DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE UMA TELHA DE CONCRETO FRIA PARA EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS: ESTUDO PILOTO EM SÃO CARLOS-SP

Wellington Souza Silva (1); Kelen Almeida Dornelles (2)
(1) Mestre, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, wellingtonsouza@usp.br
(2) Pós-doutora, Professora do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, kelend@usp.br
Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, São Carlos-SP, (16) 3373-9285

RESUMO
Grande parte das pesquisas nacionais sobre materiais frios buscou analisar e compreender as propriedades térmicas e ópticas de materiais existentes, principalmente a refletância solar. Há uma deficiência de pesquisas voltadas para o desenvolvimento de materiais refletivos, sobretudo telhas. Este trabalho apresenta os resultados do estudo piloto de uma pesquisa que pretende preencher essa lacuna no desenvolvimento de materiais frios, com foco na produção e avaliação de uma telha de concreto fria para o Brasil. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho termoenergético de uma telha de concreto fria na cidade de São Carlos-SP (clima subtropical úmido, Cwa). A metodologia consistiu em simulação computacional de uma residência unifamiliar no *software* EnergyPlus 9.2, para calcular os graus-hora de calor e frio e o consumo energético da edificação. A telha de concreto fria reduziu 339 graus-hora de calor das 5475 horas anuais analisadas, e aproximadamente, 40% do consumo energético do ar-condicionado, em comparação à telha cerâmica. Esses resultados confirmam o desempenho da telha de concreto fria, evidenciado pela literatura, e permitem fundamentar as próximas etapas da pesquisa, que incluem: revisão bibliográfica; produção de telhas de concreto com componentes refletivos (pigmentos ou materiais); medição das propriedades físicas, mecânicas (absorção de água, impermeabilidade e carga de ruptura à flexão), térmicas e ópticas (refletância espectral, emitância térmica, temperatura superficial e parâmetros de cor), incluindo os efeitos da degradação natural nessas propriedades; simulação do desempenho termoenergético; e análise econômica para o contexto nacional.

Palavras-chave: cobertura fria, telha, concreto, desempenho termoenergético.

ABSTRACT
Much of the national research on cool materials sought to analyze and understand the thermal and optical properties of materials, mainly solar reflectance. There is a lack of study focused on the development of reflective materials, especially tiles. This research presents the results of a pilot study of a bigger research which seeks to fill this gap by producing and assessing a cool concrete tile for Brazil. This study presents an assessment of the thermoenergetic performance of a cool concrete tile for São Carlos-SP (humid subtropical climate, Cwa). Computer simulation on EnergyPlus 9.2 software was used to calculate the heat and cool degree-hours, and the energy consumption of a single-family house. The cool concrete tile reduced 339 degree-hours of heat from the 5475 annual hours analyzed, and a reduction of approximately 40% in the energy consumption of the air conditioner. These results confirm the performance of the cool concrete tile cited by literature and support the next steps of this research: literature review; production of concrete tiles with reflective components (pigments or other elements); measurement of their physical, mechanical (water absorption, impermeability and transverse rupture strength), thermal, and optical properties (spectral reflectance, thermal emittance, surface temperatures and color parameters), including the effects of natural aging on these properties; simulation of thermoenergetic performance; and an economic analysis for the Brazilian context.

Keywords: cool roof, tile, concrete, thermoenergetic performance.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de superfícies frias (materiais com alta refletância solar e alta emitância térmica) no meio urbano está entre as soluções para mitigar os efeitos das ilhas de calor urbanas (GARTLAND, 2010). Essas superfícies proporcionam menor absorção da radiação solar e rápida liberação de calor, resultando em temperaturas superficiais menores que superfícies convencionais (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011). Em consequência, superfícies e materiais frios podem reduzir a demanda de energia de resfriamento para edifícios condicionados artificialmente, e aumentar o conforto de usuários em edifícios não condicionados (LEVINSON *et al*., 2007). Pisello e Cotana (2014) encontraram uma redução de 4,7ºC no ático de uma edificação residencial no verão italiano, utilizando uma telha cerâmica fria. Através de simulação computacional, Silva (2019) encontrou uma redução do ganho de calor em 59% para telhas de fibrocimento frias e de 55% para as telhas cerâmicas frias, quando comparadas às telhas convencionais em uma edificação unifamiliar no Rio de Janeiro-RJ.

