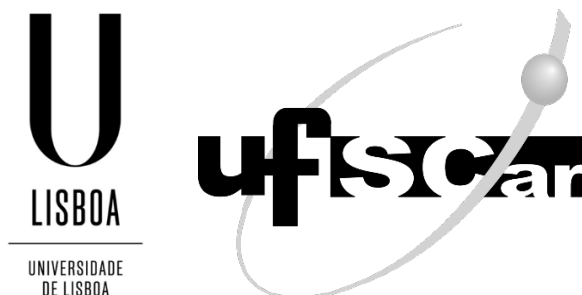


UNIVERSIDADE DE LISBOA
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS



Pavimento Urbano e Desempenho Térmico: Modelos Microclimáticos Aplicados ao
Planejamento do Território

Luiz Fernando Kowalski

Orientadores: Prof. Doutor Érico Masiero

Prof. Doutor António Manuel Saraiva Lopes

Tese em Cotutela internacional, especialmente elaborada para a obtenção do grau de Doutor no ramo de Geografia, especialidade de Geografia Física pela Universidade de Lisboa e grau de Doutor em Engenharias I, especialidade de Engenharia Urbana pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil.

(Página intencionalmente deixada em branco)



Pavimento Urbano e Desempenho Térmico: Modelos Microclimáticos Aplicados ao
Planejamento do Território

Luiz Fernando Kowalski

Orientadores: Prof. Doutor Érico Masiero
Prof. Doutor António Manuel Saraiva Lopes

Tese em Cotutela internacional, especialmente elaborada para a obtenção do grau de Doutor no ramo de Geografia, especialidade de Geografia Física pela Universidade de Lisboa e grau de Doutor em Engenharias I, especialidade de Engenharia Urbana pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil.

Júri:

Presidente: Doutor Bernardo Teixeira Arantes do Nascimento, Professor Titular Aposentado da Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Vogais:

- Doutor António Manuel Saraiva Lopes, Professor Associado do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa;
- Doutora Alessandra Rodrigues Prata Shimomura, Professora Titular da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, Brasil;
- Doutora Kelen Almeida Dornelles, Professora Associada do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Doutor Eduardo Leite Krüger, Professor Titular da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil;
- Doutora Camila Tavares Pereira, *Senior Postdoctoral Researcher* na University College Cork, Irlanda;
- Doutor Marcos dos Santos, Professor Adjunto do Instituto Militar de Engenharia, Brasil.

Tese financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES
PrInt

(Página intencionalmente deixada em branco)

Resumo:

O objetivo deste estudo é desenvolver modelos microclimáticos para avaliar a interação entre pavimentos e o ambiente construído, apoiando o planejamento territorial. Foram utilizados dois modelos: o físico em escala reduzida PAVSCAM (PAVment and Street Canyon Model) e o numérico ENVI-met. Além disso, foram analisados erros de medição, de simulação e relacionados à escala de análise. Foi examinada a relação entre alterações nos pavimentos urbanos e a resposta ao Universal Thermal Climate Index (UTCI) em diferentes climas brasileiros. Também foi aplicada a metodologia multicritério AHP-Gaussiano para determinar a melhor solução de pavimento urbano do ponto de vista térmico. Em cada etapa, diferentes formas urbanas, albedos e massas térmicas foram avaliadas. Observou-se que os maiores fluxos médios de calor ocorrem em cânions com pavimento de concreto na cor grafite, especialmente em áreas com edifícios mais baixos. Para estimativas em escala urbana real, sugere-se o uso de dados do ENVI-met (MAE = $\pm 0,59$) ou de modelos físicos (MAE = $\pm 0,66$) comparados às medições in loco. No que diz respeito ao conforto térmico, verificou-se variação no índice UTCI, especialmente em zonas quentes e secas. Vias orientadas leste-oeste, sem sombra, apresentaram aumento do stress térmico no final da tarde devido ao aumento do albedo ou da inércia térmica. Pavimentos de concreto mostraram um aumento do stress térmico de “Forte” para “Muito Forte”. Embora materiais com maior albedo, como o concreto, possam melhorar as condições térmicas em áreas mais frias e úmidas, seus benefícios não são universais, especialmente no final do dia. Os resultados fornecem ferramentas para a análise de pavimentos urbanos, integrando-os em projetos climáticos no contexto tropical. Assim, os dados de campo são complementados por novas perspectivas, permitindo uma análise mais robusta e eficaz para o planejamento urbano de pavimentos que respondam melhor ao clima local.

Palavras-Chave: Albedo; ENVI-Met; Modelo Físico; Pavimento; UTCI.

Abstract:

This study aims to develop microclimate models to evaluate the interaction between pavements and the built environment, thereby supporting territorial planning. Two models were used: the physical PAVSCAM (PAVment and Street Canyon Model) and the numerical ENVI-met. The research also analyzed measurement and simulation errors, and errors related to the scale of analysis. It explored the relationship between changes in urban pavements and responses measured by the Universal Thermal Climate Index (UTCI) across different Brazilian climates. Additionally, the AHP-Gaussian multi-criteria methodology was applied to identify the optimal urban pavement solution. Throughout the study, different urban forms, albedos, and thermal masses were assessed. Findings revealed that the highest average heat flows occur in canyons with graphite-colored concrete pavements, particularly in areas with shorter buildings, due to increased pavement exposure to solar radiation. For real urban scale estimates, the study recommends using ENVI-met data (MAE = ± 0.59) or physical models (MAE = ± 0.66) in comparison to on-site measurements. Regarding thermal comfort, the UTCI showed significant variation in hot and dry areas. East-west oriented streets without shade experienced increased thermal stress in the late afternoon, attributed to higher albedo or thermal inertia. Concrete pavements exhibited a rise in thermal stress from “Strong” to “Very Strong,” indicating that high albedo or inertia surfaces can lead to discomfort in urban canyons. While high-albedo materials like concrete can enhance thermal conditions in cooler and wetter zones by promoting heat dissipation and lowering air temperatures, their benefits are not universally applicable, particularly during the late hours of the day. The results provide essential tools for analyzing urban pavements and integrating them into climate-responsive projects within tropical contexts. By complementing field data with these new perspectives, the study enables a more robust and effective analysis for urban pavement planning, ensuring infrastructures are better adapted to local climatic conditions.

Keywords: Albedo; ENVI-Met; Physical Model; Pavement; UTCI.

(Página intencionalmente deixada em branco)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente minha família pelo amor e paciência durante essa jornada e por reafirmarem a importância de tê-los como minha base.

Aos amigos prof. Érico e prof. António por serem inspiração e referências durante o período de orientação desta tese e por me ensinarem sobre o equilíbrio e a excelência na forma de trabalhar.

Aos professores do IAU-USP, ESALQ-USP, UFSCar, UNL, UNASP e UFSC que ao abrirem as portas da universidade, promoveram essa troca tão enriquecedora de conhecimento.

Aos técnicos, bolsistas do NUTEA-UNASP e aos meus alunos pelo suporte na execução dos ensaios por reforçarem minha vocação como professor e pesquisador.

Agradeço ainda ao programa CAPES-PrInt pelo financiamento do estágio doutoral e por continuar investindo na ciência brasileira.

À ULisboa e ao UNASP por financiarem as publicações científicas e o apoio na participação dos eventos internacionais que têm auxiliado na disseminação destes resultados à sociedade.

Aos colegas e equipe administrativa do IGOT-ULisboa pela recepção e apoio no convênio de cotutela internacional e por incentivarem o fortalecimento do intercâmbio de ideias e a excelência na produção do conhecimento.

Aos colegas do Zephyrus, do NUPA e aos amigos da UFSCar e da ULisboa pelas conversas e pelos cafés durante o desenvolvimento deste trabalho.

Lista de Figuras

Figura 2.1. Esquema com os fluxos que compõem o balanço energético.	31
Figura 2.2. Vista aérea do campo experimental.	38
Figura 2.3. Representação em planta do modelo em escala (cm).	39
Figura 2.4. Vista isométrica e orientação do modelo de simulação.	39
Figura 2.5. Vista frontal do modelo de simulação.	39
Figura 2.6. Representação dos cânions com fator $H/W = 0,33$ e $H/W = 0,66$	40
Figura 2.7. Posicionamento dos sensores no modelo M1 e M2, respectivamente, na coleta de verão.	46
Figura 2.8. Posicionamento dos sensores no modelo M2, na coleta de inverno.	47
Figura 2.9. Posicionamento dos sensores no modelo com e sem borracha, respectivamente, na coleta de outono-inverno.	48
Figura 2.10. Instrumentação – coleta de verão.	50
Figura 2.11 Instrumentação – coleta de verão.	51
Figura 2.12. Coleta 1. Irradiância (I) do período – Verão.	55
Figura 2.13. Coleta 1. Irradiação solar (H) do período – Verão.	55
Figura 2.14. Coleta 1. Variáveis de entrada para o cálculo do índice de claridade atmosférica (kt) – Verão.	56
Figura 2.15. Coleta 1. Índice de claridade atmosférica (kt) – Verão.	56
Figura 2.16. Coleta 1. Umidade relativa e temperatura do ar – dia mais representativo (08 de dezembro de 2020). Coleta 1. Velocidade do vento +100 cm – dia mais representativo.	57
Figura 2.17. Coleta 1. Altura solar em dezembro – Verão.	57
Figura 2.18. Coleta 1. Altura solar do dia mais representativo – Verão.	58
Figura 2.19. Coleta 2. Irradiância (I) do período – Inverno.	59
Figura 2.20. Coleta 2. Irradiação solar (H) do período – Inverno.	59
Figura 2.21. Coleta 2. Variáveis de entrada para o cálculo do índice de claridade atmosférica (kt) – Inverno.	60
Figura 2.22. Coleta 2. Índice de claridade atmosférica (kt) – Inverno.	60
Figura 2.23. Coleta 2. Umidade relativa e temperatura do ar – dia mais representativo (24 de junho de 2021). Coleta 2. Velocidade do vento +100 cm – dia mais representativo.	61
Figura 2.24. Coleta 2. Altura solar em junho – Inverno.	61
Figura 2.25. Coleta 2. Altura solar do dia mais representativo – Inverno.	61
Figura 2.26. Esquema de instalação dos sensores para a coleta de dados – Vista em planta.	63
Figura 2.27. Esquema de instalação dos sensores para a coleta de dados – Seção transversal.	63
Figura 2.28. Temperatura do ar, superficial e subsuperficial nos pavimentos sem e com incorporação de borracha na camada de revestimento asfáltico em °C.	64
Figura 2.29 Gradiente de temperatura em °C e variação de temperatura entre o Pavimento A e B.	65
Figura 2.30. Temperatura mínima, máxima e amplitude térmica em °C do período dos Pavimentos A e B.	66

Figura 2.31. Temperatura do ar (T_a), superficial (T_s), subsuperficial (T_{ss}), base (T_{sb}) e subleito (T_{so}).	67
Figura 2.32. Amplitude térmica máxima por camada do pavimento.	68
Figura 2.33. Temperatura radiante média (TRM) do dia representativo, por pavimento e amplitude térmica, da esquerda para a direita, respectivamente.	69
Figura 2.34. Temperatura do ar próximo à superfície do pavimento nas morfologias M1 e M2.	70
Figura 2.35. Temperatura superficial dos pavimentos nas morfologias M1 e M2.	71
Figura 2.36. Temperatura subsuperficial do pavimento nas morfologias M1 e M2.	71
Figura 2.37. Temperatura de base do pavimento nas morfologias M1 e M2.	72
Figura 2.38. Temperatura do subleito do pavimento nas morfologias M1 e M2.	73
Figura 2.39. Temperatura do ar média do dia e da noite, nas morfologias M1 e M2.	73
Figura 2.40. Temperatura superficial média do dia e da noite, nas morfologias M1 e M2.	74
Figura 2.41. Temperatura subsuperficial média do dia e da noite, nas morfologias M1 e M2.	75
Figura 2.42. Temperatura na camada de base do pavimento, média do dia e da noite, nas morfologias M1 e M2.	76
Figura 2.43. Temperatura na camada do subleito do pavimento, média do dia e da noite, nas morfologias M1 e M2.	77
Figura 2.44. Temperatura média horária do pavimento vermelho, morfologia M1 e M2, da esquerda para a direita.	78
Figura 2.45. Temperatura média horária do pavimento cinza, morfologia M1 e M2, da esquerda para a direita.	79
Figura 2.46. Temperatura média horária do pavimento grafite, morfologia M1 e M2, da esquerda para a direita.	79
Figura 2.47. Temperatura média horária do pavimento asfalto, morfologia M1 e M2, da esquerda para a direita.	80
Figura 2.48. Gráfico de Pareto para todas as variáveis da Coleta 1. Verão, classificados por morfologia, M1 e M2, respectivamente.	81
Figura 2.49. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) dos pavimentos em ambas as morfologias (M1 e M2).	82
Figura 2.50. Fluxo de calor total (Q) dos pavimentos em ambas as morfologias (M1 e M2).	82
Figura 2.51. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) do pavimento asfalto em ambas as morfologias (M1 e M2).	83
Figura 2.52. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) do pavimento grafite em ambas as morfologias (M1 e M2).	84
Figura 2.53. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) do pavimento vermelho em ambas as morfologias (M1 e M2).	84
Figura 2.54. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) do pavimento cinza em ambas as morfologias (M1 e M2).	85
Figura 2.55. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) dos pavimentos asfalto e grafite em ambas as morfologias (M1 e M2).	86
Figura 2.56. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) dos pavimentos vermelho e cinza em ambas as morfologias (M1 e M2).	86
Figura 2.57. Fluxo total médio e máximo das combinações e pavimento nas duas morfologias (M1 e M2).	87
Figura 2.58. Local de estudo: a. Brasil; b. Estado de São Paulo; c. Área de Estudo; d. Ponto de coleta de dados em área urbana; e. Ponto de coleta de dados no campus universitário.	92
Figura 2.59. Classificação LCZ: Área Urbana (Bairro).	92
Figura 2.60. a. Fator de visão do céu; b. Albedo da superfície (Bairro).	93

Figura 2.61. Instalações do modelo em escala (PAVSCAM).....	93
Figura 2.62. a. Albedo da Superfície (PAVSCAM); b. Fator de Visão do Céu.....	93
Figura 2.63. a. Modelo numérico da área urbana; b. Área urbana; c. Modelo numérico do modelo em escala; d. Modelo Físico.	94
Figura 2.64. Posição dos sensores de temperatura do ar durante o monitoramento (a) PAVSCAM (Todas as unidades em cm); (b) Bairro.....	96
Figura 2.65. a) Irradiância Global (I), todas as unidades em W/m ² ; b) Índice de claridade atmosférica (kt) do período.....	101
Figura 2.66. Temperatura do ar (Ta) e umidade relativa (RH) do período, a 3 m de altura do piso.	102
Figura 2.67. Velocidade do vento (m/s) e direção (°) da série temporal a 3 m de altura do piso. ..	102
Figura 2.68. Temperatura do ar (Ta) e umidade relativa (UR) da série temporal na estação meteorológica mais próxima (banco de dados da CETESB).	103
Figura 2.69. Velocidade do vento (m/s) e direção (°) da série temporal na estação meteorológica mais próxima (banco de dados da CETESB).....	103
Figura 2.70. Direção do vento (°) da série temporal, no local (PAVSCAM) e na estação meteorológica mais próxima (banco de dados da CETESB).	104
Figura 2.71. Análise A1 - Correlação entre diferentes escalas: física (PHY) e urbana (URB). a. temperatura da superfície do pavimento no local (Ts); b. temperatura do ar no local (Ta).	109
Figura 2.72. Análise A2 - Correlação entre a simulação CFD em ambiente urbano (CFD_urb) e os dados coletados no local (URB): a. temperatura da superfície do pavimento (Ts); b. temperatura do ar (Ta).....	109
Figura 2.73. Análise A3 - Correlação entre os dados simulados em escala urbana (CFD_urb) e a modelagem física (PHY): a. temperatura da superfície do pavimento (Ts); b. temperatura do ar (Ta).	110
Figura 2.74. Análise 1 - Modelos observados e previstos: a. A1 temperatura horária do ar (Ta); b. A3 temperatura horária do ar (Ta).....	111
Figura 2.75. Análise 2 - Modelos observados e previstos: a. A3 temperatura horária do ar (Ta); b. A5 temperatura horária do ar (Ta).	111
Figura 2.76. Esquema com os detalhes em um modelo físico em escala (a) e do Bairro em escala real (b).....	114
Figura 3.0. Temperatura do ar, umidade relativa, radiação e direção do vento no mês de dezembro em Curitiba (Z1) e Goiânia (Z6).	131
Figura 3.1. Área de estudo para simulação no ENVI-Met.	133
Figura 3.2. Temperatura do ar, velocidade do vento em vias com ventos perpendiculares e paralelos à seção do cânion – Zona 1 e Zona 6.....	135
Figura 3.3. Sombreamento dos pavimentos em função do horário.	136
Figura 3.4. Velocidade do vento, UTCI sobre pavimentos de asfalto e concreto - Z1 e Z6.	139
Figura 3.5. ΔUTCI (Asfalto – Concreto) e ΔTRM (Asfalto – Concreto) - Vias com diferentes orientações– Zona 1 e Zona 6.	140
Figura 4.1. Fluxograma das etapas do método AHP-Gaussiano.	154
Figura 4.2. Processo de obtenção do <i>ranking</i>	155
Figura 4.3. Ranking dos pavimentos – Etapa 1 (Verão, variáveis de pavimento e atmosfera).	160
Figura 4.4. Ranking dos pavimentos – Etapa 2 (Verão, variáveis de pavimento e atmosfera).....	163

Lista de Tabelas e Quadros

Tabela 2.1. Condicionantes naturais do local de implantação do campo.....	38
Tabela 2.2. Propriedades geométricas e térmicas dos blocos de concreto.	40
Tabela 2.3. Propriedades geométricas e térmicas dos pavimentos.....	41
Quadro 2.0. Amostras de pavimento e fachada e refletância.....	41
Quadro 2.1. Variáveis de estudo.....	43
Quadro 2.2. Equipamentos para execução do projeto.	45
Quadro 2.3. Campanha de coleta de dados 1: Verão. Pavimento Intertravado de Concreto – Vermelho, Cinza e Grafite.....	46
Quadro 2.4. Cenários de simulação – Coleta 1: Verão. Pavimento de Asfalto.	46
Quadro 2.5. Cenários de simulação – Coleta 2: Inverno. Pavimento Intertravado de Concreto – Vermelho, Cinza e Grafite.....	47
Quadro 2.6. Cenários de simulação – Coleta 2: Inverno. Pavimento de Asfalto e Fachadas.	47
Quadro 2.7. Cenários de simulação – Coleta 2: Inverno. Pavimento Intertravado de Concreto – Vermelho, Cinza e Grafite.....	48
Tabela 2.4. Equações para determinar o índice de claridade atmosférica.	49
Quadro 2.8. Normas e metodologias relacionadas aos ensaios.	52
Quadro 2.9. Soluções de pavimentação para projeto de planejamento urbano em uma zona de clima tropical. Modelo de observação no PAVSCAM.	88
Tabela 2.5. Características gerais de cada cenário do campo experimental.	95
Tabela 2.6. Parâmetros de entrada no modelo urbano e em escala - Condições de inverno e experimento no local.	97
Tabela 2.7. Principais especificações dos sensores nos ambientes Bairro e PAVSCAM.....	98
Tabela 2.8. Parâmetros de entrada na simulação numérica - Condições de inverno, ambiente de modelo de escala (SM). Cenário "NumSca-SM" e NumUrb-NB".	100
Tabela 2.9. Métricas de desempenho para avaliar a exatidão e a precisão dos modelos previstos.	100
Tabela 2.10. Condições gerais nas estações meteorológicas mais próximas - Limeira.	103
Tabela 2.11. Temperatura da superfície (Ts) e temperatura do ar (Ta). Cenário "NumSca-SM".....	105
Tabela 2.12. Temperatura da superfície (Ts) e temperatura do ar (Ta). Cenário "NumUrb-SM"....	106
Tabela 2.13. Temperatura da superfície (Ts) e temperatura do ar (Ta). Cenário "NumUrb-NB"....	107
Tabela 2.14. Cenários simulados para análise de correlação de temperatura do ar e superficial...	109
Tabela 2.15. Faixa de temperatura da superfície e do ar de cada modelo de previsão.....	110
Tabela 2.16. Análise comparativa - modelos de previsão da temperatura do ar (Ta) e da temperatura da superfície (Ts) no inverno.	113
Tabela 3.0. Temperatura equivalente UTCI categorizada por stress térmico.	129
Tabela 3.1. Atributos das cidades de estudo.	131

Tabela 3.2. Características dos arquivos climáticos de Curitiba (Z1) e Goiânia (Z6).....	132
Tabela 3.3. Parâmetros de entrada no modelo de simulação numérica.....	133
Tabela 3.4. Parâmetros dos pavimentos: propriedades geométricas, térmicas e ópticas.	134
Tabela 3.5. Características do ponto de posicionamento dos pontos de interesse.....	136
Quadro 3.1. Horário com máximos registros de temperatura do ar sobre os pavimentos em asfalto e concreto – Zona 1 (Z1).	137
Quadro 3.2. Horário com máximos registros de temperatura do ar sobre os pavimentos em asfalto e concreto – Zona 6 (Z6).	138
Quadro 3.3. Soluções de pavimentação para diferentes contextos do projeto de planejamento urbano – Zona Fria e Úmida. Modelo Simulado no ENVI-Met.....	142
Quadro 3.4. Soluções de pavimentação para diferentes contextos do projeto de planejamento urbano – Zona Quente e Seca. Modelo Simulado no ENVI-Met.....	143
Quadro 4.0. Conceito dos termos mais usuais na aplicação do método AHP-Gaussiano.....	149
Quadro 4.1. Métodos Multicritérios mais comuns para a tomada de decisão.	150
Quadro 4.2. Métodos Multicritérios aplicado em estudos de planejamento urbano.....	152
Quadro 4.3. Definição do monotônicos, critérios e alternativas para a estação de verão.	155
Quadro 4.4. Definição da monotonicidade, critérios e alternativas para a estação de inverno. ...	156
Tabela 4.1. Matriz de decisão para o cenário A1, utilizando valores médios da morfologia M1 (Cânion com relação H/W de 0,33).	157
Tabela 4.2. Matriz de decisão para o cenário B1, utilizando valores médios da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).	157
Tabela 4.3. Matriz de decisão para o cenário A2, utilizando valores máximos da morfologia M1 (Cânion com relação H/W de 0,33).	157
Tabela 4.4. Matriz de decisão para o cenário B2, utilizando valores máximos da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).	157
Tabela 4.5. Dados normalizados e fator gaussiano, cenário A1 (valores médios) da morfologia M1 (Cânion com relação H/W de 0,33).	158
Tabela 4.6. Dados normalizados e fator gaussiano, cenário B1 (valores médios) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).	158
Tabela 4.7. Dados normalizados e fator gaussiano, cenário A2 (valores máximos) da morfologia M1 (Cânion com relação H/W de 0,33).	158
Tabela 4.8. Dados normalizados e fator gaussiano, cenário B2 (valores máximos) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).	159
Tabela 4.9. Ranking dos pavimentos, cenário A1 (valores médios) da morfologia M1 (Cânion com relação H/W de 0,33).	159
Tabela 4.10. Ranking dos pavimentos, cenário B1 (valores médios) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).	159
Tabela 4.11. Ranking dos pavimentos, cenário A2 (valores máximos) da morfologia M1 (Cânion com relação H/W de 0,33).	159
Tabela 4.12. Ranking dos pavimentos, cenário B2 (valores máximos) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).	159
Tabela 4.13. Matriz de decisão para o cenário B1, utilizando valores médios da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).	161
Tabela 4.14. Matriz de decisão para o cenário B2, utilizando valores máximos da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).	161
Tabela 4.15. Dados normalizados e fator gaussiano, cenário B1 (valores médios) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).	161

Tabela 4.16. Dados normalizados e fator gaussiano, cenário B2 (valores máximos) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).....	162
Tabela 4.17. Ranking dos pavimentos, cenário B1 (valores médios) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).....	162
Tabela 4.18. Ranking dos pavimentos, cenário B2 (valores máximos) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).....	162

Sumário

Capítulo 1. Introdução	19
1.1. Caracterização do Problema	19
1.2 A Engenharia Urbana e a Geografia Física em Estudos de Clima Urbano.....	21
1.2.1. Desafios e Fragilidades	22
1.2.2. Potencialidades Futuras.....	24
1.3. Objetivos.....	24
1.3.1. Objetivos Específicos.....	25
1.4. Estrutura da Tese	25
Capítulo 2. Pavimento e o Campo Térmico	26
2.1. Contextualização.....	26
2.1.1. Estrutura do Pavimento & Estudos de Campo	27
2.1.2. Interação entre Pavimento e Elementos do Tecido Urbano.....	29
2.2. Aplicação I - Modelo Físico em Escala Reduzida	35
2.2.1. Materiais e Métodos	37
a. Caracterização do Local de Estudo	38
b. Variáveis da Pesquisa.....	42
c. Instalação e Posicionamento dos Sensores	44
d. Coleta de Dados em Campo	48
e. Interação entre as Camadas	51
f. Bases Metodológicas.....	52
2.2.2. Resultados e Discussões.....	53
a. Impacto da Alteração das Propriedades do Tecido Urbano	54
b. Impacto da Alteração do Material de Revestimento.....	62
c. Impacto da Alteração do Albedo.....	64
d. Impacto da Alteração da Forma Urbana	70
e. Gradiente de Temperatura entre as Camadas do Pavimento.....	78
f. Transferência de Calor entre as Camadas do Pavimento	81
2.3. Aplicação II - Análise de Erros entre Diferentes Escalas e Modelos de Simulação.....	89
2.3.1. Materiais e Métodos	91
a. Caracterização do Local de Estudo	91
b. Desenho Experimental	94
c. Instrumentação da Observação em Campo	96

d. Parâmetros do Modelo Numérico e Calibração	100
2.3.2. Resultados e Discussões.....	101
a. Caracterização Climática.....	101
b. Variação Espacial da Temperatura do Ar e Superficial.....	105
c. Correlação entre os Cenários.....	108
d. Variação Temporal da Temperatura do Ar e Superficial	111
2.4. Considerações	115
2.5. Referências	116
Capítulo 3. Pavimento e Conforto Térmico Urbano.....	128
3.1. Contextualização	128
3.2. Aplicação III – Índice UTCL e Albedo de Pavimentos Urbanos.....	130
3.2.1. Materiais e Métodos	130
a. Modelagem Computacional Utilizando ENVI-met.....	132
b. Aplicação do Índice UTCL	134
3.2.2. Resultados e Discussões.....	135
3.3. Considerações.....	143
3.4. Referências	144
Capítulo 4. Método Multicritério, Pavimentação e Planejamento do Território.....	148
4.1. Contextualização	148
4.1.1. Modelos Multicritério para Tomada de Decisão	148
4.1.2. Método AHP-Gaussiano	153
4.2. Aplicação IV - AHP-Gaussiano Aplicado à Escolha de Pavimentos	155
4.2.1. Materiais e Métodos	155
4.2.2. Resultados e Discussões	156
a. Variáveis do Pavimento e Atmosfera	156
b. Variáveis do Pavimento, Fachadas e Atmosfera	160
4.3. Considerações	163
4.4. Referências	164
Capítulo 5. Conclusões.....	167
5.1. Principais Contribuições	167
5.2. Discussões.....	169
5.3. Trabalhos Futuros.....	172
Referências	173
Apêndices.....	181

Capítulo 1.

Introdução

1.1. Caracterização do Problema

O planejamento urbano sob a perspectiva da geografia envolve uma abordagem interdisciplinar que considera os aspectos físicos, sociais e ambientais das cidades. Os estudos de geografia destacam a importância de compreender as paisagens urbanas de um ponto de vista socio natural, integrando elementos como resiliência climática, ecossistemas e uso sustentável da terra (CORDEIRO, 2022). A Engenharia Urbana, assim como a Geografia Física, como subdisciplinas, enfrentam desafios metodológicos e teóricos, especialmente no urbanismo comparativo e nos urbanismos relacionais, que estão moldando o futuro do campo ao questionar os entendimentos existentes e promover um conjunto de comparações mais diversificado e global (WARD, 2022).

A interação entre os elementos que compõem a paisagem urbana ainda tem sido uma das mais complexas tarefas em estudos do campo térmico. Possivelmente, pelas diferentes possibilidades de transferência de calor entre eles e pela pouca previsibilidade na geração de calor antropogênico. O campo térmico de uma cidade pode ser influenciado, inclusive, por questões físicas, culturais e econômicas, entretanto pode ser atenuado por regulamentação de políticas urbanas (MILLS, 2006).

Nesse contexto, a elevação da temperatura do ar em áreas centrais tem grandes consequências na saúde e bem-estar das pessoas que vivem nas cidades. Associado a isso, a elevação da produção de calor antropogênico a partir da atividade humana, também propicia a formação das Ilhas de Calor Urbano (ICU). Segundo Mohajerani, Bakaric, Jeffrey-Bailey (2017), o efeito da ICU também leva ao aumento das necessidades energéticas de resfriamento de edificações, o que contribui ainda mais para o aquecimento urbano, para as consequências ambientais e de saúde pública, associadas ao fenômeno.

Ao avaliar as principais variáveis climáticas interagindo sob a camada do dossel urbano com os demais elementos que compõem os cânions, os pavimentos e fachadas, que naturalmente possuem diferentes tipos de propriedades geométricas, térmicas e ópticas, pode-se impactar a qualidade térmica do ambiente urbano e os espaços de convivência.

O equacionamento do balanço radiativo do ambiente urbano idealizado por Oke (1978), tem sido a base para estudos da alteração do microclima urbano e explica de forma genérica como a energia é transferida na superfície urbana. Além disso, segundo Duffie e Beckman (1984) as propriedades termofísicas são parâmetros para a descrição dos fenômenos de transferência de calor, com base na lei de Fourier, importantes para o entendimento dos materiais e sua interação como ambiente construído.

Portanto, esta relação que permite uma análise de potenciais melhorias da cidade, seja pelo controle da Radiação Líquida (Q^*) que chega ao cânion e da geração de calor antropogênico (Q_F) em seu interior, ou pela dissipação de calor sensível (Q_H), calor latente (Q_E), calor armazenado na malha intra-urbana (ΔQ_S) ou pela variação da circulação convectiva horizontal (advecção) (ΔQ_A).

Sendo assim, é nesse contexto que o pavimento tem sido um dos objetos com maior influência sobre as alterações na escala microclimáticas, especialmente pela liberação de calor sensível. De acordo com Qin *et al.* (2019), pavimentos de coloração cinza clara possuem uma absorvância considerável de radiação solar e liberam o calor absorvido para o ar, como calor sensível, contribuindo para o desenvolvimento ICU.

Além disso, atualmente a área pavimentada corresponde à aproximadamente 40% da cobertura do tecido urbano, em função do plano diretor municipal e das leis de parcelamento, com 75-80% de estradas com revestimento escuro (CHEELA *et al.*, 2021) que possui uma taxa de absorção do calor ainda mais intensa do que as superfícies claras durante o dia.

Além disso, globalmente se nota um crescimento de áreas impermeabilizadas em função do adensamento. E um dos efeitos mais notáveis no ambiente urbano é o aumento de problemas relacionados à infiltração de água no solo e por consequência o aumento dos volumes de drenagem (TATARANNI, SANGIORGI, 2019).

É nesse contexto que emana a problemática sobre qual seria o papel da superfície pavimentada nas condições de conforto e na formação do microclima no interior de cânions urbanos, considerando que:

- A massa térmica do pavimento pode ser um fator determinante para armazenamento de calor. Desta maneira, a densidade dos materiais, a textura superficial, a cor e a espessura das camadas que compõem o pavimento, são os principais fatores que influenciam o ar próximo à superfície;
- O albedo é uma propriedade óptica importante ao considerar que sua capacidade de refletir ondas curtas ao longo dia, favorece o menor acúmulo de calor na camada de revestimento e uma menor emissão de radiação de ondas longas durante a noite;
- A incorporação de materiais com baixa condutividade térmica na camada de revestimento asfáltico, como a borracha, pode favorecer a dissipação do calor

acumulado ao longo do dia, através do processo de condução, no contato da camada de base com o subleito do pavimento.

A fim de demonstrar e avaliar essa interação entre os elementos que compõem os pavimentos urbanos, os modelos microclimáticos são ferramentas importantes para compreender os processos de troca de calor e no levantamento de hipóteses para orientar o planejamento urbano. Associados a isso, os métodos multicritério também representam um conjunto de ferramentas que favorecem a tomada de decisão, sobre as melhores estratégias de intervenção urbana ou na escolha dos materiais mais adequados, considerando um conjunto amplo de parâmetros.

1.2. A Engenharia Urbana e a Geografia Física em Estudos de Clima Urbano

Diante do cenário de expansão urbana e da falta de integração entre os diferentes profissionais envolvidos no planejamento das cidades, o contexto deste trabalho está na relevância do diálogo entre a engenharia urbana, o planejamento urbano e a climatologia urbana. Este diálogo é de fundamental importância para destacar as fragilidades e potencialidades de cada disciplina no âmbito do planejamento de cidades resilientes ao clima.

A engenharia urbana pode ser descrita como “a arte de conceber, empreender, gerenciar e coordenar os aspectos técnicos dos sistemas urbanos” (MARTINARD, 1986). O termo 'sistemas urbanos' refere-se tanto às infraestruturas físicas quanto aos serviços de suporte. Abiko (2010) complementa descrevendo que a engenharia urbana abrange todos os serviços de engenharia civil e ambiental ligados à infraestrutura, serviços, construções e questões ambientais. A atuação do engenheiro urbano é multifacetada, envolvendo fatores sociais, econômicos, políticos, ambientais e tecnológicos.

Bitan (1988) propõe uma metodologia para integrar de forma sistemática os diferentes elementos climatológicos em todos os níveis de planejamento, desde o regional, passando pelos assentamentos e chegando aos edifícios. Eliasson (2000) discute o uso do conhecimento climático no planejamento urbano, destacando a importância de considerar o clima na urbanização.

1.2.1. Desafios e Fragilidades

As zonas urbanas modificam elementos climáticos, como radiação, temperatura — o exemplo mais documentado de alteração climática provocada pelo ser humano (OKE, 1987) — umidade, chuvas, vento e qualidade do ar. Essas transformações impactam de maneira significativa o conforto, a saúde e a segurança nas cidades, gerando custos relevantes.

Alcoforado e Matzarakis (2010) mencionam ainda que existem limitações e diferentes pontos de vista entre os climatologistas urbanos e os planejadores urbanos nos processos de tomadas de decisão. Destacam que os processos e efeitos do clima urbano estão localizados entre a meso e a microescala, portanto, é urgente adquirir uma linguagem compartilhada entre as duas comunidades científicas e profissionais, bem como aprofundar o debate sobre as vantagens de incluir diretrizes climáticas nos Planos Diretores dos municípios urbanos de forma sistemática.

Para Bitan (1988), Mills (2014) e Mills *et al.* (2010) ainda há imaturidade ao abordar o problema de um ponto de vista abrangente e não há trabalhos científicos que tratem do impacto de todos os elementos climáticos (geografia física) no planejamento e na construção (engenharia), ou seja, na escala das cidades e dos edifícios de maneira combinada.

Eliasson (2000) aponta algumas barreiras para integrar o conhecimento da climatologia no planejamento urbano: a dificuldade de comunicação entre planejadores e investidores/políticos, conflitos de interesses, custos de adaptação, falta de conhecimento justificável frente aos *stakeholders*, baixa prioridade perante outros aspectos técnicos e a falta de clareza em políticas públicas. Além disso, o tempo e a complexidade que envolve um processo decisório democrático também são citados como desafios, especialmente porque a incorporação desses aspectos prolongam os prazos e conseqüentemente os custos de implantação.

Oke (2006) destaca a importância de uma comunicação mais eficaz tanto dentro do campo do clima urbano quanto entre o clima urbano e os campos relacionados, para vincular os assuntos internamente e facilitar um diálogo interdisciplinar. O campo do clima urbano reúne profissionais de várias disciplinas, cada qual com diferentes metodologias e metas de pesquisa. Para garantir que o diálogo nesta área seja claro e abrangente, cobrindo um amplo espectro de interesses, e para evitar a fragmentação em grupos excessivamente especializados, é vital padronizar a terminologia, assim como os métodos de classificação e descrição.

Ou seja, partindo da hipótese de que o conhecimento da climatologia ainda possui baixo impacto no processo de planejamento, as variáveis explicativas que Eliasson (2020) e Oke (2006) propõem são de natureza conceitual, intelectual, institucional e técnica. Além disso, envolve a falta de consenso sobre a relevância da incorporação da climatologia no planejamento urbano, a falta de comunicação entre especialistas e planejadores, e entre

profissionais da esfera técnica, administrativa e política. Associado a isso, a falta de incentivo financeiro entre investidores, as questões políticas centradas em questões econômicas e a escassez de métodos e técnicas para análise, coleta e integração desses dados.

Para o profissional da engenharia urbana, no contexto de países em desenvolvimento, Abiko (2010), Ventura *et al.* (2020) e Adegun (2023) também citam desafios no planejamento das cidades:

- O crescimento da população urbana tende a se concentrar nas regiões metropolitanas, uma vez que elas atraem os trabalhadores que chegam para as oportunidades de emprego disponíveis.
- A pressão causada pelo crescimento da população urbana sobre a infraestrutura e os serviços públicos existentes.
- A deterioração e a obsolescência das redes de infraestrutura existentes e a necessidade de introduzir novas soluções técnicas de acordo com o crescimento físico e populacional das cidades.
- A introdução de novas tecnologias e a rápida evolução de sistemas de gerenciamento, acesso e recuperação de informações cada vez mais eficientes, acessíveis e econômicos, como os baseados em geoprocessamento.
- A lógica observada em países em desenvolvimento é que a qualidade de vida nas cidades melhora à medida que aumenta a taxa de urbanização, em função do maior acesso aos serviços públicos.
- Maior participação da comunidade, exigindo um nível mais alto de transparência por parte das autoridades públicas.
- Sistemas administrativos e governamentais complexos, descentralizados e automatizados que exigem coordenação e acompanhamento eficientes e coerentes. Os recursos financeiros estão sob enorme pressão em todos os lugares, o que exige o desenvolvimento de critérios eficientes de “alocação e uso” por parte dos profissionais de gerenciamento urbano.
- Envolvimento cada vez maior do setor privado por meio de concessões e permissões que exigem sistemas complexos de licitação, concorrência, contratação, controle e remuneração.

Além disso, Abiko (2010) discute o processo de urbanização de assentamentos informais, destacando a colaboração de geógrafos, arquitetos, advogados, assistentes sociais, médicos e engenheiros em equipes interdisciplinares. Atualmente, acredita-se que a melhor abordagem, a longo prazo, é melhorar gradualmente essas áreas e estabilizar ocupações irregulares, fornecendo infraestrutura e serviços básicos.

As cidades dos países em desenvolvimento enfrentam desafios adicionais, como a pobreza urbana, a falta de instalações básicas e a degradação ambiental, que complicam os esforços de adaptação ao clima (BUSAYO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2012). A partir de intervenções habitacionais dessa natureza, o envolvimento do engenheiro urbano e a integração com os outros profissionais que planejam as cidades, que possuem uma compreensão clara dos requisitos urbanos sistêmicos e a capacidade de agir de acordo com eles, é fundamental.

1.2.2. Potencialidades Futuras

As potencialidades incluem a implementação de ferramentas de otimização espacial para equilibrar riscos climáticos e objetivos de sustentabilidade (CAPARROS-MIDWOOD *et al.*, 2017), novos métodos de estudo podem facilitar parcerias entre setores público e privado, promovendo um desenvolvimento urbano mais sustentável (PUCHOL-SALORT *et al.*, 2020).

A combinação de soluções tecnológicas, soluções baseadas na natureza e consideração de aspectos sociais mais complexos pode contribuir com a resiliência urbana aos impactos climáticos (LIN *et al.*, 2021; KIM, LIM, 2016; CAI *et al.*, 2021; MCPHEARSON *et al.*, 2016; ELMQVIST *et al.*, 2019). A morfologia urbana, as características físicas, espaciais e funcionais do tecido urbano, são fundamentais para medir e aprimorar a resiliência (DHAR, KHIRFAN, 2017), conforme também é proposto nesta pesquisa.

