrumentos estratégicos no controle do microclima das cidades. Por isso, é necessário o entendimento das propriedades termo físicas desses materiais e otimizar formas de potencializar os mecanismos de resfriamento de superfícies urbanas. Neste contexto, a alteração do albedo da superfície pavimentada através da pigmentação é uma das alternativas. Entretanto, a refletância solar ou o albedo dos pavimentos tendem a sofrer alterações com a idade ou tempo de utilização. Sendo assim, este artigo tem por objetivo analisar o efeito do envelhecimento no albedo de pavimentos pigmentados. Para isso, foram mensurados in loco a refletância de três colorações de pavimentos intertravados de concreto, utilizando o espectrômetro portátil Alta II e as recomendações normativas da ASTM C1549-16. O ensaio foi realizado em amostras no estado novo e envelhecido pela intempérie e pela radiação solar em um período de 5 anos. Os resultados da pesquisa apresentaram uma diminuição na refletância dos materiais com cores mais claras e um aumento nos pavimentos mais escuros, nos três primeiros anos de observação. Esses valores também foram comparados às estimativas de envelhecimento através de correlações matemáticas, que apresentaram um coeficiente de variação médio de 0,08 entre os métodos, que demonstram que a avaliação por equacionamento é uma proposta válida na predição do albedo do pavimento envelhecido.

Palavras-chave: Albedo. Envelhecimento de pavimentos. Pavimentos de concreto.

Abstract

Cool pavements can be considered strategic instruments in the microclimate control of the cities. Therefore, it is necessary to understand the thermal properties of this material and ways to potentiate the cooling mechanisms. In this context, the changing of the albedo of the paved surface through pigmentation is one of the alternatives. However, the solar reflectance or albedo of this type of pavement tend to change, caused by age or time of use. Therefore, this article aims to analyze the effect of ageing on the albedo of colored pavements. For this, the reflectance of three interlocking concrete pavements was measured, using the Alta II portable spectrometer and the normative recommendations of ASTM C1549-16. The assay was performed on fresh and aged samples for 5 years. The results showed a decrease in the reflectance of the light materials and an increase in the darker pavements, in the first three years. These values were also compared to estimates of ageing through mathematical correlations, which presented an average variation coefficient of 0.08 between the methods, which demonstrate that the equation is a valid proposal in the prediction of pavement albedo aged.

Keywords: Albedo. External pavement. Ageing pavement. Concrete pavement.

1 Introdução

A modificação das superfícies urbanas altera as condições de conforto térmico das cidades, o desempenho energético das edificações e, por consequência, trazem implicações na saúde humana. Nesse contexto, o pavimento é um elemento importante na retenção de calor do tecido urbano.

Segundo, Li (2016), a compreensão e o registro do comportamento termodinâmico dos pavimentos frios, em diversas realidades urbanas, são essenciais para que novas estratégias venham a ser adotada e incorporados ao desenho urbano para reduzir os efeitos das Ilhas de Calor Urbanas (ICUs).

Na construção de pavimentos, a mistura asfáltica ainda é o material mais utilizado. Entretanto, a coloração escura do ligante asfáltico, causa uma certa dificuldade em refletir a radiação solar incidente. Kyriakodis e Santamouris (2018) afirmam que a implementação de materiais reflexivos em estruturas urbanas, como rodovias e pavimentos, reduz a temperatura do ar e da superfície, e auxilia a contrabalançar o fenômeno das ICUs.

Chen, Wang e Xie (2019) realizaram uma revisão dos modelos de predição da temperatura superficial de pavimentos urbanos. Os autores apontaram a necessidade de uma certa atenção no tratamento de dados de radiação, convecção, albedo e emissividade da superfície.

Nesse contexto, os pavimentos frios podem ser uma estratégia no controle dessa temperatura. Segundo Santamouris e Kolokotsa (2016), pavimentos frios são materiais desenvolvidos para apresentar baixas temperaturas superficiais nas cidades, sendo que tais alterações podem ser decorrentes do albedo e da condutividade térmica (CHEN et al., 2019), da emitância, de sua composição e de suas características físicas (LI et al., 2016).

Pomerantz et al. (1997) conduziram inicialmente alguns estudos em pavimentos reflexivos e seus benefícios, mensurando o albedo de pavimentos de concreto com cimento Portland com agregados de coloração clara. Levinson e Akbari (2002) desenvolveram um estudo sobre os efeitos da dosagem de concreto na alteração da refletância solar da superfície. Synnefa et al. (2009) mensuraram as propriedades ópticas e o desempenho térmico de amostras de asfalto colorido no ambiente urbano. Wong et al. (2009) desenvolveram um estudo da efetividade da cobertura de pavimentos na mitigação de ilhas de calor em Singapura, através da medição do albedo para diferentes tratamentos superficiais.

Santamouris et al. (2012), desenvolveram em Atenas, na Grécia a reabilitação de uma área de aproximadamente 16000 m² substituindo a cobertura de asfalto por pavimento de concreto. A área foi monitorada enquanto técnicas de simulação foram aplicadas para identificar os benefícios do uso de pavimentos frios do ponto de vista térmico.

Aboelata (2021) avaliou no contexto de clima árido do Egito, a influência de pavimentos frios na redução da temperatura do ar, na melhoria da condição de conforto e na demanda energética para resfriamento. As constatações foram de que pavimentos frios promoveram uma redução de 25% na temperatura do ar em áreas urbanas de baixa densidade.

Em contrapartida, em função da reflexão de ondas curtas incidentes, houve um prejuízo nas condições de conforto térmico em espaços abertos. Para isso, a combinação de pavimentos frios com massas de vegetação, resultaram em um bom desempenho, especialmente em áreas de alta densidade construída.

Por fim, vale ressaltar que a coloração do revestimento provoca alterações no balanço energético das cidades. A mistura asfáltica, devido à sua coloração escura, possui uma alta capacidade de absorção da radiação de ondas curtas durante o dia, e liberação do calor durante a noite, o que contribui com o aquecimento do ar na região próxima à sua superfície (LI, 2016; ZHU, MAI, 2019).

O albedo é um importante indicador da capacidade que a superfície do pavimento tem em refletir a radiação solar. (CHEN et al., 2019). Denomina-se albedo a refletância de uma superfície em relação a toda faixa espectral de radiação de onda curta (OKE, 1978). Em outras palavras, Gonzalez (2015) define o albedo como sendo o índice de espalhamento – reflexão difusa da radiação de onda curta (OC). Para materiais opacos, o albedo é o inverso da absorptância.

A avaliação deste parâmetro é feita em uma escala de zero a um. Os valores próximos a um indicam superfícies com maior refletância. À medida que uma superfície escurece devido ao desgaste pelo uso, pelo acúmulo de poeira ou degradação do pigmento e alteração da tonalidade, sua refletância em geral se reduz.

