



## **MODELO EM ESCALA REDUZIDA DE CÂNIONS E PAVIMENTOS URBANOS: *PAVEMENT AND STREET CANYON MODEL (PAVSCAM)***

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

(1) Doutorando, Engenheiro Civil, luizfernando.lfk@gmail.com, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís Km 235, São Carlos - SP, CEP: 13571, +55 (19) 98147-6005

(2) Doutor, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, erico@ufscar.br, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís Km 235, São Carlos - SP, CEP: 13571, +55 (16) 3351-8263

### **RESUMO**

Em estudos de cânions urbanos, as coletas de dados em campo fornecem informações de muito valor, porém nem sempre permitem o entendimento de processos físicos mais complexos de interação entre as superfícies e o ambiente. Por outro lado, os métodos de simulação, mesmo sendo um processo de simplificação, permitem outra perspectiva de análise desses fenômenos. Sendo assim, o objetivo deste estudo é propor a construção de um modelo físico de cânion urbano em escala reduzida em um contexto tropical para observar as variáveis microclimáticas relacionadas a quatro tipos de pavimentos. A primeira fase do método foi a caracterização da área e do local de implantação. Em seguida, foram apresentadas as potencialidades e limitações dos modelos de simulação. Como resultado, o estudo mostrou que modelos físicos em escala apresentam potencialidades para observar diversos fenômenos físicos que ocorrem em cânions urbanos, especialmente àqueles que se relacionam com a temperatura superficial e aos ventos. Em contrapartida, não são tão adequados para estudos de balanço energético, tendo em vista as limitações relacionadas à inércia dos materiais. Desta forma, o potencial de medidas mitigatórias e as consequências de políticas públicas de adaptação climática a nível local podem ser observadas com maior precisão e assim apoiar a construção de estruturas responsivas ao clima em ambiente real.

Palavras-chave: modelo físico em escala, pavement and street canyon model (PAVSCAM), pavimentos frios, microclima urbano.

### **ABSTRACT**

In the study of urban canyons, field data collection provides valuable information, but does not always allow the comprehension of more complex physical processes of surface interaction with the environment. On the other hand, simulation methods, despite being a simplification process, offer an alternative analysis for these phenomena. So, the aim of this study is to propose the construction of a physical model of an urban canyon in a tropical context in order to observe the microclimatic variables associated with four varieties of pavements. Characterization of the area and implantation site comprised the initial phase of the method. Next, the strengths and weaknesses of the simulation models were discussed. The results demonstrated that physical scale models have the potential to observe a variety of physical phenomena that occur in urban canyons, particularly surface temperature and winds. However, the limitations associated with the inertia of the materials, make physical scaled model unsuitable for energy balance investigations. Thus, the potential for mitigation measures and the consequences of public climate adaptation policies at the local level can be observed with greater precision, thereby facilitating the construction of climate-responsive structures in the real world.

Keywords: physical scaled model, pavement and street canyon model (PAVSCAM), cool pavements, urban microclimate.

## 1. INTRODUÇÃO

O cânion urbano pode ser uma representação modular e simplificada da composição da superfície urbana, conforme a definição de Erell, Pearlmutter e Williamson (2011). Os primeiros trabalhos no entendimento de processos físicos no interior de cânions foram conduzidos por Nunez e Oke (1977), dando espaço a partir de então para pesquisas associadas a alterações microclimáticas, formação de Ilhas de Calor Urbano e estudos de conforto.

Inúmeras são as pesquisas que se propõem avaliar o impacto das medidas mitigatórias para o microclima urbano como, a substituição do pavimento asfáltico por pavimento de concreto em clima mediterrâneo proposta por Santamouris *et al.* (2012); o estudo da redução da temperatura do ar proporcionado por pavimentos frios em clima árido (ABOELATA, 2021); avaliação do impacto dos sistemas de vegetação em fachadas no conforto térmico de pedestres em cidades de clima subtropical úmido (CUI *et al.*, 2022); bem como, a influência dos materiais de pavimento e fachada no balanço radiativo de cânions urbanos em clima quente e temperado (MATIAS e LOPES, 2020). Nesse mesmo contexto, os modelos físicos em espaços abertos podem ser adotados como métodos para avaliar os efeitos combinados entre os elementos que compõem cânions urbanos, sob condições reais de exposição climática.