Há uma necessidade de desenvolver procedimentos comuns para processar dados, avaliar locais e criar soluções simplificadas e fundamentadas para as necessidades de projeto e planejamento de comunidades em diferentes zonas climáticas (OKE, 2006). Associado a isso, a colaboração interdisciplinar entre cientistas, planejadores urbanos, geógrafos, engenheiros e arquitetos é vital para transferir conhecimentos teóricos para a prática urbana (FALLMANN, EMEIS, 2020; ZANON, VERONES, 2013; PUCHOL-SALORT *et al.*, 2020).

Esta pesquisa trata o pavimento urbano não apenas como um componente do tecido urbano, mas como um objeto de estudo, tanto para a geografia física quanto para a engenharia urbana. Ela visa orientar tecnicamente profissionais que planejam o território, tratando de questões relacionadas a ocupação, ao projeto de pavimentos para veículos e pedestres e a elaboração de espaços públicos. Para isso, busca-se uma avaliação integrada que considere o projeto estrutural das camadas do pavimento urbano, a escolha dos materiais de revestimento, a avaliação das alterações térmicas no interior do cânion urbano e as implicações no conforto térmico dos pedestres. Partindo de uma abordagem teórica para embasamento, observações e medições em campo para avaliar o desempenho, uso de ferramentas computacionais para confirmar hipóteses e aplicando metodologia multicritério para tomada de decisão.

1.3. Objetivos

O objetivo desta pesquisa é desenvolver modelos microclimáticos para avaliar, sob diferentes perspectivas, a interação térmica do pavimento com o ambiente construído, por meio de modelo físico em escala e modelos computacionais, orientando o planejamento do território.

1.3.1. Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento térmico de cânions formados por diferentes tipos de pavimentos, com diferentes propriedades térmicas e físicas das camadas superficiais utilizando o modelo físico PAVSCAM.
- Identificar os erros relativos às diferenças entre os modelos de simulação (física ou numérica), ambientes (modelo em escala reduzida ou bairro) e escalas (real ou reduzida).
- Avaliar a contribuição das alterações do albedo de pavimentos nas condições de conforto urbano utilizando o modelo físico PAVSCAM e o modelo numérico no ENVI-Met.
- Propor o uso de um modelo multicritério de apoio à tomada de decisão, considerando os materiais e configurações geométricas mais adequadas para projetos urbanos.

1.4. Estrutura da Tese

A estrutura da tese explora diferentes perspectivas da interação do pavimento urbano como elemento do planejamento territorial, dividindo-se em três seções principais. O **Capítulo 1** apresenta as questões introdutórias relativas à interação dos pavimentos com o clima urbano. O **Capítulo 2** aborda a relação das camadas do pavimento com a formação do microclima no interior do cânion urbano. Além disso, são apresentados modelos de simulação para estudos microclimáticos, que permitem avaliar o desempenho térmico dos pavimentos sob diversas perspectivas e condicionantes. No **Capítulo 3** é estudada a relação entre o pavimento e as condições de stress térmico, utilizando o índice de conforto UTCI, com o objetivo de introduzir e proporcionar uma análise sob a perspectiva do pedestre. O **Capítulo 4** propõe a aplicação de um método multicritério para orientar a escolha de materiais e configurações ideais para projetos urbanos. Ao longo da tese, há um foco na interação do pavimento com o ambiente construído, analisada sob a ótica do conforto e desempenho térmico, com as fontes de dados e métodos adaptados às questões específicas abordadas em cada seção.

A sequência segue uma lógica que inicia com o estudo das variáveis do campo térmico relacionadas ao pavimento. Para isso, são propostos tanto um modelo de simulação física quanto um modelo numérico. Em seguida, aplica-se os resultados inicialmente simulados a um ambiente urbano em dois contextos climáticos distintos, com o objetivo de avaliar a resposta térmica do pavimento ao nível do pedestre. Por fim, é proposta a aplicação de métodos multicritério utilizando dados urbanos provenientes dos modelos microclimáticos, com o objetivo de orientar a escolha de materiais no planejamento territorial.

Capítulo 2.

Pavimento e o Campo

Térmico

O objetivo deste capítulo é apresentar os estudos de pavimentação relacionados ao campo térmico urbano, o que inclui: A apresentação do modelo físico em escala reduzida, nomeado PAVSCAM (Pavement Scaled Model). Além disso, a análise dos erros de medição e as limitações de aplicação desta metodologia em estudos de simulação numérica e coletas de dados em campo. Parte dos resultados deste capítulo foram publicados no periódico *Theoretical and Applied Climatology* e *City and Built Environment* da editora Springer Nature

Kowalski, L.F., Masiero, E. & Krüger, E.L. Evaluating the impact of pavement reflectance and aspect ratio on thermal conditions in a scale model of a street canyon: introducing PAVSCAM. *Theoretical and Applied Climatology* (2024). <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04911-z>

Kowalski, L.F., Lopes, A.M.S. & Masiero, E. Integrated effects of pavement simulation models and scale differences on the thermal environment of tropical cities: physical and numerical modeling experiments. *City Built Environment*, 2, 9 (2024). <https://doi.org/10.1007/s44213-024-00032-5>

2.1. Contextualização

A geometria, as propriedades térmicas e ópticas dos materiais do pavimento alteram o balanço radiativo da malha intraurbana. Por isso, emerge a importância em se determinar a melhor combinação dessas propriedades e usar estratégias adequadas para melhorar o desempenho térmico do espaço urbano. Além disso, os elementos que compõem a cidade influenciam diretamente a infraestrutura de transportes, tornando importante a análise das interações entre pavimentos, fachadas e a forma urbana.

2.1.1. Estrutura do Pavimento & Estudos de Campo

A estrutura do pavimento, em função da geometria e das propriedades térmicas e ópticas dos materiais de sua composição, faz com que haja alteração no balanço radiativo dos cânions urbanos. Por isso, é necessário identificar a melhor combinação dessas propriedades, fazer uso apropriado de estratégias e elementos na composição do tecido para que apresentem melhor desempenho térmico e favoreçam as condições de uso do espaço urbano.

As alterações microclimáticas provocadas pela alteração do uso do solo (Hart e Sailor, 2009) e a formação de ICU trazem implicações severas no ambiente, tais como nos níveis de consumo energético e na saúde humana. Carnielo e Zinzi (2013) estudaram as propriedades ópticas e térmicas de pavimentos reflexivos para compreender os fenômenos envolvidos na redução da temperatura do ar dos espaços urbanos e na demanda de resfriamento das edificações. O contexto de aplicação do estudo desenvolvido foi um bairro densamente povoado na cidade italiana de Roma. Foi estimado o efeito do albedo das estradas sobre o gradiente de temperatura do ar.

Por meio de simulações, com o software ENVI-met, foi identificada uma redução significativa da temperatura do ar, correlacionada com o albedo dos pavimentos das estradas. Além disso, o perfil de temperatura do ar foi utilizado como variável de entrada para calcular o impacto da mudança do albedo sobre o consumo energético das edificações. Por meio da ferramenta de simulação dinâmica TRNSYS, notou-se uma redução de 19% sobre o pico de demanda de resfriamento das edificações com a configuração de pavimentos com maior albedo.

Entretanto, Erell *et al.* (2014) sugerem que, embora o uso de materiais com alto teor de albedo nas superfícies dos cânions possa diminuir a temperatura do ar, a redução não é suficiente para compensar o aumento das cargas radiantes. Como resultado, o conforto térmico dos pedestres pode, de fato, ser comprometido. O mesmo comportamento também pôde ser observado avaliando o conforto térmico pelo ITS e pelo modelo teórico CAT, por Giordano e Krüger (2014), Gonzalez (2015) e Krüger *et al.* (2016).

Rossi *et al.* (2016) avaliaram o potencial de mitigação de ICU em cânions urbanos com a utilização de pavimentos retro-reflexivos. O objetivo da pesquisa foi estudar a interação entre pavimento e fachadas e considerando o efeito de resfriamento das superfícies. O cálculo foi conduzido em escala reduzida, por meio da razão entre a radiação refletiva e difusa que permanece no interior do cânion, e relacionada analiticamente a um experimento validado em campo. Os resultados demonstraram um maior potencial de resfriamento do pavimento retro-reflexivo em relação aos materiais difusos, nas cores branca e bege, apresentando uma redução energética de aproximadamente 37% no interior do cânion.

Xie *et al.* (2019) avaliaram o potencial mitigação de ICU, por meio do estudo das propriedades térmicas e ópticas de revestimentos e pigmentos de pavimentos reflexivos

com nanomateriais. Para isso, dez amostras de revestimento não-branco foram submetidas aos experimentos, e a constatação foi de que a coloração é um fator dominante na refletância visível e que não afeta a refletância do infravermelho.

Os revestimentos com pigmentação em cromo, alcançaram uma refletância de 60% e a refletância na faixa do infravermelho foi de 95%, assim, como o revestimento branco. Notou-se também que há uma relação linear entre luminosidade e refletância na faixa do visível em cores escuras e médias. Enquanto, o crescimento é exponencial para os revestimentos de cores claras. Por fim, baseado em análises estatísticas, a refletância de ondas curtas no infravermelho-próximo foram os fatores dominantes que influenciaram o desempenho térmico dos revestimentos. O que os autores sugerem é a utilização de revestimentos coloridos metaméricos, sem brilho para mitigação de ICU (XIE *et al.* (2019)).

A utilização de materiais permeáveis e com alta condutividade foi estudada por Chen *et al.* (2019) para aliviar os efeitos da ICU, nas condições seca e úmida. As amostras foram preparadas com a adição de fibras de aço no concreto permeável tradicional. Os resultados apontaram que as placas de concreto permeável apresentaram temperaturas superficiais mais elevadas em condições secas. Entretanto, temperaturas mais baixas na condição úmida, dependendo da taxa de evaporação da água. Por fim, o aumento da condutividade térmica do pavimento permeável pode reduzir de 2,5% – 5,2% o acúmulo de calor, demonstrando ser uma opção viável para aliviar os efeitos de ICU tanto em condições secas e úmidas.

Qin *et al.* (2019) avaliaram o aumento da refletância solar em função da cura do concreto. A ideia dos autores foi destacar que não só apenas as propriedades térmicas dos materiais, mas também as condições de cura do concreto, alteram o albedo da amostra. Essa hipótese era até então desconhecida, por isso a análise foi feita com 120 pastas com diferentes proporções de água/cimento e em seguida curadas por dias em ambiente interno e 365 dias em ambiente externo. Os resultados indicaram que as amostras com cura úmida apresentaram um albedo de 0,01 – 0,10 superiores às amostras de cura em ambiente interno.

Yang *et al.* (2020) propuseram um novo índice para analisar a influência de materiais de pavimentação na formação de ICU. Foi observado que a temperatura do interior do pavimento depende da profundidade e que usualmente é mais alta que a temperatura do ar. Além disso, a radiação solar durante o período do dia contribuiu especialmente na elevação da temperatura superficial e nas camadas superiores do pavimento.

Chella *et al.* (2021) estudaram o impacto da combinação entre pavimentos reflexivos e estratégias de sombreamento por meio de arborização, na mitigação de Ilhas de Calor Urbano. O foco da pesquisa foi associar os efeitos de pavimentos intertravados de concreto e de asfalto, as tendências tecnológicas, aplicação de resíduos e subprodutos industriais. Além da contribuição dos sistemas de sombreamento de árvores urbanas para a temperatura do pavimento e o impacto no microclima.

Outro ponto a ser considerado é a variação do albedo em função do envelhecimento do elemento causado pelo intemperismo. Para isso, Sanjuán, Morales e

Zaragoza (2022) realizaram o registro de albedo e índice de refletância solar (SRI) em pavimentos em escala urbana, fabricados em concreto pré-moldado, com diferentes misturas. O objetivo foi dar subsídio técnico à formulação de políticas públicas, para a tomada de decisão de planejadores urbanos e em compromissos líquidos de “Emissão-Zero”. Coelho, Gomes e Dornelles (2017) avaliaram o impacto do envelhecimento natural na absorvância de telhas por meio de três processos: carbonatação, eflorescência e do desenvolvimento de fungos, e as consequências sobre o desempenho térmico. Araújo e Dornelles (2022) monitoraram a variação da absorvância de telhas por meio de uma estação de envelhecimento natural. O objetivo foi identificar o nível de correlação entre a variação da absorvância, em função da degradação, e a temperatura de superfície.

Pan *et al.* (2022) propuseram uma nova estrutura de pavimentação com elevada condutividade térmica (*highly thermally conductive pavement* – HTCP) e avaliaram o efeito de resfriamento das camadas e do ar próximo à superfície. O experimento foi conduzido com a utilização de lâmpadas incandescentes, que foram posicionadas sobre as amostras. A ideia foi avaliar agregados quartzolíticos grosseiros com alta condutividade térmica ao invés de calcário.

Os resultados apontam que o quartzito melhora a inércia térmica das camadas do pavimento e que o pavimento HTCP transfere efetivamente o calor acumulado na camada superior, o que favorece a redução da temperatura diária e do ar próximo à superfície. Entretanto, o HTCP libera mais calor sensível, no período noturno, impactando negativamente o efeito de ICU (PAN *et al.*, 2022).

Por fim, nota-se que as diferentes estratégias, como pavimentos retro-reflexivos, a incorporação de nanomateriais e pigmentos nas camadas de revestimento, agregados sintéticos, a utilização de materiais com elevada condutividade térmica, as condições de cura do concreto, o estudo das propriedades térmicas e ópticas das camadas, interação de maneira distinta com as superfícies do cânion urbano e podem afetar seu balanço radiativo e, por consequência, as condições microclimáticas do entorno.

2.1.2. Interação entre Pavimento e Elementos do Tecido Urbano

Os elementos do tecido urbano, por meio de suas características geométricas e suas propriedades, interagem com a infraestrutura de transportes. Desta maneira, é importante trazer à reflexão as relações que se formam entre pavimentos e fachadas e a relação entre pavimentos e a forma urbana.

Sendo que, a interação do pavimento com a forma urbana é afetada diretamente pela ventilação do cânion, pelas estruturas de sombreamento e a densidade construtiva. E a relação entre pavimentos e fachada ocorre por meio das propriedades térmicas e ópticas dos materiais de revestimento, como inércia, albedo, que impactam o balanço radiativo, a

carga térmica das fachadas, as condições de conforto ao nível do pedestre e na formação de ICU.

Segundo Olgyay (1963), o espraiamento urbano implica em diferenças radicais e facilmente perceptíveis entre o clima dentro e fora do centro da cidade. Essas modificações são de considerável interesse tanto no aspecto arquitetônico, quanto de planejamento (HILBERSHEIMER, 1944).

Nesse contexto, projetos urbanos climaticamente responsivos podem melhorar as condições de uso de espaços abertos. Segundo Nikolopoulou (2004), projetos focados na adequação bioclimática, consideram a integração entre espaço, clima e pessoas, combinando elementos espaciais, com o intuito de atenuar os efeitos negativos do clima, proporcionando condições mais favoráveis de uso.

De acordo com Klok e Kluck (2018), os projetos sensíveis ao clima apresentam estratégias focadas nos períodos mais quentes, em função dos impactos do aquecimento da infraestrutura urbana na qualidade do ar, na saúde e na taxa de mortalidade. Além disso, Nikolopoulou, *et al.* (2001) mencionam que, quando as condições de conforto não são favoráveis, há uma tendência em as pessoas evitarem o uso de espaços públicos abertos.

Tamminga, Cortesão e Bakx (2020) afirmam que a criação de sub-espços com diferentes condições de insolação, sombreamento, abrigo e exposição incentivam o aumento de uso de espaços públicos abertos. Desta maneira, os projetos urbanos climaticamente responsivos buscam, segundo os mesmos autores:

- Controlar a quantidade de radiação solar que atinge os espaços para proporcionar diferentes gradientes de sol e sombra;
- Controlar a exposição ao vento, através de abrigos contra o vento, no inverno e estimulando o resfriamento pela ventilação no verão;
- Balancear a temperatura do ar e a umidade relativa, através da combinação de parâmetros, como a vaporização, a evapotranspiração e o vento;
- Permitir o resfriamento evaporativo, aumentando a evapotranspiração das plantas e a vaporização de água;
- Permitir perdas de calor das superfícies, refletindo o máximo de irradiação solar possível e liberando o calor armazenado pelos materiais.

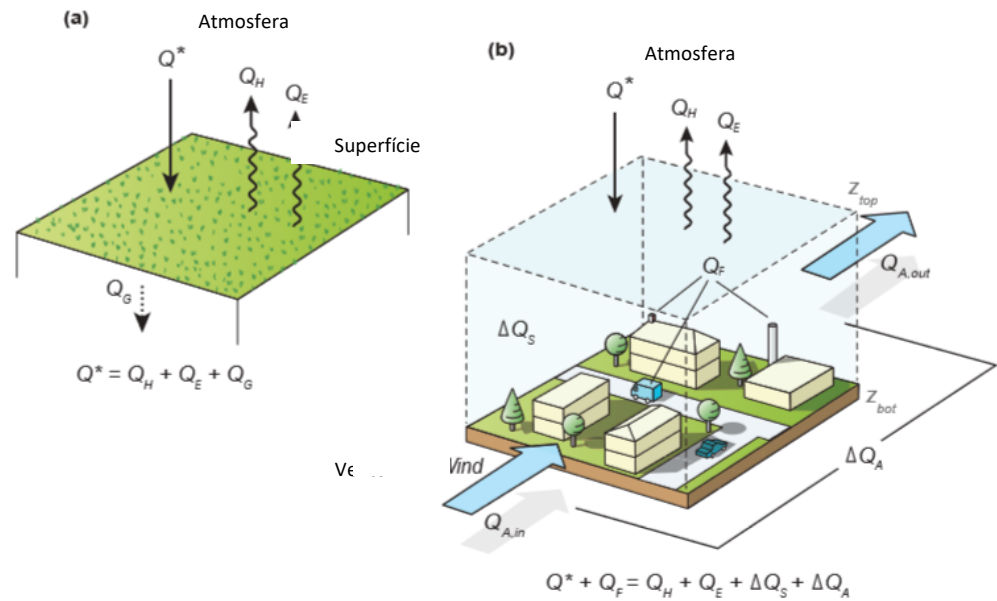
Segundo Shishegar (2015), há quatro categorias principais de elementos espaciais comumente utilizados para atingir esses objetivos: Vegetação, Dispositivos de Sombreamento, Materiais e Água. Além disso, esses elementos devem ser associados à Relação Altura-Largura (*Height/Width*) do cânion urbano, ou seja, a relação H/W. Esses parâmetros são importantes no entendimento sobre a relevância desses elementos em cada região específica.

Sendo assim, como apontou Cortesão (2013), o microclima urbano pode ser descrito como o clima de pequenos espaços confinados e bem definidos onde os elementos meteorológicos são condicionados principalmente por fatores do entorno. Por isso, o design responsivo não pode ser generalizado e sim, deve considerar os efeitos locais.

A equação de balanço de energia no ambiente urbano idealizada por Oke (1978) tem sido explorada como a base para estudos da alteração do microclima urbano e explica de forma genérica como a energia é transferida para a superfície terrestre. Segundo Oke (1987), as trocas térmicas, que estão associadas ao balanço energético, podem ocorrer através do processo de radiação, condução e convecção.

Na Figura 2.1 Oke *et al.* (2017) apresentam um esquema com os fluxos que compõem o balanço energético, diferenciando uma área rural (a) e uma área urbanizada (b).

Figura 2.1. Esquema com os fluxos que compõem o balanço energético.



Fonte: adaptado de Oke *et al.* (2017).

Erell, Pearlmutter e Williamson (2011) mencionam que esse balanço pode ser descrito de forma simplificada em áreas urbanas, segundo a Equação 1.

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad [1]$$

Sendo:

Q^* : Radiação líquida ($W.m^{-2}$)

Q_F : Calor antropogênico ($W.m^{-2}$)

Q_H : Calor sensível ($W.m^{-2}$)

Q_E : Calor latente ($W.m^{-2}$)

ΔQ_S : Fluxo de calor armazenamento pela malha urbana ($W.m^{-2}$)

ΔQ_A : Variação da circulação convectiva horizontal (advecção) ($W.m^{-2}$)

Segundo Erell, Pearlmutter e Williamson (2011), para se compreender os fenômenos que diferenciam o microclima urbano, precisa-se considerar detalhadamente cada um dos componentes de todo o entorno do ambiente construído.

Os materiais utilizados na envoltória das edificações e nas estruturas urbanas desempenham um papel importante no balanço térmico urbano. Esses materiais absorvem a radiação solar infravermelha incidente e dissipam uma porcentagem do calor acumulado através de processos radiativos e convectivos para a atmosfera, aumentando a temperatura do ambiente (SANTAMOURIS, KOLOKOTSA, 2016).

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 contrabalancear o fenômeno das ICUs.

Chen, Wang e Xie (2019) realizaram uma revisão dos modelos de previsão 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.

Santamouris e Kolokotsa (2016) afirmam que os materiais frios são caracterizados por duas propriedades: uma elevada refletância solar e uma elevada emissividade na faixa do infravermelho. Eles destacam que há um indicador que determina o quão frio é o material, denominado índice de refletância solar (SRI). Esse índice é a combinação de propriedades radiantes (refletância solar e emissividade) e efeitos de resfriamento convectivo.

Segundo Bretz, Akbari (1997) uma superfície que é caracterizada por uma alta refletância solar e emissividade na faixa do infravermelho, irá permanecer mais fria quando for exposta à radiação solar. Por consequência apresenta temperaturas superficiais inferiores a outros materiais que tenham refletância solar e emissividade mais baixo.

Para Li (2016), o entendimento dos mecanismos de resfriamento e o estudo das propriedades térmicas dos pavimentos reflexivos são fatores importantes no estudo de mitigação de ilhas de calor urbana. O aumento da taxa evaporativa e da convecção entre pavimento e ar são alguns exemplos desse mecanismo para a diminuição da temperatura superficial.

O uso de materiais frios, altamente reflexivos, junto com o incremento de espaços verdes, é uma alternativa viável e de baixo custo que pode ser implementada nas áreas urbanas e na construção de novos empreendimentos, como uma estratégia para reduzir os efeitos da ICU (CARPIO, 2014, p.113). Li (2016) afirmam que o aumento do albedo da superfície pode reduzir significativamente a temperatura no interior da malha urbana, ao longo do dia nas estações quentes. No entanto, deve-se considerar os efeitos no desconforto na perspectiva do pedestre.

Há um número crescente de trabalhos reportados na literatura nos últimos anos. Pomerantz *et al.* (1997) e Pomerantz *et al.* (2000) conduziram alguns estudos em pavimentos reflexivos e seus benefícios, mensurando o albedo de pavimentos intertravados de concreto com cimento Portland com agregados de coloração clara. Entretanto há outros trabalhos, como Gonzalez (2015) e Qin (2015), que afirmam que o albedo superficial pode reduzir a temperatura superficial das edificações, entretanto, podem piorar as condições de conforto ao nível do pedestre.

Qin (2015) desenvolveu um modelo para predição do albedo em cânions urbanos – *urban canyon albedo* (UCA), com validação através de observações experimentais, considerando a energia absorvida (A), em Watts, pelas superfícies do cânion, variando o acréscimo de energia que é absorvida (ΔA), em Watts, pelas superfícies, em função da variação da refletância dos pavimentos.

Uma avaliação sensível aos parâmetros que influenciam no albedo do cânion urbano demonstra que o fator que se sobressai é a relação H/W – Razão entre a altura do cânion (H) e largura das vias (W). Portanto, aumentar o albedo do pavimento poderia efetivamente elevar o UCA somente se o cânion tivesse uma relação $H/W \leq 1$ (QIN, 2015 *apud* KOWALSKI, 2019).

Além disso, o aumento do albedo do pavimento em um cânion com baixa relação H/W ou em estacionamentos pode induzir um fluxo de radiação difusa adicional para os pedestres (QIN *et al.*, 2019).

Rossi, Castellani *et al.* (2016) avaliaram o potencial de mitigação de ICUs através de pavimentos retro-reflexivos em cânions urbanos. Na pesquisa foram comparados materiais frios tradicionais, na coloração branco e bege em relação aos materiais retro-reflexivos. O objetivo foi avaliar o albedo no topo do cânion, considerando a interação óptica entre pavimento e fachada. A constatação dos autores foi que de fato há um potencial de resfriamento no interior do cânion, com um incremento máximo de 4,6% no albedo.

Rosso, Golasi *et al.* (2018) avaliaram o impacto de materiais inovadores no conforto térmico de pedestres em cânions urbanos históricos. Os centros históricos europeus apresentam uma geometria mais estreita, o que pode trazer efeitos deletérios no conforto térmico ao ar livre. A proposta da pesquisa foi elevar o albedo das superfícies verticais a fim de reduzir o consumo energético no interior da edificação e melhorar as condições de circulação no cânion. Por apresentar cânions mais estreitos e altos, a elevação do albedo trouxe benefícios nas condições de conforto, possivelmente devido ao sombreamento no nível do pedestre.

Taleghani (2018) estudou o impacto do aumento do albedo das superfícies urbanas nas condições de conforto térmico nas condições de verão. O estudo foi realizado em um campus universitário. Foram comparadas as condições térmicas de três locais com diferentes materiais de superfície. O estudo utilizou modelagem computacional e coletas de campo para validação dos resultados. O resultado encontrado foi que o aumento a cada 0,1 no albedo levou a um PET (*Physiological Equivalent Temperature*) 0,8°C maior.

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 intertravado de concreto. A área foi monitorada enquanto técnicas de simulação foram aplicadas para identificar os benefícios do uso de pavimentos reflexivos do ponto de vista térmico. Como resultado foi observada uma redução de aproximadamente 3,4K na temperatura urbana sob condições de máximas durante a estação do verão.

Aboelata (2021) avaliou no contexto de clima árido do Egito, a influência de pavimentos com aumento do albedo na redução da temperatura do ar, na melhoria da condição de conforto e na demanda energética para resfriamento. As constatações foram de que pavimentos reflexivos 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 reflexivos 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).

Sendo assim, esses resultados reforçam a informação de que pavimentos com elevado albedo podem reduzir a temperatura do ar, entretanto, podem ser mais desfavoráveis para a percepção de conforto do pedestre.

Lai *et al.* (2019) realizaram uma revisão bibliográfica, indicando os efeitos do uso de estratégias microclimáticas em projetos urbanos como: geometria, vegetação, superfícies frias e corpos d'água. As constatações foram de que:

- As estratégias apresentaram uma redução média da temperatura de 1,5-2,0 K;
- Os resultados da simulação indicaram que superfícies com elevada refletância provocaram um aumento no índice PET;
- Os efeitos das estratégias analisadas apresentaram melhores resultados em climas mais quentes e mais secos;
- Vegetação, superfícies frias e corpos d'água provocaram menos resfriamento em espaços urbanos compactos do que em áreas abertas.

Além disso, Cui *et al.* (2022) avaliaram o efeito de diferentes sistemas de vegetação de fachada vertical no conforto térmico de pedestres em cidades de clima subtropical úmido. Para isso foram realizados estudos combinando modelos de simulação computacional e medições em campo. Os resultados apontam que fachadas verdes podem melhorar as condições de conforto térmico do pedestre e que a cobertura nas partes mais baixas do cânion poderia melhorar o efeito de resfriamento no nível do pedestre.

Sendo assim, os materiais utilizados no revestimento de fachadas e na construção dos pavimentos urbanos, apresentam uma grande variação de propriedades termofísicas, o que pode impactar de diferentes maneiras o balanço radiativo de áreas mais adensadas. Matias e Lopes (2020) investigaram o balanço da radiação superficial de materiais e seu impacto sobre a temperatura do ar em cânions urbanos de Lisboa. As constatações foram de que o balanço das fachadas e outras superfícies, como pavimentos e calçadas, respondem diretamente à radiação incidente nas superfícies verticais. Além disso, o

balanço radiativo mais elevado foi registrado sempre no asfalto, quando comparado à calçada.

Synnefa *et al.* (2011) realizaram um teste experimental com um pavimento asfáltico de camada fina e de coloração fria, a fim de estimar o potencial de melhoria do microclima urbano e do consumo energético para resfriamento de edificações. Para isso, a metodologia empregada foi analisar as propriedades do espectro solar e de desempenho térmico de 05 colorações de asfalto de camada fina, comparando a amostras de asfalto convencionais. A avaliação foi feita por meio de simulação computacional de dinâmica dos fluidos (CFD), cujos dados serviram de base para o estudo de impacto termo energético na aplicação do material em rodovias.

A pavimentação é um componente importante nos sistemas urbanos. Por isso, o traçado espacial, a orientação cardinal e o material dos pavimentos que compõem a cidade, desempenham uma influência substancial no ambiente térmico. Por isso, Li *et al.* (2022) se propuseram avaliar quantitativamente a influência de vários fatores em pavimentos na rodovia Zhonghuan-Oeste na China. Com base em dados coletados em campo, através de modelos em escala reduzida, foram conduzidas análises comparativas, utilizando ENVI-met, combinando temperatura, umidade, velocidade do vento, temperatura equivalente fisiológica (PET) e temperatura radiante média (TRM). As principais constatações foram que (LI *et al.*, 2022) o efeito da orientação do cânion é inexpressivo. Entretanto, a orientação tem uma influência significativa na velocidade do vento;

Por fim, vale ressaltar que todos os resultados, constatações e conclusões apresentadas não devem ser generalizadas. Devido à variação das condições de medição, do clima e das especificidades de cada local em que o experimento foi conduzido.

2.2. Aplicação I - Modelo Físico em Escala Reduzida

As avaliações físicas em espaços abertos têm sido uma metodologia utilizada para constatar os efeitos combinados entre os elementos que compõem cânions urbanos, sob condições reais de exposição.

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 de cânions urbanos 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.

No modelo OASUS, Krüger e Pearlmutter (2008) avaliaram o efeito da evaporação em arranjo urbano sob condições desérticas. Krüger, Pearlmutter e Rasia (2010) a partir dos dados de campo, estimaram o impacto da geometria e orientação do cânion em cargas de resfriamento em um edifício de alta inércia térmica em um ambiente quente e seco.

Além do OASUS, outro modelo em escala foi construído campus do Instituto de Tecnologia de Nippon, Saitama, Japão, denominado COSMO (*Comprehensive Outdoor Scale Model Experiments for Urban Climate*). O principal objetivo do COSMO 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).

No contexto oriental, na cidade de Guangzhou, China, foi criado um modelo denominado SOMUCH (*Scaled Outdoor Measurement of Urban Climate and Health*), onde têm sido explorados diversos aspectos de simulação física do clima urbano e das superfícies construídas, como grau de inércia térmica de fachadas, estudos de vegetação, densidade construtiva, sombreamento e efeito combinado dessas variáveis (WANG *et al.*, 2021; CHEN *et al.*, 2021).

O plantio de árvores tem enorme potencial de reduzir os efeitos de ICU, consumo energético das edificações e melhorar as condições de conforto ambiental humano e qualidade do ar (RIBEIRO *et al.*, 2023). No entanto, a heterogeneidade das cidades dificulta a avaliação quantitativa dos impactos integrados do plantio de árvores e os layouts de ruas.

Foi partindo dessa problemática que Chen *et al.* (2020a) investigaram a influência do plantio de árvores em ambientes térmicos e eólicos, através de um modelo de simulação física em escala reduzida. A configuração do experimento era a formação de cânions urbanos orientados norte-sul com diferentes relações altura – largura (H/W), 1, 2 e 3, sendo a altura da fachada $h = 1,20$ m. Foram consideradas diferentes espécies arbóreas com diferentes densidades foliares e configurações. Esta pesquisa forneceu referências significativas para plantio de árvores urbanas e produziu dados de validação de alta qualidade para modelagem numérica e computacional.

O efeito combinado do plantio urbano de árvores e as relações H/W no conforto térmico e visual do pedestre foram avaliados por Chen *et al.* (2021a), sendo que a principal constatação foi de que, quanto mais estreito for o pavimento do cânion, menor será a iluminância, o índice PET e índice de stress térmico (ITS). Enquanto seu aumento, causado pela redução de densidade de árvores, é limitado em ruas estreitas. As discrepâncias entre o PET e o ITS são atribuídas em função das diferentes abordagens ao modelar os fluxos radiativos.

As diferenças na morfologia provocam conseqüentemente diferentes níveis de acúmulo de calor na malha urbana. Por isso, a relação H/W e o armazenamento térmico urbano representam uma parcela determinante da formação do ambiente térmico das cidades. Por isso, um experimento foi conduzido por Chen *et al.* (2020b) em Guangzhou, China, cujo objetivo era investigar as características espaço-temporais do ambiente térmico. Os cenários modelados foram de fachadas com diferentes níveis de inércias térmicas, compostos por blocos vazios e blocos preenchidos com areia, em um modelo de simulação física, com diferentes alturas.

Os resultados apontaram que as configurações urbanas com menor relação H/W, com menores áreas sombreadas, apresentaram temperaturas mais altas durante o dia, assim como níveis mais altos de radiação recebida pelas superfícies das paredes. Entretanto, durante a noite, ruas mais largas resfriam mais rapidamente, em função da emissão de radiação de ondas longas e a ventilação noturna serem mais intensas.

Por fim, os modelos com fachadas preenchidas com areia, apresentaram menores taxas de variação de temperaturas diárias (*Diurnal Temperature Range - DTR*) e uma menor variação de temperatura de parede, em relação ao modelo oco, pois devido ao maior armazenamento térmico, há maior absorção de calor durante o dia e liberação durante à noite (CHEN *et al.*, 2020b).

Wang *et al.* (2021) investigaram o balanço energético das superfícies em um modelo urbano compacto altamente adensado, por meio de um experimento em ambiente externo e escala reduzida. O estudo foi conduzido para investigar características de temperatura do ar e superficial, além do balanço energético superficial (SEB), sob diferentes condições de nebulosidade em Guangzhou, China. Para isso foram construídos dois cenários: paredes preenchidas com água ou ocas, a fim de representar edificações com diferentes valores de inércia térmica.

Segundo os autores, a radiação solar, a altura e orientação geográfica da parede, são fatores significantes, que afetam as variações diurnas de temperatura ar-parede. As temperaturas apresentam uma tendência de redução do topo à base da fachada. O modelo preenchido com água apresentou uma menor faixa de temperatura do ar média diária (DTR), cerca de 10°C, devido ao armazenamento do calor nas fachadas. Além disso, para o modelo oco, a soma dos fluxos de calor sensível e latente, contribui majoritariamente para a radiação líquida (Q^*) (WANG *et al.*, 2021).

Sendo assim, a inércia térmica dos materiais do cânion, tanto da fachada quanto dos pavimentos, a morfologia urbana, e por consequência, o armazenamento e o balanço energético superficial, são fatores que devem ser considerados cuidadosamente por planejadores urbanos.

O objetivo deste estudo é avaliar os impactos de diferentes morfologias urbanas e materiais de revestimentos das superfícies nas variações de temperatura do ar, superficial e subsuperficial em modelos em escala de cânions urbanos – PAVSCAM.

2.2.1. Materiais & Métodos

Este estudo foi desenvolvido em um campo experimental concebido especialmente para se avaliar o comportamento térmico de diferentes configurações de cânions urbanos. O modelo físico em escala foi construído com diferentes tipos de pavimentos e configurações geométricas distintas que emulam ruas e edificações de ambientes urbanos genéricos.

A pesquisa se classifica como um estudo experimental, e é dividida em três etapas principais:

1. Construção e caracterização do modelo físico em escala e das condições geográficas da região em estudo;
2. Instalação, posicionamento dos sensores e medição de temperaturas do ar e de superfícies, de direção e velocidade do vento, de albedo dos materiais, de Irradiância solar, bem como informações climatológicas de inverno e verão da região;
3. Análise de dados em campo aberto para avaliar a interação entre os pavimentos e o campo térmico de cânions.

a. Caracterização do Local de Estudo

Na Tabela 2.1 são apresentadas as principais condicionantes naturais do local de implantação do campo experimental e na Figura 2.2 uma vista aérea do campo experimental.

Tabela 2.1. Condicionantes naturais do local de implantação do campo.

Área territorial (2018)	109.941 km ²
Altitude	550 m
Coordenadas geográficas	22.501500207761115 S; 47.16805423447822 W
Clima	Aw - Clima tropical com estação seca de inverno
Temperatura média anual	21,75°C
Precipitação pluviométrica	1456 mm/ano
Ventos predominantes	Sudoeste - SW

Fonte: IBGE (2024).

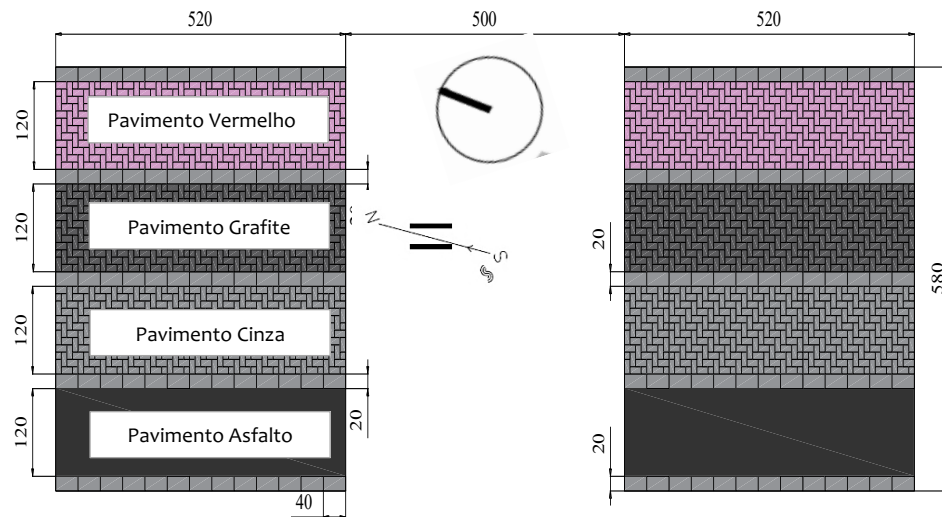
Figura 2.2. Vista aérea do campo experimental.



Fonte: o Autor (2024).

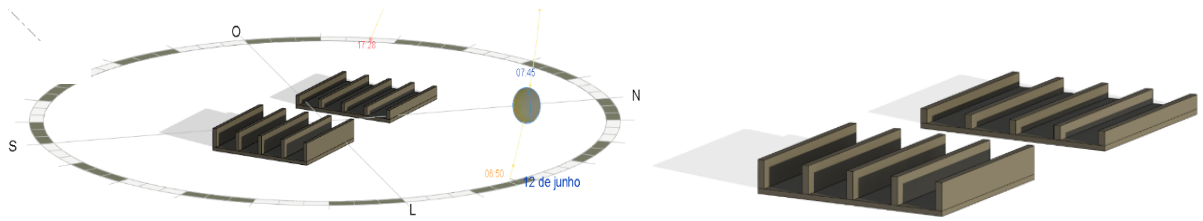
Desta forma, foi implantado inicialmente por Kowalski (2019) um modelo em uma escala de 1:15, com vias de aproximadamente 120 cm no modelo reduzido e barreiras lineares de 40 cm e 80 cm orientadas à nordeste, nas quais o vento dominante incide obliquamente (45°), conforme apresentado na Figura 2.3. O modelo foi construído utilizando materiais típicos do ambiente urbano real, como pavimento com revestimento asfáltico, pavimento intertravado de concreto e fachadas em bloco de concreto

Figura 2.3. Representação em planta do modelo em escala (cm).



Fonte: o Autor (2024).

Figura 2.4. Vista isométrica e orientação do modelo de simulação.



Fonte: o Autor (2024).

Figura 2.5. Vista frontal do modelo de simulação.

