XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Avaliação de propriedades térmicas de argamassas para pavimentos cimentícios com diferentes proporções de cimento branco.

Evaluación de propiedades térmicas de argamasas para pavimentos de cemento con distintas proporciones de cemento blanco.

Evaluation of thermal properties of mortars for cement pavements with different proportions of white cement.

Conforto Térmico no Ambiente Construído e Sustentabilidade Urbana. / *Confort Térmico en el Entorno Construido y Sostenibilidad Urbana. / Thermal Comfort in the Built Environment and Urban Sustainability.*

Cunha, Camila Luana Leal da

Professora no Instituto federal do Norte de Minas Gerais, Pirapora, Brasil, c.camilalleal@gmail.com

Lopes, Moisés João

Engenheiro Civil na Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, engmoises@gmail.com

Hickel, Guilherme Cardoso

Mestre em Construção Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, guilhermechickel@gmail.com

Marinoski, Deivis Luis

Pós Doutor, Professor na Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, deivis.marinoski@ufsc.br

Resumo

O presente estudo explora a utilização de cimento branco em materiais cimentícios de pavimentação como estratégia para contribuir com a mitigação dos efeitos das ilhas de calor urbano. Foram preparadas seis amostras, incluindo uma de controle com cimento cinza e quatro com diferentes proporções de substituição por cimento branco e uma pasta de cimento branco, analisadas quanto à refletância solar, emitância térmica, SRI e temperatura superficial. Os resultados mostraram que as substituições por cimento branco acima de 75% proporcionaram significativa redução de temperatura superficial e aumento da refletância solar, atendendo aos padrões do LEED para pontuação de pavimentos frios. Contudo, o aumento do custo dos materiais representa um desafio à implementação. Este estudo reforça o potencial do cimento branco como alternativa para uso na pavimentação urbana.

Palavras-chave: Pavimentos, Argamassas, Propriedades térmicas, Cimento branco, Custo.

Resumen

La presente investigación explora la utilización de cemento blanco en materiales cementicios de pavimentación como estrategia para contribuir a la mitigación de los efectos de las islas de calor urbano (ICU). Se prepararon seis muestras, incluyendo una de control con cemento gris y cuatro con diferentes proporciones de sustitución por cemento blanco y una pasta de cemento blanco, analizadas en cuanto a reflectancia solar, emisividad térmica, SRI y temperatura superficial. Los resultados mostraron que las sustituciones por cemento blanco superiores al 75% proporcionaron una reducción significativa de la temperatura superficial y un aumento de la reflectancia solar, cumpliendo con los estándares LEED para la puntuación de pavimentos fríos. Sin embargo, el aumento del costo de los materiales representa un desafío para la implementación. Este estudio refuerza el potencial del cemento blanco como alternativa para su uso en la pavimentación urbana.

Palabras clave: Pisos, Argamasas, Propiedades térmicas, Cemento blanco, Costo.

Abstract

This study explores the use of white cement in paving cementitious materials as a strategy to contribute to the mitigation of urban heat island (UHI) effects. Six samples were prepared, including a control sample with gray cement and four samples with different proportions of replacement with white cement and a white cement paste, and analyzed for solar reflectance, thermal emittance, SRI, and surface temperature. The results showed that replacement with white cement above 75% provided a significant reduction in surface temperature and an increase in solar reflectance, meeting the LEED standards for scoring cool pavements. However, the increased cost of materials represents a challenge to implementation. This study reinforces the potential of white cement as an alternative for use in urban paving.

Keywords: Pavements, Mortars, Thermal properties, White cement, Cost.

1. Introdução

O fenômeno das ilhas de calor urbanas (ICU) resulta do aumento das temperaturas em áreas urbanas em relação às regiões rurais adjacentes, causado pela substituição de vegetação por superfícies construídas, como asfalto e concreto, que absorvem e retêm calor. Essa condição é agravada pela densidade de edificações e emissões de calor antropogênico, o que leva ao aumento do consumo de energia, impactos negativos na saúde e alterações no microclima urbano (Zhu & Mai, 2019; Senevirathne et al., 2021; Andrade & Dornelles, 2024).