A partir da necessidade de avaliar o microclima por modelos físicos, Oke (1981) propôs um modelo em escala, constituído por uma maquete de 50 cm de lado e 50 cm de altura, a fim de avaliar a influência da geometria do cânion na formação de ICU noturnas e comparar essas informações com observações em campo. Pearlmutter, Berliner e Shaviv (2006) propuseram a criação de uma modelagem física da troca de energia nos pedestres no interior do dossel urbano, em um modelo denominado OASUS (*open-air scaled urban surfaces*) produzido em escala 1:10, no deserto do Negev, Israel. A partir do modelo OASUS, foi avaliado o efeito da evaporação em arranjo urbano sob condições desértica (KRÜGER e PEARMUTTER, 2008) e o impacto da geometria e orientação do cânion em cargas de resfriamento em um edifício de alta massa em um ambiente quente e seco (KRÜGER, PEARMUTTER e RASIA, 2010).

No campus do Instituto de Tecnologia de Nippon, Saitama, Japão, foi construído o modelo denominado COSMO2 (*Comprehensive Outdoor Scale Model Experiments for Urban Climate*). O principal objetivo do COSMO2 era analisar sistematicamente o balanço de energia de forma integral em diferentes escalas, 1:5 e 1:50, e utilizar os dados de campo como parâmetros de entrada para simulações de modelos computacionais (KANDA *et al.*, 2006). Na cidade de Guangzhou, China, foi criado um modelo denominado SOMUCH (*Scaled outdoor measurements of urbanclimate*), onde têm sido explorado diversos aspectos de simulação física do clima urbano e das superfícies construídas (CHEN *et al.*, 2019), como inércia térmica de fachadas (CHEN *et al.*, 2020 [2]), estudos de vegetação (CHEN *et al.*, 2020 [1]), densidade construtiva (CHEN *et al.*, 2020 [2]), balanço energético superficial (WANG *et al.*, 2021) sombreamento e efeito combinado dessas variáveis (CHEN *et al.*, 2021),

No contexto brasileiro, as pesquisas documentadas na literatura sobre modelos físicos urbanos para avaliação de pavimentos e cânions são escassas, tendo em vista a diversidade de tipos climáticos e a diversidade construtivas das cidades brasileiras. Foram desenvolvidos trabalhos sobre o campo térmico de pavimentos frios por Kowalski (2019), sobre envelhecimento e consequências sobre o albedo por Kowalski e Masiero (2021) e a relação do teor de umidade sobre albedo por Kowalski *et al.* (2022). Além disso, justamente neste contexto, ainda há dificuldade no entendimento do nível de interação de cada variável microclimática e do nível de confiabilidade das simulações físicas e computacionais. Desta maneira, a motivação deste estudo é entender quais são as limitações e potenciais de aplicações de um modelo físico em escala, utilizando materiais de baixo custo, para a observação do ambiente térmico urbano no contexto nacional.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é apresentar um modelo físico *PAVement and Street Canyon Model* (PAVSCAM), implantado em contexto tropical, para a observação das variáveis do campo térmico de diferentes pavimentos no interior de cânions urbanos.

## 3. MÉTODO

Esta pesquisa se trata de um estudo exploratório e está dividida em duas etapas principais: a) Caracterização da área de implantação e b) Potencialidades e limitações dos modelos de simulação, as quais serão detalhadas a seguir.

### 3.1. Caracterização da área de implantação

O modelo PAVSCAM está implantado na cidade de Engenheiro Coelho – SP. Um município de pequeno porte que se encontra na região leste do Estado de São Paulo. O município pertence à sede administrativa da região metropolitana de Campinas, SP e é formado por uma população estimada de 20.284 habitantes, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023).

A classificação climática de Köppen-Geiger para Engenheiro Coelho – SP é clima tropical com estação seca de inverno (Aw). O município é caracterizado por apresentar temperatura média anual de 21,75°C, oscilando entre mínima média de 13,7°C e máxima média de 26,2°C, segundo dados do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI, 2018). Além disso, quanto à pluviosidade, o município apresenta precipitação média anual de 1541 mm, conforme dados da estação pluviométrica D4-107 do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE, 2019).