No Brasil, as pesquisas sobre materiais frios ainda são incipientes. A maioria dos trabalhos buscou analisar e compreender as propriedades térmicas e ópticas de materiais existentes (tintas, telhas, revestimentos, entre outros), sobretudo a refletância solar. Há deficiência de pesquisas voltadas para o desenvolvimento de materiais refletivos, sobretudo telhas, embora Dornelles (2021) já tenha identificado elevadas absortâncias solares para as telhas de concreto brasileiras, por exemplo, variando entre 0,51 e 0,91 para telhas de concreto coloridas (marfim e canela, respectivamente) e 0,73 para a telha de concreto natural.

Assim, este trabalho apresenta os resultados do estudo piloto de uma pesquisa pretende preencher essa lacuna no desenvolvimento de materiais frios, com foco na produção e avaliação de uma telha de concreto refletiva que apresente custo-benefício adequado para o contexto brasileiro.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho termoenergético de uma telha de concreto fria na cidade de São Carlos-SP (clima subtropical úmido, Cwa) utilizando o *software* EnergyPlus.

3. MÉTODO

3.1. Estudo Piloto

A fim de verificar o desempenho do material e justificar o desenvolvimento de uma telha de concreto fria para o cenário nacional, foi realizado um estudo piloto utilizando simulação computacional no *software* EnergyPlus 9.2 (ENERGYPLUS, 2023) com o arquivo climático (INMET) da cidade de São Carlos-SP (CLIMATE ONE BUILDING, 2023) para as 8760 horas do ano. A cidade possui um clima subtropical úmido, Cwa, com inverno seco e verão quente (ALVARES *et al*., 2013).

A edificação simulada possui sala/cozinha integradas, dois quartos e um banheiro (Figura 1). É um modelo de referência para Habitações de Interesse Social (HIS) naturalmente ventiladas, elaborado por Rossi *et al*. (2019) a partir do levantamento das tipologias de HIS comuns no Brasil e na região. A ocupação dos quartos (BDR_1 e BDR_2) ocorre entre 22h e 8h, com 2 pessoas dormindo em cada quarto, enquanto na sala/cozinha (LR_KIT) ocorre em dois períodos: 14h às 18h com 2 pessoas sentadas, e entre 18h e 22h com 4 pessoas sentadas. Os ganhos internos por pessoas, por iluminação e por equipamentos seguiram as recomendações da NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

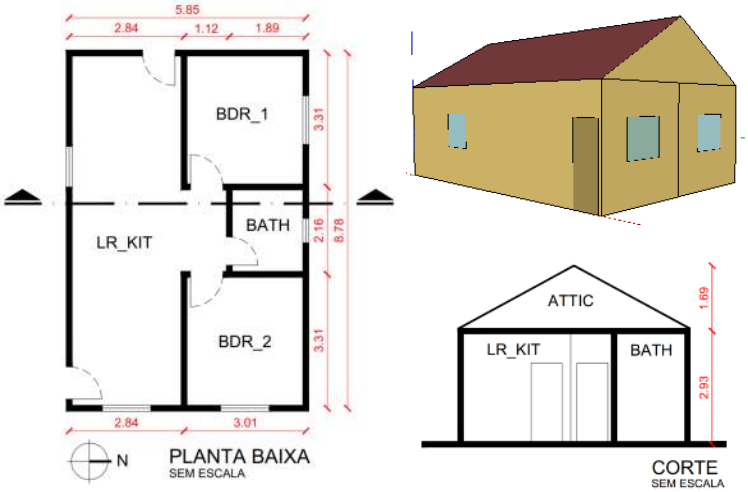

Figura 1 - Modelo geométrico da edificação unifamiliar simulada.
Fonte: Adaptado de ROSSI *et al*., 2019.

A temperatura do solo considerada para a simulação corresponde às médias mensais da temperatura do ar. A ventilação natural foi modelada no *ZoneVentilation:DesingFlowRate*, considerando 3 renovações de ar por hora e funcionamento entre 7h e 22h, apenas se a temperatura do ar interno for maior que 21ºC e com um delta de temperatura de 1ºC. O ar-condicionado modelado no *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsSystem* foi

inserido apenas nos quartos, funcionando entre 22h e 7h. O termostato possuía um *setpoint* de 8ºC para aquecimento e 25ºC para resfriamento. Além disso, no módulo *ZoneInfiltration:DesingFlowRate* foi modelada a infiltração pelas aberturas, com um valor constante de 1 renovação de ar por hora.

A Tabela 1 apresenta as propriedades térmicas dos materiais dos sistemas construtivos da edificação. Estes sistemas consistiram em: piso em laje de concreto; paredes de tijolo cerâmico 6 furos com argamassa (14cm); portas de madeira, janelas de vidro e cobertura com laje pré-moldada (12cm) e telhas.