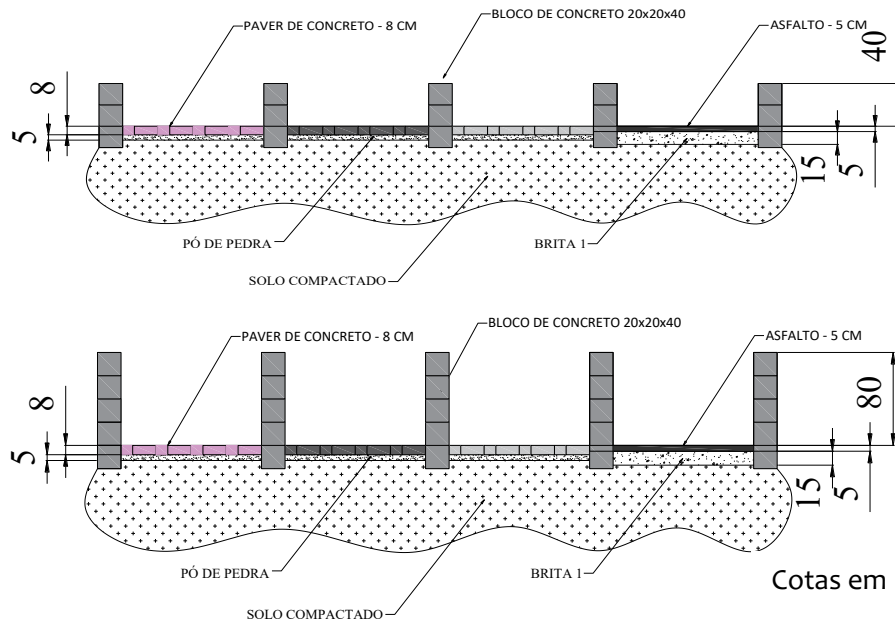


Fonte: o Autor (2024).

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. As edificações, em escala real, teriam um gabarito de, no máximo, 10 m de altura.

No campo experimental há dois arranjos que representam distintas configurações de cânions urbanos. O primeiro com uma relação $H/W = 0,33$, denominado M1 e o segundo modelo com $H/W = 0,66$, denominado M2, conforme representado pela Figura 2.6.

Figura 2.6. Representação dos cânions com fator $H/W = 0,33$ e $H/W = 0,66$.



Fonte: o Autor (2024).

A configuração com relação $H/W = 0,66$ é denominada M2 e possui um Fator de Visão do Céu ($FVC \cong 0,60$) no centro da via e no meio do cânion e a morfologia com $H/W = 0,33$, M1, com um $FVC \cong 0,85$. Os pavimentos intertravado de concreto possuem 8 cm de espessura, assentados 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.

Por fim, além dos pavimentos intertravados de concreto, o modelo é construído com blocos de concreto com diferentes alturas, paralelos à faixa pavimentada, que representarão as massas construídas que formam os arranjos urbanos. As propriedades geométricas e térmicas de cada elemento construtivo, área de seção (A), altura (h), espessura (e), densidade, calor específico (c), condutividade térmica (λ) e capacidade térmica (CT). Na Tabela 2.2 estão apresentadas as informações dos blocos e na Tabela 2.3, as informações dos pavimentos.

Tabela 2.2. Propriedades geométricas e térmicas dos blocos de concreto.

Amostra	Altura [h](m)	Área da Seção [A](m ²)	Espessura [e](m)	Densidade [ρ](kg/m ³)	Condutividade térmica [λ](W/(m.K))	Calor específico [c](kJ/(kg.k))	Capacidade térmica [CT_bloco](kJ/(m ² .K))
Blo_SA*	0,19	0,0038	0,09	2803,43	1,75	0,9048	110,945
Blo_SB*	0,19	0,0313	0,02	2803,43	1,75	0,9048	

*SA: Seção A, correspondente a um corte transversal no bloco, cuja seção é uniforme, maciça. SB: Seção B, corresponde a um corte transversal no bloco, cuja seção é vazada.

Fonte: o Autor (2024).

Tabela 2.3. Propriedades geométricas e térmicas dos pavimentos.

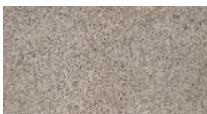
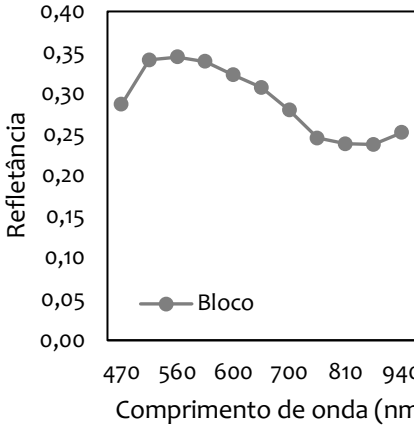
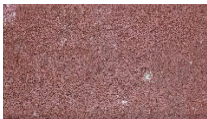
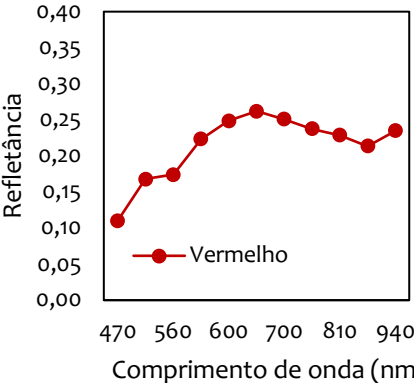
Amostra	REVESTIMENTO					BASE				PAVIMENTO	
	$[e]$ (m)	$[\rho]$ (kg/m ³)	$[\lambda]$ (W/m.K)	c (kJ/kg.K)	CT_{rev} (kJ/m ² .K)	$[e]$ (m)	$[\rho]$ (kg/m ³)	$[\lambda]$ (W/m.K)	c (kJ/kg.K)	CT_{bgs} (kJ/m ² .K)	CT_{pav} (kJ/m ² .K)
Pav_Ver - 8cm_B05	0,08	2750,34	1,75	0,98	217,10	0,05	2366	0,7	0,8	94,64	311,74
Pav_Cin - 8cm_B05	0,08	2706,42	1,75	0,98	213,63	0,05	2366	0,7	0,8	94,64	308,27
Pav_Gra - 8cm_B05	0,08	2743,86	1,75	0,98	216,59	0,05	2366	0,7	0,8	94,64	311,23
Pav_Asf - 5cm_B15	0,05	2300,00	1,15	0,92	0,00	0,15	2366	0,7	0,8	283,92	389,72


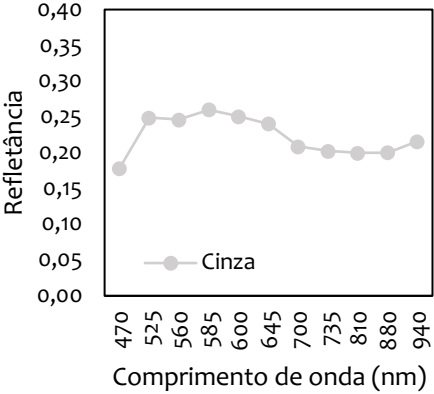

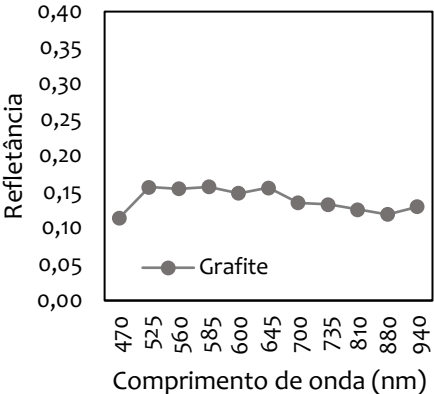
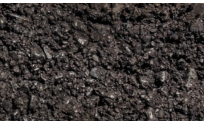
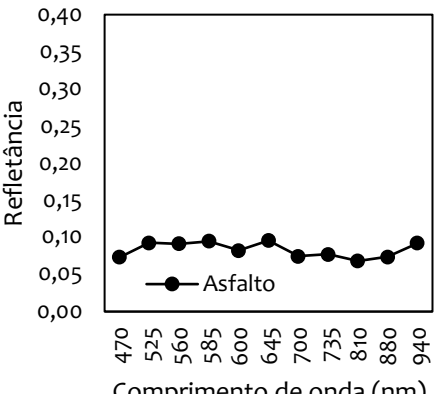
*Pav: corresponde a pavimento; Ver: pavimento intertravado de concreto com coloração vermelha; Cin: pavimento intertravado de concreto com coloração cinza; Gra: pavimento intertravado de concreto com coloração grafite; Asf: pavimento asfáltico de coloração preta.

Fonte: o Autor (2024).

No Quadro 2.0 são apresentadas as amostras de pavimento, fachada e suas respectivas curvas espectrais.

Quadro 2.0. Amostras de pavimento e fachada e refletância.

Amostra	Descrição	Superfície	Curva espectral	Refletância Solar
Bloco	Bloco de concreto utilizado na fabricação da fachada		 <p>Refletância</p> <p>Comprimento de onda (nm)</p> <p>— Bloco</p>	0,2876
Pav_Ver	Pavimento intertravado de concreto, coloração vermelha		 <p>Refletância</p> <p>Comprimento de onda (nm)</p> <p>— Vermelho</p>	0,1986

Pav_Cin	Pavimento intertravado de concreto, coloração cinza		 <p>0,40 0,35 0,30 0,25 0,20 0,15 0,10 0,05 0,00</p> <p>Refletância</p> <p>470 525 560 585 600 645 700 735 810 880 940</p> <p>Comprimento de onda (nm)</p> <p>—●— Cinza</p>	0,224
Pav_Gra	Pavimento intertravado de concreto, coloração grafite		 <p>0,40 0,35 0,30 0,25 0,20 0,15 0,10 0,05 0,00</p> <p>Refletância</p> <p>470 525 560 585 600 645 700 735 810 880 940</p> <p>Comprimento de onda (nm)</p> <p>—●— Grafite</p>	0,1416
Pav_Asf	Pavimento asfáltico, coloração preta		 <p>0,40 0,35 0,30 0,25 0,20 0,15 0,10 0,05 0,00</p> <p>Refletância</p> <p>470 525 560 585 600 645 700 735 810 880 940</p> <p>Comprimento de onda (nm)</p> <p>—●— Asfalto</p>	0,0918

Fonte: o Autor (2024).

b. Variáveis da Pesquisa

Foram realizadas oito campanhas em diferentes períodos de coletas de informações micro meteorológicas na área do PAVSCAM, com medições de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, irradiância solar, temperaturas de globo, superficiais, subsuperficiais do pavimento, albedo e curva espectral do modelo.

As variáveis consideradas nesta pesquisa estão representadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1. Variáveis de estudo.

	Descrição	Período	Elemento	Variáveis
Etapa 1	Caracterização dos materiais – Fachada e Pavimento	Inverno 2022	Pavimentos e blocos de concreto	- Densidade - Capacidade térmica
Etapa 2	Coleta de dados em campo – Cânions M1 e M2	Verão 2020	Pavimento e Ar	- Temperatura do ar (Ta) - Umidade relativa (Ur) - Velocidade do vento (Vv) - Irradiância solar (I) - Temperatura do ar (Ta) - Temperatura superficial (Ts) - Temperatura subsuperficial do pavimento (Tss) - Temperatura base do pavimento (Tsb) - Temperatura do subleito do pavimento (Tso)
Etapa 3	Coleta de dados em campo – Cânion M2	Inverno 2021	Pavimento, Ar e Fachadas	- Temperatura do ar (Ta) - Umidade relativa (Ur) - Velocidade do vento (Vv) - Irradiância solar (I) - Temperatura do ar (+20, +40, +60 cm) - Temperatura de globo (+40 cm) - Temperatura superficial do pavimento (Ts) - Temperatura subsuperficial do pavimento (Tss) - Temperatura base do pavimento (Tsb) - Temperatura superficial das fachadas – Sudoeste (SW) (+20, +40 e +60 cm) - Temperatura superficial das fachadas – Nordeste (NE) (+20, +40 e +60 cm)
Etapa 4	Monitoramento de dados – Cânion M1	Inverno 2020-21	Escala Urbana e Reduzida	- Temperatura do ar - Temperatura superficial
Etapa 5	Coleta de dados em campo - Pavimento	2019 a 2024	Envelhecimento	- Curva espectral - Albedo
Etapa 6	Coleta de dados em campo – Pav. Não sombreado	Outono 2021	Asfalto borracha	- Temperatura superficial - Temperatura subsuperficial
Etapa 7	Coleta de dados em campo – Pav. Não sombreado	Inverno 2022	Diferentes espessuras de	- Temperatura superficial - Temperatura subsuperficial - Temperatura de globo

			Base: 10, 15 e 20 cm	- Temperatura do ar
Etapa 8	Coleta de dados em campo – Cânion M2	Verão 2023	Fachadas de madeira, vidro e tinta escura e clara	- Temperatura do ar - Temperatura de globo - Temperatura superficial do pavimento

Fonte: o Autor (2024).

As análises foram feitas em cima das datas mais representativas em cada período de coleta. Um dia típico e representativo considerado, foram os dias de céu aberto, ou jája, claridade atmosférica superior a 0,55 e vento com velocidade inferior a 2 m/s.

a) Aplicação I – Estudo do Modelo Físico

- Avaliação da alteração do albedo, forma urbana, gradiente de temperatura e transferência de calor. Período: 29/11 – 10/12/2020. Dia Representativo: 08 de Dezembro de 2020.
- Avaliação da temperatura de globo e temperatura radiante média. Período: 23/06 – 28/06/2021. Dia Representativo: 24 de Junho de 2021.
- Avaliação do material do revestimento: Período: 10/05 – 21/05/2021. Dia Representativo: 16 de Maio de 2021.

b) Aplicação II – Estudo de Erros entre Modelos

- Avaliação da variação temporal e espacial da temperatura do ar e superficial em escala urbana e reduzida: Período: 23/06 – 30/06/2021. Dia Representativo: 24 de Junho de 2021.

c) Aplicação III – Estudo de Conforto Térmico

- Avaliação do Índice UTCI: Período: 07/12 – 09/12/2020. Dia Representativo: 08 de Dezembro de 2020.

c. Instalação e Posicionamento dos Sensores

Os equipamentos para a coleta das variáveis propostas e a realização desta pesquisa estão descritos no Quadro 2.2.

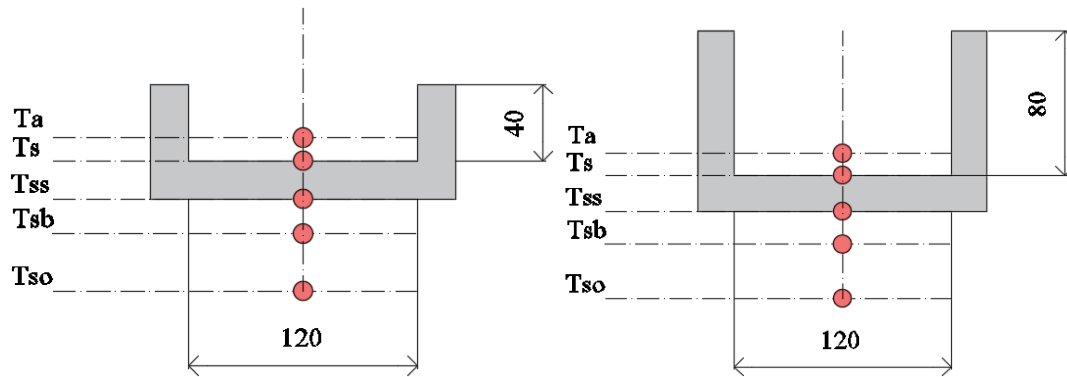
Quadro 2.2. Equipamentos para execução do projeto.

EQUIPAMENTO	MARCA/MODELO	PRECISÃO	ETAPA DE UTILIZAÇÃO
Calorímetro 200 ml	Cidepe / EQ084K	Incerteza absoluta de +/- 0.2 (Fonte: desvio padrão do experimento)	Caracterização dos materiais
Espectrômetro portátil	Lunar and Planetary Institute / ALTA II	Incerteza abs de até 3% (Fonte: C1549)	Caracterização dos elementos
Câmera termográfica	Fluke / Ti 400 9 Hz - Amplitude espectral 7,5µm - 14µm (onda longa)	±2°C (à 25°C) ou 2% da leitura (Demais Temperaturas ambiente)	Equação de ajuste entre escalas e análise de sombreamento
Estação Meteorológica Portátil	HOBO U30	-	Caracterização microclimática
Piranômetro	EKO/MS-602	Tempo de resposta: < 17 segundos; Sensibilidade: ≈ 7 µv/W/m ²	Caracterização microclimática
Anemômetro de hélice	Anemômetro em Alumínio, com baterias CR2032 / Diâmetro das conchas - 75mm, Peso 245g	± 0,2 m/s	Caracterização microclimática
Temo-Higrômetro	HOBO / Pro V2 U23-001	0,2 °C	Caracterização microclimática
Datalogger	Microcontrolador Esp32 / WROOM	-	Coleta automática e armazenamento de dados
Sensores de Temperatura	DS18B20 / Tipo Sonda	±0,5°C (à 25°C)	Coleta de dados de temperatura do ar, temperatura das camadas do pavimento (superficial, subsuperficial, base e subleito) e temperatura de fachadas
Termômetro de globo	DS18B20 Tipo Sonda com esfera de 40 mm na cor cinza médio	±0,5°C (à 25°C)	Coleta de dados de temperatura de globo

Fonte: adaptado dos manuais de usuário dos equipamentos (2024).


Nos Quadros 2.3 e 3.5 e na Figura 2.7 estão apresentadas as informações de coleta de verão, identificando a cota de instalação dos sensores e a nomenclatura utilizada. Além disso, quais modelos (M1 ou M2) foram avaliados em cada campanha.

Figura 2.7. Posicionamento dos sensores no modelo M1 e M2, respectivamente, na coleta de verão.



Fonte: o Autor (2024).



Quadro 2.3. Campanha de coleta de dados 1: Verão. Pavimento Intertravado de Concreto – Vermelho, Cinza e Grafite.

Posição do sensor*	Variáveis	Camada	Espessura	Modelo
+5 cm	Temperatura do ar (Ta)	Ar	5 cm	M1 e M2 
0 cm	Temperatura superficial (Ts)			
-8 cm	Temperaturas subsuperficiais (Tss)	Revestimento	8 cm	
-13 cm	Temperatura da camada de base (Tsb)	Base	5 cm	
-33 cm	Temperatura da camada do subleito (Tso)	Subleito	20 cm	

*distância vertical em relação ao nível do piso

Fonte: o Autor (2024).

Quadro 2.4. Cenários de simulação – Coleta 1: Verão. Pavimento de Asfalto.

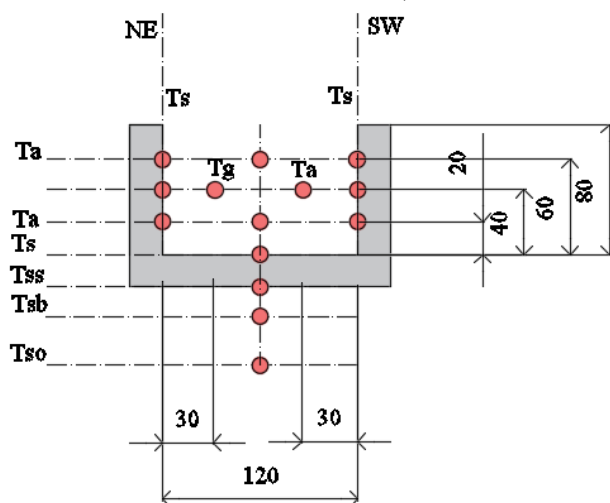
Posição do sensor*	Variáveis	Camada	Espessura	Modelo
+5 cm	Temperatura do ar (Ta)	Ar	5 cm	M1 
0 cm	Temperatura superficial (Ts)			
-5 cm	Temperaturas subsuperficiais (Tss)	Revestimento	5 cm	
-12 cm	Temperatura da camada de base (Tsb)	Base	7 cm	
-19 cm	Temperatura da camada do subleito (Tso)	Subleito	7 cm	M2 
+5 cm	Temperatura do ar (Ta)	Ar	5 cm	
0 cm	Temperatura superficial (Ts)			
-5 cm	Temperaturas subsuperficiais (Tss)	Revestimento	5 cm	
-15 cm	Temperatura da camada de base (Tsb)	Base	10 cm	
-24 cm	Temperatura da camada do subleito (Tso)	Subleito	9 cm	

* distância vertical em relação ao nível do piso

Fonte: o Autor (2024).

Os dados de posicionamento dos sensores da coleta de inverno, estão apresentadas graficamente nos Quadro 2.5 e 2.6 e Figura 2.8.

Figura 2.8. Posicionamento dos sensores no modelo M2, na coleta de inverno.



Fonte: o Autor (2022).

Quadro 2.5. Cenários de simulação – Coleta 2: Inverno. Pavimento Intertravado de Concreto – Vermelho, Cinza e Grafite.

Posição do sensor*	Variáveis	Camada	Espessura	Modelo
+60 cm	Temperatura do ar (Ta)	Ar	5 cm	M2
+40 cm	Temperatura do ar (Ta)			
+40 cm	Temperatura de globo (Tg)			
+20 cm	Temperatura do ar (Ta)			
0 cm	Temperatura superficial (Ts)			
-8 cm	Temperaturas subsuperficial (Tss)	Revestimento	8 cm	
-13 cm	Temperatura da camada de base (Tsb)	Base	5 cm	
+60 cm	Temperatura superficial (Ts)	Fachada SW	-	
+40 cm	Temperatura superficial (Ts)	Fachada SW	-	
+20 cm	Temperatura superficial (Ts)	Fachada SW	-	
+60 cm	Temperatura superficial (Ts)	Fachada NE	-	
+40 cm	Temperatura superficial (Ts)	Fachada NE	-	
+20 cm	Temperatura superficial (Ts)	Fachada NE	-	

Fonte: o Autor (2024).

Quadro 2.6. Cenários de simulação – Coleta 2: Inverno. Pavimento de Asfalto e Fachadas.

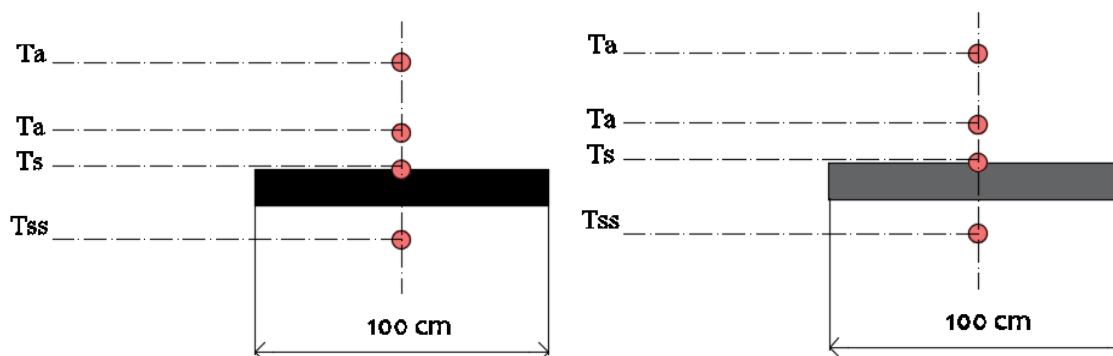
Posição do sensor*	Variáveis	Camada	Espessura	Modelo
+60 cm	Temperatura do ar (Ta)	Ar	5 cm	M2
+40 cm	Temperatura do ar (Ta)			
+40 cm	Temperatura de globo (Tg)			
+20 cm	Temperatura do ar (Ta)			
0 cm	Temperatura superficial (Ts)			
-5 cm	Temperaturas subsuperficial (Tss)	Revestimento	5 cm	
-15 cm	Temperatura da camada de base (Tsb)	Base	7 cm	
+60 cm	Temperatura superficial (Ts)	Fachada SW	-	
+40 cm	Temperatura superficial (Ts)	Fachada SW	-	
+20 cm	Temperatura superficial (Ts)	Fachada SW	-	
+60 cm	Temperatura superficial (Ts)	Fachada NE	-	
+40 cm	Temperatura superficial (Ts)	Fachada NE	-	
+20 cm	Temperatura superficial (Ts)	Fachada NE	-	

*em relação ao nível do piso

Fonte: o Autor (2024).

No Quadro 2.7 e na Figura 2.9 estão apresentadas as informações de coleta de outono-inverno, identificando a cota de instalação dos sensores e a nomenclatura utilizada. Além disso, os modelos avaliados nessa campanha foram os pavimentos não-sombreados, com e sem incorporação de borracha.

Figura 2.9. Posicionamento dos sensores no modelo com e sem borracha, respectivamente, na coleta de outono-inverno.



Fonte: o Autor (2024).

Quadro 2.7. Cenários de simulação – Coleta 2: Inverno. Pavimento Intertravado de Concreto – Vermelho, Cinza e Grafite.

Posição do sensor*	Variáveis	Camada	Espessura	Modelo
+80 cm	Temperatura do ar (Ta)	Ar	5 cm	Sem Borracha
+5 cm	Temperatura do ar (Ta)			
0 cm	Temperatura superficial (Ts)			Com Borracha
-13 cm	Temperaturas subsuperficiais (Tss)	Revestimento	13 cm	

*em relação ao nível do piso

Fonte: o Autor (2024).

d. Coleta de Dados em Campo

A coleta e a análise de dados estão estruturadas em duas etapas principais: Procedimentos experimentais (onde estão apresentadas as condições meteorológicas dos períodos de coleta e a definição das camadas de estudo) e Procedimentos metodológicos (em que são apresentadas as bases metodológicas e normativas relacionadas aos ensaios).

Em função das variações na geometria de insolação e das condições meteorológicas, as coletas foram conduzidas no período do verão, denominada Coleta 1 e no período do inverno, Coleta 2. Os dados considerados para análise, foram extraídos com base nas seguintes condições atmosféricas, conforme a EPA (2008):

- Índice de claridade atmosférica superior a 50% ($kt = 0,5$)
- Velocidade do vento inferior a 2 m/s
- Que não houvesse pluviosidade na semana de coleta de dados

O índice de claridade atmosférica foi calculado usando as equações propostas por Duffie *et al.* (2020) apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Equações para determinar o índice de claridade atmosférica.

δ	H_0	kt
Declinação magnética	Irradiância solar no topo da atmosfera	Índice de claridade atmosférica
δ $= 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right)$	$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{365} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \times (\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta)$	$kt = \frac{H}{H_0}$

n é o dia do ano, estimado pela tabela 1.6.1 de Duffie, Beckman e Blair (2020); δ é a declinação e pode ser encontrado pela equação de Cooper (1969); kt : índice de claridade atmosférica diária. Também pode ser definido como a razão entre a radiação de um dia específico (H) e a radiação extraterrestre (H_0) para aquele dia. G_{sc} pode ser definido como radiação global (W.m⁻²). ϕ é a latitude do local; ω_s é o ângulo horário do pôr do sol (graus), calculado conforme a equação 1.6.10 de Duffie, Beckman e Blair (2020).

Fonte: Duffie, Beckman e Blair (2020)

As coletas foram conduzidas por meio de termopares e anemômetros de maneira automática de minuto a minuto e a cada 15 minutos para o piranômetro. As configurações avaliadas foram a M1 e M2, correspondentes a cânions com relação H/W de 0,33 e 0,66 respectivamente. Além disso, os pavimentos e fachadas que serviram como objetos de estudo, foram:

- Pavimento intertravado de concreto cinza (CIN) com 8 cm de espessura;
- Pavimento intertravado de concreto grafite (GRA) com 8 cm de espessura;
- Pavimento intertravado de concreto vermelho (VER) com 8 cm de espessura;
- Pavimento de concreto asfáltico moldado a frio preto (ASF) com 5 cm de espessura;
- Fachada Nordeste (NE) composta por blocos cerâmicos de concreto com dimensões 20 x 20 x 40 cm;
- Fachada Sudoeste (SW) composta por blocos cerâmicos de concreto com dimensões 20 x 20 x 40 cm;

Em ambas as coletas foram avaliadas as variações de temperatura em diferentes camadas, tanto acima, quanto abaixo do pavimento. Todas as temperaturas superficiais foram coletadas com uma placa de cobre com seção ômega que envolveram os termopares, e com material isolante e acabamento reflexivo no topo. A ideia era aumentar a área de contato com o sensor e minimizar a troca de calor com o meio.

As camadas avaliadas durante o experimento, sempre em relação ao nível do pavimento, foram:

- +60 cm: Temperatura do ar no interior no cânion e Temperatura superficial das fachadas;

- +40 cm: Temperatura do ar no interior do cânion; Temperatura superficial das fachadas e Temperatura de globo;
- +20 cm: Temperatura do ar no interior do cânion e Temperatura superficial das fachadas;
- +5 cm: Temperatura do ar próximo à superfície;

- 0 cm: Temperatura superficial do pavimento;
- -5 cm: Temperatura subsuperficial do pavimento asfáltico;
- -8 cm: Temperatura subsuperficial dos pavimentos intertravados de concreto;

- -12 cm: Temperatura na camada de base do pavimento asfáltico (M1);
- -15 cm: Temperatura na camada de base do pavimento asfáltico (M2);
- -13 cm: Temperatura na camada de base dos pavimentos intertravados de concreto;

- -19 cm: Temperatura na camada do subleito do pavimento asfáltico (M1);
- -24 cm: Temperatura na camada do subleito pavimento asfáltico (M2);
- -33 cm: Temperatura na camada do subleito dos pavimentos intertravados de concreto;

Na Figura 2.10 está apresentado o processo de instrumentação em campo, o posicionamento dos sensores da coleta de verão e inverno, assim como os componentes de apoio, para aquisição de dados de temperatura superficial, temperatura do ar e temperatura em profundidade.

Figura 2.10. Instrumentação – coleta de verão.



Fonte: o Autor (2024).

Ao observar da esquerda para a direita, estão apresentados: inicialmente, a instalação do poço de monitoramento das temperaturas superficiais. Este poço foi

executado com um tubo de PVC e com uma placa de latão e um anel de cobre ao fundo, para que mantivesse em contato com o sensor posicionado internamente, mais detalhes do processo de confecção, estão apresentados no Anexo.

Em seguida, estão apresentados os sensores instalados em diferentes profundidades, o sensor para coleta de temperatura superficial e temperatura do ar. Por fim, duas imagens apresentando a estação meteorológica e o esquema de instalação em campo.

A instrumentação da coleta 2, durante o período do inverno, foi realizada apenas no modelo M2, em função de um maior tempo de exposição das fachadas ao sol. Por isso, toda a envoltória do cânion foi monitorada, incluindo diferentes alturas de temperatura do ar, conforme apresentada no Figura 2.11.

Figura 2.11 Instrumentação – coleta de verão.



Fonte: o Autor (2024).

Os materiais de pavimentação foram escolhidos em função das diferenças na capacidade drenante e das propriedades radiantes (albedo e emissividade), sob as mesmas condições de sombreamento e ventilação.

e. Interação entre as Camadas

Para avaliar a transferência de calor entre as camadas do pavimento e a interação entre o pavimento e o interior do cânion, foram calculados os fluxos térmicos, com base nas propriedades dos materiais e nas diferenças de temperaturas medidas em campo. Para isso, foram analisados, segundo o equacionamento proposto por Bergman e Lavine (2019).

- Fluxo radiativo (q_r) – Equação 2
- Fluxo convectivo (q_c) – Equação 3
- Fluxo condutivo (q_k) – Equação 4

$$q_r = G * \alpha * A \quad [2]$$

Sendo:

q_r : Fluxo Radiativo (W)
 G : Irradiância Global (W.m⁻²)
 α : Absortância ()
 A : Área (m²)

$$q_c = hc * A * (T_\infty - T_s) \quad [2]$$

Sendo:

q_c : Taxa de transferência de calor por convecção (W)
 A : Área de transferência de calor (m²)
 hc : Coeficiente médio de transferência de calor por convecção sobre a área A (W/m².K)
 T_s : Temperatura superficial (°C)
 T_∞ : Temperatura do fluido (°C)

$$q_k = \frac{k.A}{L} * (T_1 - T_2) \quad [3]$$

Sendo:

q_k : Taxa de transferência de calor por condução (W)
 k : Condutividade térmica do material (W/m.K)
 A : Área de transferência de calor (m²)
 L : Espessura da superfície por onde o fluxo incide perpendicularmente (m)
 T_1 e T_2 : Temperatura superficial das faces do elemento (°C)

f. Bases Metodológicas

As bases metodológicas e normativas relacionadas à cada experimento estão apresentadas no Quadro 2.8 de acordo com o objetivo de cada ensaio realizado.

Quadro 2.8. Normas e metodologias relacionadas aos ensaios.

ENSAIO	OBJETIVO	BASE METODOLÓGICA
Densidade dos pavimentos intertravados de concreto e dos blocos de concreto da fachada	Determinar a absorção de água, do índice de vazios por imersão e fervura, e das massas específicas de argamassas e concreto endurecidos.	ABNT NBR 9778 (2009): Argamassas e concretos endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.
Densidade das camadas do pavimento e procedimentos de compactação do solo	Determinar a relação entre o teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca de solos máxima, quando compactados	ABNT NBR 7182 (2020): Solo – Ensaio de Compactação.
Densidade da camada de areia	Determinar a massa específica e a massa específica aparente	ABNT NBR 16916 (2021): Agregado miúdo - Determinação

	dos agregados miúdos destinados a serem usados em concreto.	da densidade e da absorção de água
Calor específico do concreto	Determinar o calor específico do concreto.	NBR 12817 (2012): Concreto endurecido — Determinação do calor específico — Método de ensaio
Emitância térmica dos pavimentos e fachada*	Fornecer um meio comparativo para quantificar a emitância térmica de materiais próximos à temperatura ambiente.	ASTM C1371-15 (2022): Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers.
Refletância Solar (albedo) de pavimentos intertravados de concreto e fachada*	Fornecer dados de refletância solar, necessários para avaliar temperaturas e fluxos de calor através de superfícies expostas à radiação solar.	ASTM C1549-16 (2016): Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance Near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer.
Índice de Refletância Solar (SRI)*	Calcular o Índice de Refletância Solar para superfícies com emissividade maior que 0,1.	ASTM E1980-11 (2019): Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces.
Instrumentação de variáveis ambientais	Especificar as características mínimas dos instrumentos e métodos para medição das quantidades físicas que caracterizam um ambiente.	ISO 7726 (2001): Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities.

*Essas variáveis não foram medidas. Foram tomados valores de referência.

Fonte: o Autor (2024).

2.2.2. Resultados e Discussões

A análise dos resultados está estruturada em função de três coletas, incluindo a análise das propriedades térmicas do pavimento, bem como os dados de variação de temperatura do ar do local de implantação do modelo. Além dos dados de velocidade e direção do vento, temperatura do ar, umidade relativa do ar, irradiância e temperatura das superfícies e subsuperficiais. Os dados da coleta 1 foram tomados como referência para possíveis adaptações do método.

A coleta 2 previu o levantamento de dados de temperatura superficial, temperatura do ar e temperatura de globo no interior do cânion, assim como as temperaturas subsuperficiais e das fachadas. Por fim, velocidade e direção do vento, no interior das duas morfologias e em um local livre de obstruções.

A terceira coleta corresponde à análise das temperaturas do ar próximo à superfície, temperatura superficial e subsuperficial, porém em condições não sombreadas, com pavimentos asfálticos com e sem incorporação de asfalto.

Todas as coletas foram realizadas em períodos com atmosfera caracterizada pela baixa velocidade do vento, temperaturas elevadas, céu aberto com índice de claridade atmosférica superior a 0,5 e predominância da atuação da massa tropical atlântica.

A sequência de apresentação dos resultados é a seguinte:

- Impactos da alteração das propriedades do tecido urbano
 - Caracterização microclimática;
 - Impactos da alteração do material de revestimento;
 - Impactos da alteração do albedo;
 - Impactos da alteração da forma urbana;
 - Gradiente de temperatura no interior do cânion;
 - Transferência de calor entre as camadas do pavimento;
- Análise dos erros entre diferentes escalas e modelos de simulação
- Análise multivariada para tomada de decisão.

a. Impactos da Alteração das Propriedades do Tecido Urbano

Caracterização microclimática

A caracterização microclimática dos dias da coleta, tanto no verão, quanto de inverno, serviu de base para a escolha do dia mais representativo de análise. Para isso, ela está estruturada da seguinte maneira:

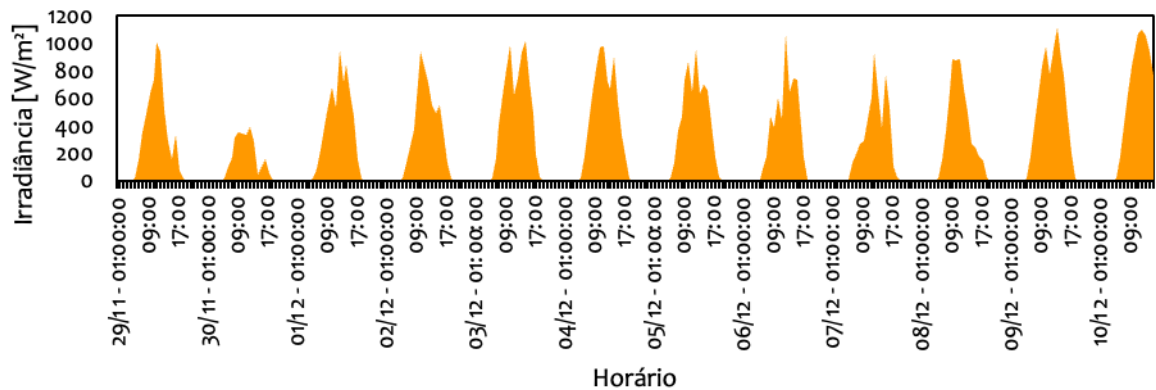
- Inicialmente foram coletados dados de irradiância solar do período (I);
- Em seguida, foi calculada a irradiação solar do período (H);
- Em função da irradiação do período, foi calculado o índice de claridade atmosférica (kt);
- Posteriormente, foram analisados os dados de temperatura do ar (T_a), umidade relativa (U_r) e velocidade do vento (V_v);
- Por fim, foi calculada a altura solar horária do período e posteriormente analisada a altura solar do dia mais representativo, a fim de uma melhor interpretação da importância do sombreamento na análise de dados.

A sequência de Figuras e Tabelas está apresentada a seguir:

Coleta de Verão

Na Figura 2.12 estão apresentados os dados de base horária da irradiância solar, coletados no período de verão.

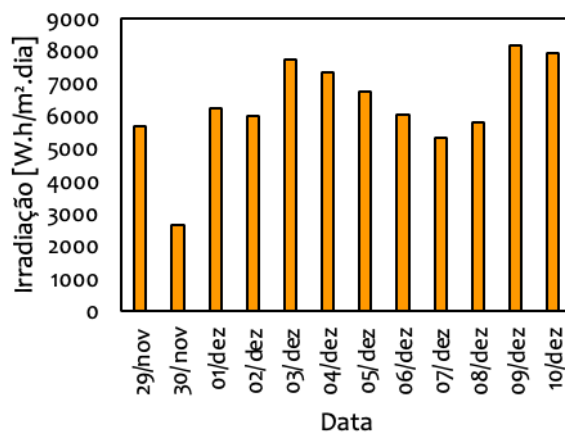
Figura 2.12. Coleta 1. Irradiância (I) do período – Verão.



Fonte: o Autor (2024).

Nota-se que todos os dias, com exceção do dia 30/11, tiveram um nível semelhante de irradiação solar, indicando a estabilidade do potencial radiativo desse período. Na Figura 2.13 são apresentados os valores de irradiação solar por dia. A radiação solar total ao longo do dia corresponde à área abaixo da curva da irradiância, que é um valor medido instantaneamente.

Figura 2.13. Coleta 1. Irradiação solar (H) do período – Verão.



Fonte: o Autor (2024).

Os dias com maior irradiação solar foram 03, 09 e 10 de dezembro de 2020. A definição dos dias com maior irradiação incidente, serve como base para a determinação do índice de claridade atmosférica (kt) e conseqüentemente a escolha do dia mais representativo para análise. Na Figura 2.14 são apresentados os dados de irradiação solar que chega na superfície (H) e a irradiação solar no topo da atmosfera (H_0). O índice de

claridade atmosférica foi calculado usando as equações propostas por Duffie *et al.* (2020) apresentadas na Tabela 2.5 deste trabalho.