Os materiais de pavimentação convencionais representam cerca de 40% das superfícies urbanas e têm um papel central na intensificação das ICU, devido à sua baixa refletância solar e elevada capacidade de retenção térmica. Materiais altamente reflexivos, como pavimentos frios, têm sido propostos como estratégia para mitigar as ICU. Em regiões tropicais, esses materiais mostraram ser particularmente eficazes na redução das temperaturas de superfície, oferecendo um potencial significativo para melhorar as condições térmicas em ambientes urbanos (Senevirathne et al., 2021; Elmagri et al., 2024; Wang et al., 2021).

Entre as soluções avaliadas, destaca-se o uso de cimentos brancos, que possuem maior refletância solar em comparação ao cimento cinza convencional. Essa propriedade é atribuída à composição química do cimento branco, que reduz a presença de óxidos metálicos, resultando em superfícies mais claras e menos absorventes de calor. Estudos recentes indicam que a substituição parcial ou total do cimento cinza por cimento branco pode melhorar significativamente as propriedades térmicas das argamassas cimentícias, reduzindo tanto a temperatura superficial quanto a transmissão de calor para o ambiente (Torres-Carrasco et al., 2020; López-Rebollo et al., 2023).

A relevância desses materiais também está relacionada ao atendimento de padrões de sustentabilidade, como os critérios do LEED v5, que estabelecem um valor mínimo de refletância solar (SR) de 0,33 para materiais de pavimentação. O uso de cimento branco pode ser um recurso eficaz para garantir que esse padrão seja cumprido, especialmente em casos em que os agregados utilizados possuem baixa refletância intrínseca, tornando necessária a alteração na composição do cimento para atender aos requisitos normativos (USGBC, 2024).

2. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo investigar as propriedades térmicas (refletância solar, emitância térmica, SRI) e o desempenho econômico das diferentes proporções de cimento branco em argamassas para pavimentos de concreto, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais eficientes na mitigação das ilhas de calor urbanas.

3 Método

3.1 Preparação das amostras

Buscando avaliar o impacto da substituição de cimento cinza por cimento branco, foram preparadas amostras de argamassas cimentícias utilizando diferentes proporções de cimento cinza e cimento branco, seguindo um único traço padronizado de 1:2:0,5 (cimento: agregado miúdo: água). Os materiais e suas proporções são detalhados de acordo com o exposto na Tabela 1:

Tabela 1: Proporções de mistura em gramas.

Substituição (%)	Cimento comum	Cimento Branco	Agregado Miúdo	Água
0	400	0	800	200
25	300	100	800	200
50	200	200	800	200
75	100	300	800	200
100	0	400	800	200
100	0	400	0	200

Fonte: Dos autores (2024).

Para a avaliação do impacto dos agregados miúdos nas medições produziu-se uma sexta mistura de argamassa utilizando a mesma proporção adotada de água e cimento, apenas retirando o agregado miúdo da dosagem do material, conforme listado na última linha da Tabela 1.

Estas argamassas foram produzidas em argamassadeira através de sua homogeneização e mistura. Foram moldadas em placas com 2 cm de espessura e acabamento grosseiro, simulando a camada superficial de um *paver* de concreto de pavimentação para serem submetidas aos ensaios (Figura 1).

Figura 1: Placas de argamassa com referidos teores de substituição.



Fonte: Dos autores (2024).

3.2 Ensaio de avaliação da refletância

O ensaio de refletância espectral foi realizado com o auxílio do equipamento Espectrofotômetro Lambda 1050 – PerkinElmer e de acordo com os preceitos da norma ASTM E903 (ASTM, 2020) o valor de incerteza é da ordem de ± 0,02 dos valores medidos. Os espectrofotômetros possuem o acessório "esfera integradora" com revestimento de alta reflexão que direcionam a radiação difusa ao detector. A refletância da amostra é obtida através dos detectores que determinam a energia refletida em cada comprimento de onda ao longo do espectro solar. (CB3E, 2015).