Prado e Ferreira (2005) mencionam que o espectro da radiação solar está dividido em três diferentes regiões: a região Ultravioleta, o Visível e o Infravermelho, que são formadas por ondas curtas. Quanto ao espectro eletromagnético, Ferreira e Prado (2003, p. 2) acrescentam:

A região do Visível, contida entre os comprimentos de onda entre 380 e 780nm, compreende aproximadamente 46% de todo espectro solar, e é aquela para a qual o olho humano é sensível, suas alterações de frequência compreendem as cores. Influi diretamente no grau de iluminação dos ambientes, pois está associada à intensidade da luz branca transmitida. [...] O Infravermelho (IV) próximo compreende o intervalo contido entre 780nm até aproximadamente 2500nm e corresponde a aproximadamente 43% do espectro solar.

A refletância solar ou o albedo dos pavimentos de concreto tendem a sofrer alterações com o tempo de utilização, afetando seu desempenho e sua durabilidade (FERREIRA; PRADO, 2003). A modificação das propriedades térmicas do material

do pavimento tem um importante papel nas estratégias para a melhoria das condições térmicas urbanas. Pode-se mencionar o aumento da condutividade térmica, da emissividade, da capacidade térmica e da refletância superficial das vias pavimentadas.

Bretz, Akbari e Rosenfeld (1998) mencionam ainda que os efeitos do envelhecimento em um contexto de cobertura, provocam uma perda na refletância de aproximadamente 15% no primeiro ano de utilização. Santamouris e Kolokotsa (2016) relatam que uma série de pesquisas experimentais foram desenvolvidas na estimativa do envelhecimento, e que a equação proposta por Levinson et al. (2005) apresenta valores na mesma ordem de grandeza.

Kyriakodis e Santamouris (2018) realizaram um experimento combinando observações em campo e simulações computacionais em dinâmica dos fluídos (CFD) na região oeste de Atenas. O projeto abrangeu uma área de cobertura de 37000 m², sendo caracterizado como o maior projeto de mitigação de Ilhas de Calor Urbanas do mundo.

As observações feitas pelos autores indicam que o fenômeno do envelhecimento do pavimento pode reduzir substancialmente em até 50% o potencial de mitigação de materiais frios em pavimentos asfálticos.

As mudanças significativas de albedo podem ocorrer devido à intempérie e envelhecimento, o estudo de Tsoka et al. (2018) investigou o potencial de resfriamento da temperatura da superfície e do ar de materiais de pavimentação frio, com albedo elevado e valores envelhecidos, a partir de dados coletados em outras pesquisas.

Tsoka et al. (2018) destacam, assim como Kyriakodis e Santamouris (2018), que há uma redução de 50% na temperatura superficial do pavimento em função do envelhecimento. Além disso, o aumento do albedo das superfícies terrestres em 0,28-0,40 levou a uma queda de 9,0 °C na temperatura da superfície.

Os pavimentos mais usuais encontrados na maioria das cidades são de concreto ou asfalto. Sendo que os de concreto podem ser com blocos intertravados ou monolíticos, executados no próprio local. Além disso, a composição granulométrica dos materiais pode modificar sua capacidade de drenagem e o albedo ao longo do tempo.

Yang et al. (2020) propuseram a criação de um índice a fim de analisar a influência do pavimento no Efeito da Ilha de Calor Urbana. As constatações foram que o pavimento de concreto possui um índice muito mais elevado que as misturas asfálticas. Além disso, o pavimento asfáltico poroso demonstrou ser sutilmente superior ao pavimento de concreto asfáltico de alta densidade.

Nesse contexto, o estudo de Li et al. (2013) demonstraram que os pavimentos intertravados de concreto apresentaram um maior albedo em relação aos pavimentos asfálticos. Outro ponto mencionado por Kowalski (2019), se refere à influência do teor de umidade dos pavimentos na alteração do albedo. Os pavimentos de concreto com pigmento vermelho, na condição saturada, apresentam uma elevação da refletância na faixa do infravermelho, quando comparados a amostras secas.

O aumento do albedo pode contribuir para reduzir significativamente a alta temperatura superficial durante o dia com intensa incidência de radiação solar, sendo que o efeito de resfriamento é altamente depende da disponibilidade de umidade próximo à camada superficial e do albedo. A viabilidade técnica de aplicação de pavimentos refletivos e permeáveis combinados mitigar ocorrência de ICUs, pode estar associada ao gerenciamento de escoamento de águas pluviais.

As Figuras 1 (a) e (b) representam de forma genérica o processo físico de absorção e reflexão de radiação promovido pelo albedo das superfícies horizontais para cores claras e escuras respectivamente, sejam elas em planos de coberturas ou pavimentos.

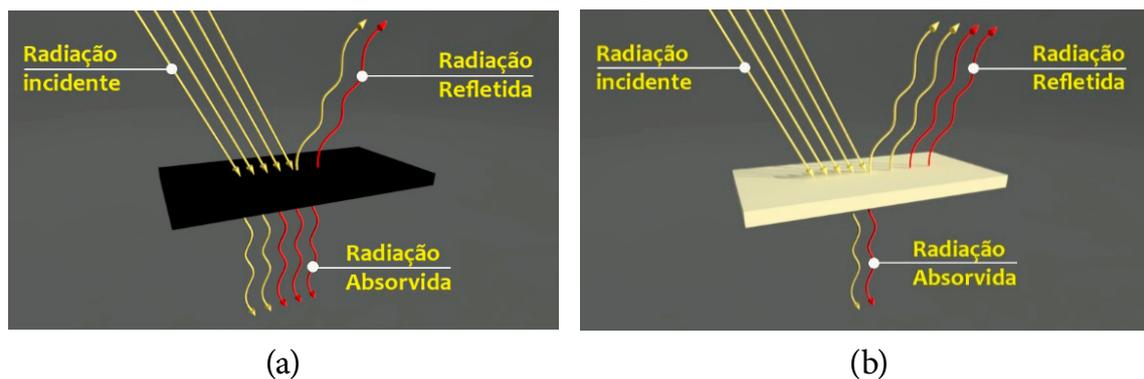


Figura 1 – Processo físico em superfícies escuras (a) e processo físico em superfícies claras (b)

Fonte: Adaptado de GCCA (2012).

Segundo o Natural Stone Council (2018, s.p.), “o albedo de um material é influenciado, inicialmente, pelos seguintes fatores: composição, textura da superfície e orientação da radiação solar”. O desgaste da superfície e o envelhecimento podem influenciar ao longo dos anos na alteração do albedo. Entretanto, como a cor nem sempre é um indicador preciso da refletância solar, recomenda-se desenvolver testes para caracterizar corretamente este atributo a partir das condicionantes de uso de cada material. Desta forma, é possível prever o período de tempo no qual cada material sofre alterações no seu Índice de Refletância Solar de acordo com sua exposição à poluição, à radiação solar e ao perfil de uso.