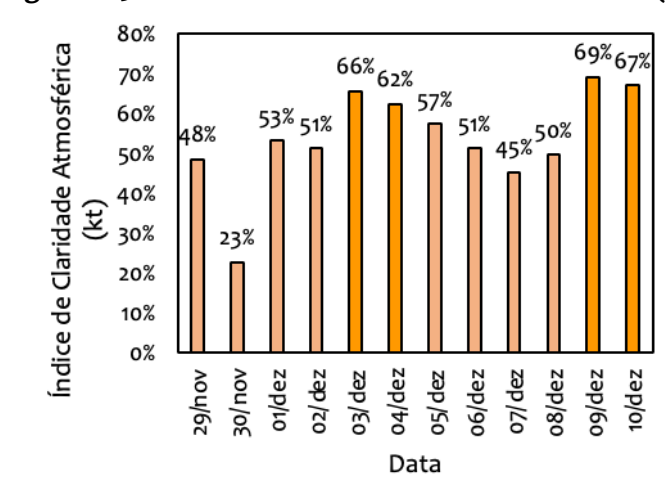
Figura 2.14. Coleta 1. Variáveis de entrada para o cálculo do índice de claridade atmosférica (kt) – Verão.

Irradiação Solar	(H) [W/m ²]
Dia do ano	(n)
Declinação magnética	(δ) [°]
Ângulo horário do anoitecer	(ω_s) [°]
Irradiação Solar no Topo da Atmosfera	(Ho) [W.h/m ² .dia]

Data	(H)	(n)	(δ)	(ω_s)	(Ho)	(kt)
29/nov	5675	333	-21,8255	99,5784	11737,06	48%
30/nov	2652	334	-21,9699	99,6491	11747,98	23%
01/dez	6238	335	-22,1077	99,7167	11758,42	53%
02/dez	6015	336	-22,2391	99,7813	11768,37	51%
03/dez	7720	337	-22,3638	99,8427	11777,84	66%
04/dez	7348	338	-22,4819	99,9010	11786,84	62%
05/dez	6752	339	-22,5934	99,9561	11795,36	57%
06/dez	6041	340	-22,6981	100,0080	11803,41	51%
07/dez	5335	341	-22,7962	100,0566	11811,00	45%
08/dez	5850	342	-22,8874	100,1020	11818,12	50%
09/dez	8166	343	-22,9719	100,1440	11824,78	69%
10/dez	7932	344	-23,0496	100,1827	11830,98	67%

Fonte: o Autor (2024).

Figura 2.15. Coleta 1. Índice de claridade atmosférica (kt) – Verão.



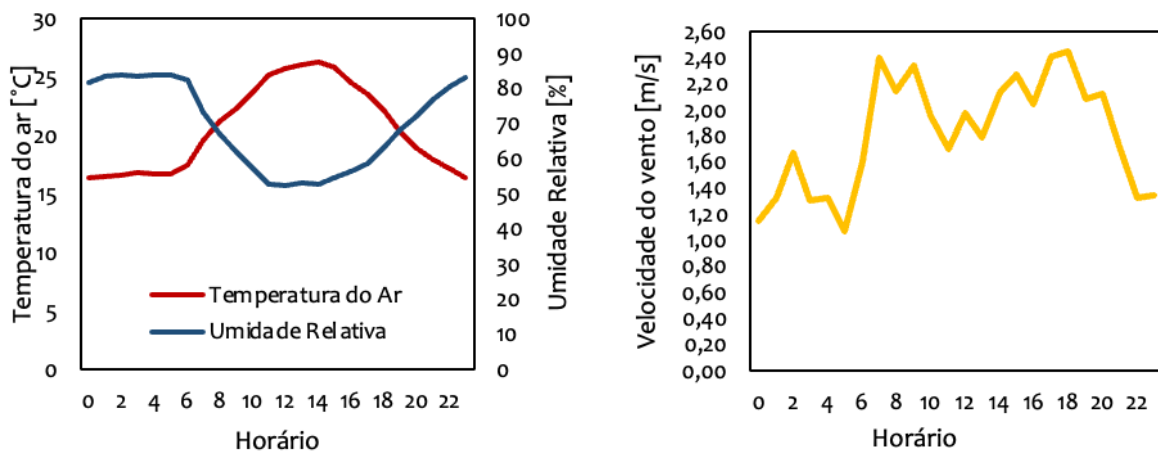
Fonte: o Autor (2024).

A determinação do índice de claridade atmosférica (kt) corresponde à razão entre a radiação solar que chega à superfície (H) e a radiação solar no topo da atmosfera (Ho) pelo modelo de isotropia do céu de Liu e Jordan (1960). Percebe-se que os dias com maior abertura do céu foram dia 09 e 10 de dezembro de 2020 com, 69% e 67% de abertura, respectivamente. Entretanto, por se tratar da média mensal no contexto brasileiro, todos os dias com kt > 50% (RÍSPOLI *et al.*, 2015) são adequados para a determinação dos dias

mais representativos para análise de dados, ou seja, apenas os dias 29 e 30 de novembro e 07 de dezembro de 2020 não seriam ideais para tratamento.

Desta maneira, em função da velocidade média do vento e do índice de claridade atmosférica, o dia mais representativo para análise na estação do verão foi 08 de dezembro de 2020. Na Figura 2.16 estão apresentados os dados de temperatura e umidade relativa do ar, bem como a média horária da velocidade do vento.

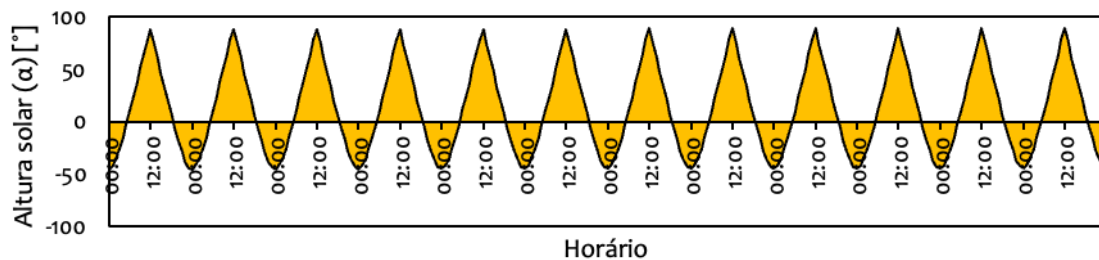
Figura 2.16. Coleta 1. Umidade relativa e temperatura do ar – dia mais representativo (08 de dezembro de 2020). Coleta 1. Velocidade do vento +100 cm – dia mais representativo.



Fonte: o Autor (2024).

Além disso, outra variável a ser considerada nos estudos em modelos físicos é o sombreamento das superfícies adjacentes no pavimento. Para isso a equação proposta por Duffie *et al.* (2020, p.19) foi tomada como base para o cálculo. Na Figura 2.17 está apresentada a altura solar do período de coleta.

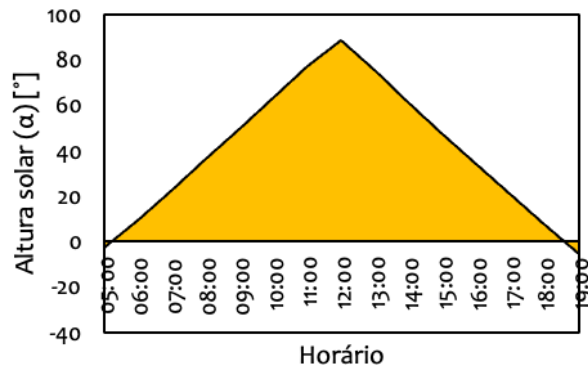
Figura 2.17. Coleta 1. Altura solar em dezembro – Verão.



Fonte: o Autor (2024).

Os valores negativos representam os horários em que o sol está abaixo da linha do horizonte. Na Figura 2.18 está apresentando a altura solar do dia representativo. O que se pode notar é que o ângulo máximo com o plano horizontal ao longo do dia é de 80° e que o período de sol inicial próximo das 05h da manhã e encerra próximo das 19 horas.

Figura 2.18. Coleta 1. Altura solar do dia mais representativo – Verão.



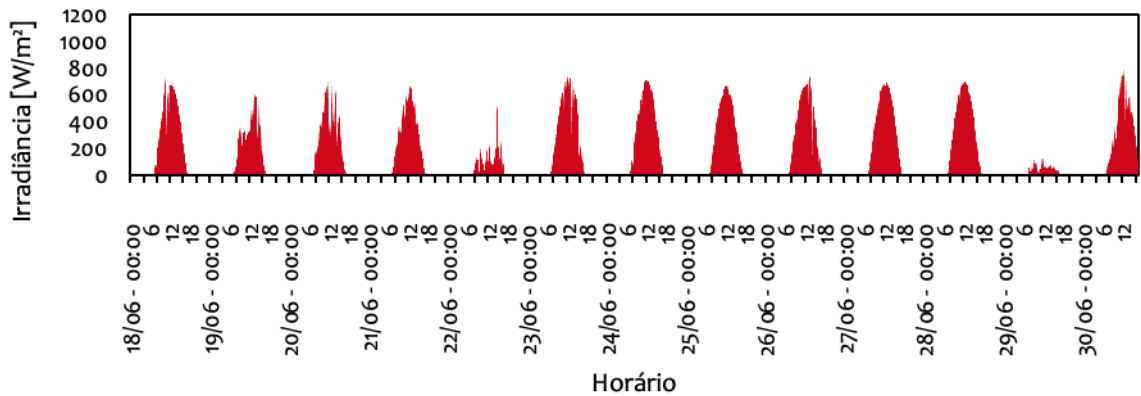
Hora Local (HL)	Altura Solar (α)
05:00	-2,85
06:00	9,86
07:00	22,99
08:00	36,41
09:00	50,01
10:00	63,73
11:00	77,53
12:00	88,60
13:00	74,80
14:00	61,02
15:00	47,31
16:00	33,74
17:00	20,37
18:00	7,31
19:00	-5,29

Fonte: o Autor (2024).

Coleta de Inverno

Na Figura 2.19 estão apresentados os dados e irradiância solar, coletados no inverno.

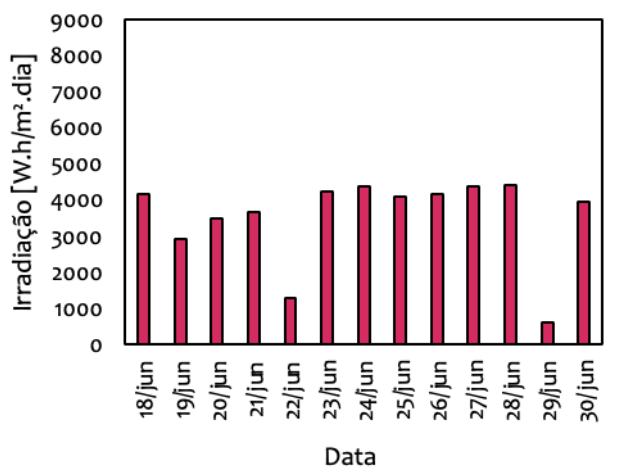
Figura 2.19. Coleta 2. Irradiância (I) do período – Inverno.



Fonte: o Autor (2022).

Nota-se que entre dia 23 e 28 de junho de 2021, os valores de irradiação solar foram semelhantes, porém com níveis mais baixos em relação ao verão. Na Figura 2.20 são apresentados os valores diários de irradiação solar.

Figura 2.20. Coleta 2. Irradiação solar (H) do período – Inverno.



Fonte: o Autor (2024).

Os dias com maior irradiação solar foram no período de 23 a 28 de junho de 2021. Na Figura 2.21 são apresentados os dados de índice de claridade atmosférica (kt) do período, assim como as variáveis de entrada.

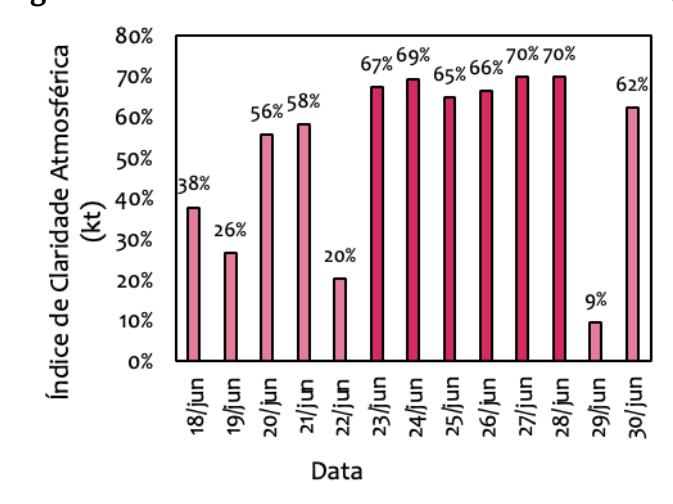
Figura 2.21. Coleta 2. Variáveis de entrada para o cálculo do índice de claridade atmosférica (kt) – Inverno.

Irradiação Solar	(H) [W/m ²]
Dia do ano	(n)
Declinação magnética	(δ) [°]
Ângulo horário do anoitecer	(ωs) [°]
Irradiação Solar no Topo da Atmosfera	(Ho) [W.h/m ² .dia]

Data	(H)	(n)	(δ)	(ωs)	(Ho)	(kt)
18/jun	4175,407	169	-21,825	99,549	11047,685	38%
19/jun	2924,767	170	-21,970	99,620	11053,301	26%
20/jun	3505,090	171	23,445	79,651	6286,910	56%
21/jun	3654,662	172	23,450	79,648	6285,427	58%
22/jun	1274,347	173	23,448	79,649	6285,049	20%
23/jun	4223,876	174	23,439	79,654	6285,774	67%
24/jun	4362,318	175	23,424	79,662	6287,602	69%
25/jun	4085,023	176	23,401	79,673	6290,531	65%
26/jun	4171,121	177	23,372	79,688	6294,560	66%
27/jun	4393,571	178	23,335	79,706	6299,688	70%
28/jun	4408,083	179	23,292	79,727	6305,911	70%
29/jun	598,695	180	23,242	79,752	6313,226	9%
30/jun	3934,129	181	23,184	79,781	6321,631	62%

Fonte: o Autor (2024).

Figura 2.22. Coleta 2. Índice de claridade atmosférica (kt) – Inverno.



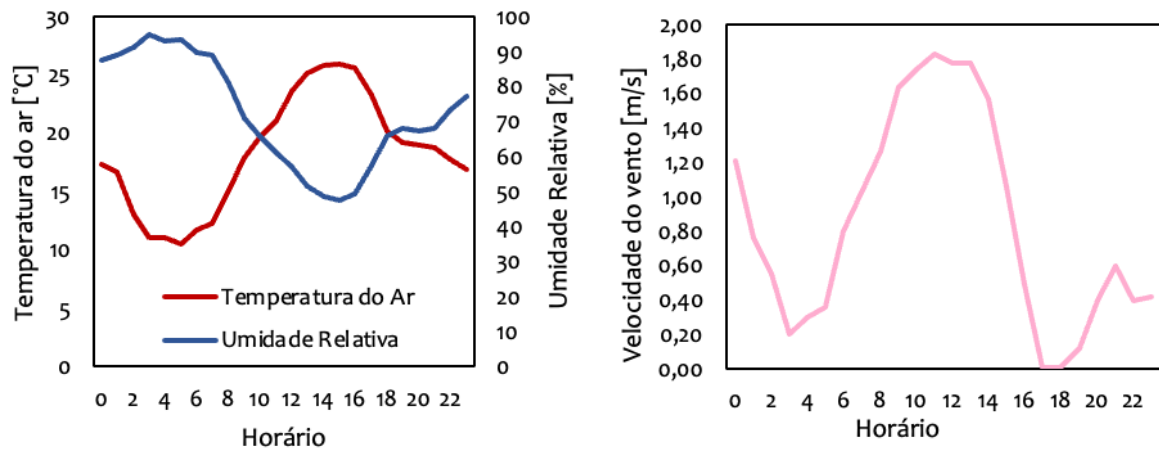
Fonte: o Autor (2024).

Percebe-se que os dias com maior abertura do céu foram entre 23 e 28 de junho de 2021. Embora no período de coleta de inverno se tenha uma menor intensidade de irradiação solar, há maior abertura do céu, ou seja, pouca incidência de nuvens.

Desta maneira, em função da velocidade média do vento e do índice de claridade atmosférica, o dia mais representativo para análise na estação do inverno foi 24

de junho de 2021. Na Figura 2.23 estão apresentados os dados de temperatura e umidade relativa do ar, bem como a média horária da velocidade do vento.

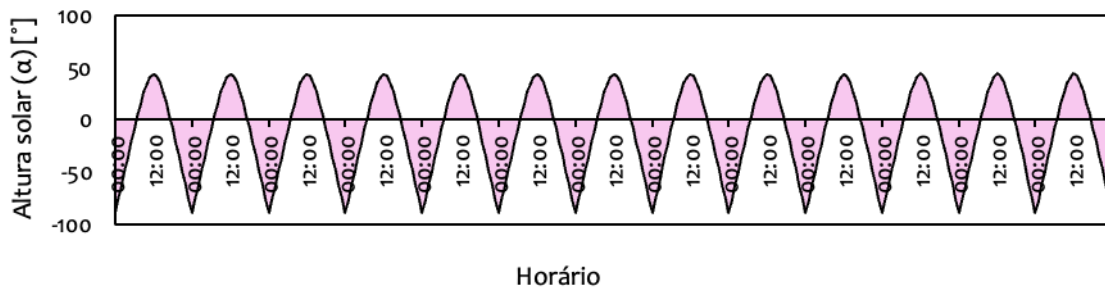
Figura 2.23. Coleta 2. Umidade relativa e temperatura do ar – dia mais representativo (24 de junho de 2021). Coleta 2. Velocidade do vento +100 cm – dia mais representativo.



Fonte: o Autor (2024).

Além disso, nas Figura 2.24 e 2.25 estão apresentadas a altura solar do período de coleta e do dia representativo, respectivamente.

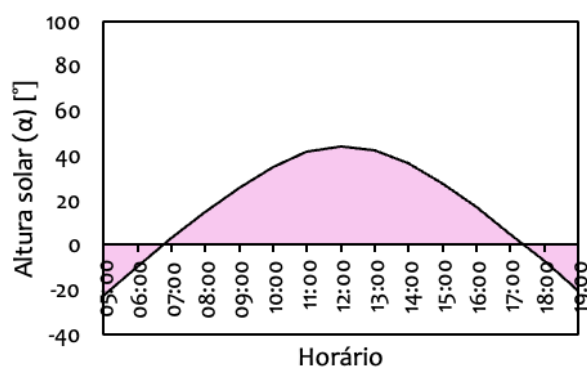
Figura 2.24. Coleta 2. Altura solar em junho – Inverno.



Fonte: o Autor (2024).

O que se pode notar é que o ângulo máximo com o plano horizontal ao longo do dia é de 45° e que o período de sol inicial próximo das 07h da manhã e encerra próximo das 17h30, indicando um menor período de sol, quando comparado ao verão.

Figura 2.25. Coleta 2. Altura solar do dia mais representativo – Inverno.



Hora Local (HL)	Altura Solar (α)
05:00	-22,94
06:00	-9,83
07:00	2,84
08:00	14,85
09:00	25,79
10:00	35,03
11:00	41,57
12:00	44,24
13:00	42,36
14:00	36,42
15:00	27,58
16:00	16,88
17:00	5,03
18:00	-7,55
19:00	-20,59

Fonte: o Autor (2024).

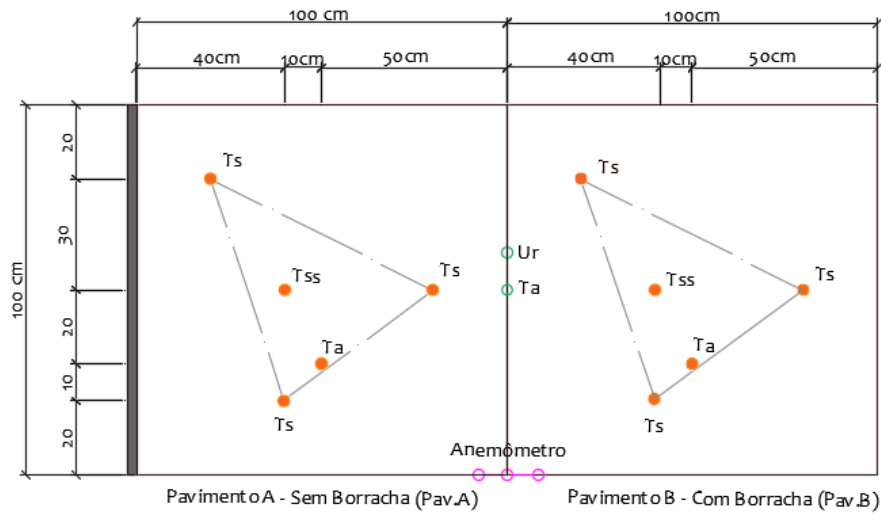
b. Impacto da Alteração do Material de Revestimento

Com o objetivo de avaliar o impacto da alteração do material de revestimento e as consequências sobre a temperatura do ar e a interação com as camadas subsuperficiais, foram comparados dois pavimentos asfálticos, sem sombreamento, sendo que em um deles foi incorporada borracha granulada, baseado na hipótese de que um material pouco condutor, poderia atenuar os processos de liberação do calor no período noturno e facilitar a dissipação no solo, do calor retido nas camadas subsuperficiais.

A borracha de pneu reciclada, triturada e granulada mecanicamente faz parte da composição de uma mistura asfáltica moldada a frio. O albedo medido permaneceu inalterado em relação ao pavimento asfáltico convencional.

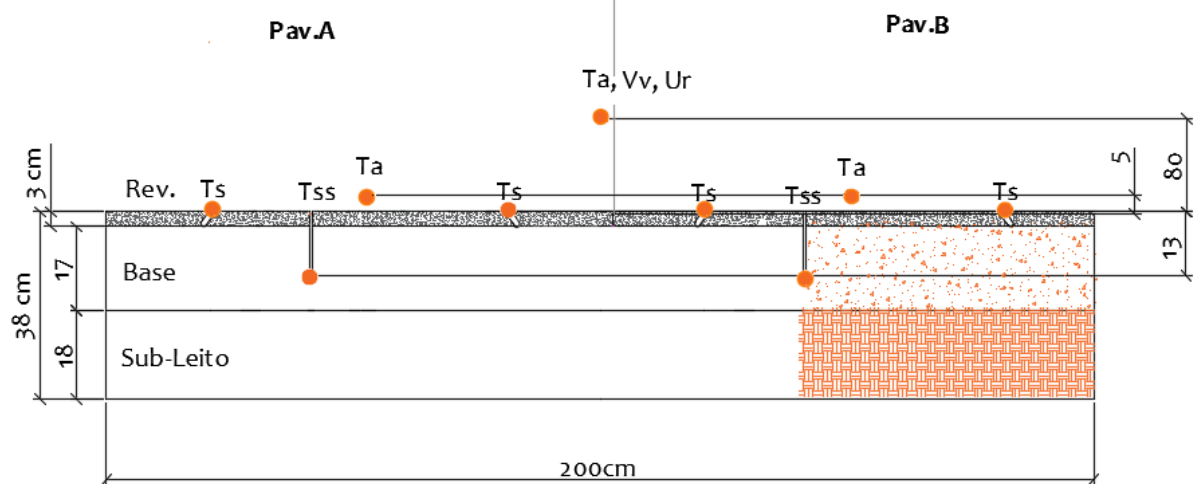
O esquema de instalação dos sensores para coleta de dados de velocidade do vento, umidade relativa, temperatura do ar, superficial e subsuperficial está apresentado nas Figuras 2.26 e 2.27. A proposta de triangulação é instalar o sensores em posições que cubram a superfície em pontos distintos e que formem três perfis de análise.

Figura 2.26. Esquema de instalação dos sensores para a coleta de dados – Vista em planta.



Fonte: o Autor (2024).

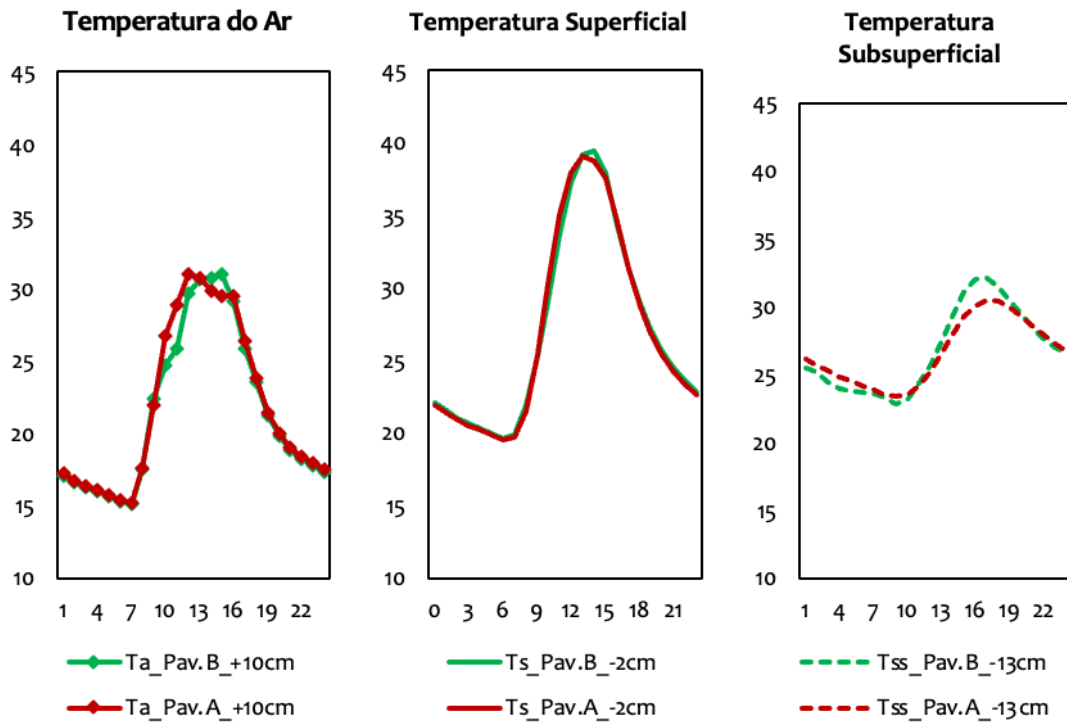
Figura 2.27. Esquema de instalação dos sensores para a coleta de dados – Seção transversal.



Fonte: o Autor (2024).

O dia mais representativo para análise foi dia 16 de maio de 2021, durante a estação de outono/inverno. Sendo assim, os valores médios horários de temperatura do ar (T_a), superficial (T_s) e subsuperficial (T_{ss}) em ambos os protótipos, sendo pavimento Pav.A (sem incorporação de borracha) e Pav.B (com incorporação de borracha), estão apresentados na Figura 2.28.

Figura 2.28. Temperatura do ar, superficial e subsuperficial nos pavimentos sem e com incorporação de borracha na camada de revestimento asfáltico em °C.



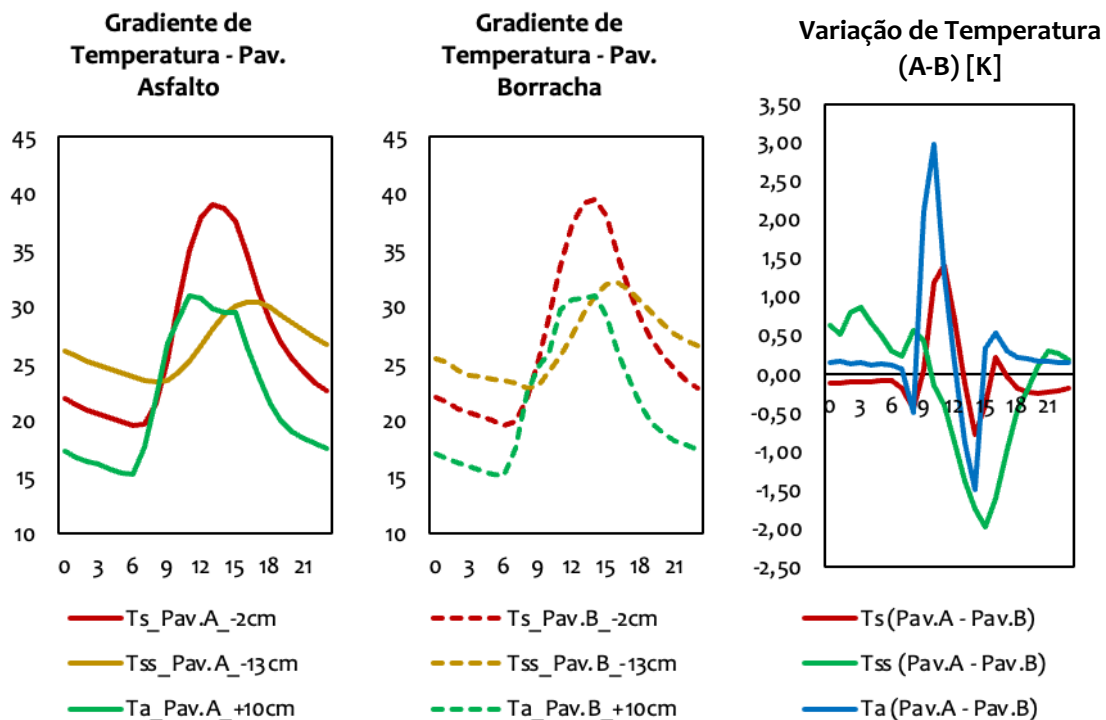
Fonte: o Autor (2024).

Em relação à temperatura do ar, nota-se que o pavimento sem incorporação de borracha (Pav.A) apresentou valores horários semelhantes, com exceção das 10h às 12h, em que ficou superior ao pavimento borracha (Pav.B).

Além disso, a temperatura superficial não apresentou variações muito expressivas. Porém, a temperatura na camada de base do pavimento borracha foi superior em relação ao pavimento asfáltico convencional, durante o período de sol. Uma hipótese é o fluxo de calor unidirecional descendente, que se forma com um material de baixa condutividade e que dificulta a ascensão do calor para as camadas superficiais ao longo do dia.

Para a análise da variação da temperatura entre as camadas, foram considerados: um layer subsuperficial (T_{ss}) e dois layers acima da superfície (T_s , T_a). Assim, na Figura 2.29 estão apresentadas as temperaturas médias horárias no pavimento convencional e com incorporação de borracha à camada de revestimento.

Figura 2.29 Gradiente de temperatura em °C e variação de temperatura entre o Pavimento A e B.



Fonte: o Autor (2024).

Ao avaliar a variação de temperatura em quatro períodos do dia, sendo a madrugada, o início da manhã, o período da tarde e o início da noite, nota-se que os pontos de inflexão ocorrem em horários distintos.

Percebe-se que o pavimento convencional e com incorporação de borracha apresentaram a máxima temperatura (T_a) às 11h e às 14h, respectivamente. Além disso, nota-se que a máxima temperatura superficial foi registrada no mesmo horário. Entretanto, a temperatura subsuperficial do pavimento com incorporação de borracha apresentou uma maior amplitude térmica ($9,29^\circ\text{C}$) em relação ao pavimento convencional ($7,10^\circ\text{C}$), indicando uma maior capacidade de armazenar calor durante o dia.

Percebe-se que a temperatura superficial do pavimento borracha foi inferior ao pavimento convencional entre às 09h e 17h (com um ponto de inflexão às 14h). Por consequência, entre as 10h e as 19h o pavimento de borracha apresentou temperatura mais subsuperficial mais alta em relação ao pavimento convencional.

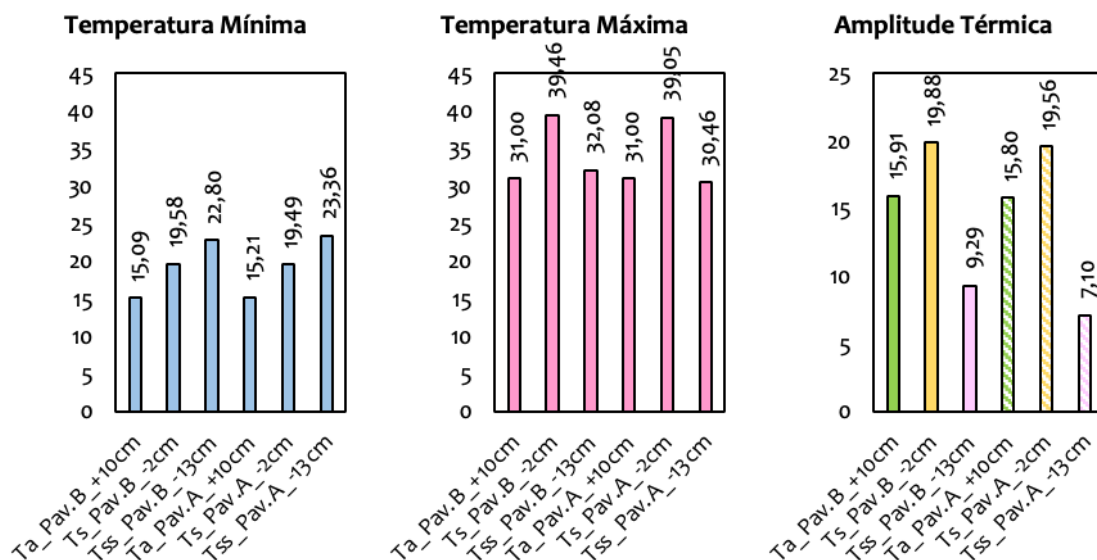
Por fim, a temperatura do ar (T_a) sobre o pavimento foi superior sobre o pavimento borracha apenas entre as 12h e 15h. E no restante do tempo, apresentou menores registros, em relação ao pavimento convencional. Analisando ambos os modelos, com e sem borracha na mistura asfáltica, notou-se que o pavimento convencional (sem incorporação de borracha) apresentou a mais alta temperatura durante o dia. Entretanto, a maior variação pôde ser observada entre as temperaturas subsuperficial, com diferença de aproximadamente 2K.

Além disso, a camada subsuperficial do pavimento com borracha apresentou uma maior capacidade armazenamento de calor, o que não provocou necessariamente uma temperatura do ar mais alta no período da noite. Pelo fato de dissipar o calor por condução até o solo.

Conforme observado também por Li (2016), a temperatura entre as camadas tende a variar através das perdas que ocorreram pela condução do calor. Pavimentos que têm baixa condutividade térmica, aquecem a superfície, mas não transferem calor às outras camadas instantaneamente, comparados a pavimentos altamente condutivos.

Na Figura 2.30 estão apresentados os valores médios do período, de temperatura mínima, máxima e amplitude térmica entre os pavimentos

Figura 2.30. Temperatura mínima, máxima e amplitude térmica em °C do período dos Pavimentos A e B.



Fonte: o Autor (2024).

Assim sendo, uma hipótese é que há maior capacidade de pavimentos com incorporação de borracha na mistura asfáltica, armazenarem calor nas camadas subsuperficiais e potencialmente reduzir o impacto na temperatura das cidades durante o dia.

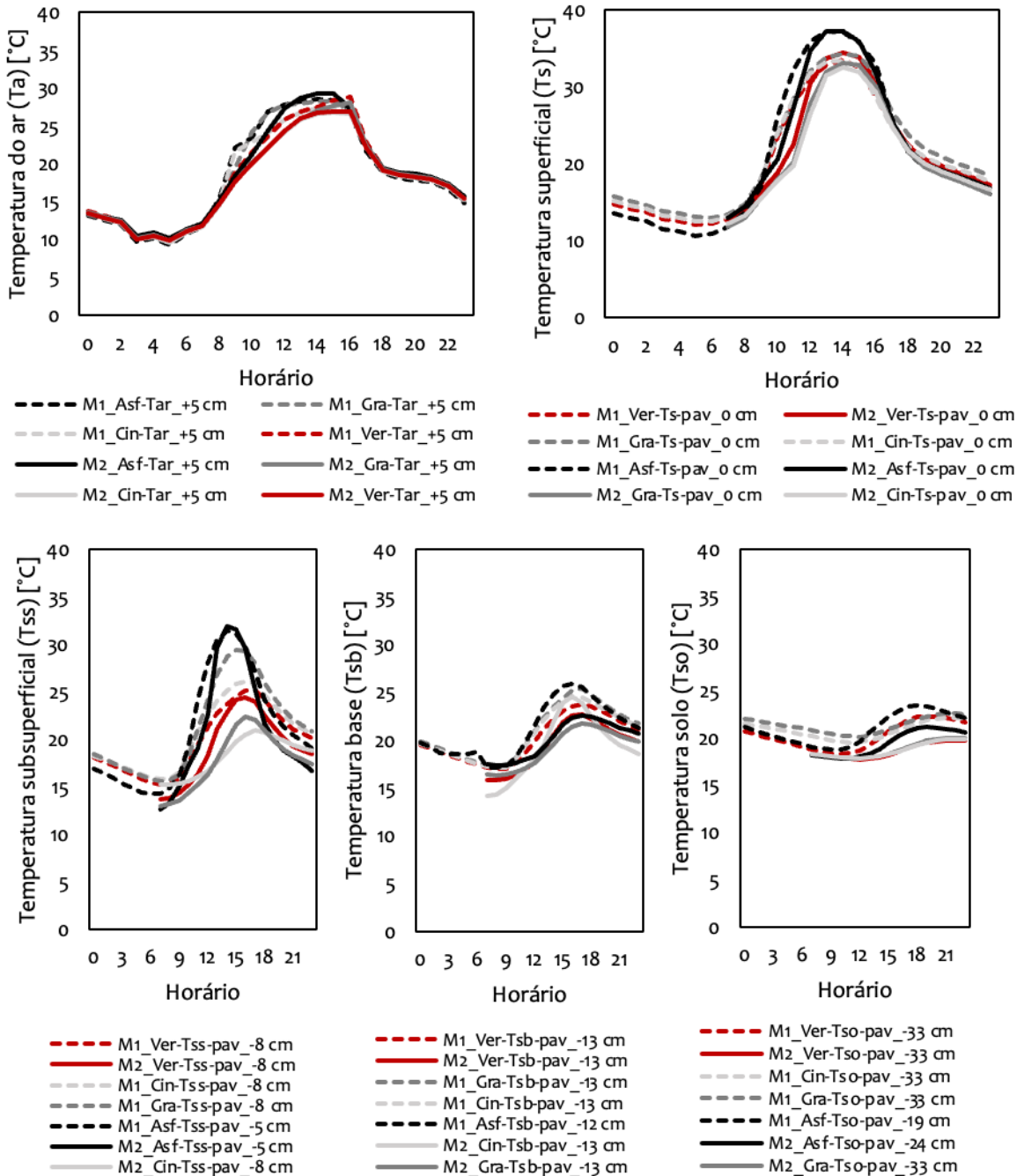
Finalmente, pôde-se observar que pavimento com incorporação de borracha apresentou menores temperaturas superficiais durante o dia, devido à sua baixa condutividade térmica. Porém, uma maior amplitude térmica na camada de base, o que permitiu armazenar e dissipar o calor para o solo durante a noite.

c. Impacto da Alteração do Albedo

Os diferentes valores de albedo das camadas superficiais alteram os padrões de variação de temperatura de todas as camadas do pavimento urbano. Por isso, o objetivo

desta seção é avaliar as amplitudes térmicas e padrões médios horários da temperatura da camada de ar acima do pavimento e das camadas superficiais, subsuperficiais, base e subleito, conforme apresentado na Figura 2.31.

Figura 2.31. Temperatura do ar (T_a), superficial (T_s), subsuperficial (T_{ss}), base (T_{sb}) e subleito (T_{so}).

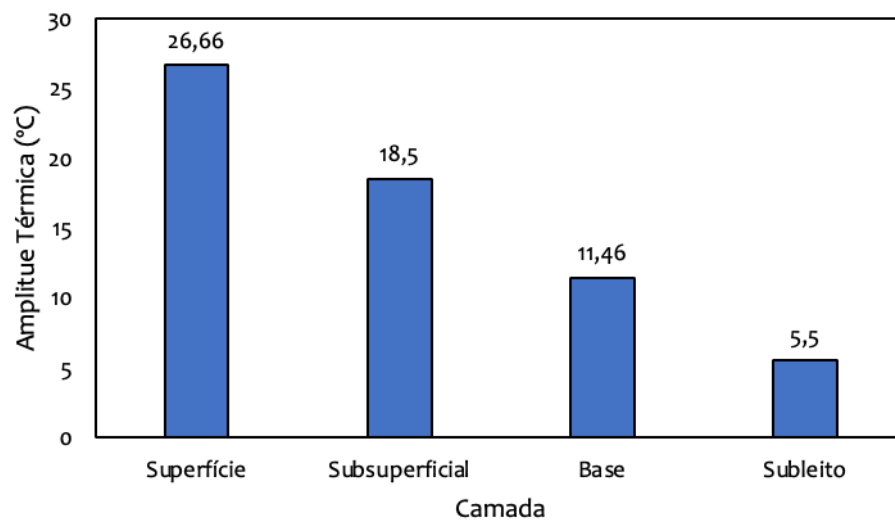


Fonte: o Autor (2024).