Tabela 1 - Características dos materiais utilizados na simulação computacional. Fonte: ABNT, 2005a; LEVINSON *et al.*, 2010.

Elemento	Material	Condut. térmica [W/(m.K)]	Densidade [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]	Absortância solar	Resist. térmica [m²K/W]
Piso	Laje de concreto (10,0cm)	1,75	2200	1000	0,8	-
Paredes externas	Argamassa (2,5cm)	1,15	2000	1000	0,6	-
	Cerâmica (2,0cm)	0,9	1400	920	-	-
	Câmara de ar	-	-	-	-	0,149
	Cerâmica (2,0cm)	0,9	1400	920	-	-
	Argamassa (2,5cm)	1,15	2000	1000	0,6	-
Paredes internas	Argamassa (2,5cm)	1,15	2000	1000	0,16	-
	Cerâmica (2,0cm)	0,9	1400	920	-	-
	Câmara de ar	-	-	-	-	0,149
	Cerâmica (2,0cm)	0,9	1400	920	-	
	Argamassa (2,5cm)	1,15	2000	1000	0,16	-
Laje pré-moldada	Argamassa (5,0mm)	1,15	2000	1000	-	-
	Concreto (2,0cm)	1,75	2200	1000	-	-
	Cerâmica (2,0cm)	0,9	1400	920	-	-
	Câmara de ar	-	-	-		0,268
	Cerâmica (2,0cm)	0,9	1400	920	-	-
	Concreto (2,0cm)	1,75	2200	1000	-	-
	Argamassa (5,0mm)	1,15	2000	1000	-	-
Portas	Madeira (35,0mm)	0,29	700	1340	-	-
Janelas	Vidro (4,0mm)	-	-	-	-	-
Cobertura	Telha cerâmica (2,5mm) - referência	0,9	1400	920	0,75	-
	Telha de concreto fria (2,5mm)	1,75	2200	1000	0,21	-

Foram simulados dois modelos com variação apenas da cobertura: telha cerâmica com absortância solar de 0,75 (modelo referência) e uma telha de concreto fria com absortância solar de 0,21. As propriedades desta última foram definidas a partir da literatura (ABNT, 2005a; LEVINSON *et al.*, 2010).

As variáveis de saída (*outputs*) solicitadas foram dados horários de: *Site Outdoor Air Drybulb Temperature* [C]; *Zone Operative Temperature* [C]; *Zone Mean Air Temperature* [C]; *Zone Ventilation Air Change Rate* [ach]; *Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Rate* [W]; *Zone Ideal Loads Zone Total Heating Rate* [W]; *Zone Lights Electric Power* [W] e *Electric Equipment Electric Power* [W]. Eles foram utilizados para analisar/calcular os graus-hora de calor e frio e o consumo energético por tipo de uso final total dos modelos. Serão apresentados os resultados desses parâmetros para o BDR_2, pois ele apresentou mais graus-hora de calor (148) e de frio (10) que o BDR_1 na simulação com a telha cerâmica (modelo referência).

4. RESULTADOS PRELIMINARES

As Figuras 2 e 3 apresentam os gráficos de graus-hora do BDR_2 e do consumo energético anual para as coberturas.

Os valores de graus-hora acima e abaixo da faixa 18ºC - 25ºC podem representar a intensidade da sensação de calor ou frio para determinando ambiente. Para este parâmetro, no BRD_2, a telha de concreto fria reduziu em 339 graus-hora de calor e em 18 graus-hora de frio (Figura 2), dentre as 5475 horas do ano analisadas. Embora a redução dos graus-hora de frio não tenha sido significativa, a redução dos graus-hora de calor foi importante pois estão sendo analisados apenas os horários de atuação da ventilação natural, ou seja, entre 7h e 22h.

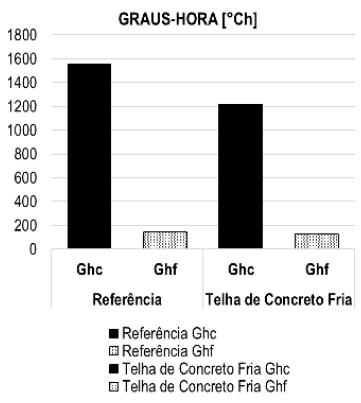

Figura 2 - Gráfico dos graus-hora calculados para as duas coberturas no BDR_2. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