Para avaliar a Refletância Solar de telhas de concreto e cerâmicas, Muniz-Gäll et al. (2018, p. 507), usou o espectrômetro portátil ALTA II, que mede a refletância solar correspondentes a radiações emitidas em onze comprimentos de onda, entre 470 e 940 nm (nanômetros), sendo sete pertencentes à região visível e quatro à região infravermelha do espectro solar. O conhecimento da capacidade de influência de cada material de superfície urbana é de fundamental importância para a compreensão de fenômenos relacionados ao clima urbano, seja para coberturas ou para pavimentos.

A aplicação de materiais superficiais frios pode reduzir a temperatura das cidades em 2 ou 3°C de acordo com o *Global Cool Cities Alliance* (GCCA, 2020). A aplicação de tais iniciativas tem sido encarada mundialmente como estratégia para o aumento

da qualidade ambiental e a redução de impactos no microclima de uma determinada intervenção espacial em ambiente urbano.

Selos de certificação ambiental como o LEED (2018) – *Leadership in Energy and Environmental Design* – por exemplo, incorporam como critério de pontuação à aplicabilidade dos conceitos de refletância solar dos materiais em projetos de edificações e áreas externas, tais como pátios, estacionamentos, vias públicas e calçadas. Logo, o local, as condições de uso, os procedimentos construtivos, o tipo de material e sua durabilidade são fatores essenciais na concepção de vias e áreas abertas na cidade que podem ser mais bem exploradas por gestores, planejadores e projetistas.

Portanto, o estudo da pavimentação urbana sob o ponto de vista climatológico é relevante para que estratégias de mitigação possam ser implantadas com maior potencial de sucesso em se combater efeitos indesejados nas condições térmicas urbanas.

Assim, esta pesquisa tem por objetivo analisar o efeito do envelhecimento no albedo de pavimentos pigmentados de concreto intertravado em um campus universitário.

2 Materiais e Métodos

Esta pesquisa, de caráter teórico experimental, envolve os conceitos de variação de albedo de materiais de pavimentos e seus possíveis efeitos no microclima urbano de acordo com o envelhecimento. Para tanto, foi desenvolvido um campo experimental com três faixas de piso com blocos de pavimentos intertravados de concreto de três cores distintas, vermelho, cinza e grafite.

Os fenômenos físicos apresentados na introdução do artigo fundamentam a base conceitual das medições desenvolvidas neste campo de testes, sendo que as amostras de pavimentos das três cores foram monitoradas durante 5 anos de uso.

Os procedimentos experimentais se dividem em cinco etapas principais:

- ◆ Caracterização do local de estudo e descrição do uso;
- ◆ Medição da refletância de pavimentos em condições novas e envelhecidas pela intempérie e pelo acúmulo de impurezas, nas cores vermelho, grafite e cinza através do espectrômetro portátil ALTA II;
- ◆ Desenvolvimento de cálculo para estimativa do albedo no estado envelhecido através de equacionamento matemático;
- ◆ Análise da variação do albedo entre a condição nova e envelhecida, nas idades de 0, 2 anos, 3 anos e 5 anos;
- ◆ Análise da variação entre o albedo mensurado pelo espectrômetro portátil e o albedo estimado pelos equacionamentos matemáticos.

Na Figura 2 está apresentado o fluxograma da pesquisa.

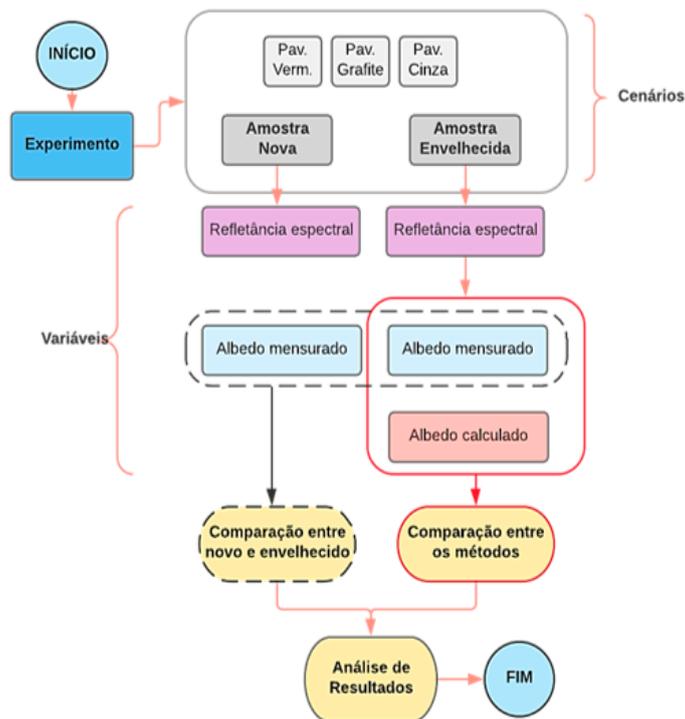


Figura 2 – Fluxograma da pesquisa.

Fonte: Autores (2021).

2.1 Caracterização do local de estudo

O local de estudo para análise dos pavimentos de concreto intertravado em sua condição nova, foi o campo de experimentos em térmica do campus **XXXXXXXXXXXX** localizado na cidade de **XXXXXXXXXXXX**, Figura 3.

Para análise do pavimento em sua condição envelhecida, foi adotado um pavimento intertravado de concreto três cores, vermelho, grafite e cinza, construídos em 2016 e 2018, exposto a partículas de poeira de área rural, com predominância de circulação de pedestres e bicicletas, conforme apresentado nas Figuras 3 e 4.



Figura 3 – Pavimento novo.
Autores (2018).



Figura 4 – Pavimento envelhecido (2 anos).

Fonte: Autores (2018).

Os blocos intertravados de concreto nas duas condições são provenientes do mesmo fabricante, com as mesmas especificações técnicas de formato, composição de materiais. A pigmentação sofreu variação em função do envelhecimento.

O método, baseado em medições in loco e equacionamento matemático, foi aplicado para a obtenção da refletância solar e espectral das amostras das três colorações de pavimento, com amostras no estado novo e envelhecido. O experimento foi realizado no mesmo dia para ambos os cenários.

A amostragem foi feita de maneira aleatória. A posição do equipamento sobre o bloco, para aferição do albedo, foi realizada da seguinte maneira: duas coletas próximas à extremidade e uma na região central da superfície.

2.2 Cálculo da refletância através do espectrômetro portátil

Para a realização deste estudo, foi empregado o espectrômetro portátil Alta II, conforme apresentado na Tabela 1, e seguindo as recomendações normativas da ASTM C1549-16 (2016).

Tabela 1 - Especificações técnicas do espectrômetro portátil.

	Marca/modelo	Lunar and Planetary Institute / ALTA II
	Aquisição de dados	11 comprimentos de onda ($\lambda = 470 - 940 \text{ nm}$)

Sendo λ , o comprimento de onda em nm.