Nota-se que as temperaturas do ar e superficial são inferiores, em ambas as morfologias, com os pavimentos vermelho e cinza, respectivamente. Além disso, em relação às camadas abaixo da superfície, percebe-se que:

- Nas camadas subsuperficiais, a máxima temperatura horária foi registrada às 14h, sendo que o menor pico registrado foi na morfologia M2, sob os pavimentos cinza e grafite. Outro ponto a ser destacado é que os maiores registros foram do pavimento asfáltico, tendo um valor muito semelhante ($31,9^{\circ}\text{C}$), tanto para morfologia M1, quanto M2.
- Nas camadas de base, a máxima temperatura horária foi registrada às 16h para todos os pavimentos, sendo que os mais altos valores foram do pavimento asfáltico e grafite na morfologia M1. Um ponto de destaque é que o pavimento asfáltico e o pavimento intertravado de concreto vermelho da morfologia M2 tiveram temperaturas de base muito semelhantes ($22,6^{\circ}\text{C}$).
- Por fim, nas camadas do subleito, a máxima temperatura horária foi registrada às 18h, sendo que os mais altos valores foram do pavimento asfáltico e entre todos os pavimentos da morfologia M1. De maneira geral, pôde-se observar que conforme mais profunda a camada, menor a amplitude térmica das temperaturas de contato, conforme Figura 2.32.

Figura 2.32. Amplitude térmica máxima por camada do pavimento.



Fonte: o Autor (2024).

Em relação à diferença entre os materiais, asfalto e concreto apresentam comportamentos térmicos distintos devido às suas propriedades térmicas específicas. O asfalto possui densidade média de 2.400 kg/m^3 (CHEN *et al.*, 2015), calor específico de aproximadamente $920 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ (ISLAM & TAREFDER, 2014), e condutividade térmica de cerca de $0,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (CARLSON *et al.*, 2010). Essas características fazem com que aqueça mais rapidamente e retenha calor na superfície, contribuindo para temperaturas de superfície e do ar mais altas, especialmente em dias quentes (SHI, 2015).

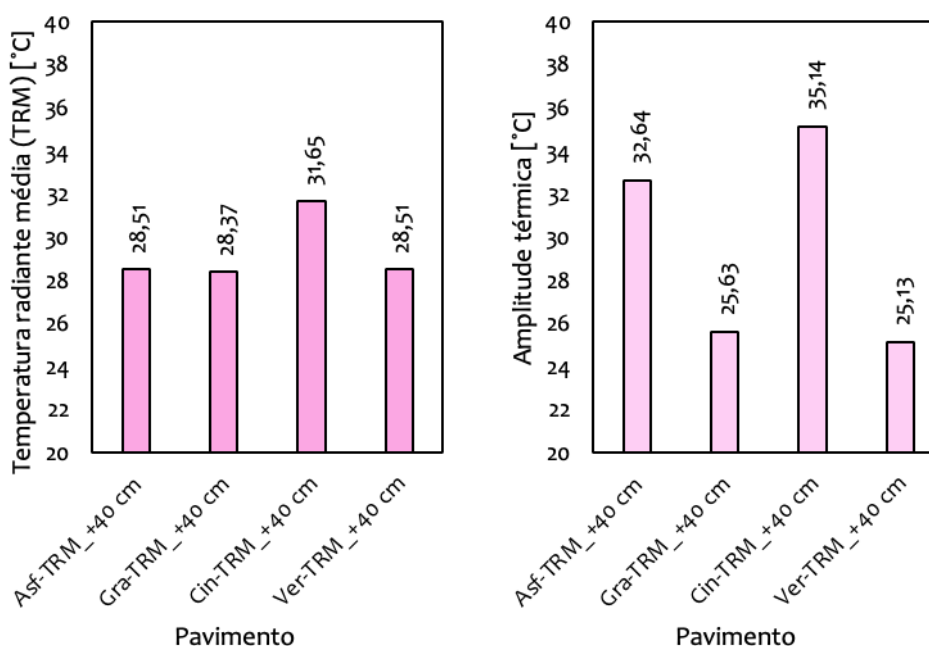
O concreto, com densidade típica entre 2.300 e 2.400 kg/m^3 , calor específico de aproximadamente $840 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ (WU *et al.*, 2015), e condutividade térmica variando entre $1,7$ e $2,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (CARLSON *et al.*, 2010), dissipa o calor mais rapidamente para as camadas

internas. Isso reduz as variações de temperatura ao longo do dia e ajuda a mitigar o efeito Ilha de Calor Urbano (DI MARIA *et al.*, 2013).

Essas diferenças fazem com que o asfalto tenha impacto maior no aquecimento diurno, enquanto o concreto grafite apresenta uma liberação de calor mais prolongada, influenciando as temperaturas noturnas. Estudos mostram que materiais como o grafite, quando adicionados ao concreto, podem aumentar a condutividade térmica em até 43%, resultando em uma redução na amplitude térmica diária e no pico de temperatura da superfície em cerca de 1,5 °C em climas quentes (SHI *et al.*, 2019).

Essas propriedades destacam o papel dos materiais na regulação térmica de superfícies urbanas, sendo o concreto grafite uma alternativa promissora para minimizar os efeitos do aquecimento urbano. Ao relacionar as variações do albedo e a temperatura de globo no ponto médio do cânion (a 40 cm do pavimento) é possível calcular a temperatura radiante média. E com base nos valores máximos e mínimos, calcular a amplitude térmica média do dia mais representativo, conforme apresentado na Figura 2.33.

Figura 2.33. Temperatura radiante média (TRM) do dia representativo, por pavimento e amplitude térmica, da esquerda para a direita, respectivamente.



Fonte: o Autor (2024).

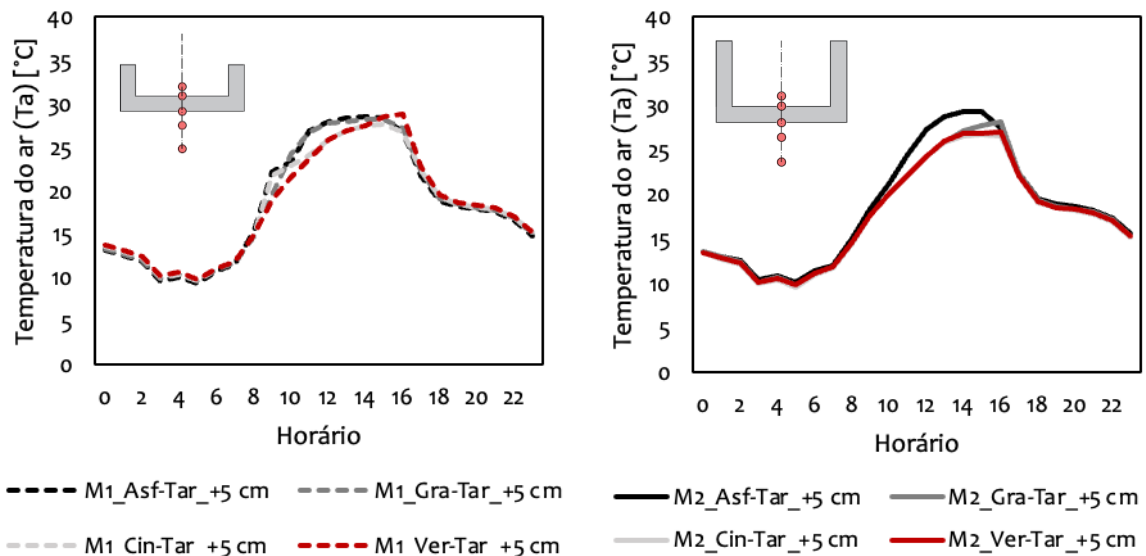
Nota-se que a TRM do pavimento asfáltico e do pavimento vermelho não apresentaram diferença significativa, e que o maior registro foi sobre o pavimento cinza. Além disso, a maior amplitude térmica foi registrada no cânion com pavimento cinza (34,14°C) e sobre o pavimento asfalto (32,64°C). Por fim, na morfologia M2 no verão, a menor amplitude foi registrada no cânion com pavimento vermelho (25,13°C).

d. Impacto da Alteração da Forma Urbana

A forma urbana altera o fluxo de vento na malha intraurbana e o tempo de sombreamento sobre as superfícies dos cânions. Desta maneira, interage de distintas maneiras com as camadas acima e abaixo do pavimento. Assim, o objetivo desta seção é avaliar de maneira comparativa as morfologias M1 e M2, os valores médios horários de temperatura do ar, superficial, subsuperficial e de base dos pavimentos, nas colorações, cinza, vermelho, grafite (fabricado em concreto) e preto (fabricado em asfalto), discretizados entre dia e noite.

Na Figura 2.34 estão apresentados os dados de temperatura do ar, no interior do cânion urbano, especificamente a temperatura do ar próximo à superfície, localizado a 5 cm acima do nível do pavimento.

Figura 2.34. Temperatura do ar próximo à superfície do pavimento nas morfologias M1 e M2.

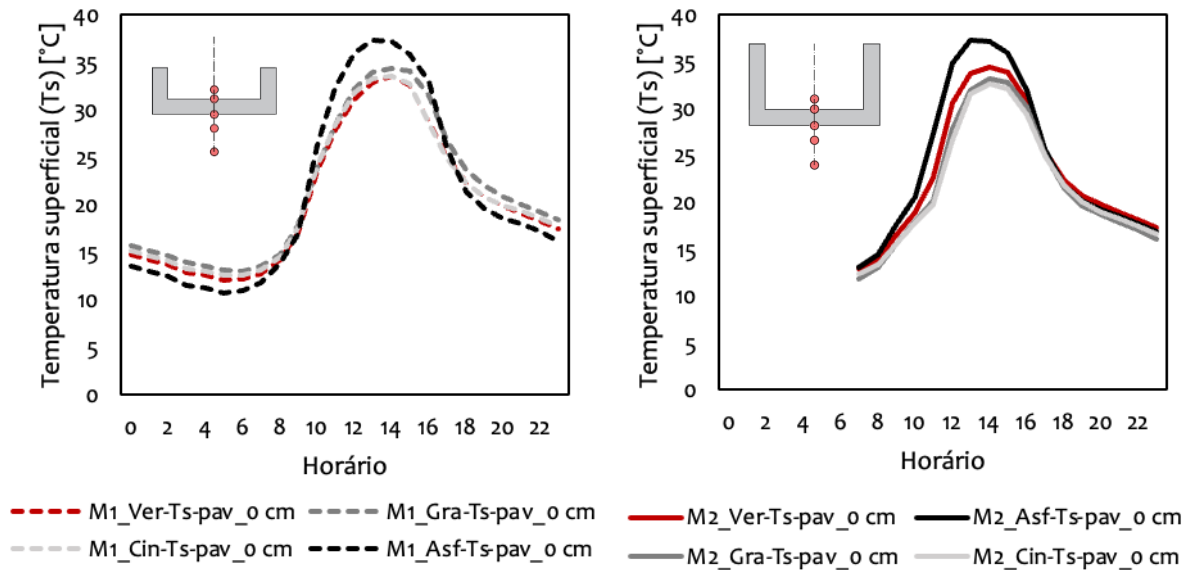


Fonte: o Autor (2024).

Na configuração M1, a temperatura do ar do pavimento asfáltico e grafite são muito semelhantes, sendo a máxima igual a $27,5^{\circ}\text{C}$. Por outro lado, na morfologia M2, a temperatura do ar sobre os pavimentos intertravados de concreto apresentou pouca variação. Sendo que apenas o pavimento grafite, apresentou uma temperatura mais elevada às 16 horas ($26,9^{\circ}\text{C}$) e o pavimento asfáltico tendo o maior registro em relação aos demais ($29,26^{\circ}\text{C}$).

Em seguida, estão apresentados na Figura 2.35 os dados de temperatura superficial dos pavimentos.

Figura 2.35. Temperatura superficial dos pavimentos nas morfologias M1 e M2.

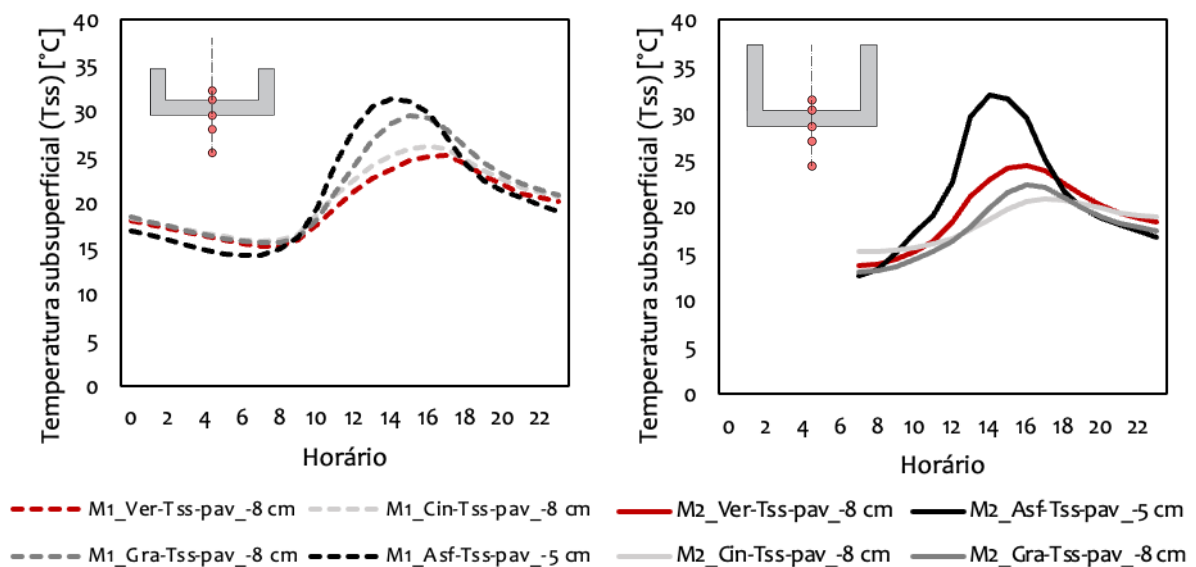


Fonte: o Autor (2024).

Em ambas as configurações, a temperatura superficial média horária, do pavimento asfáltico, foi a maior (37,26°C). Porém, na morfologia M2, a segunda temperatura superficial mais alta foi do pavimento vermelho (34,39°C), e a menor para as configurações M1 e M2, foi o pavimento cinza, com 33°C e 32,5°C respectivamente.

Na Figura 2.36 estão apresentados os dados de temperatura subsuperficial dos pavimentos, no interior do cânion urbano.

Figura 2.36. Temperatura subsuperficial do pavimento nas morfologias M1 e M2.



Fonte: o Autor (2024).

Em relação à temperatura subsuperficial, claramente há uma alteração no padrão das médias horárias. Na morfologia M1 o menor registro foi do pavimento vermelho (26°C) e na M2 foi pavimento cinza (22,05°C). Além disso, nota-se um atraso dos pavimentos em

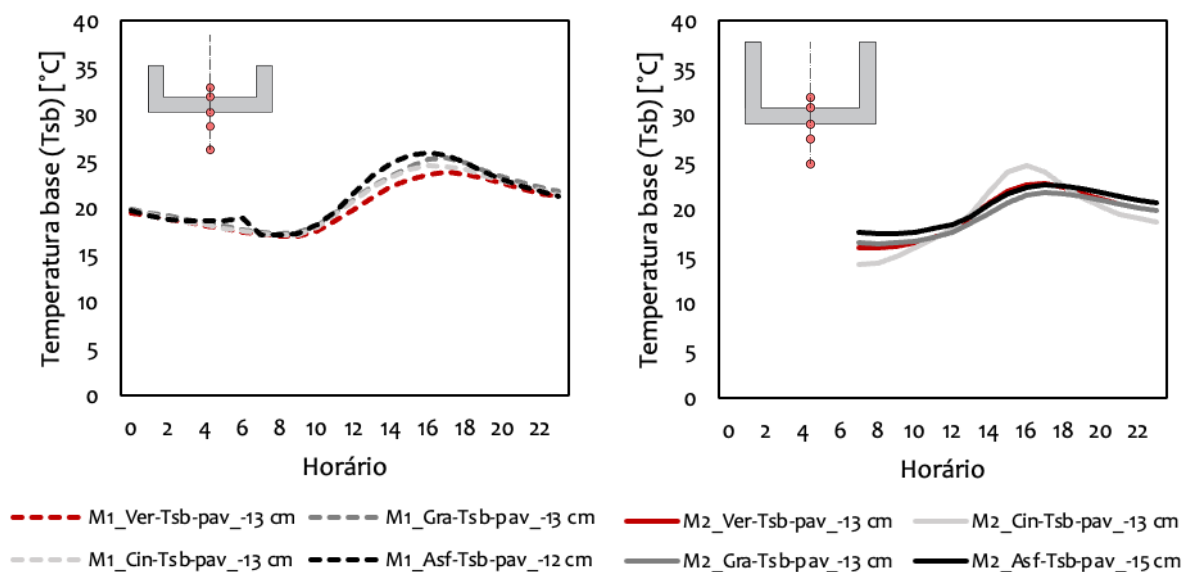
relação ao pico de temperatura, o horário de máximo registro para cada configuração e pavimento são:

- M1 – Preto: 14h
- M1 – Grafite: 15h
- M1 – Cinza: 16h
- M1 – Vermelho: 17h

- M2 – Preto: 14h
- M2 – Vermelho: 16h
- M2 – Grafite: 16h
- M2 – Cinza: 17h

Ou seja, percebe-se uma tendência de que, quanto maior o albedo, maior é o atraso térmico, na camada subsuperficial, tanto nos pavimentos de concreto (grafite, vermelho e cinza), quanto no asfalto (preto). Na Figura 2.37 estão apresentados os dados de temperatura de base dos pavimentos, no interior do cânion urbano.

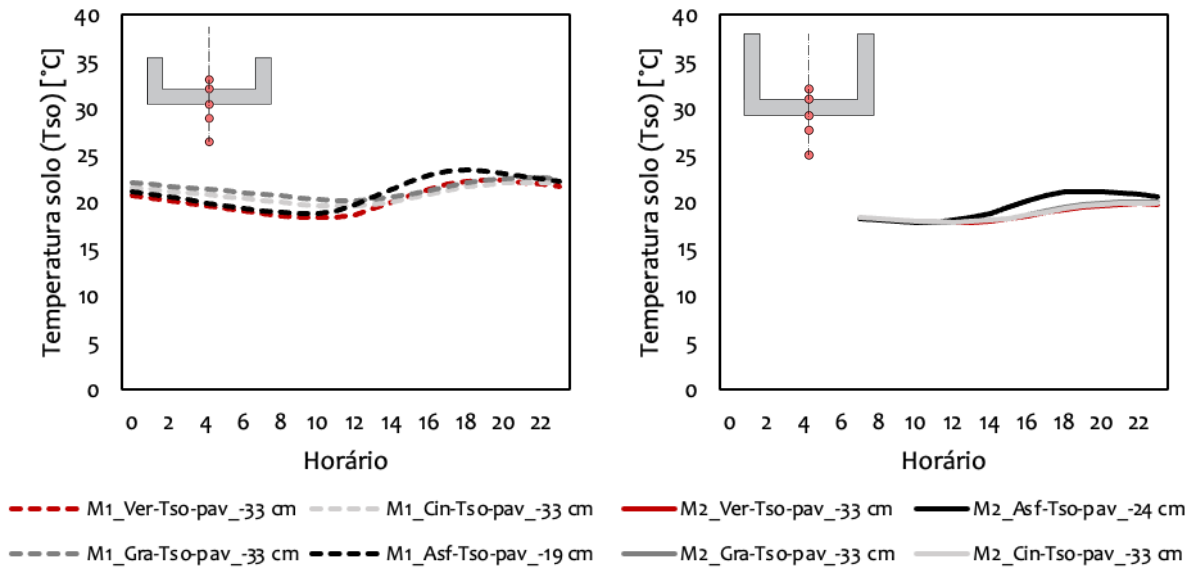
Figura 2.37. Temperatura de base do pavimento nas morfologias M1 e M2.



Fonte: o Autor (2024).

Na Figura 2.38 estão apresentados os dados de temperatura do subleito dos pavimentos, no interior do cânion urbano.

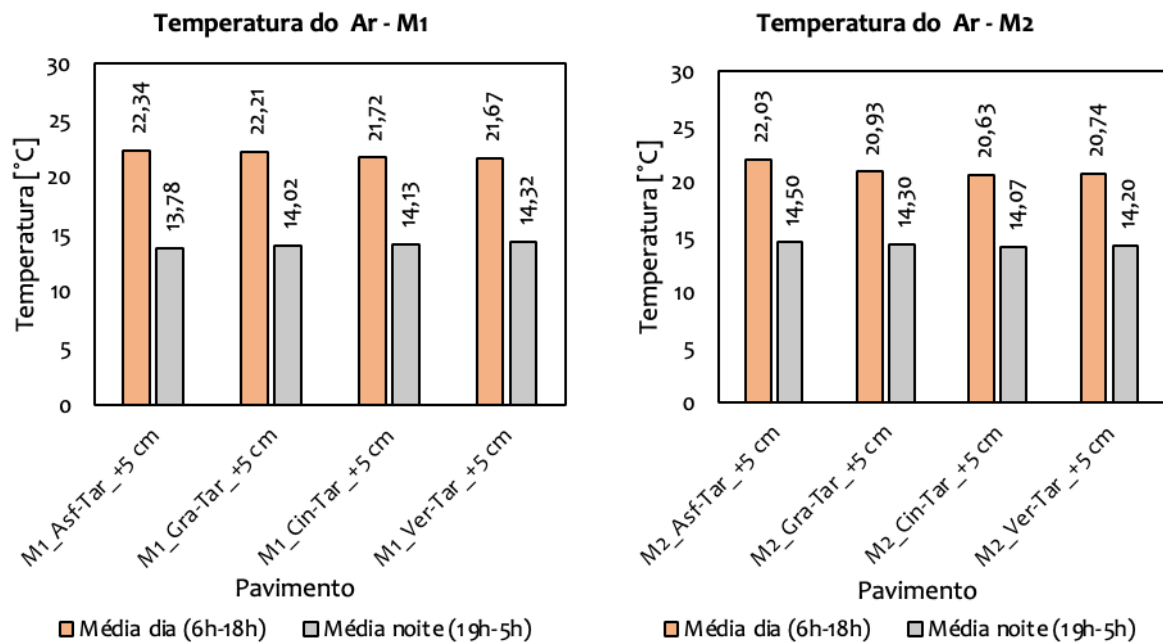
Figura 2.38. Temperatura do subleito do pavimento nas morfologias M1 e M2.



Na camada do subleito há uma menor amplitude térmica, em relação às camadas mais superficiais. O que pode ser observado é uma tendência de decréscimo na temperatura de contato da base, até o horário do meio dia. A partir daí há uma curva ascendente, com uma taxa de crescimento maior na morfologia M1 para todos pavimentos e para o pavimento asfáltico na morfologia M2, até às 18 horas.

Na Figura 2.39 estão apresentadas as temperaturas do ar, próximo à superfície do pavimento, médias do dia e da noite.

Figura 2.39. Temperatura do ar média do dia e da noite, nas morfologias M1 e M2.

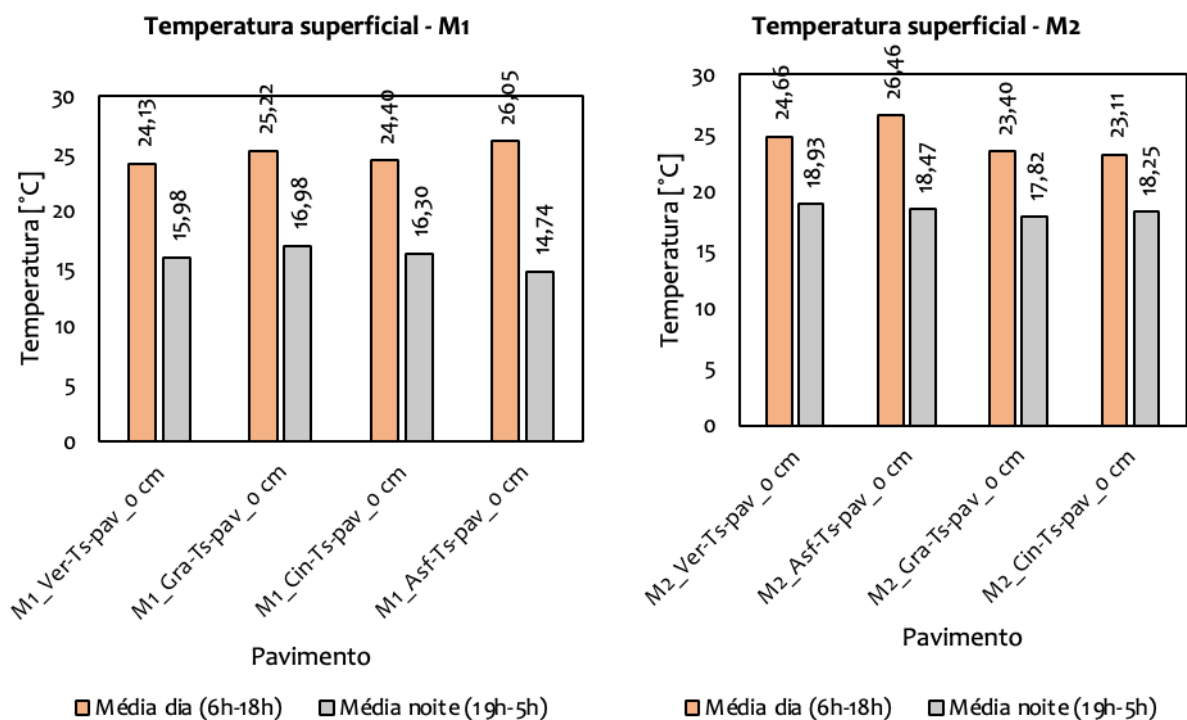


Durante o dia (06h – 18h) os menores registros de temperatura do ar próximo à superfície para as morfologias M1 e M2 foram no pavimento vermelho (21,67°C) e cinza (20,63°C), respectivamente.

Em relação ao horário noturno (19h – 05h) os menores valores médios foram registrados no pavimento asfáltico (13,78°C) e cinza (14,07°C), nas morfologias M1 e M2, respectivamente.

Na Figura 2.40 estão apresentadas as temperaturas de superfície do pavimento, médias do dia e da noite.

Figura 2.40. Temperatura superficial média do dia e da noite, nas morfologias M1 e M2.



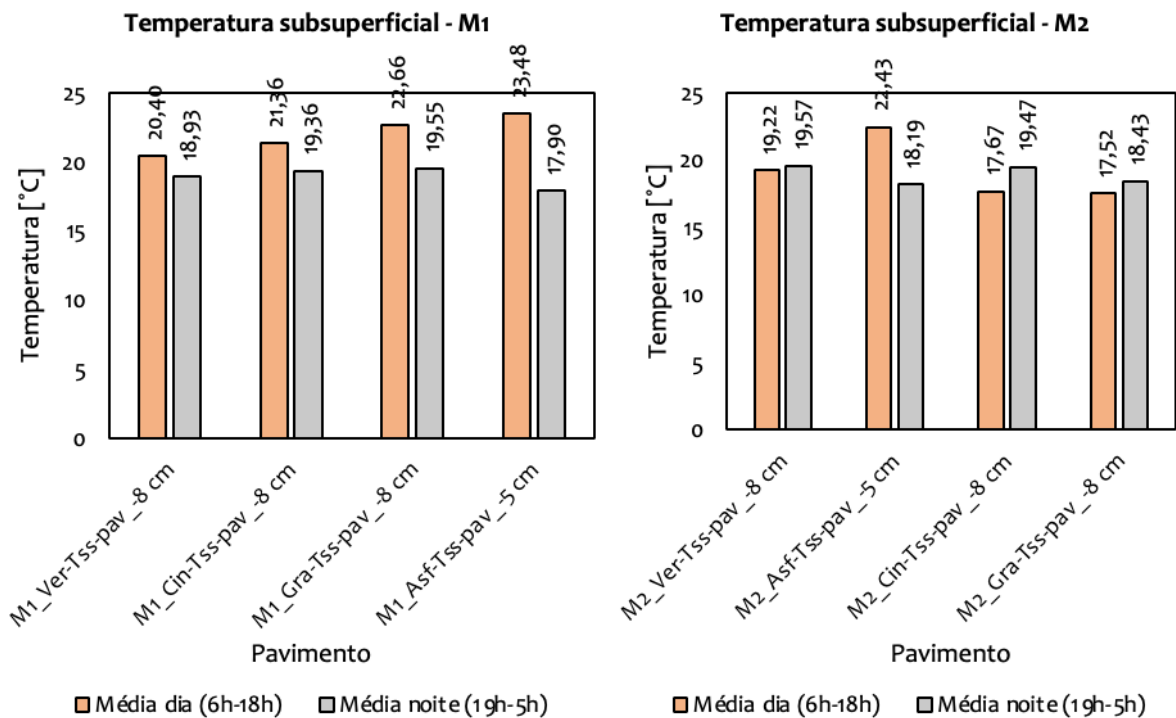
Fonte: o Autor (2024).

Durante o dia (06h – 18h) os menores registros de temperatura superficial para as morfologias M1 e M2 foram no pavimento vermelho (24,13°C) e cinza (23,1°C), respectivamente.

No período noturno (19h – 05h) os menores valores médios foram registrados no pavimento asfáltico (14,74°C) e grafite (17,82°C), nas morfologias M1 e M2, respectivamente.

Na Figura 2.41 estão apresentadas as temperaturas subsuperficiais do pavimento, médias do dia e da noite.

Figura 2.41. Temperatura subsuperficial média do dia e da noite, nas morfologias M1 e M2.



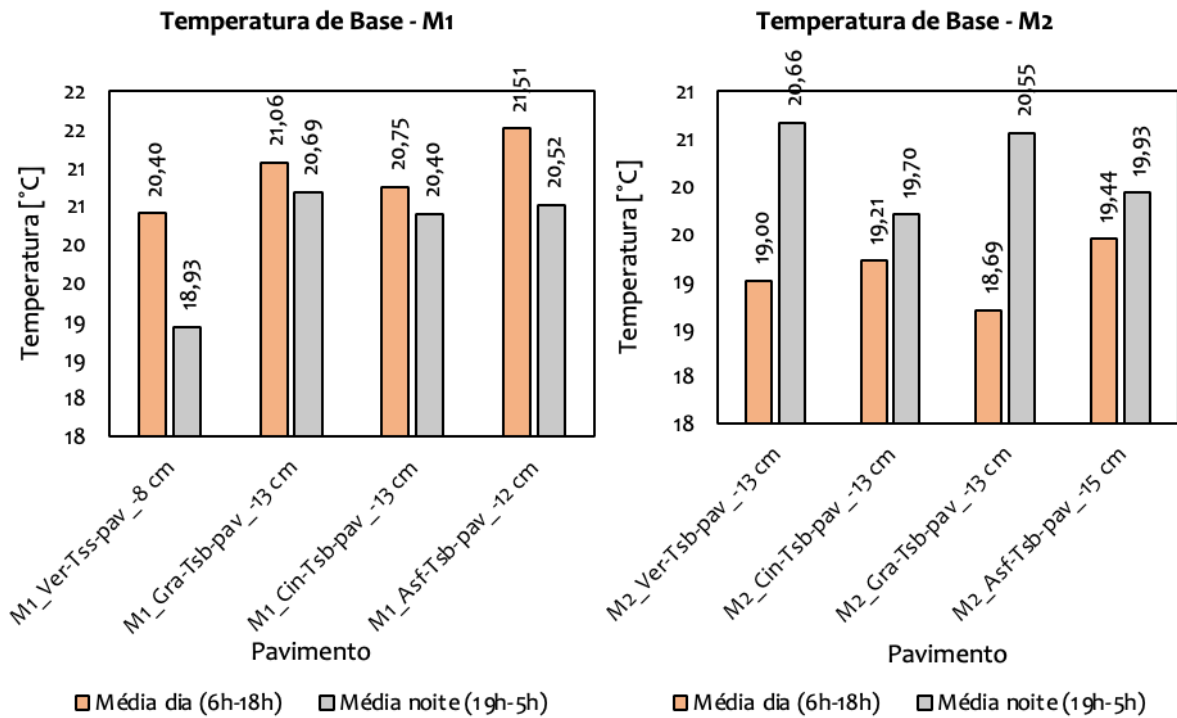
Fonte: o Autor (2024).

Durante o período do dia (06h – 18h) os menores registros de temperatura subsuperficial para as morfologias M1 e M2 foram no pavimento vermelho (20,40°C) e grafite (17,52°C), respectivamente.

No período noturno (19h – 05h) os menores valores médios foram registrados no pavimento asfáltico (17,90°C) e (18,19°C), nas morfologias M1 e M2, respectivamente. O que vale ressaltar é que as temperaturas médias subsuperficiais noturnas dos pavimentos intertravados de concreto na morfologia M2 foram superiores em relação ao dia.

Na Figura 2.42 estão apresentadas as temperaturas na camada de base do pavimento, médias do dia e da noite.

Figura 2.42. Temperatura na camada de base do pavimento, média do dia e da noite, nas morfologias M1 e M2.



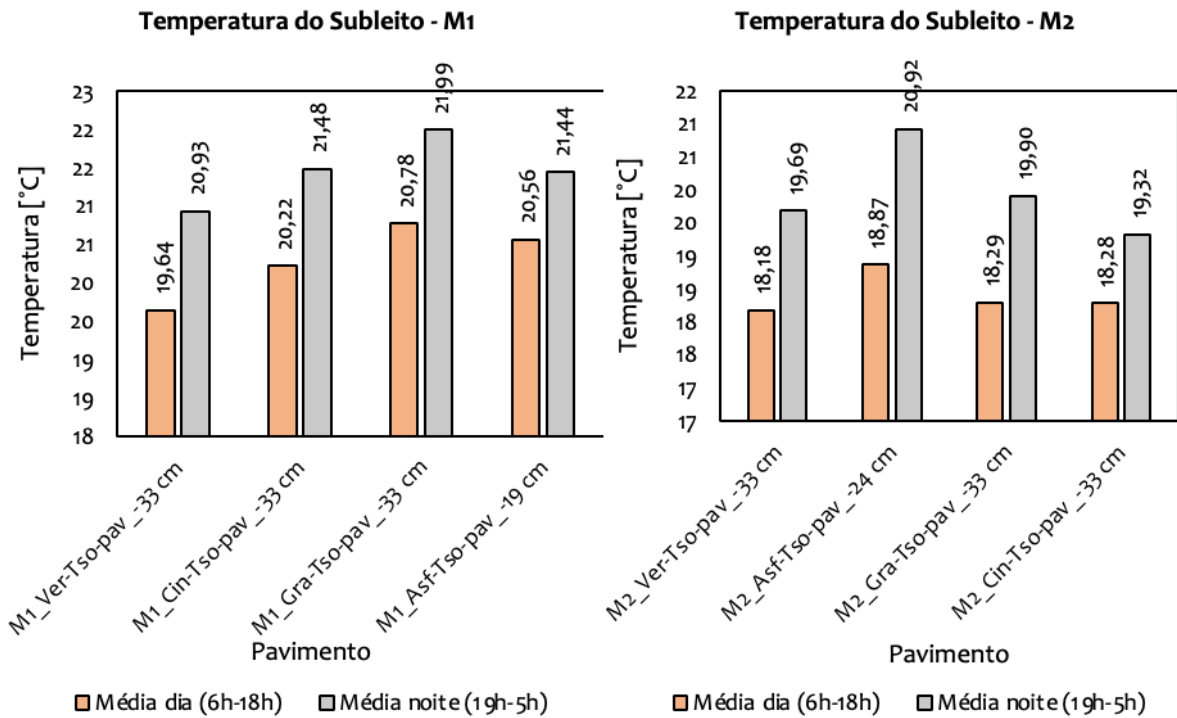
Fonte: o Autor (2024).

Durante o período do dia (06h – 18h) os menores registros de temperatura subsuperficial para as morfologias M1 e M2 foram no pavimento vermelho (20,40°C) e grafite (18,69°C), respectivamente.

No período noturno (19h – 05h) os menores valores médios foram registrados no pavimento vermelho (18,93°C) e cinza (19,70°C), nas morfologias M1 e M2, respectivamente. Assim, como na camada subsuperficial, vale ressaltar que as temperaturas médias noturnas na camada de base de todos os pavimentos na morfologia M2 foram superiores em relação ao dia.

Na Figura 2.43 estão apresentadas as temperaturas na camada do subleito do pavimento, médias do dia e da noite.

Figura 2.43. Temperatura na camada do subleito do pavimento, média do dia e da noite, nas morfologias M1 e M2.



Fonte: o Autor (2024).

Tanto na morfologia M1, quanto M2, as temperaturas médias na camada do subleito são superiores durante o período da noite. Além disso, os menores registros de temperatura subsuperficial para as morfologias M1 e M2 foram no pavimento vermelho com 19,64°C e 18,18°C, respectivamente, no período do dia (06h – 18h).

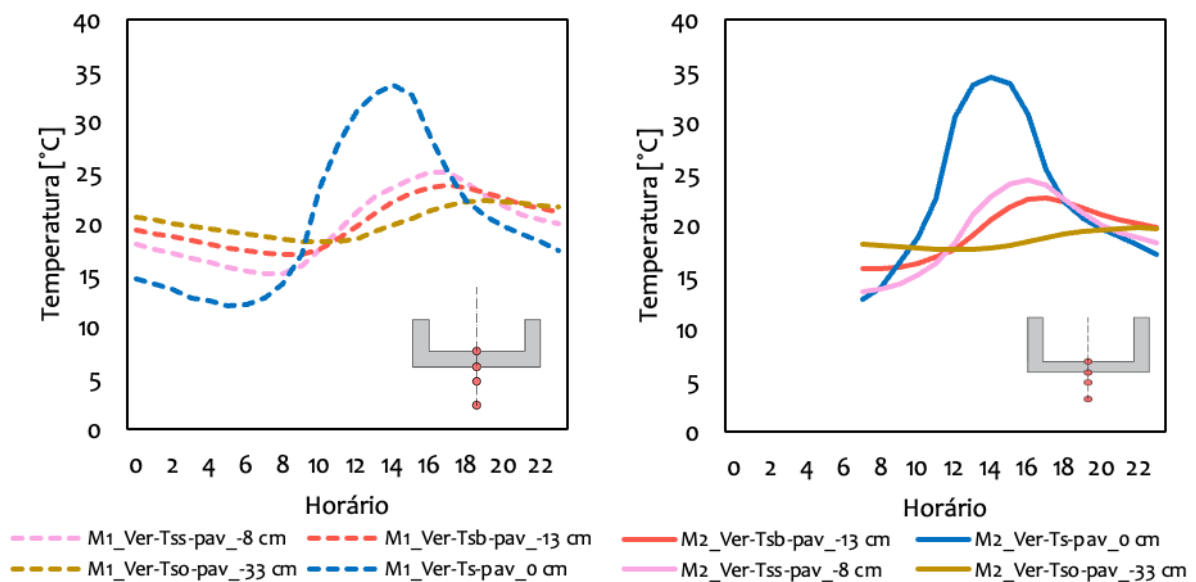
No período noturno (19h – 05h) os menores valores médios foram registrados no pavimento vermelho (20,93°C) e cinza (19,32°C), nas morfologias M1 e M2, respectivamente. Assim, como na camada subsuperficial, vale ressaltar que as temperaturas médias noturnas na camada do subleito são superiores à camada de base, o que indica que há uma dissipação através das camadas mais profundas do solo, e que são, muitas vezes, pouco consideradas para os estudos de clima urbano.

e. Gradiente de Temperatura entre as Camadas do Pavimento

A fim de avaliar a estratificação do calor nas camadas abaixo e acima dos pavimentos, esta seção tem por objetivo apresentar os dados de temperatura superficial (Ts), subsuperficial (Tss), na camada de base (Tsb) e no subleito (Tso), agrupadas por morfologia M1 e M2 e coloração dos pavimentos. Por fim, utilizando gráfico de pareto, são determinados os maiores registros de temperatura na estrutura do pavimento.

Na Figura 2.44 estão apresentados os dados de temperatura nas camadas do pavimento vermelho nas morfologias M1 e M2.