O campus universitário onde está implantado o modelo se situa a um raio de 4 km da malha urbana de Engenheiro Coelho, em uma área rural, porém rodeado por condomínios residenciais. A área de estudo, está em campo aberto, de uso predominantemente agrícola, situada a um raio de 200 m da estrutura afastado de superfícies construídas, conforme apresentado na Figura 1.

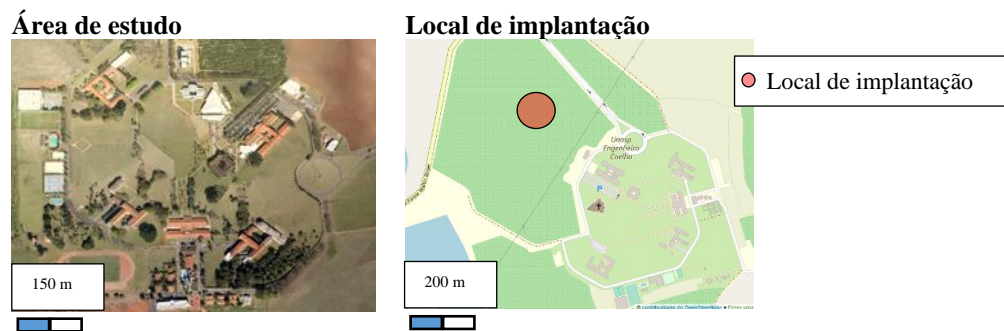


Figura 1 – Área de estudo e local de implantação do modelo

### 3.2. Caracterização do modelo PAVSCAM

O modelo experimental denominado *PAvement and Street Canyon Model* (PAVSCAM) foi construído, considerando vias urbanas com largura de 14 m e as calçadas com 2,5 m em escala urbana. Além disso, as edificações, em escala real, teriam um gabarito de no máximo 10 m de altura.

A composição do modelo é dada por pavimento asfáltico (tomado como referência) e três colorações de pavimento intertravado de concreto de 8 cm de espessura, sobre uma camada de base de 5 cm com pó de pedra e o pavimento asfáltico por uma camada de 5 cm de massa asfáltica misturada à frio, sobre uma camada de base de brita 1 com 15 cm de espessura. Ambos os solos possuem uma camada de subleito classificada como solo silto-arenoso. As pistas possuem 120 cm de largura e 500 cm de comprimento, separados lateralmente por barreiras de 40 cm e 80 cm de altura, orientadas à nordeste, nas quais o vento dominante incide obliquamente (45°), que formam duas configurações urbanas. Por se tratar de um modelo idealizado, não há obstáculos e elementos no interior do cânion. O modelo está apresentado na Figura 2.