Fonte: Autores (2021).

O experimento foi realizado em campo, durante a primavera, nas primeiras horas do dia, em dias de céu aberto e vento fraco, com iluminação natural e temperatura do ar de aproximadamente 23°C. O equipamento ALTA II foi envolvido por um tecido escuro espesso de proteção, para evitar a infiltração de luz.

O cálculo da refletância solar seguiu a metodologia apresentada Pereira et al. (2015), embasados na ASTM (2016), considerando os valores do espectro padrão da G173 ASTM (2003). O roteiro de cálculo da refletância solar pode ser descrito da seguinte maneira:

- ♦ Cálculo da refletância espectral para cada comprimento de onda ($\rho\lambda$, amostra), através da Equação (1);

$$\rho\lambda, amostra = [(V\lambda, amostra - Vf, amostra) / (V\lambda, ref - Vf, ref)] * \rho\lambda, \quad (1)$$

Sendo:

$\rho\lambda$, amostra: Refletância da amostra para um determinado comprimento de onda λ (%);

$V\lambda$, amostra: Tensão elétrica da amostra medida no comprimento de onda λ (mV);

V_f , amostra: Tensão elétrica de fundo da amostra (mV);

V_λ , ref: Tensão elétrica da amostra de referência no comprimento de onda λ (mV);

V_f , ref: Tensão elétrica de fundo da amostra de referência (mV);

ρ_λ , ref: Refletância da amostra de referência no comprimento de onda λ (mV);

O termo “amostra” se refere à superfície em análise. A nomenclatura “referência” diz respeito à refletância de um papel branco comum (Marca Ripax, 75g/m²) de acordo com as recomendações de Dornelles (2008). Por fim, o termo “fundo” está relacionado ao valor apresentado no display do espectrômetro antes de se pressionar os botões que emitem os sinais elétricos para captação dos dados de refletância das amostras.

Dornelles (2008) apresenta os valores de refletância espectral do papel branco, correspondente aos valores de refletância da amostra de referência (ρ_λ , ref) para cada região do espectro eletromagnético, sendo 87,1% para a Região Visível (VIS) e 75,9% para a Região do Infravermelho (IR), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Refletância da amostra de referência no comprimento de onda λ

Região	Cor	λ (nm)	ρ ref
VIS	Azul	470	0,871
VIS	Cian	525	0,871
VIS	Verde	560	0,871
VIS	Amarelo	585	0,871
VIS	Laranja	600	0,871
VIS	Vermelho	645	0,871
VIS	Vermelho escuro	700	0,871
IV	Infravermelho 1	735	0,759
IV	Infravermelho 2	810	0,759
IV	Infravermelho 3	880	0,759
IV	Infravermelho 4	940	0,759

Sendo λ , o comprimento de onda em (nm) e ρ_{ref} : refletância de referência em determinado comprimento de onda.

Fonte: Adaptado de ALTA II (2020) e Dornelles (2008).

- ♦ Cálculo da refletância solar (ρ_{solar}), ajustando o valor de cada amostra ao espectro solar padrão, através da Equação (2), proposta pela E903 ASTM (2012);

$$\rho_{solar} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \rho_{\lambda i} * E_{\lambda i} * \Delta \lambda i}{\sum_{i=1}^n E_{\lambda i} * \Delta \lambda i} \right) * 100 \quad (2)$$

Sendo:

ρ_{solar} : Refletância solar (%);

$\rho_{\lambda i}$: Refletância espectral no comprimento de onda λ (adimensional);

λi : Comprimento de onda (nm);

$E_{\lambda i}$: Irradiação solar global espectral (W/m².nm).

A irradiação solar global espectral ($E\lambda$), pode ser tomada como referência do espectro solar padrão da norma G1763-03 ASTM (2003), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Refletância da amostra de referência no comprimento de onda λ

Região	Cor	λ (nm)	$E\lambda$ (W/m ² . nm)
VIS	Azul	470	1,2749
VIS	Cian	525	1,3859
VIS	Verde	560	1,3118
VIS	Amarelo	585	1,3737
VIS	Laranja	600	1,3278
VIS	Vermelho	645	1,317
VIS	Vermelho escuro	700	1,1636
IV	Infravermelho 1	735	1,1101
IV	Infravermelho 2	810	0,9749
IV	Infravermelho 3	880	0,8743
IV	Infravermelho 4	940	0,4441

Sendo λ , o comprimento de onda em (nm) e $E\lambda$: Irradiação solar global espectral em determinado comprimento de onda.

Fonte: Adaptado de ASTM (2003).

2.3 Estimativa do albedo no estado envelhecido através de equacionamento

Nesta etapa, foi calculada a estimativa da refletância no estado envelhecido das três colorações de pavimento através da Equação (3), proposta por Levinson et al. (2005):

$$\rho_{\text{envelhecido}} = \rho_0 + c (\rho_{\text{inicial}} - \rho_0) \quad (3)$$

Sendo, $\rho_0 = 0,20$; $c = 0,70$. O cálculo do envelhecimento da refletância é modelado considerando uma redução de 30% da refletância e um decréscimo de 0,2 na refletância inicial.

Também foi utilizado o equacionamento empírico sugerido pela Norma de Desempenho NBR 15220-1:2013. Emenda 1: 2021 (ABNT, 2021, p.42), conforme a Equação (4).

$$\alpha[t=3] = 0,07 (\alpha[t=0])^2 + 0,59 (\alpha[t=0]) + 0,27 \quad (4)$$

Sendo, $\alpha[t=3]$ a absorvância da superfície em um período de 3 anos de envelhecimento natural. $\alpha[t=0]$, a absorvância da superfície no estado novo, no instante 0.

Apesar da proposta de utilização da norma ser para coberturas que estão submetidas ao envelhecimento natural, devido à exposição à radiação solar ultravioleta em um período igual ou superior a três anos. Os pavimentos estão sujeitos a cenários muito semelhantes.

Sendo assim, o intuito desta etapa, foi verificar a variabilidade da absorvância em função do envelhecimento mensurado in loco e o equacionamento normativo. A fim, de verificar se há uma certa aceitabilidade para utilizá-lo na predição da alteração do albedo em pavimentos de concreto pigmentado.

3 Análise de resultados

A análise de resultados deste estudo buscou relacionar os valores de refletância espectral e o comprimento de onda de cada amostra dos pisos adotados para o estudo. Assim, foram traçados gráficos comparativos com estas variáveis nas condições nova e envelhecida para as três cores dos pavimentos de concreto intertravado, os quais foram obtidos por meio da medição in loco com o espectrômetro portátil e pelo equacionamento matemático proposto por Pereira et al. (2015), embasado na ASTM (2016). Por fim, foram comparados os valores mensurados e calculados de albedo no estado novo e envelhecido.

3.1 Refletância Espectral

A refletância espectral de cada amostra de pavimento no estado novo e envelhecido está apresentada na Figura 5.