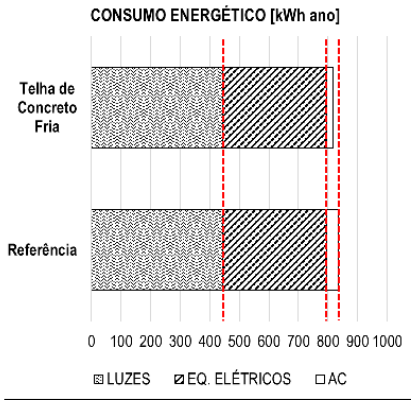

Figura 3 - Gráfico do consumo energético anual total da edificação para as duas coberturas. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Essa redução nos graus-hora a partir da utilização de uma telha de concreto com características refletivas à radiação solar provocou redução do aquecimento do ambiente, permitindo que ele ultrapassasse o limite superior de 25ºC da temperatura operativa com menor frequência que a telha cerâmica, apresentando assim um melhor desempenho térmico que a cobertura de referência.

Esses dados comprovam o que diz a literatura: a utilização de coberturas frias reduz o aquecimento do ambiente interno. Por possuir uma absortância solar menor que a telha cerâmica do modelo de referência, a telha de concreto fria aquece menos. Ela possui maior refletância no espectro solar, principalmente no infravermelho, região do espectro solar responsável pelo aquecimento do material. Isso impacta na redução da temperatura superficial do material, na redução da temperatura do ar interno e na temperatura operativa do ambiente, no caso, o BDR_2. Essas reduções permitiram também reduzir o consumo do ar-condicionado total da edificação para o período de um ano, como apresentado no gráfico da Figura 3. A telha cerâmica do modelo de referência proporcionou um consumo energético para ar condicionado (*ideal loads*) de 38,4kWh por ano, enquanto a telha de concreto fria consumiria 23,0kWh por ano, uma redução de aproximadamente 40% do consumo energético do ar-condicionado.

5. ETAPAS FUTURAS

5.1. Etapa 1: Revisão bibliográfica

Reunir referências sobre os seguintes temas: radiação solar e elementos opacos; materiais frios; desenvolvimento, produção e avaliação de revestimentos frios com foco em telhas; componentes refletivos; normas, orientações, propriedades e processo de produção das telhas de concreto no Brasil.

5.2. Etapa 2: Produção de telhas e amostras

As telhas de concreto são compostas de areia, cimento e água, podendo conter aditivos ou não (ABNT, 2009). Serão produzidas telhas de perfil ondulado com dimensões 330 x 420 x 50mm. Os componentes que conferirão as características refletivas poderão ser pigmentos refletivos, como o dióxido de titânio (TiO_2) ou materiais com propriedades refletivas, como o *filler* calcário. O tipo, quantidade e forma de aplicação desses componentes serão definidos no decorrer da pesquisa a partir da revisão bibliográfica. Além das telhas, também serão produzidas amostras 90 x 90 x 12mm utilizando o mesmo traço de materiais. As telhas serão utilizadas para os ensaios físicos e mecânicos e as amostras para os ensaios térmicos e ópticos.

5.3. Etapa 3: Ensaios físicos e mecânicos de desempenho das telhas

Serão realizados apenas os ensaios de absorção de água, impermeabilidade e determinação da carga de ruptura à flexão, porque estão dentro do escopo da pesquisa e se apresentam mais relevantes para o desempenho da telha de concreto fria, dentre todos os ensaios prescritos pela NBR 13858-2 (ABNT, 2009).

5.4. Etapa 4: Ensaios das propriedades térmicas e ópticas

Esta etapa compreende os ensaios de refletância espectral para determinação da absortância solar, da emitância térmica, dos parâmetros de cor e o monitoramento de temperaturas superficiais. Para a análise da **refletância solar**, será utilizado o método prescrito pela ASTM E903 (ASTM, 2020) que utiliza um espectrofotômetro com esfera integradora, por ser o mais difundido internacionalmente. A **emitância térmica** das amostras será medida seguindo a norma ASTM C1371 (ASTM, 2015), utilizando um emissômetro portátil. A medição dos **parâmetros de cor** será realizada conforme a norma ASTM D2244 (ASTM, 2021), utilizando um colorímetro. Por fim, a medição da **temperatura superficial** utilizará dados obtidos com termômetro infravermelho, câmera termográfica e sensores termopares (dados contínuos).

5.5. Etapa 5: Análise da degradação natural

A fim de quantificar a alteração das propriedades térmicas e ópticas das telhas de concreto frias oriundas da degradação natural (radiação ultravioleta, poluição, crescimento de microrganismos, precipitação, entre outros elementos), os ensaios da Etapa 4 serão refeitos após, pelo menos, um (1) ano de degradação natural das amostras expostas ao clima da cidade de São Carlos–SP.