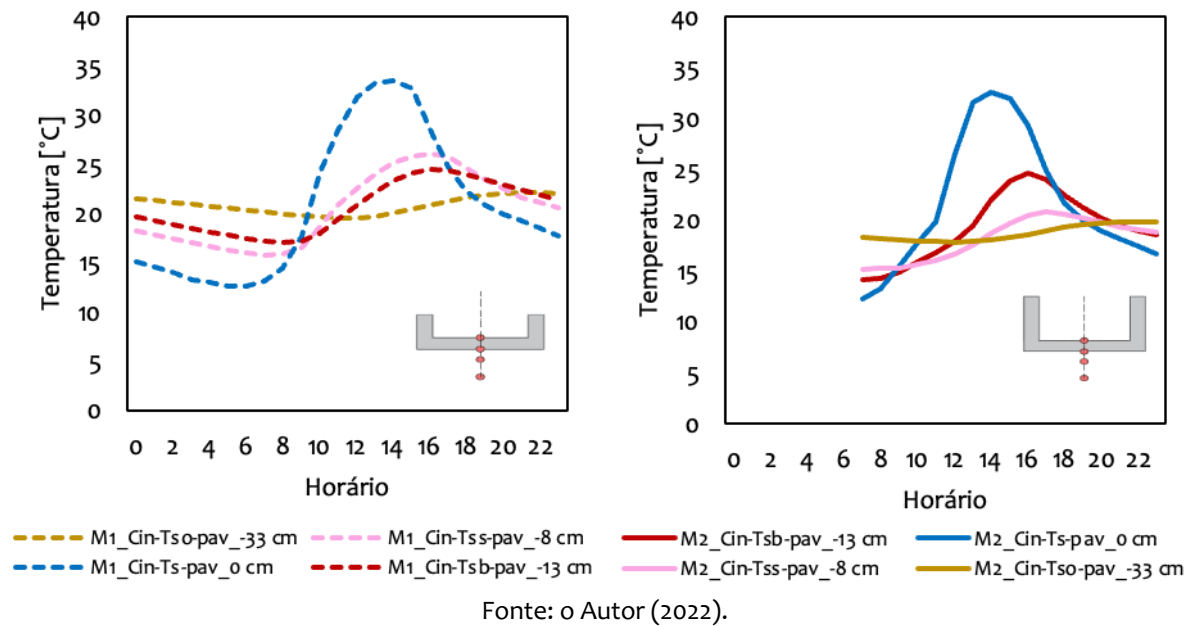
Figura 2.44. Temperatura média horária do pavimento vermelho, morfologia M1 e M2, da esquerda para a direita.



Ao longo do dia, em ambas as configurações urbanas, entre às 10h e 17h, a temperatura superficial do pavimento vermelho apresenta o maior valor, quando comparada com as outras camadas do pavimento. Porém, nota-se que o máximo valor horário registrado ocorre em horários distintos. No pavimento vermelho, a temperatura superficial atinge a máxima temperatura às 14h (33,57°C), a temperatura subsuperficial às 16h (25,07°C), a base às 17h (25,06°C) e o subleito às 20h (22,27°C). Os pontos de inversão térmica ocorrem nas camadas às 10h e 20h.

Na Figura 2.45 estão apresentados os dados de temperatura nas camadas do pavimento cinza nas morfologias M1 e M2.

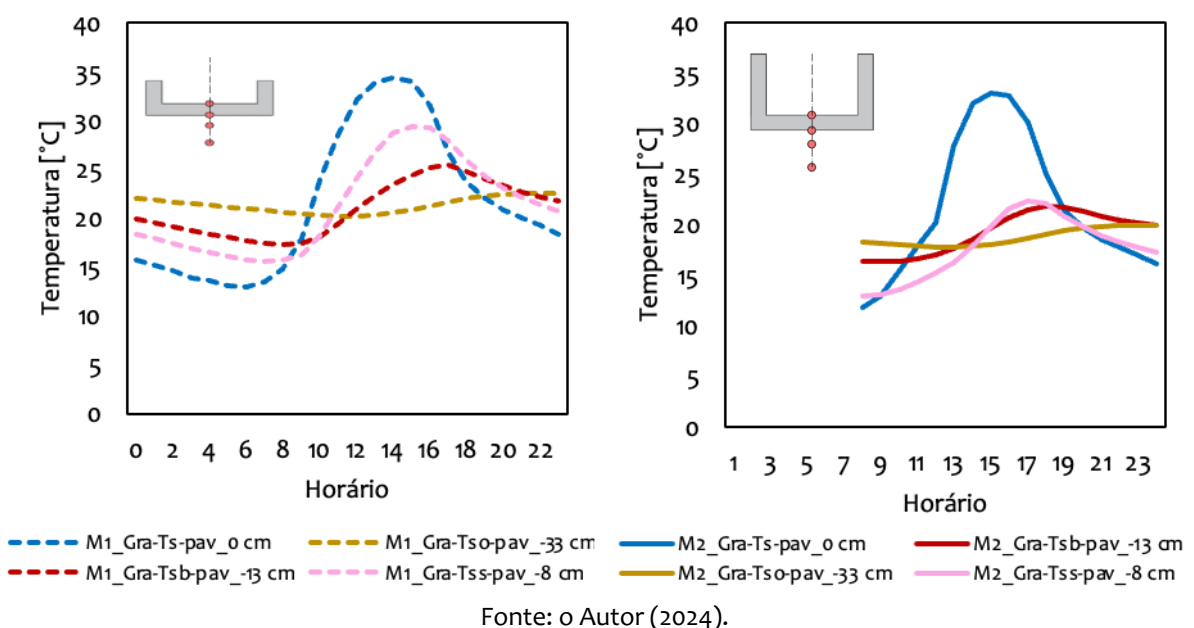
Figura 2.45. Temperatura média horária do pavimento cinza, morfologia M1 e M2, da esquerda para a direita.



Ao longo do dia, em ambas as configurações urbanas, entre às 11h e 18h, a temperatura superficial do pavimento cinza apresenta o maior valor, quando comparada com as outras camadas. Porém, nota-se que o máximo valor horário registrado ocorrem em horários distintos.

No pavimento cinza, a temperatura superficial atinge a máxima temperatura às 15h ($33,48^{\circ}\text{C}$), a temperatura subsuperficial às 16h (26°C), a base às 17h ($24,46^{\circ}\text{C}$) e o subleito às 22h ($22,30^{\circ}\text{C}$). Os pontos de inversão térmica ocorrem nas camadas às 10h e 22h, na morfologia M1 e às 09h e 21h, na M2. Na Figura 2.46 estão apresentados os dados de temperatura nas camadas do pavimento grafite nas morfologias M1 e M2.

Figura 2.46. Temperatura média horária do pavimento grafite, morfologia M1 e M2, da esquerda para a direita.



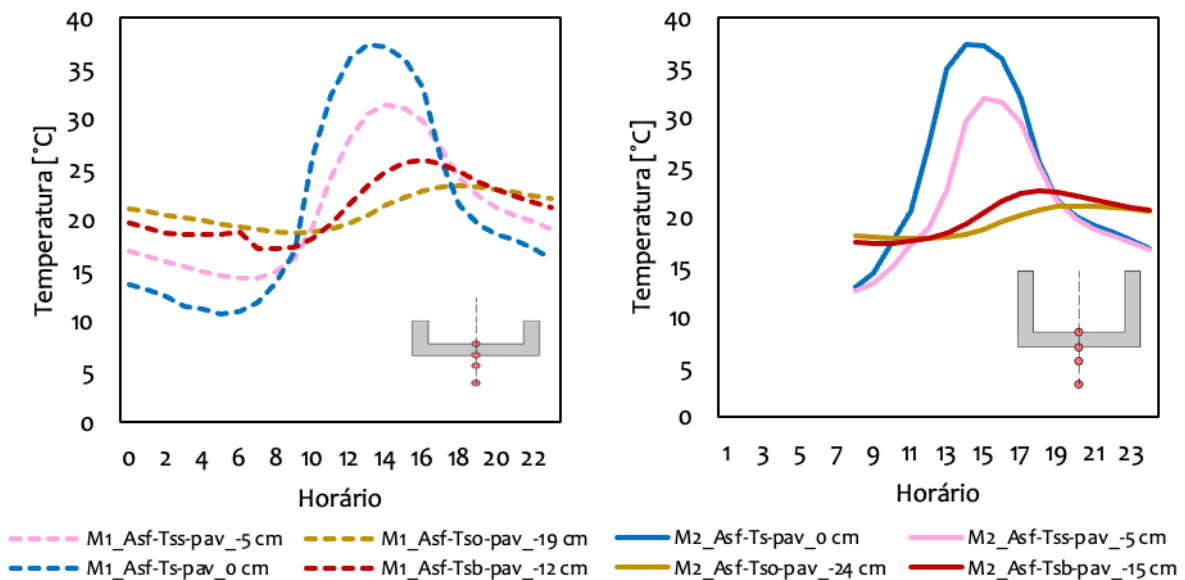
Em ambas as configurações urbanas, entre às 09h e 17h, a temperatura superficial do pavimento grafite apresenta o maior valor, quando comparada com as outras camadas. Porém, nota-se que o máximo valor horário registrado ocorrem em horários distintos.

No pavimento grafite, para a configuração M1, a temperatura superficial atinge a máxima temperatura às 14h (34,33°C), a temperatura subsuperficial às 15h (29,44°C), a base às 17h (25,39°C) e o subleito às 21h (22,67°C).

No pavimento grafite, para a configuração M2, a temperatura superficial atinge a máxima temperatura às 15h (33,09°C), a temperatura subsuperficial às 17h (22,34°C), a base às 18h (22,05°C) e o subleito às 23h (19,99°C).

Na Figura 2.47 estão apresentados os dados de temperatura nas camadas do pavimento asfalto nas morfologias M1 e M2.

Figura 2.47. Temperatura média horária do pavimento asfalto, morfologia M1 e M2, da esquerda para a direita.

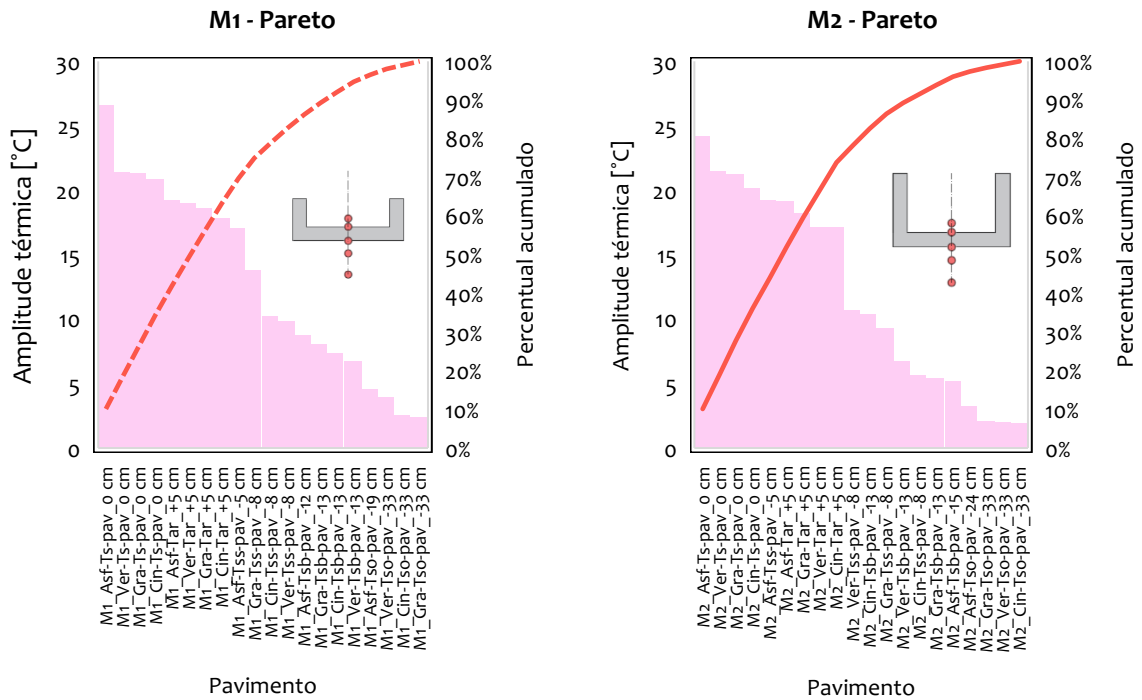


Em ambas as configurações urbanas, entre às 10h e 17h, a temperatura superficial do pavimento asfalto apresenta o maior valor, quando comparada com as outras camadas. Porém, nota-se que o máximo valor horário registrado ocorrem em horários distintos.

No pavimento asfalto, para a configuração M1, a temperatura superficial atinge a máxima temperatura às 14h (37,12°C), a temperatura subsuperficial às 14h (31,36°C), a base às 16h (25,89°C) e o subleito às 18h (24,70°C). No pavimento asfalto, para a configuração M2, a temperatura superficial atinge a máxima temperatura às 14h (37,26°C), a temperatura subsuperficial às 15h (31,91°C), a base às 18h (22,60°C) e o subleito às 22h (21,34°C).

Na Figura 2.48 estão apresentados os dados de temperatura nas camadas do pavimento agrupados em um gráfico de pareto, com todas as variáveis da coleta de verão classificados por morfologia M1 e M2.

Figura 2.48. Gráfico de Pareto para todas as variáveis da Coleta 1. Verão, classificados por morfologia, M1 e M2, respectivamente.



Fonte: o Autor (2024).

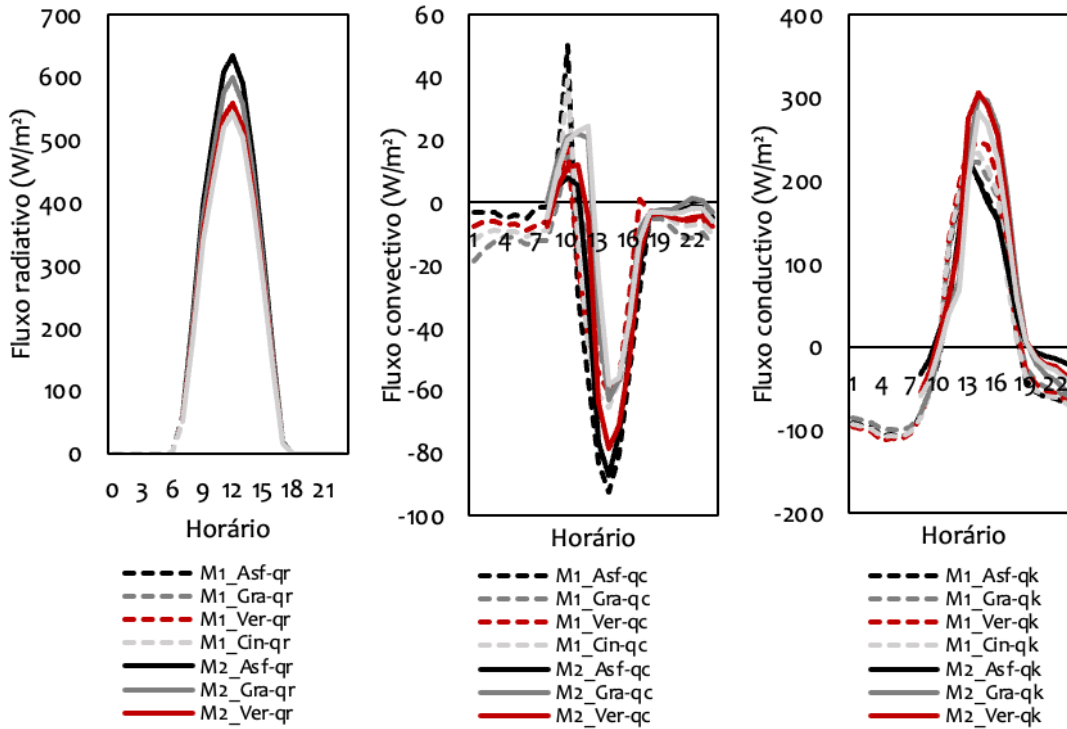
Independentemente da morfologia, M1 ou M2, nem as amplitudes, nem as variações de temperatura são significativamente distintas. Porém, a amplitude e as variações térmicas mudam de acordo com as características da camada que compõem o pavimento.

Nota-se que 80% das maiores amplitudes térmicas se encontram na região da camada de revestimento e base. Portanto, pode ser viável investigar a interação da camada de base e de revestimento, de maneira combinada, e suas influências na variação da temperatura do ar de cânions urbanos.

f. Transferência de Calor entre as Camadas do Pavimento

Uma das formas de agrupar os dados de temperatura das camadas do cânion, com intuito de buscar alguma correlação entre elas, seria uma avaliação da transferência de calor horária na estrutura do pavimento. Para isso, são apresentados os resultados calculados de fluxos de calor condutivos (pelo contato entre as superfícies), convectivo (pela interação da superfície com o ar) e radiativo (interação da radiação de onda curta com a superfície), provenientes dos dados de temperatura superficial e do ar, coletados em campo. Na Figura 2.49 estão apresentadas as curvas de fluxo de calor dos diferentes pavimentos para efeito comparativo entre eles.

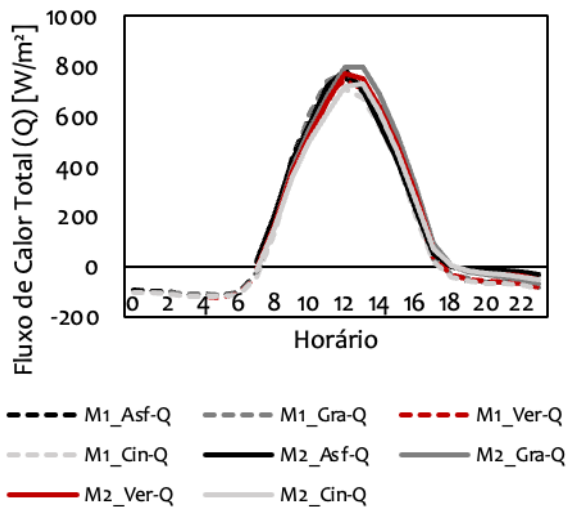
Figura 2.49. Fluxo radiativo (qr), condutivo (qk), convectivo (qc) e total (Q) dos pavimentos em ambas as morfologias (M1 e M2).



Fonte: o Autor (2024).

Os maiores valores de fluxo radiativo foram registrados nos pavimentos asfalto e grafite, em função do elevado valor de absorvância dessas superfícies. Além disso, durante o dia, os maiores valores de fluxo convectivo foram do pavimento asfalto M1 e M2 respectivamente, devido às maiores variações de temperatura entre a superfície e o ar. Entretanto, essa mesma superfície foi a que apresentou o menor fluxo condutivo, devido às menores espessuras e à menor condutividade térmica do material. Na Figura 2.50 estão apresentados os valores de fluxo de calor total dos pavimentos nas morfologias M1 e M2.

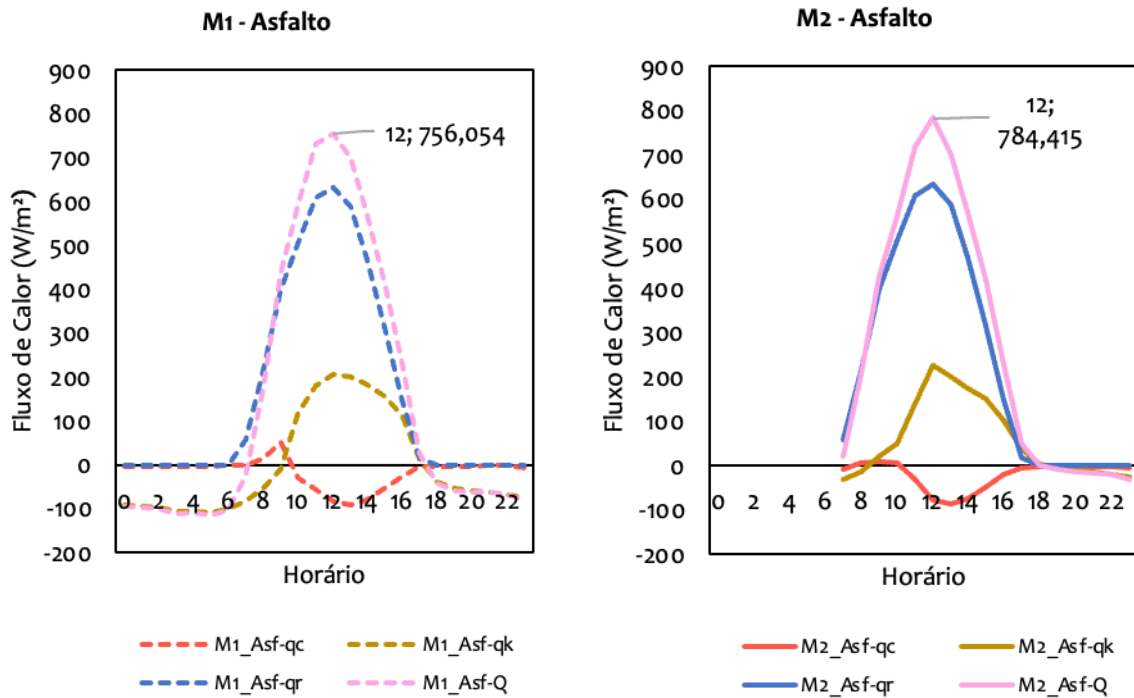
Figura 2.50. Fluxo de calor total (Q) dos pavimentos em ambas as morfologias (M1 e M2).



Fonte: o Autor (2024).

Pode ser observado que o pavimento grafite, da morfologia M2 apresentou o maior valor de fluxo total após o horário do meio dia. E os menores registros foram dos pavimentos cinzas de ambas as configurações urbanas. A fim de identificar as curvas de acúmulo ou liberação de calor por diferentes processos físicos, radiação, condução e convecção, na Figura 2.51 estão apresentados os valores de fluxo do pavimento asfáltico, classificados por morfologias (M1 e M2).

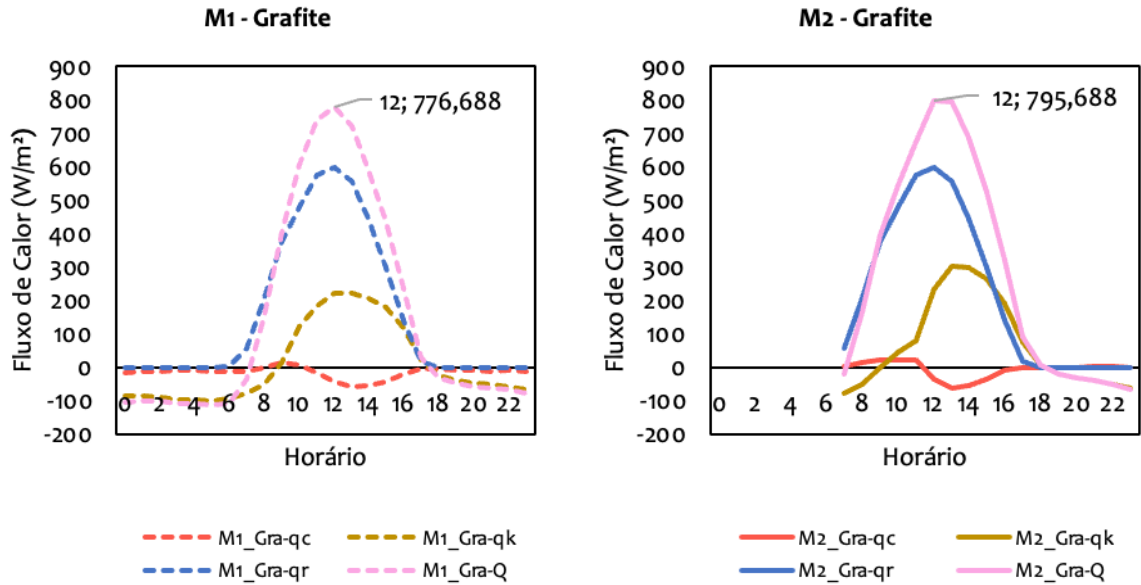
Figura 2.51. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) do pavimento asfalto em ambas as morfologias (M1 e M2).



Fonte: o Autor (2024).

No pavimento asfalto, o fluxo de calor total de ambas as morfologias ocorre ao meio-dia e possuem uma magnitude de 756 W/m^2 e 784 W/m^2 , nas configurações M1 e M2, respectivamente. Na Figura 2.52 estão apresentados os valores de fluxo do pavimento grafite.

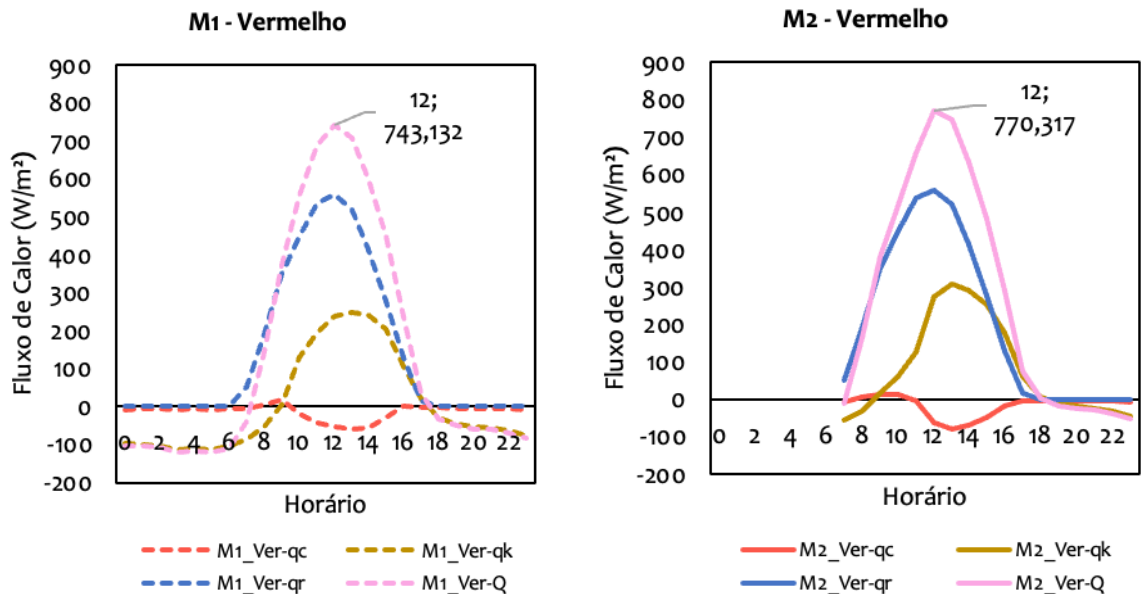
Figura 2.52. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) do pavimento grafite em ambas as morfologias (M1 e M2).



Fonte: o Autor (2024).

No pavimento grafite, o fluxo de calor total de ambas as morfologias ocorre ao meio-dia e possuem uma magnitude de 776 W/m^2 e 795 W/m^2 , nas configurações M1 e M2, respectivamente. Na Figura 2.53 estão apresentados os valores de fluxo do pavimento vermelho.

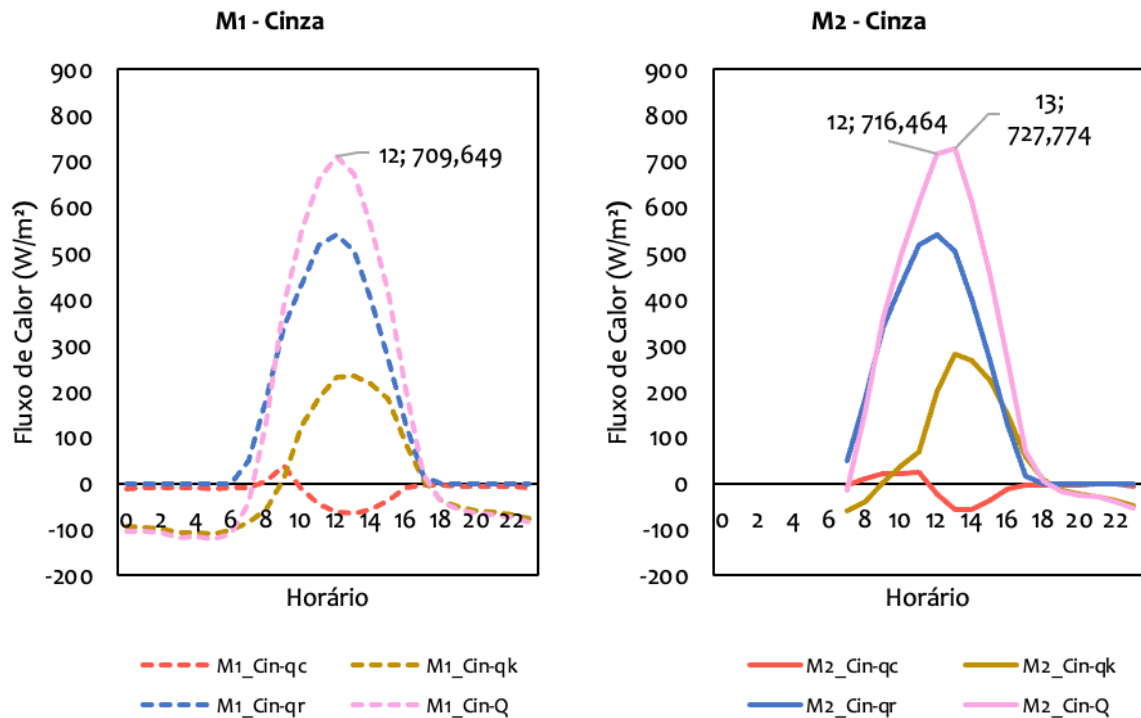
Figura 2.53. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) do pavimento vermelho em ambas as morfologias (M1 e M2).



Fonte: o Autor (2024).

Ao analisar o pavimento vermelho, percebe-se que o fluxo de calor total de ambas as morfologias ocorre ao meio-dia e possuem uma magnitude de 743 W/m^2 e 770 W/m^2 , nas configurações M1 e M2, respectivamente. Na Figura 2.54 estão apresentados os valores de fluxo do pavimento cinza.

Figura 2.54. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) do pavimento cinza em ambas as morfologias (M1 e M2).



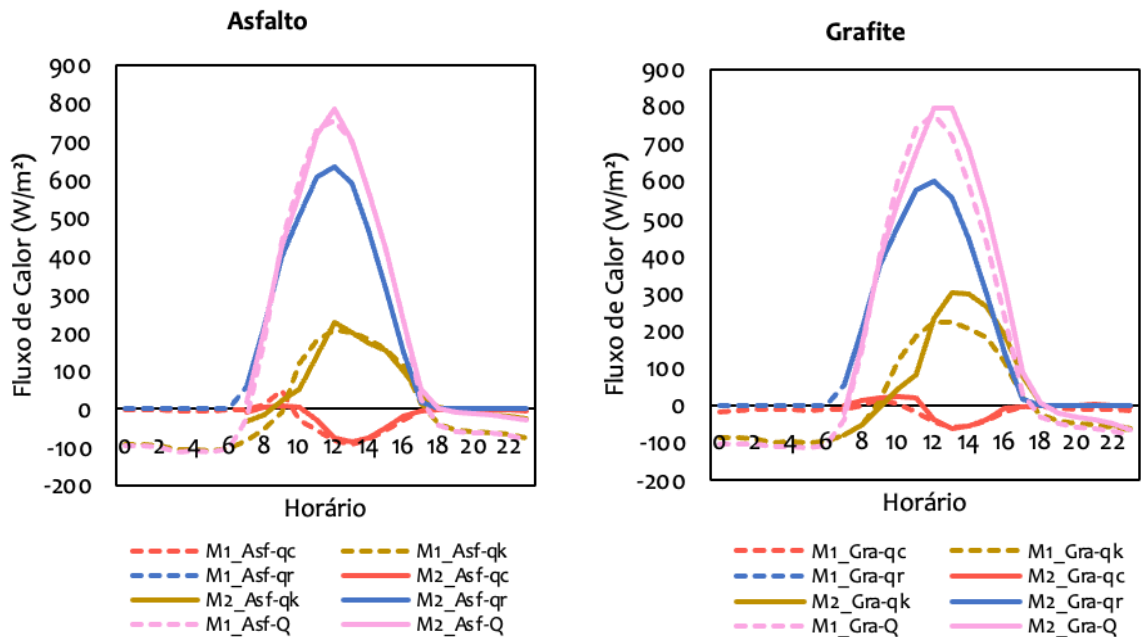
Fonte: o Autor (2024).

Em relação ao pavimento cinza, percebe-se que o fluxo de calor total máximo na morfologia M1 ocorre às 12h e na morfologia M2 às 13h, tendo magnitude de 709 W/m² e 727 W/m², nas configurações M1 e M2, respectivamente.

Por fim, em todos os pavimentos a morfologia M2 apresentou os maiores valores de fluxo de calor total. Uma hipótese é devido à maior dificuldade de dissipação do calor retido no interior do cânion para a atmosfera, em relação à M1, em função da maior altura das fachadas.

Em seguida, na Figura 2.55 estão apresentados os valores de fluxo radiativo dos pavimentos asfalto e grafite, com os valores de ambas as morfologias sobrepostas, para efeito comparativo.

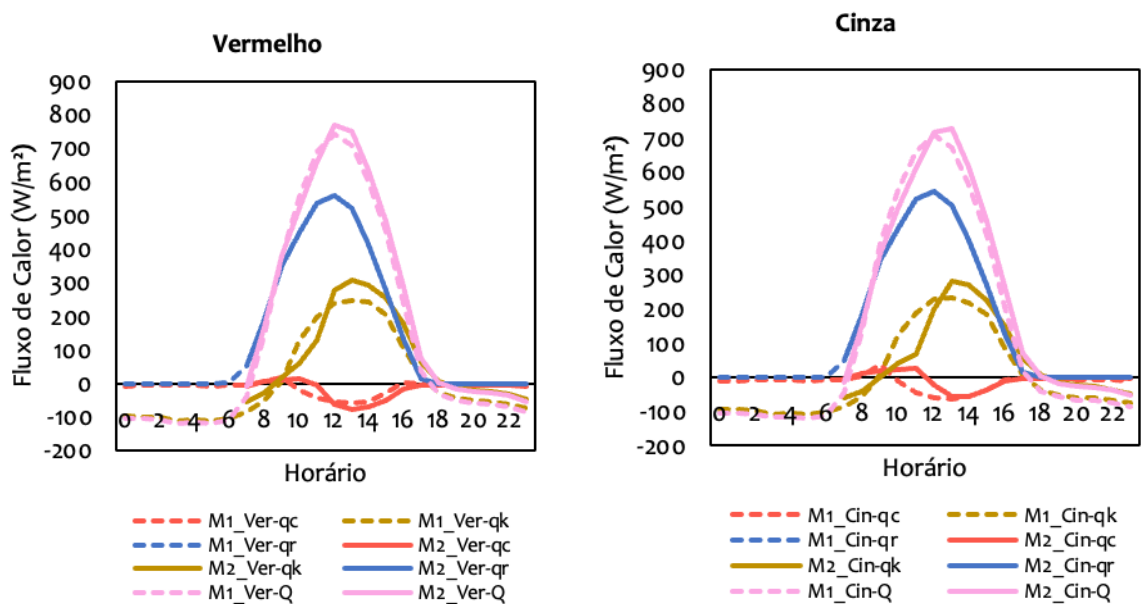
Figura 2.55. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) dos pavimentos asfalto e grafite em ambas as morfologias (M1 e M2).



Fonte: o Autor (2024).

No pavimento asfalto, os fluxos de calor de ambas as morfologias apresentam valores semelhantes. Em contrapartida, no pavimento intertravado de concreto grafite, com exceção do fluxo radiativo, os demais fluxos na morfologia M2 apresentam maior intensidade e ocorrem algumas horas após a morfologia M1. No caso do fluxo por condução o atraso foi de 2 horas entre as duas configurações. Estão apresentados na Figura 2.56, os valores de fluxo radiativo dos pavimentos vermelho e cinza, com os valores de ambas as morfologias sobrepostas, para efeito comparativo.

Figura 2.56. Fluxo radiativo (q_r), condutivo (q_k), convectivo (q_c) e total (Q) dos pavimentos vermelho e cinza em ambas as morfologias (M1 e M2).

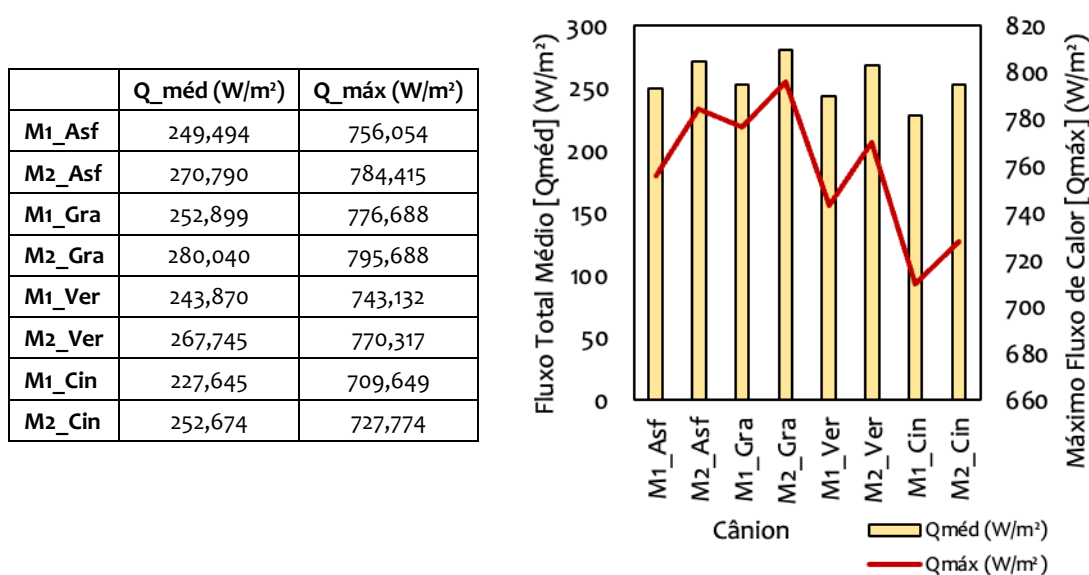


Fonte: o Autor (2024).

Tanto o pavimento vermelho, quanto cinza apresentam, valores de fluxo semelhantes. Entretanto, nos pavimentos intertravados de concreto vermelho e cinza, com exceção do fluxo radiativo, os demais fluxos na morfologia M2 apresentam maior intensidade e ocorrem algumas horas após a morfologia M1. No caso do fluxo por condução o atraso foi de 1 hora entre as duas configurações.

A fim de sintetizar os dados de fluxo de calor médios horários, na Figura 2.57 estão os fluxos médios e máximos dos pavimentos em suas respectivas morfologias.

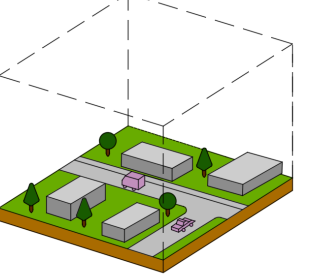
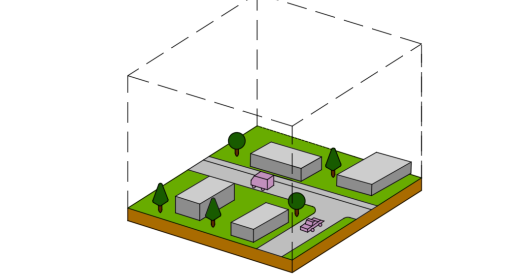
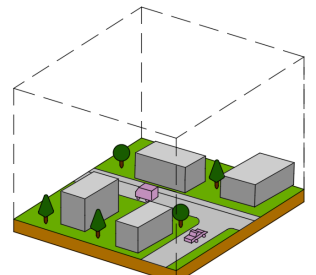
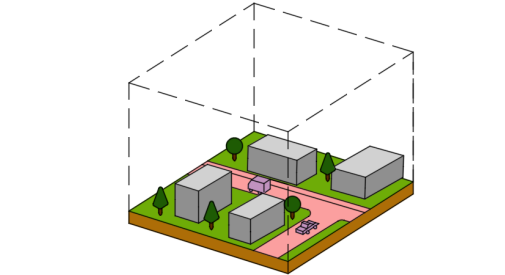
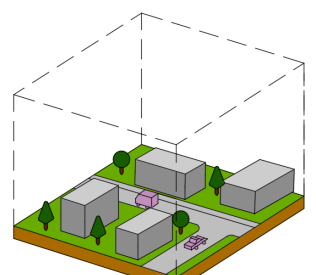
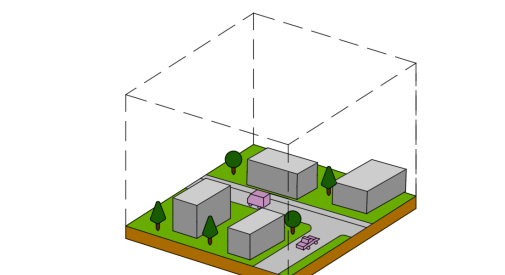
Figura 2.57. Fluxo total médio e máximo das combinações e pavimento nas duas morfologias (M1 e M2).