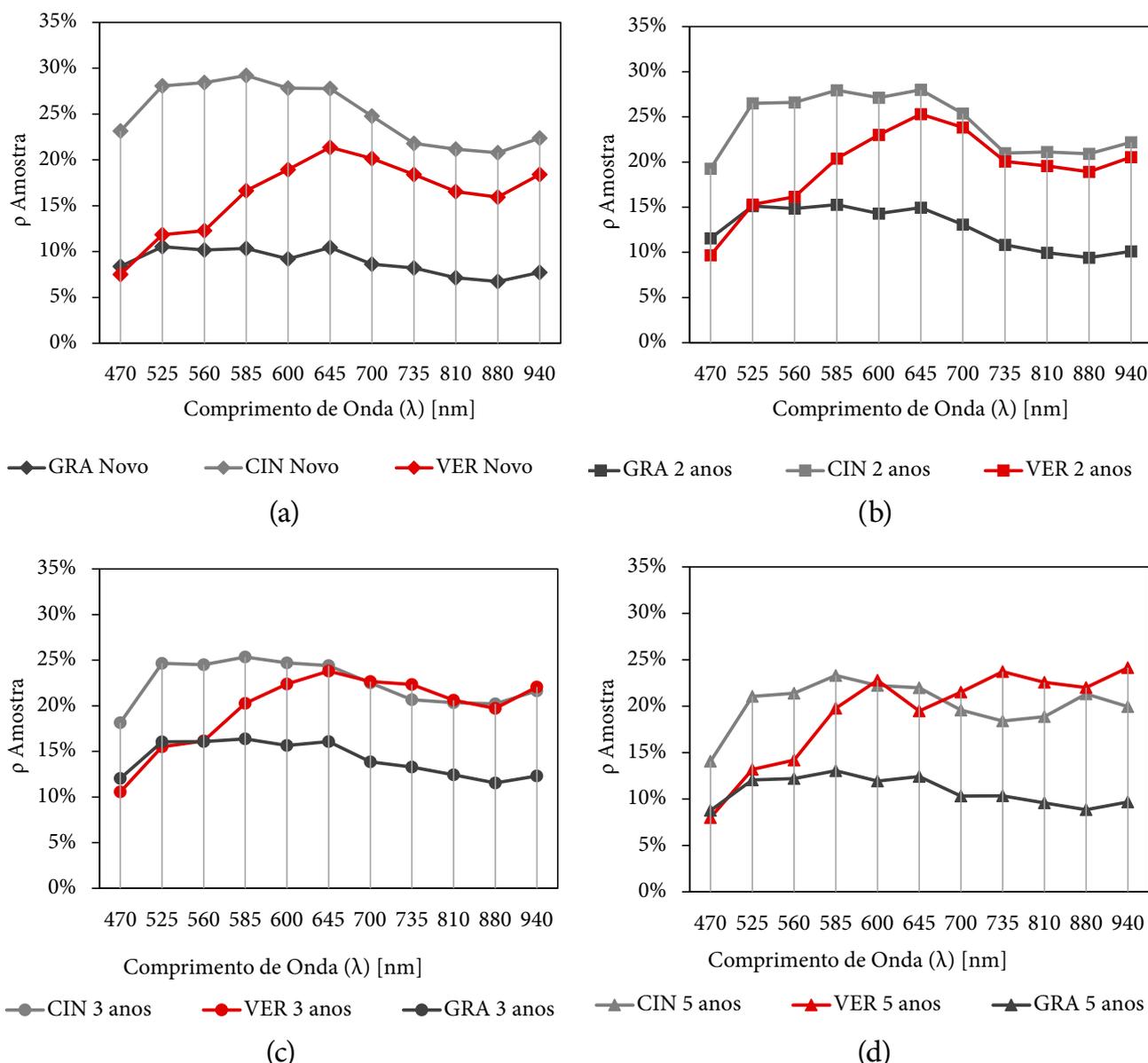


Figura 5 – Variação da refletância espectral (ρ) mensurada in loco dos pavimentos cinza (CIN), grafite (GRA) e vermelho (VER) nas idades de: a) 0; b) 2 anos; c) 3 anos; d) 5 anos. Sendo λ : comprimento de onda em nanômetros

Fonte: Autores (2021).

Percebe-se que o pavimento na condição nova, na cor cinza possui maior refletância em todo o espectro. Entretanto, na faixa do visível, no comprimento de onda 470 nm e 525 nm, o pavimento grafite e o vermelho apresentam uma refletância semelhante.

A amostra do pavimento cinza no estado envelhecido com idade de 2 anos ainda possui maior refletância espectral. Entretanto, na faixa do infravermelho, com comprimento de onda superior a 735 nm, se aproxima da refletância do pavimento vermelho. O pavimento grafite, sofre em todos os comprimentos de onda, uma elevação da refletância espectral.

No terceiro ano de envelhecimento, a refletância espectral entre o pavimento cinza e vermelho praticamente se iguala na faixa do infravermelho próximo. E o

pavimento grafite, se mantem praticamente estável para toda a faixa espectral em relação ao ano anterior.

Kowalski (2019) analisou amostras de pavimentos intertravados pigmentados, nas condições seca e saturada. O que foi observado, é que as amostras vermelhas apresentavam uma maior refletância na faixa do infravermelho, quando saturadas.

Por fim, no quinto ano de envelhecimento, percebe-se um comportamento semelhante observado por Kowalski (2019). Na faixa do infravermelho, o pavimento vermelho possui uma maior refletância que os demais pavimentos, e que o pavimento grafite sofreu uma pequena redução. Além disso, não houve redução da refletância dos pavimentos grafite e cinza nos 5 anos de envelhecimento observado, nos comprimentos de onda 470 nm e 525 nm.

3.2 Refletância Solar

A refletância solar ou albedo das amostras mensuradas e os valores de refletância considerando o envelhecido, matematicamente estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Refletância do pavimento no estado novo e envelhecido, mensurado (M) e calculado (C)

Pavimento	Coletas in Loco (M)			Calculado (com base na NBR 15575, 2021)	Calculado (Levinson, 2005)
	$\rho.M$ novo	$\rho.M$ [3 anos]	$\rho.M$ [5 anos]	$\rho.C >$ [3 anos]	$\rho.C >$ [3 anos]
CIN	0,2485	0,2240	0,2018	0,2471	0,2340
VER	0,1641	0,1986	0,1934	0,1879	0,1749
GRA	0,0884	0,1416	0,1082	0,1340	0,1219

Sendo: ρ a refletância solar da amostra. Sendo: ρ a refletância solar da amostra

A partir dos resultados de albedo calculado e mensurado, apresentados na Tabela 4, foi possível analisar o coeficiente de variação (CV) entre os métodos por equacionamento e os dados mensurados em campo. A variabilidade entre as duas maneiras de estimar o envelhecimento da superfície estão descritos na Figura 6.