3.3 Ensaio de avaliação da emitância térmica

Para a análise de emitância térmica, de acordo com a norma ASTM C1371 (ASTM, 2015). O equipamento utilizado foi o emissômetro modelo A-E1 da marca Device & Services. O equipamento contém duas amostras de calibração (alta emitância e baixa emitância), detector e multímetro (marca Hewlett-Packard, modelo 34401A). As superfícies de calibração foram submetidas a 6 leituras, 3 no início do experimento e 3 após a leitura das amostras. As leituras foram realizadas após 90 segundos de exposição ao detector, sendo efetuadas 5 leituras para cada uma das amostras. O resultado da emitância em cada amostra é dado pela média simples dos valores das 5 leituras.

Os resultados foram avaliados em função das incertezas de medição. Determinou-se a incerteza expandida com base no cálculo das incertezas do tipo A (desvio padrão da amostra) e tipo B (a incerteza dos equipamentos emissômetro de ± 0,010 e multímetro de 0,004 mV). A incerteza expandida máxima observada na avaliação das amostras foi de ±0,013. Como a incerteza

expandida calculada (±0,013) foi inferior ao previsto pela norma ASTM C1371 (± 0,020), adotou-se como valor de incerteza para os resultados o maior valor (± 0,020).

3.4 Verificação do SRI

De acordo com a norma ASTM E1980-11 (ASTM, 2011), o índice de refletância solar (SRI) mede a capacidade de uma superfície de refletir a radiação solar, esse fenômeno minimiza o aumento de temperatura causado pela absorção de radiação. O SRI depende da emitância térmica e da refletância solar do material.

Para o cálculo do SRI, a norma estabelece três valores para o coeficiente convectivo (h_c), indicados por h_c = 5, 12 e 30 W/(m²K) que correspondem às condições de baixa, média e alta condição de vento, respectivamente.

3.5 Verificação da temperatura superficial

Uma verificação da temperatura superficial das amostras foi realizada em campo com auxílio de uma câmera fotográfica infravermelha da marca FLIR e modelo T450SC.

O ensaio foi realizado ao ar livre no campus da UFSC em Florianópolis/SC, na cobertura do laboratório LabTermo, do Departamento de Engenharia Mecânica, no dia 26/11/2024. O período de exposição foi das 10:00h às 14:30h e as condições do céu eram de parcialmente nublado. Nos 15 minutos precedentes à execução do ensaio, a temperatura média do ar era de 29,2°C, a umidade do ar em 60,2% e a velocidade do vento era de brisa leve e foi medido em 1,27m/s (dados obtidos *in loco* com auxílio de um termo-higrômetro Testo 435 e um anemômetro Airflow LCA 6000). Os valores medidos de irradiância solar observados durante o período de exposição das amostras oscilaram entre 565 W/m² e 726 W/m² (dados obtidos *in loco* com auxílio de um piranômetro Kipp&Zonen CMP21) devido a variações do cobrimento de nuvens no céu.

As temperaturas superficiais médias das amostras vistas na imagem termográfica foram estimadas a partir de uma média ponderada das áreas de cada temperatura em cada amostra. De maneira que foi efetuado um somatório dos percentuais de área pela temperatura equivalente de cada amostra na imagem e ao final somados os valores para se obter a temperatura média de cada amostra. Os valores extremos de temperatura superficiais de cada amostra foram estimados com base na escala de cores fornecida na lateral direita da própria imagem apresentada pelo equipamento.

A Figura 2, a seguir, apresenta os equipamentos utilizados para a execução dos ensaios laboratoriais de refletância solar, emitância térmica e fotometria infravermelha.