Por fim, pode ser observado que os maiores valores de fluxo de calor total médio ocorrem nos cânions com pavimento intertravado de concreto grafite, em seguida o pavimento asfalto. E que a morfologia mais crítica foi a M2. E que os menores valores de fluxo total médio foram nos cânions com pavimento na coloração cinza.

A fim de tornar acessível esta metodologia aos gestores e planejadores urbano, no Quadro 2.9 há uma proposta sintética com as melhores soluções de pavimentos na perspectiva do acúmulo de calor no interior do cânion.

Quadro 2.9. Soluções de pavimentação para projeto de planejamento urbano em uma zona de clima tropical. Modelo de observação no PAVSCAM.

Critérios	Meio-Dia	Início da Noite
<p data-bbox="240 488 544 521"><i>Menor Fluxo de Calor (Q)</i></p> <p data-bbox="240 678 1382 745">Comportamento: Menor fluxo de calor no interior do cânion a nível do pedestre: Pavimento cinza e morfologia de edifícios baixos.</p> <p data-bbox="240 786 1362 853">Aplicação: Calçadas e ciclovias na coloração cinza claro cercadas de casas térreas. Edifícios baixos dificultam a formação de Ilhas de Calor Urbana.</p>		
<p data-bbox="240 1010 488 1077"><i>Menor Temperatura Superficial (Ts)</i></p> <p data-bbox="240 1193 1318 1301">Comportamento: A morfologia de edifícios mais altos foram registradas as menores temperaturas de superfície durante o dia em função do sombreamento. E o pavimento vermelho apresentou uma maior taxa de redução de calor até o final do dia.</p> <p data-bbox="240 1341 1422 1449">Aplicação: Calçadas e ciclovias em ruas cercadas de edifícios com até 12 metros. A cor vermelha promove menor desconforto visual. Áreas em que há contato da pele com a superfície, como playgrounds e pátios para recreação.</p>		
<p data-bbox="240 1615 525 1682"><i>Menor Temperatura do Ar (Ta)</i></p> <p data-bbox="240 1821 1374 1888">Comportamento: Em função da inércia, ao final da tarde, elevada emissão de ondas longas. Não favorece o UTCI.</p> <p data-bbox="240 1928 1342 1962">Aplicação: Leito carroçável da via. A cor cinza favorece a reflexão da iluminação noturna.</p>		

Fonte: o Autor (2024).

2.3. Aplicação II - Análise de Erros entre Diferentes Escalas e Modelos de Simulação

No grande panorama do desenvolvimento urbano, as cidades surgiram como o epicentro das estratégias de gestão pública, desempenhando um papel integral no progresso econômico, social e ambiental (NESTICÒ, DE MARE, 2018). Esse papel crucial deu origem ao paradigma da 'cidade inteligente', uma abordagem que aborda questões de desenvolvimento sustentável por meio da implementação de esquemas inovadores de planejamento espacial.

Esses esquemas, no entanto, exigem a seleção de projetos com base em métodos de múltiplos critérios, abrangendo fatores técnicos e financeiros. Isso adiciona uma camada de complexidade ao processo de design urbano, destacando a necessidade de metodologias que sejam econômicas, rápidas e confiáveis. A evolução recente das cidades destaca a necessidade de uma gestão integrada eficiente de serviços urbanos, infraestrutura e redes de comunicação em nível metropolitano.

Diante desses desafios, modelos físicos em escala reduzida, apesar de representações altamente simplificadas de cidades reais (KANDA, 2006), oferecem uma alternativa potente para estudar o clima urbano. Esses modelos investigam sistematicamente as relações entre estruturas de superfície e processos físicos (O'LOUGHLIN, MACDONALD, 1964; WEDDING *et al.*, 1977; OKE, 1981), analisando fluxo, dispersão e resfriamento radiativo (OSAKA, MOCHIZUKI, 1987; THEURER *et al.*, 1992; RAFAILIDIS, 1997). Conseqüentemente, eles fornecem os parâmetros físicos necessários para a construção de modelos numéricos.

No entanto, estudos focados na modelagem em escala urbana do balanço energético são relativamente escassos. Essa escassez se deve aos desafios em refletir com precisão as configurações urbanas reais, pois exigem semelhança dinâmica e geométrica (KANDA *et al.*, 2005), incluindo semelhança em radiação, materiais, fluxo, inércia térmica e controle sobre as condições de exposição.

No âmbito do design de paisagem, a modelagem em escala tem se mostrado uma ferramenta valiosa. Pode ser empregada para estudar processos de transferência de calor, como o resfriamento noturno de parques urbanos (SPRONKEN-SMITH, OKE, 1999) e a variação temporal e espacial característica das temperaturas de superfície de pavimentos frescos (KOWALSKI, 2019). Portanto, é crucial criar modelos de balanço energético urbano para simulação em mesoescala, construir bancos de dados para validação do modelo, incluindo balanço energético e temperaturas de superfície, e estudar parâmetros desconhecidos, como coeficientes de transferência turbulentos (KAWAI, KANDA, 2010).

Estudos têm sido realizados usando modelos em escala, associados a várias abordagens, como os requisitos de resfriamento de edifícios (KRÜGER, PEARLMUTTER, 2008). Esses estudos visam analisar o efeito da densificação no consumo de energia para

ar-condicionado em edifícios (KRÜGER, PEARLMUTTER, 2007), e investigar as variáveis ambientais térmicas dentro de cânions urbanos (HANG, CHEN, 2022).

Tais estudos exploram parâmetros de turbulência e mecânica de fluidos em ambientes urbanos (INAGAKI, KANDA, 2008), e parametrizam a convecção em modelos de energia de edifícios e modelos computacionais de dinâmica de fluidos urbanos (NOTTROTT *et al.*, 2011). Experimentos de campo de fluxo de ar e dispersão de poluentes foram realizados em túnel de vento (SATO *et al.*, 2011) no interior de um cânion urbano, aplicando velocimetria por imagem de partículas (TAKIMOTO *et al.*, 2011) e medindo diferenças de pressão entre as paredes dos edifícios e o vento (HIROSE *et al.*, 2019). Eles também examinam a influência do aquecimento solar no fluxo turbulento (CHEN *et al.*, 2020b).

Sistemas de vegetação e áreas verdes em cânions também podem ser analisados em instalações experimentais físicas para produzir dados de validação de alta qualidade para simulações numéricas e modelos teóricos. Esses estudos avaliam a influência do plantio de árvores no conforto visual e térmico do pedestre (CHEN *et al.*, 2021a), os impactos integrados do plantio de árvores e layouts de rua no ambiente térmico (CHEN *et al.*, 2021b) e a variação espaço-temporal do vento urbano e do ambiente térmico causada por sistemas verticais de vegetação (VGS) (ZHENG *et al.*, 2023). Eles também visam compreender os mecanismos de diferentes componentes de espaços verdes, como superfícies de grama, árvores ou uma combinação de infraestrutura cinza e verde, na redução das cargas térmicas em escalas locais e urbanas sob diferentes condições climáticas (RAHMAN *et al.*, 2021).

Climas urbanos são influenciados por vários fatores, como evapotranspiração, fluxo de calor, geometria urbana e albedo da superfície. Na complexa configuração urbana, a quantificação da evapotranspiração, calor latente (PEARLMUTTER *et al.*, 2009) e fluxo de calor sensível (KAWAI, KANDA, 2010a) apresenta desafios significativos. Essa complexidade surge da heterogeneidade do terreno, de seus diversos elementos secos e úmidos, e da soma de fluxo sensível. Para enfrentar esses desafios, os pesquisadores têm empregado diferentes métodos, como modelos em escala urbana, medições de campo e câmeras infravermelhas. Nesse contexto, modelos em escala urbana têm sido aplicados em cidades e até mesmo em mesoescala (KAWAI *et al.*, 2009), oferecendo uma abordagem promissora para esses desafios.

Medições de campo de longo prazo (KAWAI, KANDA, 2010b) também foram realizadas em modelos físicos ao ar livre. Essas medições consideram as perspectivas do balanço de água e energia da superfície sob diferentes condições de céu e configurações (NAKAYOSHI *et al.*, 2009; WANG *et al.*, 2021; HANG *et al.*, 2022). Esses estudos fornecem dados valiosos que contribuem para nossa compreensão dos climas urbanos e informam o desenvolvimento de estratégias de planejamento urbano mais eficazes.

O papel da geometria urbana, especialmente a razão H/W e o armazenamento térmico urbano (CHEN *et al.*, 2020a) é outro fator crucial nos estudos climáticos urbanos. Influenciados pelos materiais, esses fatores se combinam para criar padrões complexos espaciais, temporais e direcionais de radiação infravermelha de onda longa (MARRISON *et al.*, 2018). Uma câmera infravermelha posicionada na configuração experimental ao ar livre

permite que os pesquisadores investiguem esses impactos nas características espaciais/temporais do ambiente térmico urbano.

Outro aspecto do clima urbano que tem recebido atenção é o albedo, que é a refletividade das superfícies urbanas à radiação solar. Cidades em todo o mundo estão testando o uso de revestimentos reflexivos em pavimentos para reduzir o Efeito Ilha de Calor Urbano (ICU).

Para compreender melhor as interações entre esses fatores e seus efeitos nos climas urbanos, os pesquisadores adotaram uma abordagem multi-escala e multi-método, combinando simulações numéricas e físicas. A interação entre escalas (grande-reduzida) é bastante rara. O uso associativo de métodos de simulação (numérico-físico) (SALVATI *et al.*, 2022), dialogando com o ambiente externo usando ENVI-met e o ambiente interno através do EnergyPlus, representa uma abordagem ainda inovadora nesse campo.

Uma das aplicações do uso de diferentes metodologias em várias escalas é obter os dados de saída de um modelo físico para calibrar simulações numéricas, ou até mesmo utilizar dados de saída de simulações numéricas para analisar estudos em escala urbana. No entanto, os erros numéricos entre esses modelos, ambientes e escalas ainda não são completamente compreendidos. Isso destaca a necessidade de mais pesquisas nessa área.

Para preencher a lacuna, esta etapa do estudo tem como objetivo correlacionar os dados da temperatura do ar e da superfície do pavimento, por três modelos: um em escala real (bairro), um em escala reduzida (através do modelo físico de cânions urbanos, denominado PAVement and Street CAnyon Model - PAVSCAM) e outro por meio de simulação computacional com o software ENVI-Met.

2.3.1. Materiais & Métodos

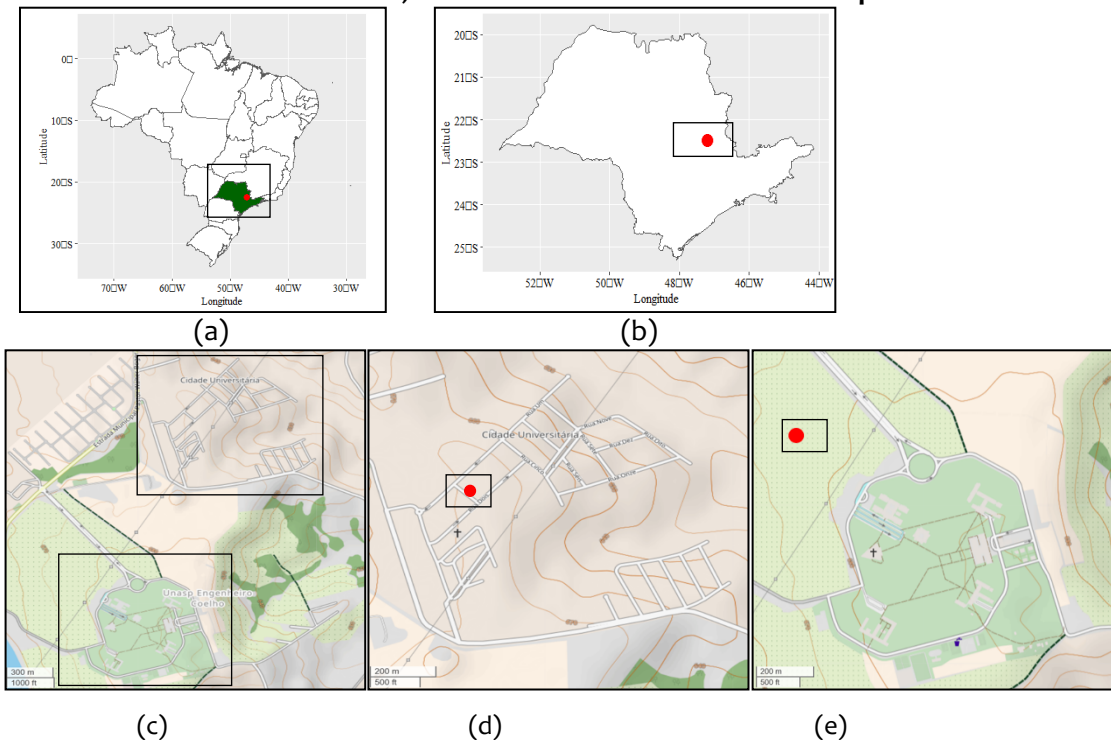
Como os projetos de cidades envolvem várias dimensões de estudo, a seleção da metodologia mais adequada para definir alguns elementos da paisagem urbana, como os materiais do pavimento, torna-se uma tarefa complexa. Esta seção descreve os locais experimentais, bem como os materiais usados na construção do modelo, os dados de entrada dos cenários de simulação, incluindo os procedimentos de calibração e o projeto experimental.

a. Caracterização do Local de Estudo

Esta etapa do estudo foi realizada na cidade de Engenheiro Coelho, uma pequena cidade com uma população de 21.712 habitantes (IBGE, 2023) no estado de São Paulo, Brasil, a 880 metros acima do nível do mar, nas coordenadas 22.501500207761115 S; 47.16805423447822 W. As duas áreas de estudo estão situadas a 1 km uma da outra (Figura 2.58c). A coleta de dados em escala urbana foi realizada em uma rua no Bairro Universitário (Figura 2.58d) da cidade, enquanto a coleta de dados em escala reduzida foi no modelo físico PAVSCAM, localizado no campus universitário do Centro Universitário Adventista de

São Paulo (UNASP), em uma área rural (Figura 2.58e), em função do grau de controle do monitoramento das variáveis e segurança dos equipamentos.

Figura 2.58. Local de estudo: a. Brasil; b. Estado de São Paulo; c. Área de Estudo; d. Ponto de coleta de dados em área urbana; e. Ponto de coleta de dados no campus universitário.

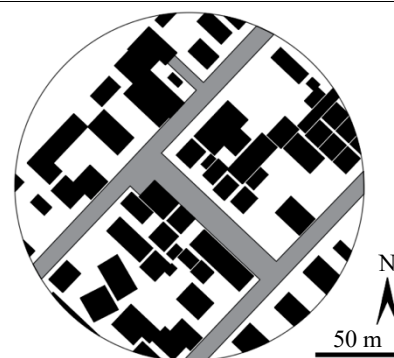


Fonte: o Autor (2024).

Na Figura 2.59 estão apresentados os parâmetros para classificação LCZ. A altura dos elementos de rugosidade e as dimensões de altura dos edifícios e largura da via, para determinação da relação H/W foram levantado em *in loco*. Os demais parâmetros relacionados à área foram levantado por imagem de satélite.

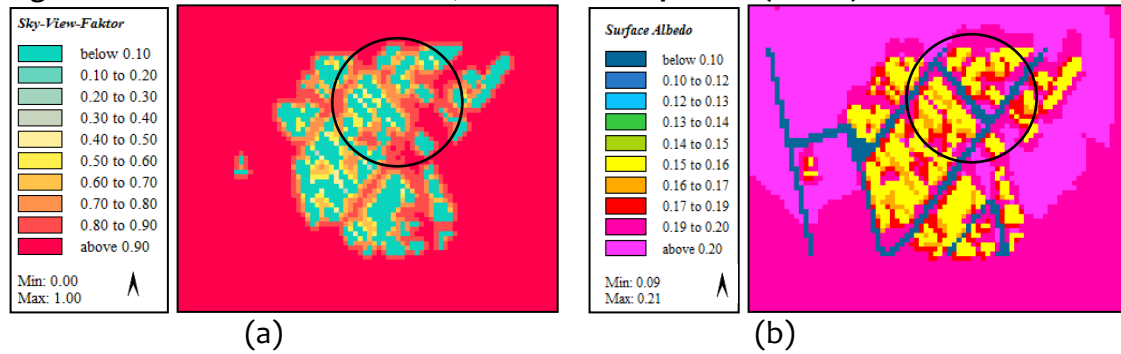
Figura 2.59. Classificação LCZ: Área Urbana (Bairro).

- Orientação da rua: NW – Noroeste
- Relação H/W: 0.66
- Área total: 31,415.90 m²
- Área de superfície impermeável: 4,744.00 m² - 15,10%
- Área de superfície edificada: 10,377.80 m² - 33,03%
- Área de superfície permeável: 16,294.10 m² - 51,87%
- Altura dos elementos de rugosidade: 10 m
- Classe de rugosidade do terreno: Very rough - 6
- **LCZ 6 – Aberta – Edifícios baixos**



Fonte: o Autor (2024).

Figura 2.60. a. Fator de visão do céu; b. Albedo da superfície (Bairro).



Fonte: o Autor (2024).

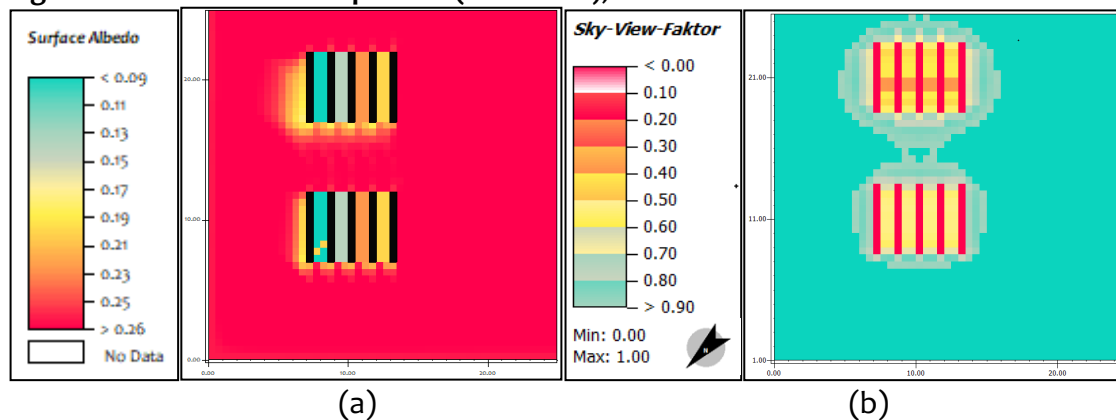
De acordo com Stewart e Oke (2012) essa área é classificada como LCZ 6. As principais características são: “Configuração aberta de edifícios baixos (1-3 andares). Abundância de cobertura de solo permeável (plantas rasteiras e arbustos). Madeira, tijolo, rocha, telha e materiais de concreto. A Figura 2.61 apresenta as principais características físicas do modelo em escala reduzida (PAVSCAM) e a Figura 2.62 o albedo e o fator de visão do céu no interior do modelo.

Figura 2.61. Instalações do modelo em escala (PAVSCAM).



Fonte: o Autor (2024).

Figura 2.62. a. Albedo da Superfície (PAVSCAM); b. Fator de Visão do Céu.

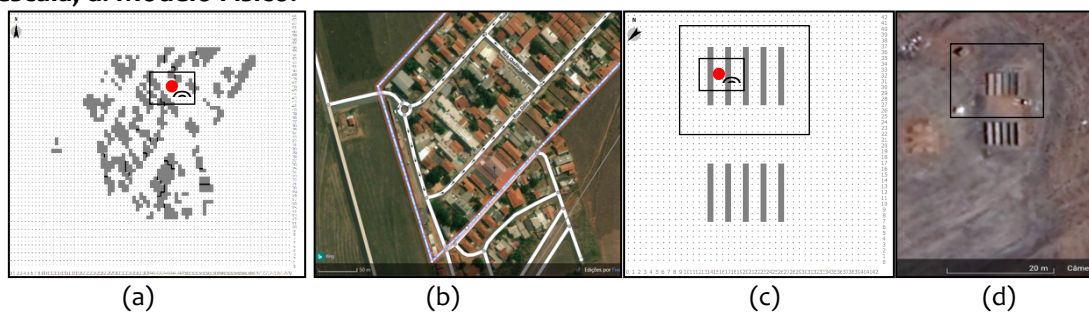


Fonte: o Autor (2024).

b. Desenho Experimental

Na etapa de observação em campo, os sensores foram instalados no Bairro Universitário, Engenheiro Coelho, São Paulo, Brasil. E os dados coletados pelos equipamentos serviram como dados de calibração para o modelo numérico, relacionados à análise do Ambiente “Bairro (NB)”. Além disso, um anemômetro, sensores de temperatura superficial e do ar foram posicionados. Com uma câmera infravermelho foram coletados dados de temperatura superficial do pavimento, durante a observação, relacionados à análise do Ambiente “Modelo em Escala (SM)”. Os ambientes do estudo de caso estão apresentados na Figura 2.63. E os pontos de interesse estão demarcados em vermelho.

Figura 2.63. a. Modelo numérico da área urbana; b. Área urbana; c. Modelo numérico do modelo em escala; d. Modelo Físico.



O modelo PAVSCAM foi projetado para avaliar diferentes tipos de pavimento, com diferentes albedos sobre diferentes morfologias urbanas. Portanto, neste estudo, apenas o albedo mais alto (o pavimento de asfalto) foi analisado, porque esse é o material mais comum usado nas cidades brasileiras para pavimentação. Embora as figuras mostrem quatro tipos de pavimentos, apenas o asfalto foi monitorado e analisado neste estudo. As características gerais de cada cenário e o arranjo experimental está apresentado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5. Características gerais de cada cenário do campo experimental.

Cenário ¹	<i>PhySca-SM</i>	<i>PhyUrb-NB</i>	<i>NumSca-SM</i>	<i>NumUrb-NB</i>
Modelagem	Física	Física	Numérica	Numérica
Escala	Reduzida (1:15)	Urbana (1:1)	Reduzida (1:15)	Urbana (1:1)
Ambiente	SM – Modelo em Escala	NB – Bairro	SM – Modelo em Escala	NB – Bairro



¹Código dos Cenários: **Phy**- física; **Num**- numérica; **-Sca**- escala reduzida; **-Urb**- urbana; **-SM** modelo em escala; **- NB** bairro.

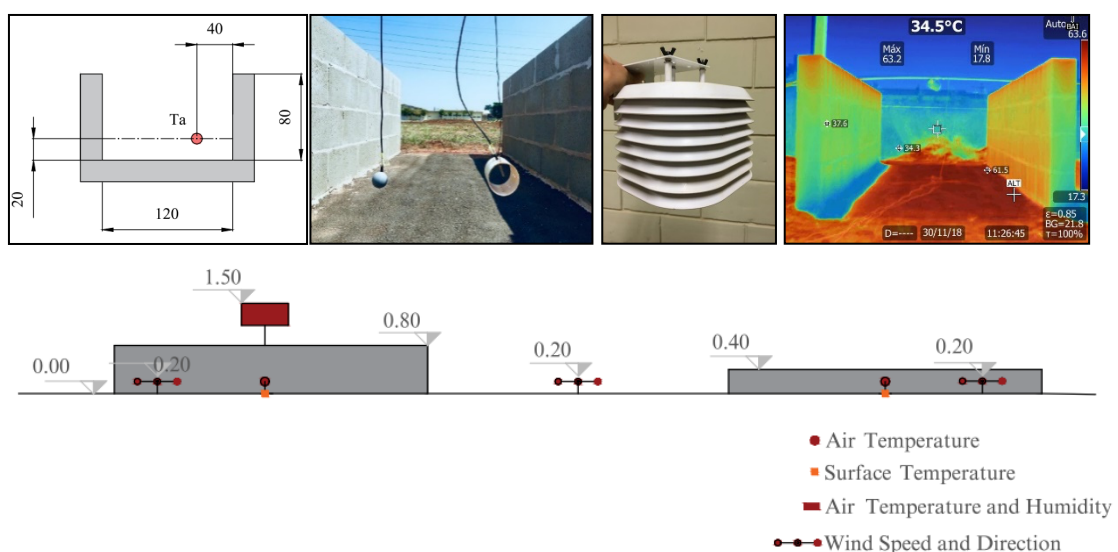
c. Instrumentação da Observação em Campo

A rodada de monitoramento térmico do campo teve como objetivo avaliar o impacto no interior de um cânion em uma área urbana real, coberto com pavimento asfáltico escuro em comparação ao caso de referência, de um pavimento asfáltico dentro de um modelo em escala, denominado PAVSCAM (PAVement and Street CAnyon Model). O objetivo era identificar o nível de correlação entre os dados de saída em cenários de diferentes escalas. A rodada de monitoramento, em todos os cenários (real e em escala reduzida), foi realizada durante o inverno no hemisfério sul (23 a 30 de junho de 2021).

Foram coletadas a temperatura da superfície (T_s) de uma rua pavimentada e a temperatura do ar (T_a) a uma altura de referência padrão, denominada 'altura de pedestre'. O sensor de temperatura do ar foi posicionado na fachada um edifício. A temperatura superficial foi coletada de hora em hora utilizando uma câmera termográfica, em função dos riscos de segurança e circulação de veículos, para manter a integridade dos equipamentos.

Por se tratar de um ambiente controlado, no modelo físico, os sensores de temperatura superficial foram tanto termopares (que ficaram posicionados no centro do pavimento durante todo o período de coleta), quanto a câmera termográfica (com dados coletados de hora em hora em um dia representativo). A Figura 2.64 mostra a posição dos sensores no modelo físico (a) e no bairro (b).

Figura 2.64. Posição dos sensores de temperatura do ar durante o monitoramento (a) PAVSCAM (Todas as unidades em cm); (b) Bairro.



(a)



(b)

Fonte: o Autor (2024).

Dias de céu claro (índice de claridade atmosférica $kt \geq 0,5$ com baixa velocidade do vento ($w_s \leq 2$ m/s) foram considerados válidos para as medições. O índice de claridade atmosférica foi calculado usando as equações propostas por Duffie *et al.* (2020) apresentadas na Tabela 2.4.

Este estudo investiga as variações entre escalas (1:1 e 1:15), tipos de modelagem (física e numérica) e ambientes (bairro e modelo em escala). A Tabela 2.6 descreve o posicionamento dos sensores e os parâmetros de entrada na rodada de monitoramento do modelo urbano e em escala.

Tabela 2.6. Parâmetros de entrada no modelo urbano e em escala - Condições de inverno e experimento no local.

Parâmetros	Bairro	PAVSCAM
Temperatura do ar (°C)	Dados de campo (3,0 m de altura)	Dados de campo (0,2 m de altura)
Umidade relativa (%)	Dados de campo (3,0 m de altura)	Dados de campo (0,2 m de altura)
Temperatura superficial do pavimento (°C)	Dados de campo (0,0 m de altura)	Dados de campo (0,0 m de altura)
Velocidade do vento média diária (m/s)	0,84 (2 m de altura)	0,84 (2 m de altura)
Direção do vento média diária (°)	173 (Sudeste)	173 (Sudeste)
Comprimento de rugosidade (m)	0,01	0,01
Data da coleta	23 -30 de Junho, 2021	23 -30 de Junho, 2021
Tempo total de coleta em horas (h)	168	168
Albedo das paredes e telhados dos edifícios (-)	0,7690 ± 0,0267	0,7690 ± 0,0267
Emissividade do solo [Solo argiloso] (-)	0,90	0,90
Albedo do pavimento asfáltico (-)	0,0932	0,0918
Espessura da camada de revestimento asfáltico (cm)	5,0	5,0

As principais especificações dos sensores durante o monitoramento experimental em ambientes e sensores urbanos (bairro) e de modelo em escala (PAVSCAM) são apresentadas (Tabela 2.7).

Tabela 2.7. Principais especificações dos sensores nos ambientes Bairro e PAVSCAM.

Parâmetro	Bairro	PAVSCAM	Especificações
Albedo do pavimento asfáltico [AP]	Espectrômetro portátil ALTA II	Espectrômetro portátil ALTA II	Acurácia: $\pm 0,10$.
Temperatura superficial do pavimento	Câmera Infravermelho Fluke Ti400	Câmera Infravermelho Fluke Ti400 e Termopares DS18B20	Câmera Infravermelho – Intervalo de medição: -20°C to $+1200^{\circ}\text{C}$; Acurácia: $\pm 0,10$.
Temperatura do ar	HOBO/Pro V2 U-23-00	HOBO/Pro V2 U-23-001 Termopares Dallas DS18B20	HOBO e Termopares - Intervalo de medição: -40°C to 70°C ; Acurácia: $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
Umidade relativa	HOBO/Pro V2 U-23-001	HOBO/Pro V2 U-23-001	Termo-Higrômetro – Intervalo de medição: 0 - 100%; Acurácia: $\pm 2,5\%$
Velocidade e direção do vento	Anemômetro de concha	Anemômetro de concha	Vento – Intervalo de medição: 0,7 to 40 m/s; Acurácia: $\pm 0,2$ m/s.
Radiação solar	-	Piranômetro EKO MS-602	Irradiância – Sensitividade $\sim 7 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$; Acurácia: $\pm 2\%$.

Fonte: HOBO, EKO e FLUKE (2024)

- *Refletância solar*: O espectrômetro portátil ALTA II consiste em 11 lâmpadas posicionadas de forma circular, sendo que cada lâmpada representa um comprimento de onda distinto. Após a ativação, essas lâmpadas emitem radiação de seus respectivos comprimentos de onda, que é refletida pelo objeto e capturada pelo sensor localizado no centro do círculo. A energia registrada é então exibida em milivolts (mV) no visor frontal, com uma precisão de $\pm 0,10$.
- *Temperatura superficial*: Câmera infravermelha Fluke Ti400 - IFOV (resolução espacial) de 1,31 mRad; resolução de luz visível de 5 megapixels com uma faixa de medição de temperatura de -20°C a $+1200^{\circ}\text{C}$, sensibilidade térmica (NETD) $\leq 0,05^{\circ}\text{C}$ a 30°C de temperatura alvo (50 mK) e precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou 2% (a 25°C nominal, o que for maior). Termopares Dallas Termômetro digital de 1 fio - Faixa operacional de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$, precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (a 25°C).

- *Temperatura do ar*: HOBO - Resolução de 0,04°C com uma faixa de operação de -40°C a 70°C e uma precisão de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ de 0 a 70°C. Termopares Dallas Termômetro digital de 1 fio - Faixa operacional de -55°C a +125°C, precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ (a 25°C).
- *Umidade relativa*: HOBO - Resolução de 0,05% com uma faixa operacional de 0 a 100%, -40° a 70°C e uma precisão de $\pm 2,5\%$ de 10% a 90% de UR típica até um máximo de $\pm 3,5\%$, incluindo histerese a 25°C; abaixo de 10% e acima de 90% $\pm 5\%$ típica.
- *Velocidade e direção do vento*: Anemômetro de copo com cata-vento - diâmetro do copo de 75 mm, faixa operacional de 0,7 a 40 m/s e precisão de $\pm 0,2$ m/s.
- *Irradiância*: Piranômetro - Segunda classe (ISO 9060), sensibilidade de $\sim 7 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$, faixa espectral de 285...2800 nm, tempo de resposta $\leq 17\text{s}$, dependência da temperatura da sensibilidade (-10 °C...+40°C) é de $\pm 2\%$.

A refletância espectral do pavimento asfáltico (PA) foi medida com um espectrômetro portátil. Para reduzir as variações de tensão, o procedimento foi repetido três vezes (COUTO, DORNELLES, 2023). O valor médio foi usado no cálculo da refletância solar.

Os dados de temperatura do ar e da superfície no PAVSCAM foram registrados por um microcontrolador Esp32 com um intervalo de tempo de 1 minuto. Em cada caso, foram usados protetores solares de baixo custo para as medições de temperatura (tubos de PVC de 0,3 m de comprimento abertos paralelos ao eixo longitudinal do cânion). Os sensores de temperatura da superfície foram equipados com um invólucro de cobre e cobertos por uma camada de isolamento com cobertura reflexiva, para evitar trocas de calor por convecção e radiação.

No interior da área urbana do bairro, os dados de temperatura do ar e umidade relativa foram medidos com um termo-higrômetro HOBO com um intervalo de tempo de 15 minutos, durante 7 dias. Para obter os dados de temperatura da superfície, uma câmera infravermelha foi posicionada a 1 m de altura para capturar a visão superior do pavimento.

O anemômetro foi posicionado a uma distância de 3 m do PAVSCAM e a 1,5 m de altura acima do solo, a fim de identificar os dados instantâneos, médios e máximos de velocidade e direção do vento acima do topo dos cânions. O piranômetro foi posicionado a 9 m de altura e a 150 m de distância do local do experimento. Todos os sensores foram submetidos a uma etapa de calibração antes da implantação no PAVSCAM e estão em conformidade com os requisitos de precisão da EPA (2008).

Foram utilizados equipamentos distintos para a temperatura da superfície, a fim de se adequar melhor a cada cenário. Como o PAVSCAM está localizado em uma área privada e controlada, é um local seguro para colocar os sensores (termopares). Além disso, a proteção do termo-higrômetro HOBO poderia modificar o padrão de vento dentro do cânion devido a suas dimensões.

d. Parâmetros do Modelo Numérico e Calibração

A Tabela 2.8 mostra os parâmetros de entrada na simulação numérica, sob condições de inverno, em um ambiente de modelo em escala, denominado PAVSCAM, e no ambiente do Bairro.

Tabela 2.8. Parâmetros de entrada na simulação numérica - Condições de inverno, ambiente de modelo de escala (SM). Cenário "NumSca-SM" e NumUrb-NB".

Parâmetro	Modelo em Escala (SM)	Bairro (NB)
Temperatura do ar a 1 m (°C)	Simple forcing – Dados coletados no local	Full forcing – Itapira/SP
Umidade relativa a 1 m (%)	Simple forcing – Dados coletados no local	Full forcing – Itapira/SP
Velocidade do vento media diária (m/s)	0,84	0,84
Direção do vento media diária (°)	173 (Sudeste)	173 (Sudeste)
Umidade específica 2500 m ($g_{\text{water vapor}}/kg_{\text{air}}$)	7,13	7,13
Comprimento de rugosidade (m)	0,01	0,01
Dia do início da simulação	24 de Junho, 2021	24 de Junho, 2021
Horário do início da simulação	1 am	6 am
Tempo total de simulação em horas (h)	24	48
Albedo de paredes e telhados dos edifícios (-)	0,7690	0,7690
Emissividade do solo [Solo argiloso] (-)	0,90	0,90
Albedo do pavimento asfáltico [AP] (-)	0,0918	0,0918
Espessura da camada de revestimento (cm)	5,0	5,0
Espessura da camada de base (cm)	15,0	15,0
Grid [x; y; z]	[50; 50; 40]	[80; 65; 25]
dx; dy, dz (m)	[0,50; 0,50; 0,50]	[6,66; 6,66; 3,00]

Para determinar quantitativamente qual modelo de previsão é o ideal, três métricas de desempenho foram usadas para avaliar a precisão da previsão pontual, que são o erro absoluto médio (MAE), o erro percentual absoluto médio (MAPE) e a qualidade do ajuste (R^2) em relação às temperaturas do ar e da superfície para cada análise comparativa, conforme mostrado na Tabela 2.9.

Tabela 2.9. Métricas de desempenho para avaliar a exatidão e a precisão dos modelos previstos.

MAE	MAPE	R^2
Erro absoluto médio	Erro percentual absoluto médio	Coefficiente de determinação
$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - y'_i $	$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right \times 100\%$	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$

y_i e y'_i denotam os valores reais e os valores de previsão, respectivamente. \bar{y} representa a média dos valores reais. O R^2 também foi utilizado para avaliar o desempenho da adequação no processo de ajuste da distribuição, em que y_i e y'_i e representam a probabilidade cumulativa observada, a probabilidade cumulativa estimada e a média da probabilidade cumulativa observada, respectivamente.

Fonte: Adapted Wang et al. (2017).

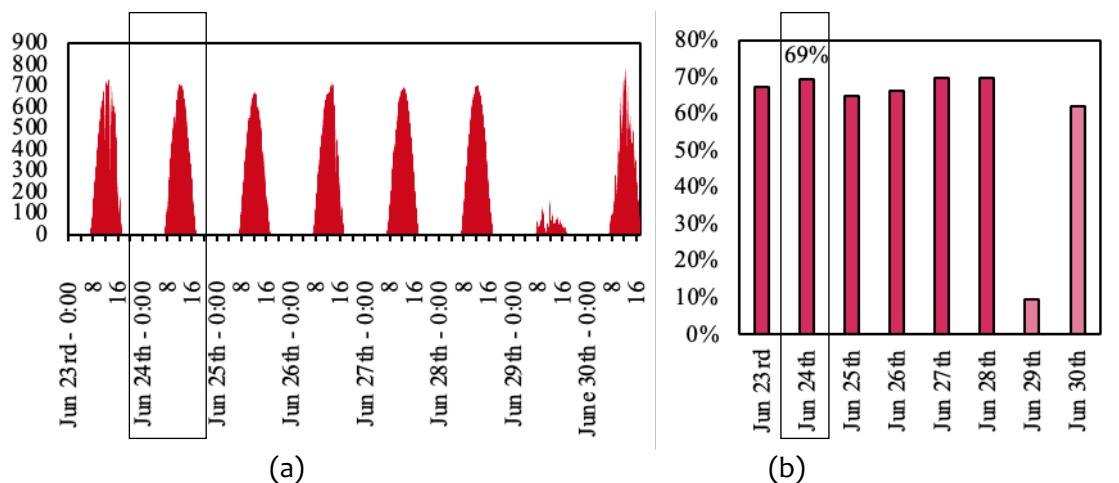
2.3.2 Resultados e Discussões

Esta seção descreve as características climáticas durante o experimento no local, apresenta a variação espaço-temporal da temperatura do ar e da superfície da simulação numérica e, por fim, os modelos de correlação e a análise de erro entre os cenários, para discutir a modelagem de simulação mais adequada, considerando os aspectos de escala e ambiente.

a. Caracterização Climática

A Figura 2.65 mostra a irradiância global medida no local, durante o período do observação, e o dia típico selecionado (24 de junho), que apresentou o maior índice de claridade atmosférica ($kt = 0,69$).

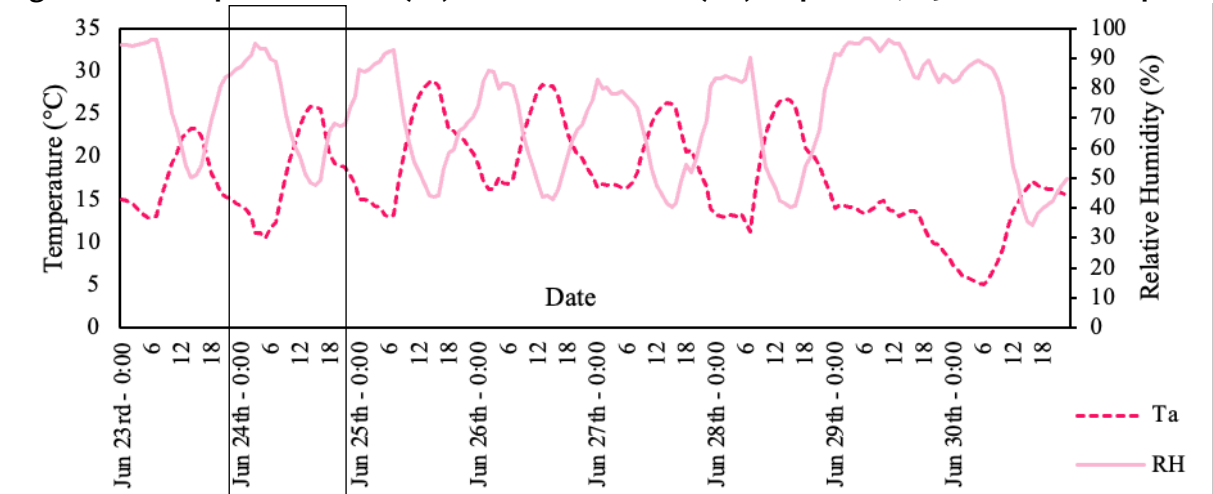
Figura 2.65. a) Irradiância Global (I), todas as unidades em W/m^2 ; b) Índice de claridade atmosférica (kt) do período.