5.6. Etapa 6: Simulação do desempenho termoenergético

O desempenho termoenergético das telhas será analisado por meio de simulação computacional no *software* EnergyPlus, utilizando como indicadores o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), a temperatura operativa anual máxima e mínima da unidade habitacional ($To_{máx}$ e $To_{mín}$), e a carga térmica total (CgTT) conforme prescrito na NBR 15575-1 (ABNT, 2021). As simulações serão realizadas para um período anual em cada uma das 8 Zonas Bioclimáticas Brasileiras (ABNT, 2005b), alterando apenas as propriedades da cobertura (absortância solar) obtidas na Etapa 4.

5.7. Etapa 7: Análise econômica

Pretende-se comparar os custos (investimento inicial, consumo energético e manutenção) e os benefícios da utilização de telhas de concreto frias. Será utilizada a metodologia proposta por Silva (2019), que realizou simulação termoenergética e análise econômica da utilização de coberturas de alta refletância solar em uma residência unifamiliar no Brasil. Ela utilizou simulação no *software* EnergyPlus e indicadores financeiros (investimento inicial, tempo de retorno do investimento e taxa interna de retorno) na avaliação.

5. CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Os resultados do estudo piloto demonstram que a telha de concreto fria analisada apresentou resultados promissores na redução dos ganhos internos de calor e no consumo energético para condicionamento artificial. Esse comportamento é importante, principalmente para o Brasil, um país tropical com altas taxas de radiação solar onde o desconforto por calor é predominante. Desse modo, o estudo piloto confirma o desempenho esperado da telha de concreto fria e evidenciado pela literatura, permitindo fundamentar o desenvolvimento da pesquisa, que avança para as fases de revisão bibliográfica e produção de telhas e amostras. Importante destacar que o desempenho térmico da telha fria dependerá das características construtivas e projetuais do edifício, o que pode potencializar ou não a eficiência em seu uso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13858-2**: telhas de concreto - parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **ABNT NBR 15220-2**: desempenho térmico de edificações – parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

_____. **ABNT NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações – parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

_____. **ABNT NBR 15575-1**: edificações habitacionais – desempenho parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1371**: Standard test method for determination of emittance of materials near room temperature using portable emissometers. ASTM International, 2015.

_____. **ASTM D2244**: Calculation of color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates. ASTM International, 2021.

_____. **ASTM E903**: Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres. ASTM International, 2020.

CLIMATE ONE BUILDING. Website. 2023. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org/>. Acesso em: 31 mar. 2023.

DORNELLES, Kelen Almeida. **Biblioteca de absortância de telhas:** base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios. São Carlos: IAU/USP, 2021.

ENERGYPLUS. Website. 2023. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 31 mar. 2023.

GARTLAND, Lisa. **Ilhas de calor**: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. Tradução Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina dos Textos, 2010.

LEVINSON, Ronnen; AKBARI, Hashem; BERDAHL, Paul; WOOD, Kurt; SKILTON, Wayne; PETERSHEIM, Jerry. A novel technique for the production of cool colored concrete tile and asphalt shingle roofing products. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 94, p. 946-954, 2010. DOI: 10.1016/j.solmat.2009.12.012.

LEVINSON, Ronnen; BERDAHL, Paul; AKBARI, Hashem; MILLER, William; JOEDICKE, Ingo; REILLY, Joseph; SUZUKI, Yoshi; VONDRAN, Michelle. Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 91, p. 304-314, 2007. DOI: 10.1016/j.solmat.2006.06.062.

PISELLO, Anna Laura; COTANA, Franco. The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy: results from two years of continuous monitoring. **Energy and Buildings**, v. 69, p. 154-164, 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.031.

ROSSI, Michele Marta; FAVRETTO, Ana P. Oliveira; GRASSI, Camila; DECAROLIS, Joseph; CHO, Soolyeon; HILL, David; CHVATAL, Karin M. Soares; RANJITHAN, Ranji. Metamodels to assess the thermal performance of naturally ventilated low-cost houses in Brazil. **Energy & Buildings**, v. 204, 109457, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109457.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar Energy**, v. 85, p. 3085-3102, 2011. DOI: 10.1016/j.solener.2010.12.023.

SILVA, Milena Paim. **Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados de alta refletância solar em uma residência unifamiliar**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/215434>. Acesso em: 21 abr. 2022.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de doutorado (Processo n° 2022/09123-7). As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade dos autores e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.