Figura 2: A) Espectrofotômetro LAMBDA 1050; B) Emissômetro AE1 D&S; C) Câmera Infravermelha FLIR T450SC.



Fonte: Dos autores (2024).

3.6 Verificação do incremento de custo

Avaliou-se ainda, o custo relativo das composições de argamassa, através do preço médio dos insumos mais importantes, que são o Cimento Portland Composto CP II-32 e o Cimento Portland Branco CPB-32, tendo o valor médio de R$ 0,87/kg para o cimento cinza, e o valor de R$ 4,61/kg para o cimento branco, referenciado pela tabela Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), disponibilizado pela Caixa Econômica Federal no mês de referência de Outubro de 2024 (CEF, 2024) e sendo tomada como preço referência um custo relativo unitário da argamassa com 0% de substituição. A Tabela 2 apresenta os custos relativos de cada amostra de argamassa produzida em função de seu percentual de substituição.

Tabela 2: Custo relativo das argamassas produzidas.

Substituição (%)	0%	25%	50%	75%	100%
Custo relativo unitário (em R$)	1,00	2,07	3,15	4,22	5,30

Fonte: Dos autores (2024).

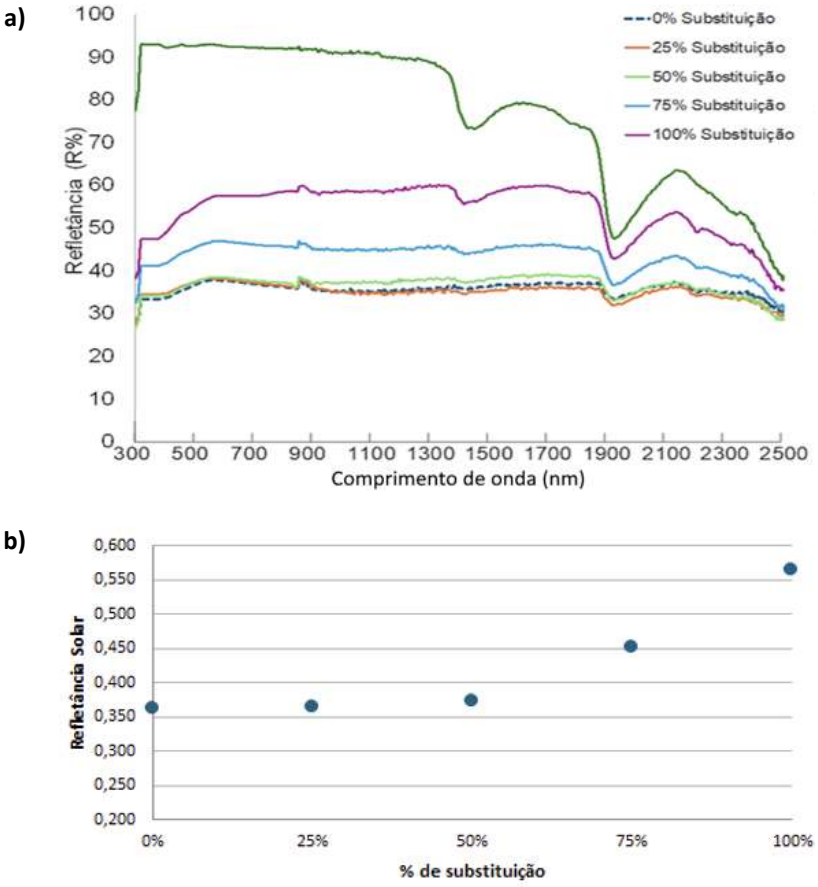
4 Resultados e discussões

Os resultados obtidos a partir da realização dos ensaios permitiram avaliar as propriedades térmicas das amostras com diferentes proporções de substituição de cimento cinza por cimento branco, a influência do agregado miúdo e uma visão breve do custo-benefício de se realizar essas substituições.