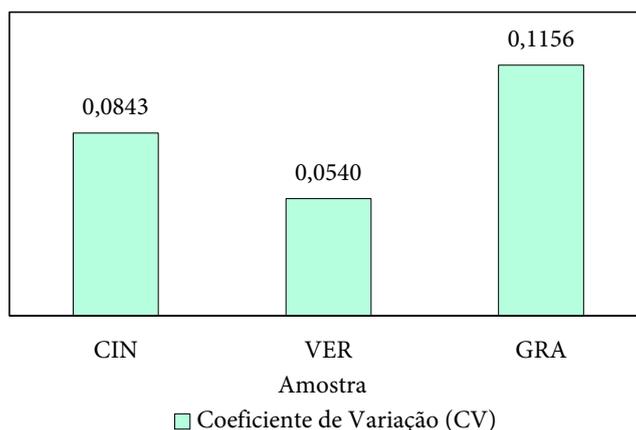


Figura 6 – Coeficiente de variação do albedo envelhecido entre a. valores coletados em campo, b. pelo equacionamento na norma NBR 15575 (2021), e c. da equação de Levinson et al. (2005).

Fonte: Autores (2021).

Ao analisar o coeficiente de variação entre as medições em campo, do equacionamento da norma NBR 15575-1:2013 – Emenda 1 (2021) e a equação proposta por Levinson et al. (2005), percebe-se que a maior variação ocorreu nas amostras grafite (GRA) com um coeficiente de variação de aproximadamente 0,1156, e que a menor variação entre os métodos, ocorreu nos dados da amostra vermelha, com 0,0540. Sendo assim, a variação não demonstra ser significativa, pois os valores de refletância são comumente expressos com um ou dois algarismos decimais, como apresentado em Santamouris e Kolokotsa (2016) e Li (2016).

Na Tabela 5 e na Figura 7 estão apresentados os valores de variação do albedo medido in loco, em um período de 5 anos.

Tabela 5 – Refletância solar (albedo) [ρ] das amostras vermelha (VER), grafite (GRA) e cinza (CIN), nas idades de 0, 2, 3 e 5 anos de envelhecimento natural

Pavimento	ρ (Novo)	ρ (2 anos)	$\Delta\rho$ (V-N) 2 anos	ρ (3 anos)	$\Delta\rho$ (V-N) 3 anos	ρ (5 anos)	$\Delta\rho$ (V-N) 5 anos
CIN	0,2485	0,1265	-0,1220	0,1416	-0,1069	0,1082	-0,1403
VER	0,1641	0,1960	0,0319	0,1986	0,0345	0,1934	0,0293
GRA	0,0884	0,2465	0,1581	0,2240	0,1356	0,2018	0,1134

Sendo: ρ a refletância solar da amostra; $\Delta\rho$ (V-N) a variação da refletância entre a amostra envelhecida e nova. Autores (2021).

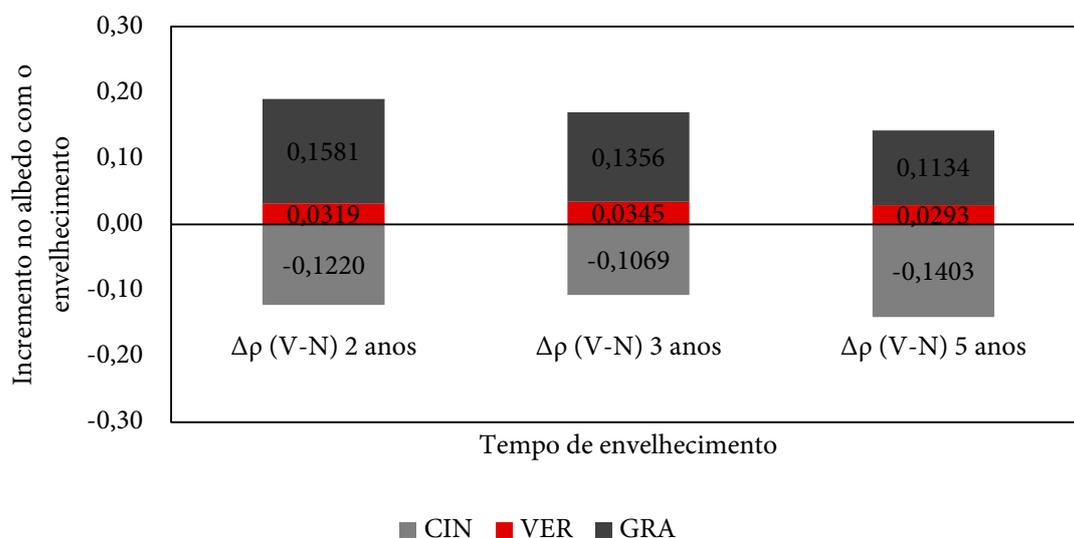


Figura 7 – Incremento no albedo em pavimentos cinza (CIN), grafite (GRA) e vermelho (VER), em função do envelhecimento das amostras.

Fonte: Autores (2021).

Quando comparadas as três colorações, o pavimento cinza apresentou uma diminuição da refletância em relação à amostra nova. Assim como relatado por Alves e Vecchia (2012), o pavimento adquiriu uma coloração mais escura devido ao acúmulo de poeira, o que provocou, conseqüentemente, uma diminuição da refletância. Essa diminuição foi evoluindo com o passar dos anos.

Por outro lado, o pavimento grafite e vermelho apresentam um aumento do albedo com o envelhecimento, tanto nos valores mensurados, quanto nos valores calculados. Porém, essa diferença se reduziu com o passar dos anos. A explicação está pautada possivelmente pela perda da pigmentação e pela perda de tonalidade, nos primeiros anos de envelhecimento, causada pela ação da radiação ultravioleta e pela intempérie.

A variação média identificada no segundo ano de envelhecimento, foi um aumento de 0,15 no albedo do pavimento grafite, 0,03 no pavimento vermelho e uma redução de 0,12 no pavimento cinza.

Bretz, Akbari e Rosenfeld (1998) mencionam que os efeitos do envelhecimento em um contexto de cobertura, provocam uma perda na refletância de aproximadamente 15% no primeiro ano de utilização dos pavimentos asfálticos. Os valores observados em dois anos neste experimento, para a coloração grafite são muito próximos aos encontrados pelos autores. O que reforça a ideia de que há uma perda mais substancial na refletância de materiais escuros nos primeiros anos de utilização.

Em compensação no quinto ano de observação, a diferença entre o albedo novo e envelhecido era de um acréscimo de 0,11 para o pavimento grafite e uma redução de 0,14 em relação ao estado novo. O pavimento vermelho, não apresentou alterações expressivas após o período de 5 anos.