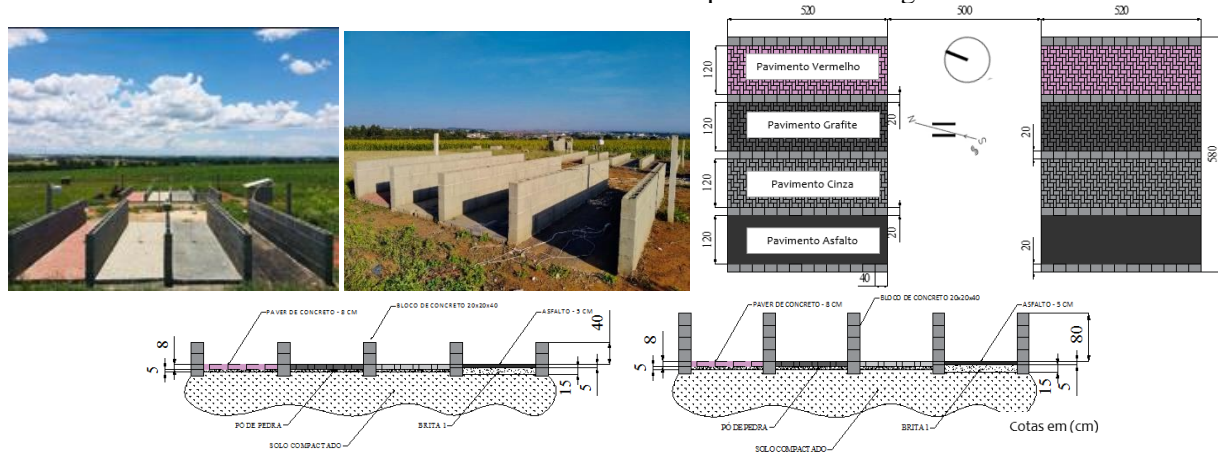


Figura 2 – Representação gráfica em planta do modelo PAVSCAM

Após a construção do modelo têm sido realizados estudos de temperatura do ar, temperatura radiante, temperatura das superfícies internas do cânion e temperaturas subsuperficiais dos pavimentos. As coletas de maneira geral têm sido feitas com uso de termopares, com apoio de termografia. Além disso, as variáveis climáticas do local são coletas por meio de uma estação meteorológica instalada no campus. Em relação ao número de dias de coleta, tem variado em função da natureza da pesquisa. Entretanto, busca-se sempre os dias de céu claro (com índice de claridade atmosférica superior a 50%) e vento fraco (com velocidade média, inferior a 2m/s), segundo as recomendações de Duffie, Beckman e Blair (2020). Além disso, o modelo requer tanto similaridade dinâmica, quanto geometria, para que reflita com acurácia as configurações urbanas reais, conforme proposto por Kanda (2006).

## 4. RESULTADOS

Os resultados estão organizados em duas partes: as pesquisas de validação executadas no modelo, com foco nos procedimentos metodológicos de caracterização e na instrumentação de baixo custo e, os potenciais usos do modelo.

### 4.1. Pesquisas executadas no modelo PAVSCAM

Paralelamente ao monitoramento de variáveis em estudos de clima urbano e pavimentação. Foram executados ensaios de caracterização dos elementos que compõem o modelo, com o objetivo de complementar os procedimentos metodológicos e de uso do PAVSCAM. Na Figura 3a está o processo de determinação do calor específico dos materiais fabricados em concreto, com a utilização de um calorímetro de baixo custo, seguindo as recomendações normativas da NBR 12817 (ABNT, 2012). Na Figura 3b o ensaio de densidade dos blocos que representam as fachadas do modelo e na Figura 3c a densidade dos pavimentos intertravados de concreto.

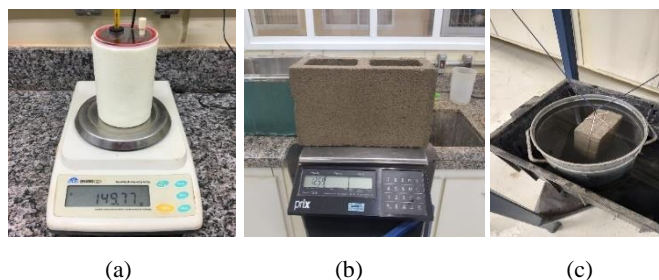


Figura 3 – Ensaio para determinação do calor específico dos materiais, utilizando um calorímetro (a) e densidade dos blocos (b) e densidade dos pavimentos intertravados (c).

A densidade dos blocos e dos pavimentos, e o calor específicos dos materiais são fundamentais para garantir a precisão na determinação da inércia térmica dos elementos. O preparo das amostras, a execução do ensaio e o procedimento de cálculo foi seguindo as diretrizes da norma NBR 9778 (ABNT, 2009). Na Figura 4 estão apresentados os elementos auxiliares para coleta de dados em campo.

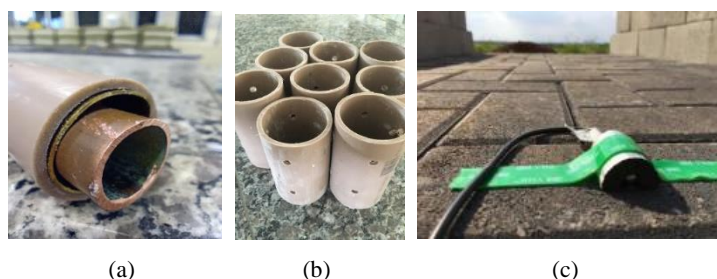


Figura 4 – Produção de acessórios auxiliares para coleta no PAVSCAM.