4.1 Resultado avaliação de refletância

A Figura 3 (a e b) apresenta os resultados obtidos nos ensaios em laboratório, realizados com o espectrofotômetro e indicam a refletância espectral (a) e solar (b) das amostras analisadas. Verifica-se o impacto significativo da refletância das placas com substituição de cimento branco nos teores superiores a 75%, já nos teores de 25% e 50% de substituição a variação da refletância foi mínima.

Figura 3: Refletância Espectral (a) e solar (b) das amostras



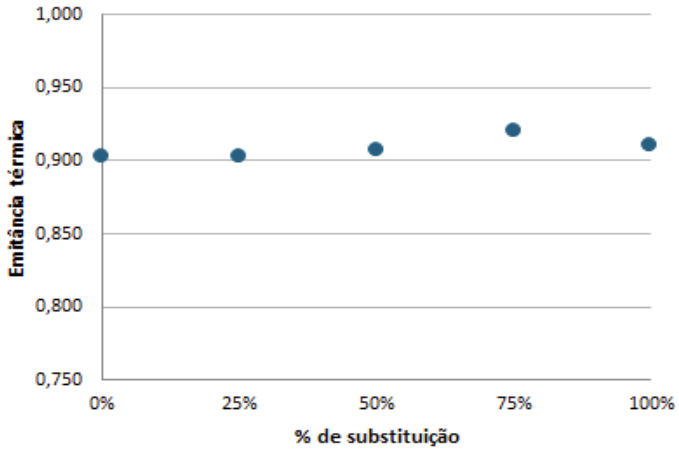
Fonte: Dos autores (2024).

4.2 Resultado avaliação da emitância térmica

A Figura 4 apresenta os resultados de emitância térmica após cálculos com os dados obtidos pelo ensaio utilizando o emissômetro.

Os valores resultantes do ensaio permaneceram relativamente constantes em todas as amostras, indicando que a substituição de cimento cinza por cimento branco não influencia de maneira expressiva na capacidade do material de emitir calor armazenado em forma de radiação.

Figura 4: Emitância térmica.

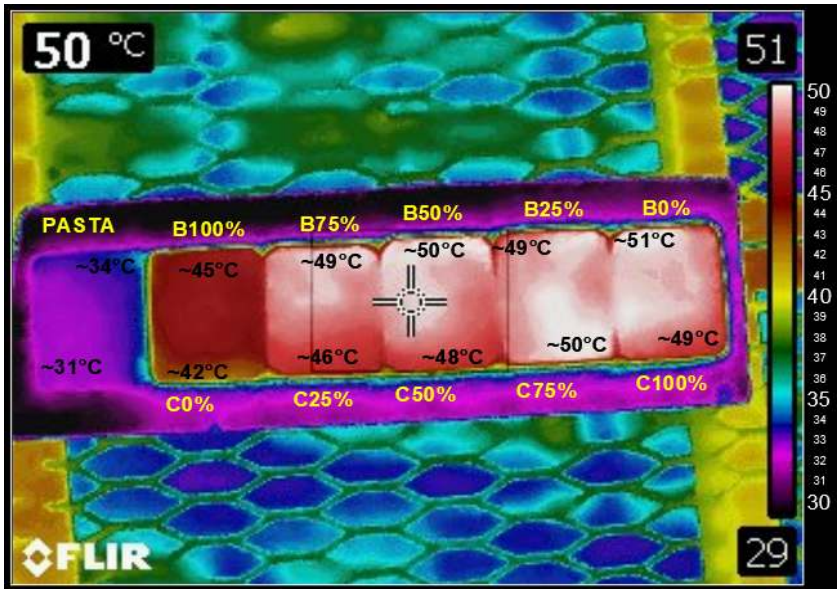


Fonte: Dos autores (2024).

4.3 Resultado da variação de temperatura superficial

A figura 5 apresenta a fotometria infravermelha das placas após a exposição destas a luz solar natural.