3.3 Albedo no Estado Envelhecido

O albedo no estado envelhecido foi obtido inicialmente através da mensuração da refletância em um pavimento com idades de aproximadamente dois, três e cinco anos. Em seguida, foram aplicados os albedos do concreto novo no equacionamento proposto por Levinson et al. (2015) e pela Emeda 1 (2021) da ABNT NBR 15575-1 (2013). A Figura 8 apresenta a alteração do albedo em função do envelhecimento natural.

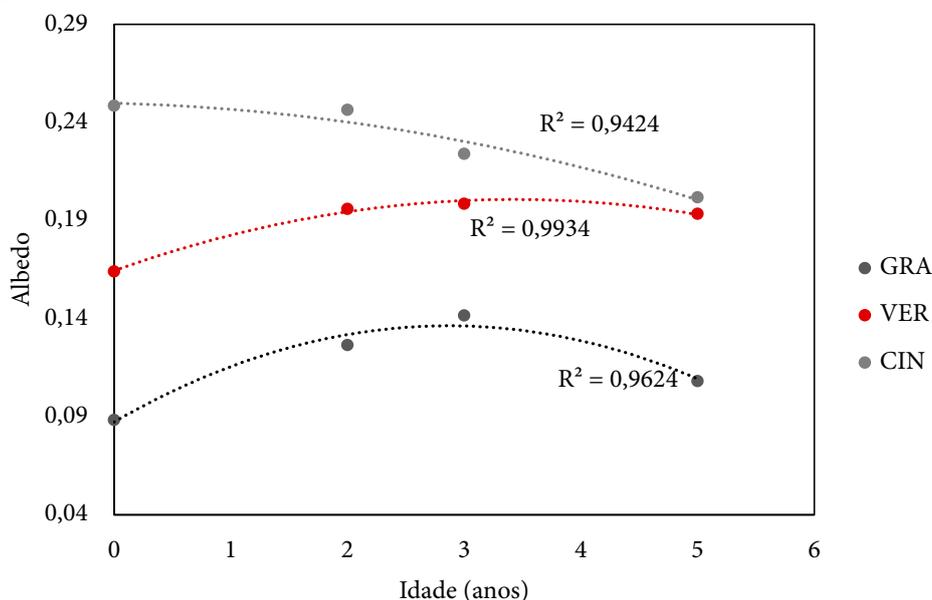


Figura 8 – Alteração do albedo de pavimentos intertravados de concreto em função do tempo. Sendo (GRA) pavimento grafite, (VER) pavimento vermelho e (CIN) pavimento cinza.

Fonte: Autores (2021).

Através de um modelo de regressão polinomial de ordem 2, percebeu-se no período de observação desta pesquisa, que o comportamento de envelhecimento do pavimento segue uma equação de segundo grau.

Os pavimentos, grafite e vermelho apresentaram uma tendência de aumento do albedo nos três primeiros anos. Em compensação, o pavimento cinza uma redução em todo o período de análise, possivelmente em função da deposição de sedimentos.

Ferreira e Prado (2003, p. 7) mencionam que “a exposição ao tempo tende a diminuir a refletância dos materiais claros e aumentar a refletância dos materiais escuros”, o que foi constatado nesta pesquisa. A partir dos resultados apresentados, percebe-se que o pavimento cinza sofre uma diminuição do seu albedo quando envelhecido, o que pode comprometer a eficiência na mitigação das ICU ao utilizá-lo em locais com tráfego intenso, com exposição excessiva à poeira e/ou com manutenção deficitária.

Em contrapartida, o pavimento grafite apresenta a maior variação da refletância em relação às demais superfícies ao considerar o estado novo e envelhecido. Na presença de tráfego intenso de veículos, uma hipótese seria que o pavimento grafite perderia ainda mais sua pigmentação, o que favoreceria seu albedo na mitigação das

ICU. Entretanto, uma investigação mais aprofundada no assunto é necessária.

Na Tabela 6 estão apresentadas equações empíricas, formuladas a partir dos dados observados neste experimento, a fim de estimar o albedo em função do envelhecimento.

Tabela 6 – Estimativa da alteração do albedo em função do envelhecimento natural causado pela radiação solar, em pavimentos intertravados de concreto, com base em dados coletados em campo

Pavimento	Equação	R ²
Grafite	$y = -0,006x^2 + 0,0342x + 0,0873$	0,9624
Vermelho	$y = -0,0031x^2 + 0,0212x + 0,1644$	0,9934
Cinza	$y = -0,0017x^2 - 0,0014x + 0,2498$	0,9424

Sendo y: o albedo ou a refletância solar das amostras e x: tempo de envelhecimento natural causado pela radiação solar em um período igual ou superior a 3 anos.

Fonte: Autores (2021).

Pode-se observar que o modelo de predição apresenta um coeficiente de correlação acima de 94% para as três superfícies, o que demonstra uma boa estimativa de valores intermediários de envelhecimento no período de 5 anos. O que é necessário destacar, é que o experimento foi realizado em pavimentos, que são utilizados apenas para a circulação de pessoas e bicicletas; e localizado na zona rural, sujeito à deposição de sedimentos.

Grande parte dos fenômenos de ICU pode ser mitigado com o uso de pavimentos frios, sendo que, as alterações no microclima das cidades podem ser reduzidas. Entretanto, é importante também considerar os fatores de uso sobre os quais tais pavimentos estão sujeitos, para que o processo de envelhecimento também seja considerado na especificação técnica para a aplicação de um material em superfícies urbanas. A alteração das propriedades de absorvância e refletância dos pavimentos e o comportamento térmico dos materiais de superfície no ambiente urbano devem ser compreendidos mais profundamente.

4 Conclusões

Este trabalho propôs analisar o efeito do envelhecimento no albedo de três pavimentos pigmentados de concreto, através da análise da refletância mensurada pelo espectrômetro portátil e estimada por dois equacionamentos matemáticos, em um período de observação de 5 anos.

Os pavimentos urbanos correspondem a uma grande parcela da cobertura da superfície das cidades. Sendo assim, o uso de pavimentos frios pode, de fato, ser um instrumento para a mitigação de fenômenos relacionados às alterações do microclima.

Por isso, justifica-se compreender mais detalhadamente os mecanismos de resfriamento dos pavimentos e as variáveis envolvidas no processo de envelhecimento e degradação da infraestrutura viária. Desta maneira, a periodicidade de manutenção de um pavimento urbano, seja para tráfego de veículos ou para pedestres, deve ser reavaliada, caso seja estabelecida a função de tornar as cidades mais frias pela sua aplicação.

Os resultados demonstram que há uma redução média de aproximadamente 0,12 no albedo dos materiais claros. Além disso, nos pavimentos mais escuros, há um acréscimo de aproximadamente 0,15 do albedo no segundo ano de exposição e 0,11 após o quinto ano de envelhecimento. Por fim, os pavimentos, grafite e vermelho apresentaram uma tendência de aumento do albedo nos três primeiros anos.

Além disso, essas alterações na coloração original do pavimento frio, e consequentemente a alteração do albedo, pode causar uma perda do potencial de mitigação das ICU.