A confecção dos acessórios auxiliares para etapa de instrumentação, foi feita com materiais de baixo custo e validados em laboratório com sensores calibrados. Três acessórios foram produzidos:

- Poço de monitoramento de temperaturas das camadas subsuperficiais do pavimento* (tubo de PVC de 20 – 25 mm, com chapa de latão na extremidade inferior e tubo de cobre de menor diâmetro para manter o contato entre os termopares e o fundo do poço) – Figura 4a;
- Escudo suspenso para proteção de termopares em coletas de temperatura do ar* (tubo de PVC 75 – 80 mm, com 10 cm de comprimento aproximadamente, e furos com broca 1 diâmetro nominal acima

- da espessura do termopar para garantir a ventilação) – Figura 4b;
- c) *Ponteira para aumento de área de contato para coleta de temperatura superficial* (chapa de cobre dobrada em seção ômega para abraçar o termopar longitudinalmente, com fixação de material isolante e revestimento reflexivo no topo – Figura 4c.

A fim de garantir a caracterização de todas as condições de exposição do modelo ao ambiente, também é monitorado o teor de umidade do solo nas profundidades de interesse de cada experimento, utilizando o *speed test*. Por fim, há um processo periódico de monitoramento da alteração do albedo dos pavimentos causada pelo envelhecimento e intempéries. Para isso os dados são coletados, por meio da retirada de amostras do campo e ensaiadas em laboratório sob condições controladas de iluminação, utilizando o espectrômetro portátil ALTA II. Na Tabela 1 estão relacionados alguns estudos que vêm sendo conduzidos no PAVSCAM desde o ano de 2017.

Tabela 1 – Estudos realizados no modelo PAVSCAM

Temática	Referências
Estudo de diferentes morfologias urbanas	Kowalski (2019)
Permeabilidade e variação do albedo de pavimentos frios em função do teor de umidade	Kowalski et al. (2022a)
Alteração do albedo em função do envelhecimento de pavimentos urbanos	Kowalski e Masiero (2021)
Monitoramento de temperatura superficial, temperatura do ar (em diferentes alturas de medição do cânion) e temperatura radiante média	Kowalski (2019)
Alteração da condutividade térmica de materiais de revestimento de pavimentos	Kowalski et al. (2022b)

### 4.3. Potenciais estudos no modelo PAVSCAM

De acordo com Oke (1987) e Svensson, Eliasson e Holmer (2002), três tipos de modelos podem ser aplicados em pesquisas relacionadas ao clima em ambientes urbanos: modelos com base empírica, numérica e física. Os modelos físicos em escala são utilizados principalmente nos estudos sobre ventilação urbana e a influência de arranjos de edifícios (ASSIS, 2006), podendo ser especificamente aplicados para estudos sobre padrões de dispersão, fluxo e rugosidade de superfície (BALÁZS *et al.*, 2009). Entretanto, conforme apontado por Kanda (2006), estudos envolvendo transferência radiativa e balanço de energia de superfícies podem não ser tão precisos, pela dificuldade em encontrar similaridade de inércia térmica. Por isso, demandam um tratamento da informação, conforme proposto por Lyons (1983).

Na Tabela 2 estão listados os potenciais estudos, que estão em execução ou que podem ser desenvolvidos no modelo.