Figura 5: Fotometria infravermelha.



Fonte: Dos autores (2024).

Através da análise da imagem, foi possível identificar diferenças significativas nas temperaturas superficiais de cada amostra analisada. As amostras com maior proporção de cimento branco apresentaram menores temperaturas, com reduções notáveis nas substituições de 75% e 100%. É possível destacar que a remoção dos agregados miúdos da pasta cimentícia branca ao ser comparada com a placa de argamassa produzida com 100% de cimento branco impactou na temperatura superficial das placas, destacando a influência do agregado miúdo na leitura.

4.4 Discussão

A Tabela 4 resume os resultados dos ensaios realizados e a análise de custo relativo das argamassas cimentícias formuladas com diferentes proporções de substituição de cimento cinza por cimento branco. A análise permite identificar tendências em relação à temperatura superficial, propriedades térmicas, bem como os impactos econômicos das composições.

Tabela 4: Resumo dos ensaios e análise custo relativo.

Substituição	0%	25%	50%	75%	100%	Pasta Cimentícia Branca
Temp. Superficial (°C)	49,9	49,3	49,0	47,0	43,8	32,5
Refletância Solar	0,362	0,364	0,372	0,451	0,564	0,898
Emitância térmica	0,903	0,902	0,907	0,920	0,910	0,855
SRI (h_c=5)	40,7	40,9	42,1	52,7	67,5	112,9

SRI (h_c=12)	39,9	40,1	41,5	52,6	67,2	112,5
SRI (h_c=30)	40,7	40,9	42,1	53,7	67,5	112,9
Custo Relativo (R$)	1,00	2,07	3,15	4,22	5,30	Não Avaliado

Fonte: Dos autores (2024).

Os valores médios de temperatura superficial das amostras diminuíram de forma consistente com o aumento da proporção de substituição de cimento branco, passando de 49,9°C na substituição de 0% para 43,8°C na pasta de 100% de cimento branco. Essa redução significativa reflete a influência positiva da maior refletância solar do cimento branco, que reduz a absorção de calor e, consequentemente, o aquecimento superficial. Ademais, ao comparar a argamassa de 100% de substituição com a pasta cimentícia branca, observa-se que a inclusão do agregado miúdo (areia) utilizado no estudo, reduziu o desempenho térmico das argamassas, o que sugere que a origem e proporções dos agregados podem gerar impactos.

A refletância solar aumentou de 0,362 (0% de substituição) para 0,564 (100% de substituição), indicando que a substituição do cimento cinza por cimento branco melhora a capacidade do material de refletir a radiação solar, mas de maneira não linear. O critério LEED BD+C para redução de ilha de calor considera que o valor mínimo de refletância solar inicial para pavimentação deve ser de no mínimo 0,33 (USGBC, 2023), valor que foi atendido por todas as amostras analisadas. Os valores elevados de refletância solar obtidos com o cimento comum são possivelmente decorrentes das características da areia usada na argamassa que era de cor clara.

Na substituição de 0%, o custo relativo definido foi de R$1,00, já a substituição de 75% o custo relativo aumentou para R$4,22. Quando se tem a substituição de 100%, o custo relativo é de R$5,30. O que indica um aumento significativo do custo de produção da argamassa com cimento branco. A substituição de 75% ou mais mostrou a capacidade de serem atingidos elevados valores de refletância solar, tornando-se assim uma opção para o caso de necessidade de atender o critério de redução de ilha de calor observando os critérios do LEED.

5. Conclusão

O presente estudo demonstrou o potencial do cimento branco como uma alternativa eficaz para melhorar o desempenho térmico de pavimentos cimentícios e contribuir para a mitigação dos efeitos das ilhas de calor urbano. Os ensaios realizados indicaram que a substituição parcial ou total do cimento cinza por cimento branco aumenta a refletância solar e reduz as temperaturas superficiais das amostras analisadas. Substituições superiores a 75% apresentaram os melhores resultados em termos de desempenho térmico, com incrementos expressivos nos índices de

refletância solar, alcançando níveis de eficiência que atendem com ampla margem os critérios estabelecidos pelo LEED v5.