Entre as contribuições deste trabalho, destaca-se o refinamento dos valores tabelados de refletância solar de pavimentos intertravados de concreto e sua alteração em função do envelhecimento. Além disso, percebe-se que para a análise do efeito do envelhecimento, as diferenças entre os valores instrumentados pelo espectrômetro portátil e os valores calculados através do equacionamento não são substanciais na predição do albedo de pavimentos envelhecidos. Portanto, a equação proposta neste cenário, poderia ser utilizada como forma de acompanhamento e controle da eficiência na perda potencial de albedo em função do envelhecimento de pavimentos urbanos.

Referências

- ABOELATA, A. Reducing Outdoor Air Temperature, Improving Thermal Comfort, and Saving Buildings' Cooling Energy Demand in Arid Cities-Cool Paving Utilization. *Sustainable Cities and Society*, p. 102762, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102762>
- ALVES, E. D. L., VECCHIA, F. A. S. Influência de diferentes superfícies na temperatura e no fluxo de energia: um ensaio experimental. *Ambiência Guarapuava (PR)*, 8(1), 101 – 111. 2012. doi: <https://doi.org/10.5777/ambiencia.2012.01.08>
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. *G173-03*: Standard tables for reference solar spectral irradiances – direct normal and hemispherical on 37° tilted surface. Philadelphia, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. *E903-12*: Standard test method for solar absorptance, reflectance and transmittance of materials using integrating spheres. West Conshohocken, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. *C1549-16*: Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer. Philadelphia, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 15572-1. E-1:2021*. Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos Gerais. Emenda 1: 2021. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- BRETZ, S.; AKBARI, H., ROSENFELD, A. Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. *Atmospheric Environment*, 32(1), 95-101, 1998. doi: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00182-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00182-9)
- CARPIO, J. A.D del. *Uso de pigmentos de óxidos de metais mistos na pavimentação para a mitigação da ilha de calor urbana* (Tese de doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- CHEN, J. et al. Field and laboratory measurement of albedo and heat transfer for pavement materials. *Construction and Building Materials*, v. 202, p. 46-57, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.028>
- CHEN, J; WANG, H.; XIE, P. Pavement temperature prediction: Theoretical models and critical affecting factors. *Applied Thermal Engineering*, v. 158, p. 113755, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113755>
- DORNELLES, K. A. *Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA* (Tese de doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Campinas, 2008.
- ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. *Urban microclimate: Designing the spaces between buildings*. London: Earthscan, 2011.

FERREIRA, F. L., PRADO, R. T. A. *Medição do albedo e análise de sua influência na temperatura superficial dos materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil*. In: Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo 351 – Serie BT-PCC. São Paulo: USP, 2003. Recuperado em 13 de junho de 2020, de http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00351.pdf

GLOBAL COOL CITIES ALLIANCE - GCCA. *A practical guide to cool roofs and cool pavements*. Recuperado em 20 de junho de 2020, de https://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/pdfs/CoolRoofToolkit_Full.pdf

GLOBAL COOL CITIES ALLIANCE - GCCA. *Cooler Cities*. Recuperado em 20 de junho de 2020, de <https://globalcoolcities.org/discover/cool-science/cooler-cities-2/>

GONZALEZ, D. E. G. *Análise dos efeitos do albedo no microclima de cânions urbanos* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, Curitiba, 2015.

GREEN BUILDING COUNCIL – GBC. *Leadership in Energy and Environmental Design*. Recuperado em: 02 de junho de 2020, de <https://www.gbcbrasil.org.br/certificacoes/>

KOWALSKI, L. F. *Influência do albedo de pavimentos no campo térmico de cânions urbanos: estudo de modelo em escala reduzida*. 2019. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2019.

LEVINSON, R.; AKBARI, H. Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete. *Cement and concrete research*, v. 32, n. 11, p. 1679-1698, 2002. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00835-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00835-9)

LEVINSON, R., AKBARI, H., KONOPACKI, S., BRETZ, S. Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements. *Energy Policy*, 33(1), 151-170, 2005. doi: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00206-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00206-4)

LI, H. *Pavement materials for heat island mitigation: design and management strategies*. (1a ed). Oxford: Elsevier, 2016.

LI, H.; HARVEY, J. T., HOLLAND, T. J., KAYHANINAN, M. The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management. *Environmental Research Letters*, 8(1), p.1-14, 2013. doi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/1/015023>

MUNIZ-GÄAL, L. P., PEZZUTO, C. C., CARVALHO, M. F. H. DE, MOTA, L. T. M. Eficiência térmica de materiais de cobertura. *Ambiente Construído*, 18(1), 503-518, 2018. doi: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100235>

NATURAL STONE COUNCIL. *Case Study: Natural Stone Solar Reflectance Index and the Urban Heat Island Effect*. Recuperado em 22 de junho de 2020, de <https://naturalstonecouncil.org/wp-content/uploads/2018/09/Solar-Reflectance-Case-Study-NSC-1.pdf>

OKE, T. R. *Boundary layer climates*. Londres: Methuen & Co, 1978.

PEREIRA, C. D.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. *Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas*. Florianópolis: UFSC, 2015.

- POMERANTZ, M. et al. *Paving materials for heat island mitigation*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1997.
- PRADO, R. T. A., FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37(4), 295–300, 2005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.03.009>
- ROMEO, C., ZINZI, M. Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study. *Energy and Buildings*, 67(1), 647-657, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.023>
- SANTAMOURIS, M.; XIRA, F.; GAITANI, N.; SPANOU, A.; SALIARI, M.; VASSILAKOPOULOU, K. Improving the Microclimate in a Dense Urban Area Using Experimental and Theoretical Techniques. – The case of Marousi, Athens. *Int. Journal of Ventilation*, 11(1), 1–16, 2012. doi: <https://doi.org/10.1080/14733315.2012.11683966>
- SANTAMOURIS, M., KOLOKOTSA, D (Org). *Urban climate mitigation techniques*. New York: Routledge, 2016.
- SYNNEFA, A. et al. Measurement of optical properties and thermal performance of coloured thin layer asphalt samples and evaluation of their impact on the urban environment. In *The second international conference on countermeasures to urban heat islands. California* (p.1-14). US: Berkeley, 2009.
- TSOKA, S. et al. Modeling the 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.016>
- WONG, C. W. et al. A study on the effectiveness of heat mitigating pavement coatings in Singapore. In *The second international conference on countermeasures to urban heat islands* (s.p.) California, U.S: Berkeley, 2009.
- YANG, H. et al. Comparison of potential contribution of typical pavement materials to heat island effect. *Sustainability*, v. 12, n. 11, p. 4752, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/su12114752>
- ZHU, S.; MAI, X. A review of using reflective pavement materials as mitigation tactics to counter the effects of urban heat island. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, v. 2, n. 3, p. 381-388, 2019. doi: <https://doi.org/10.1007/s42114-019-00104-9>