Tabela 2 – Estudos potenciais no modelo PAVSCAM

Temática
Variação de materiais de fachada e impactos sobre o campo térmico
Alteração da inércia térmica de camadas de base de pavimentos urbanos
Estudo de inércia térmica de fachadas e influência sobre o campo térmico
Estudo de estruturas responsivas ao clima
Análise do erro de medição em função das diferenças de escala de análise
Estudo das limitações de interoperabilidade entre modelo físico e modelo de simulação computacional
Modelo físico como ferramenta para validação de simulações computacionais de microclima urbano
Estudo de estruturas de sombreamento associadas à alteração de albedo do cânion (pavimento + fachadas)
Monitoramento do gradiente de temperatura no interior de cânions com pavimentos com diferentes albedos.
Avaliação das temperaturas superficiais e subsuperficiais de pavimentos urbanos (camada de revestimento, camada de base e camadas do subleito)

## 5. CONCLUSÕES

Os estudos realizados no modelo físico PAVSCAM estão limitados ao contexto climático Aw (Clima tropical) e o recorte está restrito à região metropolitana de Campinas – SP. As observações de campo e coleta de dados

meteorológicos, para validação com os sensores instalados *in loco*, podem ser cruzadas com a estação do INMET e da CETESB de Itapira – SP (distância de 35 km), Limeira – SP (distância de 25 km) e Paulínia – SP (distância de 27 km). Existem três tipos de modelos utilizados em pesquisas sobre o clima urbano: empíricos, numéricos e físicos. Como potencialidade dos modelos físicos em escala, pode-se mencionar que são adequados para estudos sobre ventilação urbana e arranjos de edifício. Porém como limitação, podem ser menos precisos em relação à transferência radiativa e balanço de energia de superfícies. Portanto, como sugestão para pesquisas futuras é recomendada a variação de propriedades geométricas, térmicas e radiantes dos seus elementos.

Apesar da simplicidade na concepção e de suas limitações em análises de clima urbano, o modelo PAVSCAM foi executado desde a compactação da área, até o posicionamento dos sensores, seguindo os rigores normativos e metodológicos, com o intuito de incentivar pesquisas com materiais de baixo custo e auxiliar no refinamento de políticas públicas de adaptação climática, considerando a realidade local e as diferenças construtivas das cidades brasileiras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **NBR 12817**: Concreto endurecido — Determinação do calor específico — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **NBR 9778** (2009): Argamassas e concretos endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- 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.
- ASSIS, E. S. Aplicações da climatologia urbana no planejamento da cidade: revisão dos estudos brasileiros. **Revista de Urbanismo e Arquitetura**, v. 7, n.1. 2006. Disponível em: <http://www.portalseer.ufba.br/index.php/rua/article/viewArticle/3149>. Acesso em: 28.06.2021.
- BALÁZS, B.; UNGER, J.; GÁL, T.; SÜMEGHY, Z.; GEIGER, J.; SZEGEDI, S. Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modeling, verification and extension. **Meteorological Applications**, v. 16, n.3, pp. 275-287, 2009.
- CEPAGRI. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: [https://www.cpa.unicamp.br/outrasinformacoes/clima\\_muni\\_172.html](https://www.cpa.unicamp.br/outrasinformacoes/clima_muni_172.html). Acesso em 04 de maio de 2018.
- CHEN, G.; WANG, D.; WANG, Q.; LI, Y.; WANG, X.; HANG, J., ... WANG, K. Scaled outdoor experimental studies of urban thermal environment in street canyon models with various aspect ratios and thermal storage. **Science of The Total Environment**, 726, 138147, 2020 [2]
- CHEN, J.; CHU, R.; WANG, H.; ZHANG, L.; CHEN, X.; DU, Y. Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement. **Journal of Cleaner Production**, 237, 117722, 2019.
- CHEN, T.; PAN, H.; LU, M.; HANG, J.; LAM, C. K. C.; YUAN, C.; PEARLMUTTER, D. Effects of tree plantings and aspect ratios on pedestrian visual and thermal comfort using scaled outdoor experiments. **Science of the total environment**, 801, 149527, 2021.
- CHEN, T.; YANG, H.; CHEN, G.; LAM, C. K. C.; HANG, J.; WANG, X.; ... LING, H. Integrated impacts of tree planting and aspect ratios on thermal environment in street canyons by scaled outdoor experiments. **Science of The Total Environment**, 142920, 2020. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.1429 [1]
- CLIMATEMPO. **Climatologia de Engenheiro Coelho**. Disponível em: <https://www.climatepo.com.br/climatologia/2290/engenheirocoelho-sp>. Acesso em 02 abr. 2022.
- CUI, D.; ZHANG, Y.; LI, X.; YUAN, L.; MAK, C. M.; KWOK, K. Effects of different vertical façade greenery systems on pedestrian thermal comfort in deep street canyons. **Urban Forestry & Urban Greening**, 72, 127582, 2022.
- DAEE. **Banco de dados hidrológicos**. Disponível em: <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>. Acesso em 02 abr. 2019.
- ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban Microclimate: Designing the Spaces between Buildings**. London: Earthscan, 2011.
- IBGE. **Área territorial oficial**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/engenheirocoelho/panorama>. Acesso em 10 de março de 2023.
- KANDA, M. *et al.* Comprehensive outdoor scale model experiments for urban climate (COSMO). In: **Proceedings of the 6th International Conference on Urban Climate**, Göteborg, Sweden. 2006. p. 12-16.
- KANDA, M. Progress in the scale modeling of urban climate: Review. **Theoretical and Applied Climatology**, v.84, p.23-33, 2006.
- 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.
- KOWALSKI, L. F.; MASIERO, E. Envelhecimento de pavimentos de concreto pigmentado e consequências sobre o albedo. **Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, v. 10, n. 1, p. 126-147, janeiro-junho, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2021.v10i1.4411>
- KOWALSKI, L. F.; SILVA, T. M. da.; SILVA, V. H. N.; RÍSPOLI, I. A. G.; MASIERO, E. Permeabilidade e variação do albedo de pavimentos frios em função do teor de umidade. **Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, v. 11, n. 1, p. 39-55, janeiro-junho, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2022.v11i1.4412> [1]
- KOWALSKI, L. F.; AMANCIO, D. C.; VIANA, J. F.; SILVA, F. P.; TEIXEIRA, I.; MASIERO, E. Evaluation of thermal performance of urban asphalt pavements with rubber incorporation. In: **PLEA 2022**, 2022, Santiago - Chile. Will Cities Survive?. 2022. p. 194-198. [2]