No entanto, observou-se que o teor de cimento branco utilizado pode aumentar significativamente o custo relativo das argamassas, representando um desafio econômico para a implementação em larga escala. Apesar disso, os benefícios em termos de sustentabilidade, conforto térmico e atendimento às normas de eficiência energética posicionam o cimento branco como uma solução viável em contextos específicos em que a redução de temperaturas urbanas é uma prioridade ou para certificações ambientais de empreendimentos.

Recomenda-se a continuidade de estudos que explorem alternativas para reduzir o custo de produção dessas argamassas e avaliem o desempenho térmico em condições reais de aplicação. Além disso, a análise de diferentes tipos e proporções de agregados miúdos poderá contribuir para otimizar ainda mais o desempenho térmico e a viabilidade econômica das composições cimentícias com substituição de cimento branco.

Referências

ANDRADE, M. M. de; DORNELLES, K. A. **Chemical composition of cool coatings and the influence on solar reflectance and thermal emittance**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 24, e138358, 2024. DOI: https://doi.org/10.1590/s1678-86212024000100775.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1371-15: Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers**. ASTM International, 2015;

_____. **E1980-11: Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces.** ASTM International, 2011

_____. **E903-20: Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres.** ASTM International, 2020.

CB3E - Centro Brasileiro de Construção em Elementos de Edifícios. **Guia de Medição de Refletância Solar** - Versão 1. Florianópolis: UFSC, 2015. Disponível em: https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Guia_medicao_refletancia_CB3E_v1.pdf. Acesso em: 9 dez. 2024.

DEVICES & SERVICES CO. **AE1 Spec Sheet.** Dallas: Devices & Services Co., [s.d.]. Disponível em: https://www.devicesandservices.com/AE1%20Spec%20Sheet.pdf. Acesso em: 02 dez. 2024.

ELMAGRI, Hasna; KAMEL, Tarek M.; OZER, Hasan. **Assessment of the effectiveness of cool pavements on outdoor thermal environment in urban areas.** Building and Environment, [s. l.], v. 266, 1 dez. 2024. DOI https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112095. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132324009375.

LÓPEZ-REBOLLO, J.; DEL POZO, S.; MARTÍN NIETO, I.; SÁEZ BLÁZQUEZ, C.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D. **Experimental study on the thermal properties of pigmented mortars for use in energy efficiency applications.** Journal of Cleaner Production, v. 382, 135280, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135280.

SENEVIRATHNE, D. M.; JAYASOORIYA, V. M.; DASSANAYAKE, S. M.; MUTHUKUMARAN, S. **Effects of pavement texture and colour on Urban Heat Islands:** An experimental study in tropical climate. Urban Climate, v. 40, 101024, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101024.

TORRES-CARRASCO, M.; ENRÍQUEZ E.; TERRÓN-MENOYO L.; CABRERA M. J.; MUÑOZ D.; FERNÁNDEZ J. F. **Improvement of thermal efficiency in cement mortars by using synthetic feldspars.** Construction and Building Materials 269. 2021.

USGBC. U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. **LEED v5 Public Comment 2 - New Construction Credits**. Disponível em: https://www.usgbc.org/credits/new-construction/v5-public-comment-2-13?return=/credits/New%20Construction/v5%20-%20Public%20Comment%202. Acesso em: 10 dez. 2024.

WANG, Chenghao; WANG, Zhi-Hua; KALOUSH, Kamil E.; SHACAT, Joseph. **Cool pavements for urban heat island mitigation:** A synthetic review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [s. l.], v. 146, Agosto 2021. DOI https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111171.

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. 4, p. 381-388, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s42114-019-00104-9.