- KRÜGER, E. L.; PEARLMUTTER, D. The effect of urban evaporation on building energy demand in an arid environment. **Energy and Buildings**, v.40, n.11, p. 2090-2098, 2008.
- KRÜGER, E.; PEARLMUTTER, D.; RASIA, F. Evaluating the impact of canyon geometry and orientation on cooling loads in a high-mass building in a hot dry environment. **Applied energy**, v. 87, n. 6, p. 2068-2078, 2010.
- LYONS, T. J. Comments on canopy geometry and the nocturnal urban heat island: comparisons of scale model and field observations. *J. Climatol*, v. 3, p.95-101, 1983.
- MATIAS, M.; LOPES, A. Surface Radiation Balance of Urban Materials and Their Impact on Air Temperature of an Urban Canyon in Lisbon, Portugal. **Applied Sciences**, v.10, n. 6: 2193, 2020.
- NAKATA-OSAKI, C. M. **Adaptação de um modelo simplificado para verificação da influência da geometria urbana na formação de ilha de calor noturna**. 2016. 132p. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana). Departamento de Engenharia Civil. Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.
- NUNEZ, M.; OKE, T. R. The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v.16, n.1, p.11-19, 1977.
- OKE, T. R. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, n. 1/4, p. 237-254, 1981.
- OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2.ed. Londres: Taylor and Francis, 1987.
- PEARLMUTTER, D.; BERLINER, P.; SHAVIV, E. Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy. **Building & Environment**, v.41, n.6, p.783-795, 2006.
- 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**, v.11, n.1, p.1–16, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/14733315.2012.11683966>
- SVENSSON, M.; ELIASSON, I.; HOLMER, B. A GIS based empirical model to simulate air temperature variations in the Göteborg urban area during the night. **Climate Research**, v.22, n. 3, pp. 215-226, 2002.
- WANG, D.; SHI, Y.; CHEN, G.; ZENG, L.; HANG, J.; WANG, Q. Urban thermal environment and surface energy balance in 3D high-rise compact urban models: Scaled outdoor experiments. **Building and Environment**, v.205, n.108251, 2021.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e pelo Núcleo de Tecnologia de Engenharias e Arquitetura (NUTEA) do Centro Universitário Adventista de São Paulo (UNASP).