Fonte: o Autor (2024).

A Figura 2.66 mostra a temperatura média horária do ar (T_a) e a umidade relativa (UR) de todo o período, medidas a 3 m de altura do piso, no ambiente da vizinhança (NB).

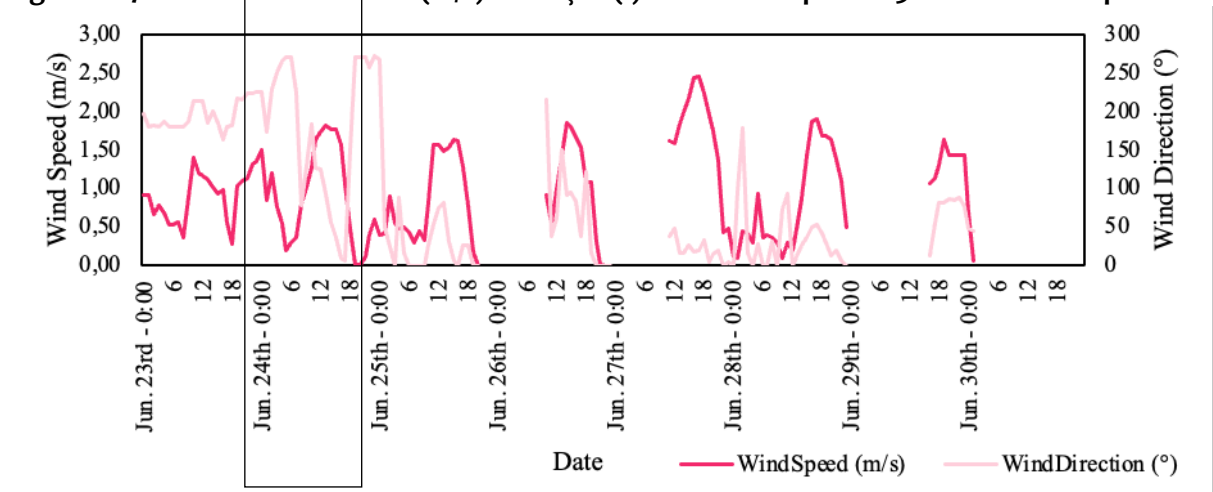
Figura 2.66. Temperatura do ar (T_a) e umidade relativa (RH) do período, a 3 m de altura do piso.



Fonte: o Autor (2024).

A velocidade do vento medida a 3 m de altura nas proximidades da configuração experimental é apresentada na Figura 2.67.

Figura 2.67. Velocidade do vento (m/s) e direção ($^{\circ}$) da série temporal a 3 m de altura do piso.



Fonte: o Autor (2024).

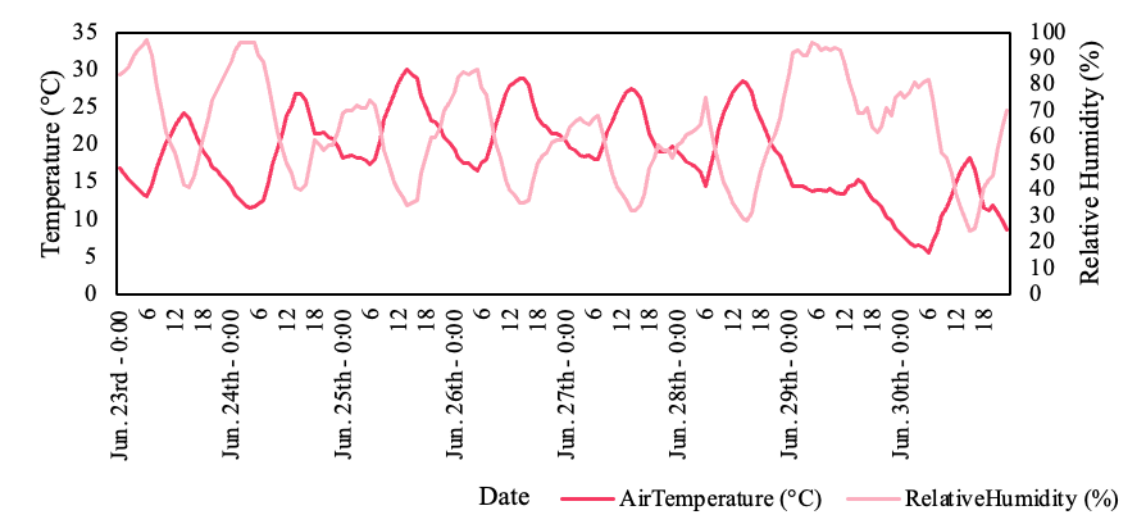
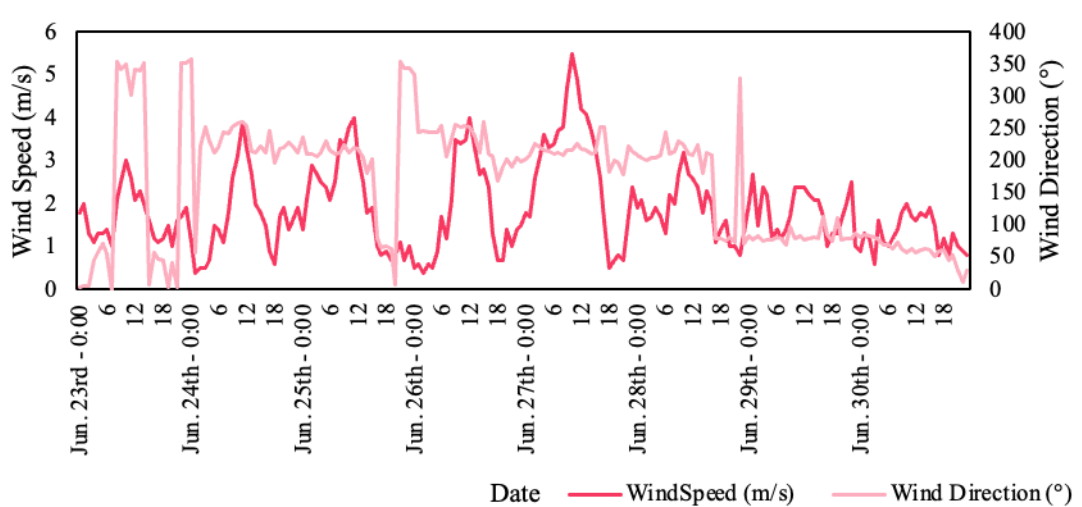
Devido a problemas técnicos, alguns dados de vento estão faltando, especialmente da meia-noite até o início do dia. Os dados da estação meteorológica mais próxima (banco de dados da CETESB) são apresentados para entender o padrão de vento e a discussão dos dados.

As condições gerais (temperatura média do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, velocidade do vento, direção do vento e radiância global máxima) nas estações meteorológicas mais próximas são apresentadas na Tabela 2.10. A estação de Limeira (banco de dados da CETESB), localizada no estado de São Paulo, dista 13 km do local do experimento, e não houve precipitação durante essa série de monitoramento.

Tabela 2.10. Condições gerais nas estações meteorológicas mais próximas - Limeira.

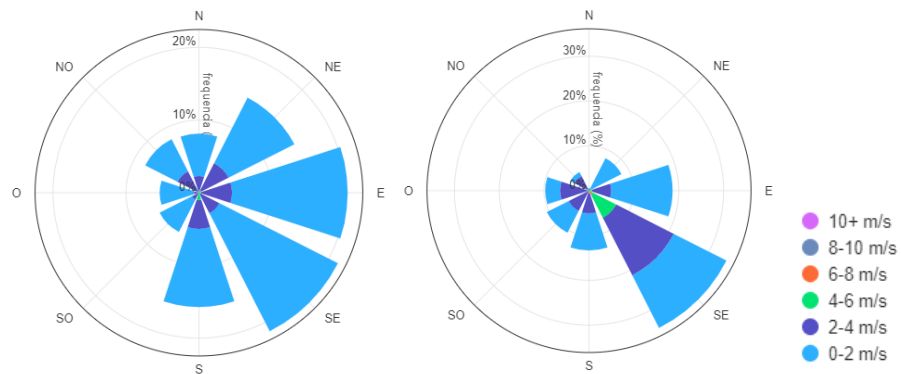
	T_{aAVG} (°C)	UR_{AVG} (%)	Pres.Atm. (hPa)	Vv (m.s ⁻¹)	Dv (°)	Max.Radiação Global (W.m ⁻²)
Jun. 23	18,06	71,58	947,94	1,69	148	119
Jun. 24	18,82	67,92	944,70	1,66	228	125
Jun. 25	22,80	57,83	944,09	2,06	197	115
Jun. 26	22,33	59,79	944,25	1,75	231	120
Jun. 27	21,53	52,29	944,31	2,85	214	126
Jun. 28	21,34	52,04	945,44	1,85	183	125
Jun. 29	13,43	81,96	948,51	1,82	83	46
Jun. 30	10,85	55,96	949,90	1,30	61	136

Fonte: Base de dados CETESB (2024).

Figura 2.68. Temperatura do ar (Ta) e umidade relativa (UR) da série temporal na estação meteorológica mais próxima (banco de dados da CETESB).**Figura 2.69. Velocidade do vento (m/s) e direção (°) da série temporal na estação meteorológica mais próxima (banco de dados da CETESB).**

A Figura 2.70 mostra a rosa dos ventos de ambos os locais, da configuração do PASCAM e da estação meteorológica mais próxima.

Figura 2.70. Direção do vento (°) da série temporal, no local (PAVSCAM) e na estação meteorológica mais próxima (banco de dados da CETESB).

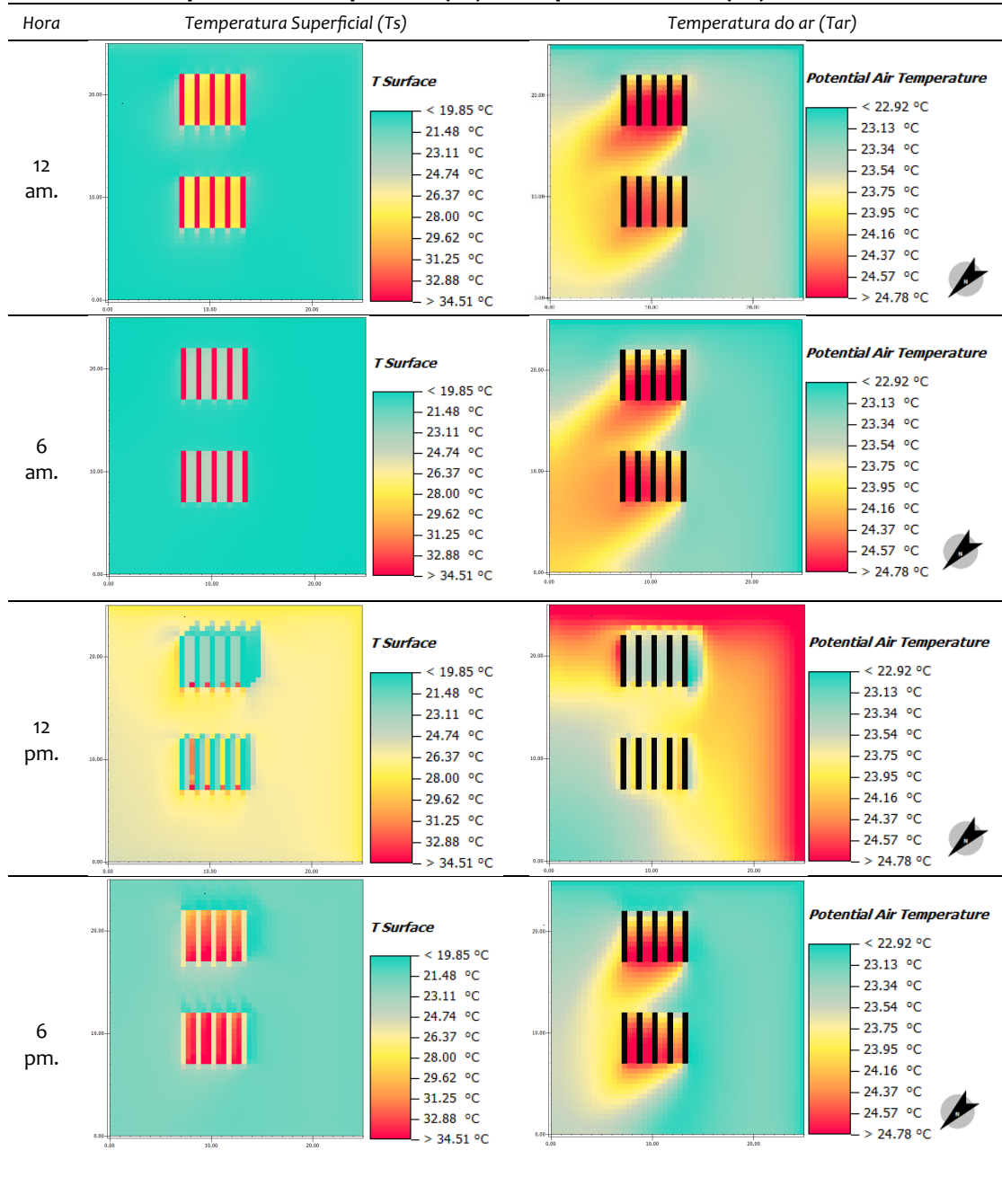


Fonte: o Autor (2024).

b. Variação Espacial da Temperatura do Ar e Superficial

São apresentadas as variações espaciais da temperatura do ar e da superfície às 12h, 18h, 12h e 18h, em uma altitude de 655 m. A Tabela 2.11 está relacionada a um cenário "NumSca-SM" (modelagem: numérica, escala: escala 1:15 e ambiente: modelo em escala - SM). Aqui está o modelado o PAVSCAM (composto por pavimento preto, grafite, cinza e vermelho, respectivamente, da esquerda para a direita, sendo que a configuração representada acima possui relação H/W de 0,66 e a de baixo H/W: 0,33).

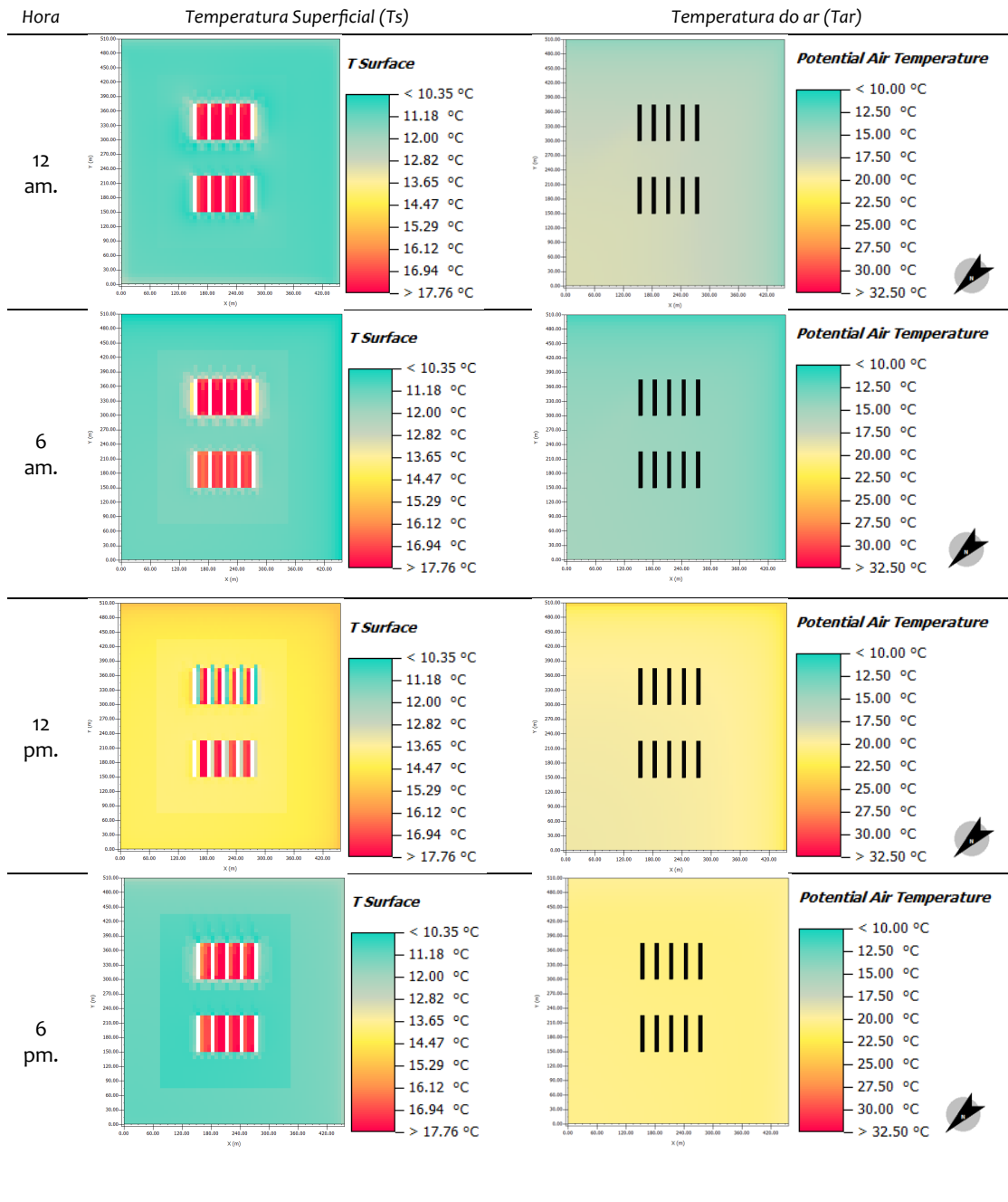
Tabela 2.11. Temperatura da superfície (Ts) e temperatura do ar (Ta). Cenário "NumSca-SM".



Fonte: o Autor (2024).

Na Tabela 2.12, é mostrado o cenário "NumUrb-SM" (modelagem: numérica, escala: urbana 1:1 e ambiente: modelo em escala - SM).

Tabela 2.12. Temperatura da superfície (Ts) e temperatura do ar (Ta). Cenário "NumUrb-SM".



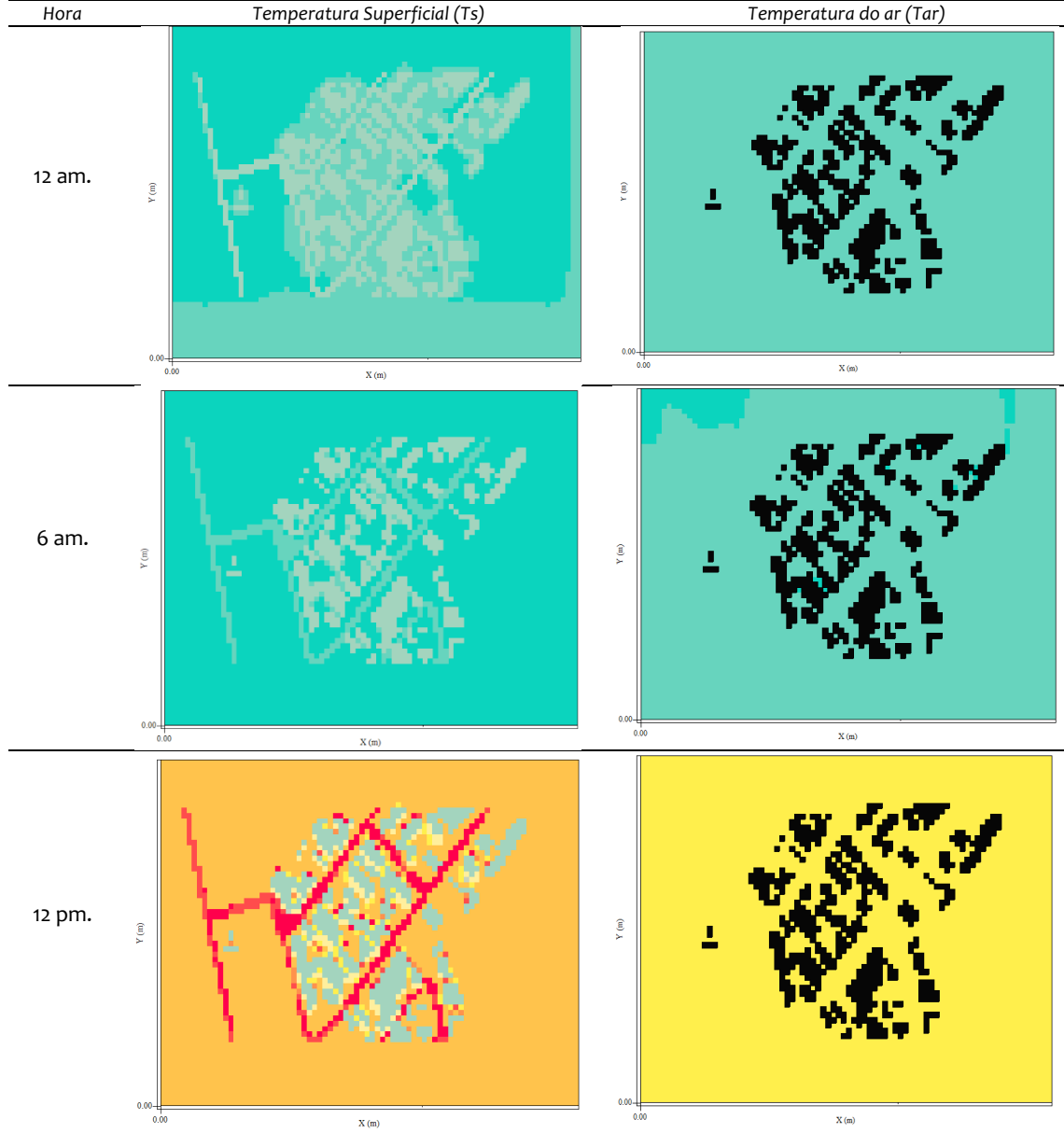
Fonte: o Autor (2024).

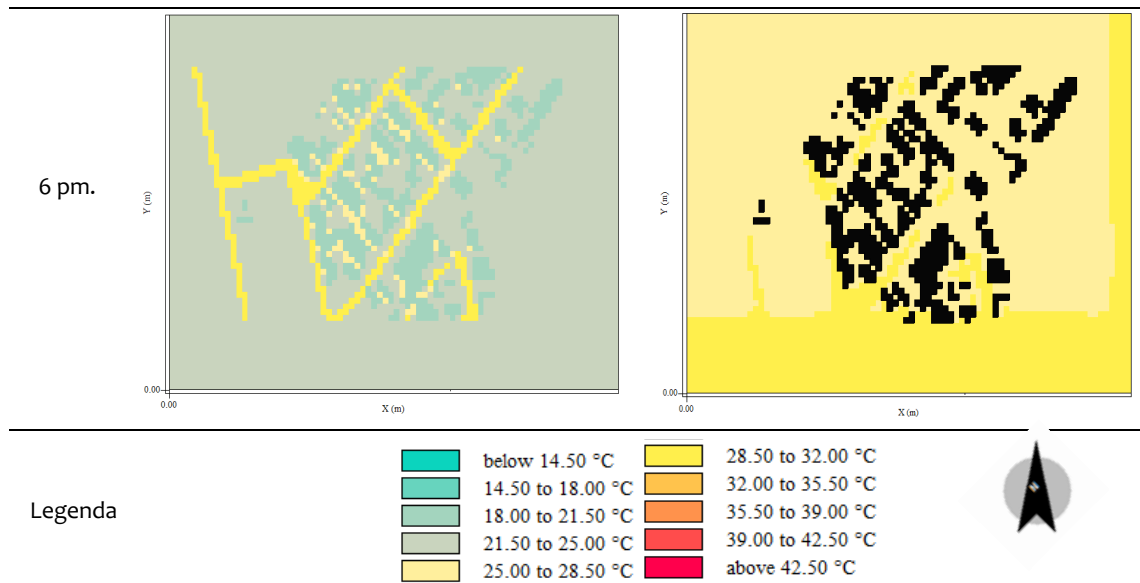
Em comparação com o modelo em escala reduzida (1:15), a simulação em escala urbana (1:1), denominada escala total, apresentou as mesmas propriedades térmicas e características climáticas. A temperatura máxima da superfície (Ts) pode ser identificada às 12 horas para o pavimento de asfalto (superfície localizada na fileira da esquerda do modelo), na configuração com relação de aspecto $H/W=0,33$. Esses resultados sugerem

que a diferença entre os pavimentos se deve aos efeitos combinados da exposição à radiação solar, bem como ao albedo mais alto.

Além disso, a temperatura do ar (T_a) no nível do pedestre muda durante o dia, principalmente devido ao efeito de sombreamento, geometria solar e liberação de radiação de ondas longas durante a noite. A Tabela 2.13 mostra o cenário "NumUrb-NB" (modelagem: numérica, escala: urbana 1:1 e ambiente: bairro - NB).

Tabela 2.13. Temperatura da superfície (T_s) e temperatura do ar (T_a). Cenário "NumUrb-NB".





Fonte: o Autor (2024).

A temperatura mais alta da superfície (T_s) pode ser observada na área pavimentada, durante o dia. Esses resultados sugerem que a diferença de 6K se deve ao efeito combinado do albedo e das propriedades térmicas dos materiais. Em relação à temperatura do ar (T_a), no final do dia (18h), os cânions da rua NE-SW apresentaram valores ligeiramente mais altos em comparação com as orientações NW-SE.

Por fim, o mapeamento da variabilidade espacial e temporal do microambiente urbano é crucial para uma estimativa precisa da vulnerabilidade das pessoas (ZHOU *et al.*, 2020).

As distinções entre as três metodologias para caracterizar a variabilidade da temperatura urbana podem ter usos variados em setores como planejamento urbano e mitigação de mudanças climáticas (ZHOU *et al.*, 2020).

c. Correlação entre os Cenários

Esta seção tem por objetivo analisar a correlação entre diferentes cenários, relacionados a: escalas, ambientes e mudanças de modelagem.

A correspondência do albedo da superfície com a entrada da radiação solar descendente é necessária para a similaridade da radiação de ondas curtas. A correspondência da emissividade da superfície, bem como as entradas de radiação atmosférica descendente e a temperatura observada da superfície, são necessárias para a similaridade da radiação de ondas longas (KANDA, 2006).

Os cenários simulados estão apresentados na Tabela 2.14.

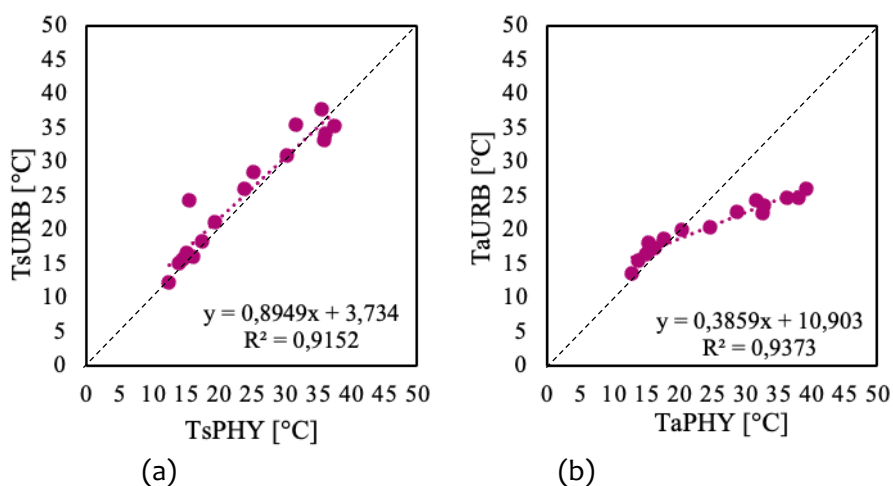
Tabela 2.14. Cenários simulados para análise de correlação de temperatura do ar e superficial.

Análise	Variável Dependente (y)	Variável Independente (x)
A1	URB - Bairro	PHY - PAVSCAM
A2	PHY - PAVSCAM	CFD_red – ENVI-Met PAVSCAM 1:15
A3	URB - Bairro	CFD_urb – ENVI-Met Bairro
A4	CFD_urb – ENVI-Met Bairro	CFD_full – ENVI-Met PAVSCAM 1:1
A5	PHY - PAVSCAM	CFD_urb – ENVI-Met modelo Bairro

Fonte: o Autor (2024).

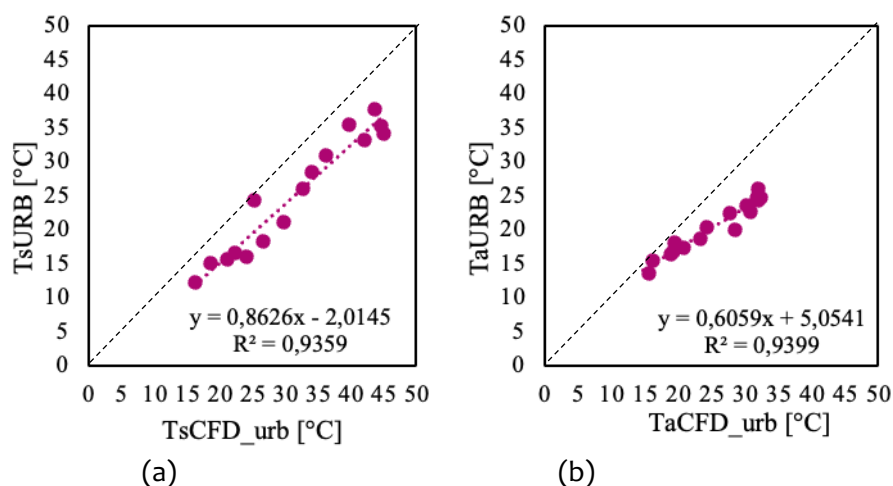
Foram selecionadas as correlações mais representativas e aplicáveis em projetos: são entre as medições da temperatura do ar e da superfície no PAVSCAM (modelo em escala) e no Bairro (modelo urbano) é apresentada na Figura 2.71; a simulação CFD em ambiente urbano (CFD_urb) e os dados coletados no local (URB), na Figura 2.72; e entre os dados simulados em escala urbana (CFD_urb) e a modelagem física (PHY), na Figura 2.73. Os gráficos de correlação dos outros cenários, são mostrados no apêndice.

Figura 2.71. Análise A1 - Correlação entre diferentes escalas: física (PHY) e urbana (URB). a. temperatura da superfície do pavimento no local (Ts); b. temperatura do ar no local (Ta).



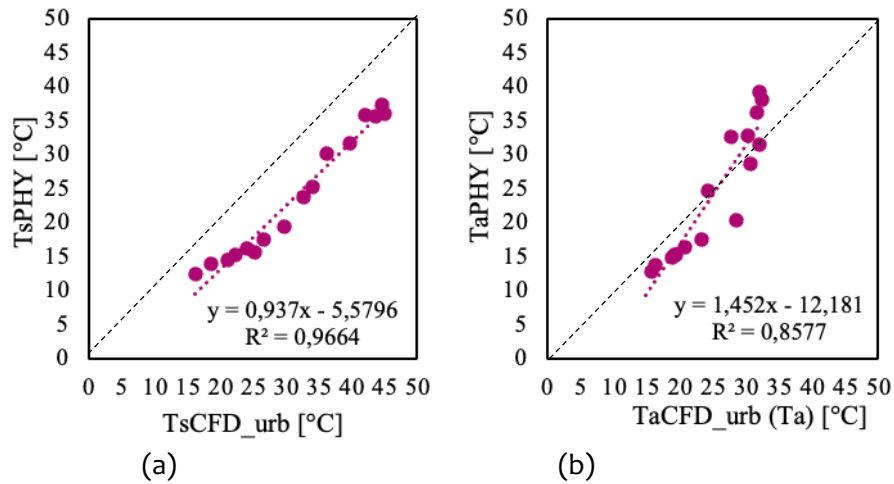
Fonte: o Autor (2024).

Figura 2.72. Análise A2 - Correlação entre a simulação CFD em ambiente urbano (CFD_urb) e os dados coletados no local (URB): a. temperatura da superfície do pavimento (Ts); b. temperatura do ar (Ta).



Fonte: o Autor (2024).

Figura 2.73. Análise A3 - Correlação entre os dados simulados em escala urbana (CFD_urb) e a modelagem física (PHY): a. temperatura da superfície do pavimento (Ts); b. temperatura do ar (Ta).



Fonte: o Autor (2024).

Há cinco modelos de previsão para a temperatura da superfície e do ar, apresentados na Tabela 2.16. A faixa de temperaturas para aplicar as equações é apresentada na Tabela 2.15.

Tabela 2.15. Faixa de temperatura da superfície e do ar de cada modelo de previsão.

Análise	Temperatura Superficial	Temperatura do Ar
A1	12,47 – 37,43°C	12,90 – 39,30°C
A2	14,13 – 34,77°C	14,47 – 25,79°C
A3	16,32 – 45,11°C	15,67 – 32,37°C
A4	12,74 – 39,40°C	14,79 – 21,60°C
A5	12,47 – 37,43°C	12,90 – 39,30°C

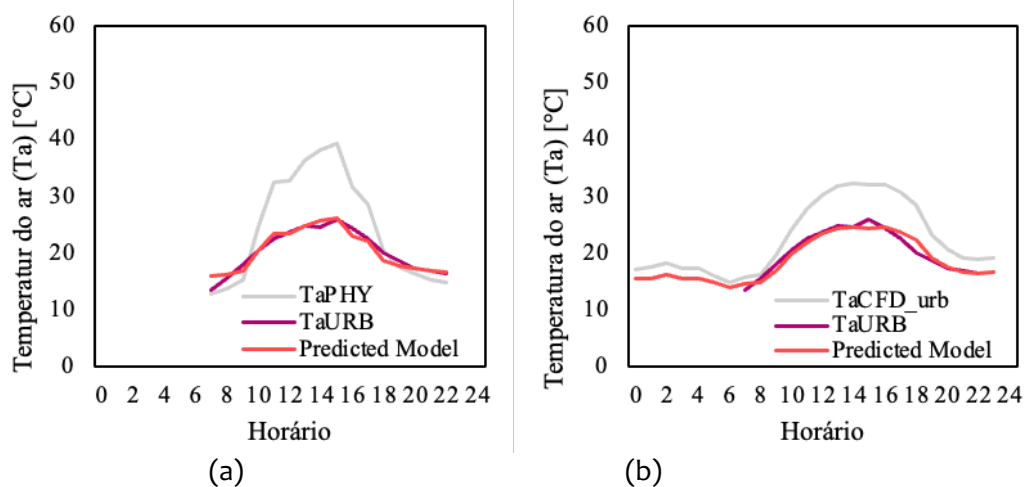
Fonte: o Autor (2024).

Depois de calibrado, o modelo foi usado para estimar a temperatura do ar e da superfície no período de inverno para a mesma área urbana, e os gráficos são apresentados a seguir.

d. Variação Temporal da Temperatura do Ar e Superficial

Os modelos observados e previstos de temperatura horária do ar e da superfície são apresentados no apêndice. Entretanto, os resultados mais importantes para a temperatura do ar são mostrados na Figura 2.74a e Figura 2.74b, cenários A1 e A3. Na Tabela 2.16 há indicação mais detalhada dos cenários e das equações.

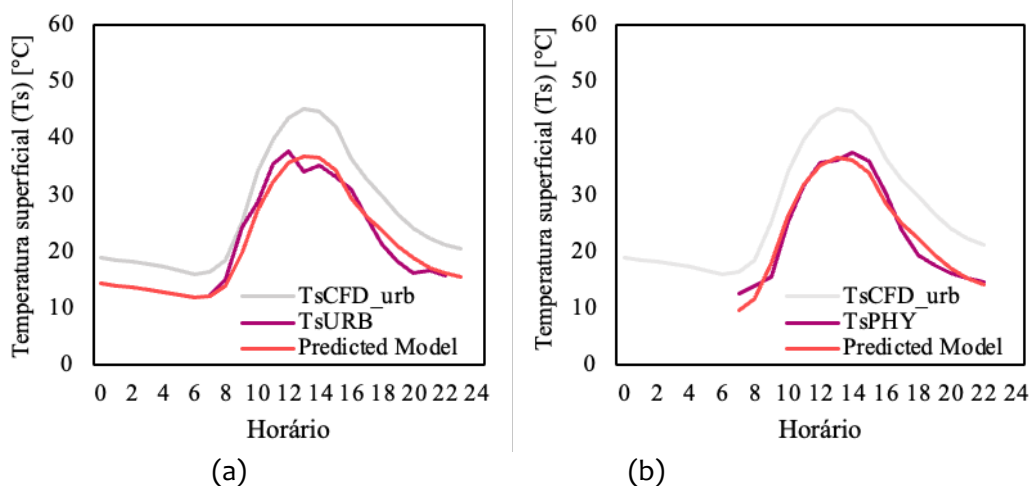
Figura 2.74. Análise 1 - Modelos observados e previstos: a. A1 temperatura horária do ar (T_a); b. A3 temperatura horária do ar (T_a).



Fonte: o Autor (2024).

Os valores previstos têm um grande ajuste aos dados observados, durante todo o dia e à noite. A Figura 2.75 mostra os resultados mais relevantes para a temperatura da superfície, cenários A3 e A5.

Figura 2.75. Análise 2 - Modelos observados e previstos: a. A3 temperatura horária do ar (T_a); b. A5 temperatura horária do ar (T_a).



Fonte: o Autor (2024).


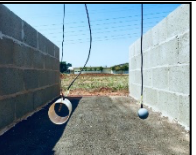



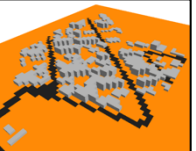
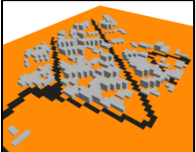
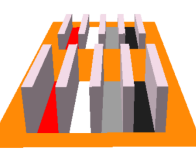

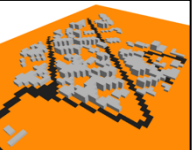
Por fim, os modelos de ajuste para A3, A4 e A5 para a temperatura da superfície têm um erro de previsão aceitável durante todo o dia, exceto a análise entre a escala urbana e a escala real em um modelo CFD (A5), que mostra um erro de 9,4%.

A temperatura da superfície do pavimento tende a ser superestimada no modelo CFD, em comparação com os dados medidos em campo. O modelo físico durante todo o período apresenta valores superestimados para a temperatura do ar em relação aos dados urbanos medidos (A1). Além disso, o mesmo comportamento pode ser observado na simulação numérica e no ambiente urbano (A4). Outros trabalhos científicos encontraram a mesma tendência (LEE *et al.*, 2016; QAID *et al.*, 2016; QAID, OSSEN, 2015; SALATA *et al.*, 2016). Por outro lado, vários estudos anteriores tendem a subestimar a temperatura do ar durante o período de simulação (ACERO, ARRIZABALAGA, 2018; MORAKINYO *et al.*, 2016; MORAKINYO *et al.*, 2017; SOSA *et al.*, 2018; WANG, AKBARI, 2016).

Nas simulações numéricas, a radiação vem do formato de dados meteorológicos e é menos precisa em comparação com outras variáveis medidas em campo. Como as condições de contorno e as propriedades térmicas dos materiais são muito semelhantes, o principal fator que contribui para a superestimação é a exposição do modelo à radiação, conforme mencionado por Salvati *et al.* (2022).

A Tabela 2.16 mostra a análise comparativa da temperatura do ar no inverno, entre os Locais A e B. Além disso, a equação do modelo preditivo, o coeficiente de determinação (R^2), o erro absoluto médio (MAE) e o erro percentual absoluto médio (MAPE) dos dados previstos e observados (local A).

Tabela 2.16. Análise comparativa - modelos de previsão da temperatura do ar (Ta) e da temperatura da superfície (Ts) no inverno.

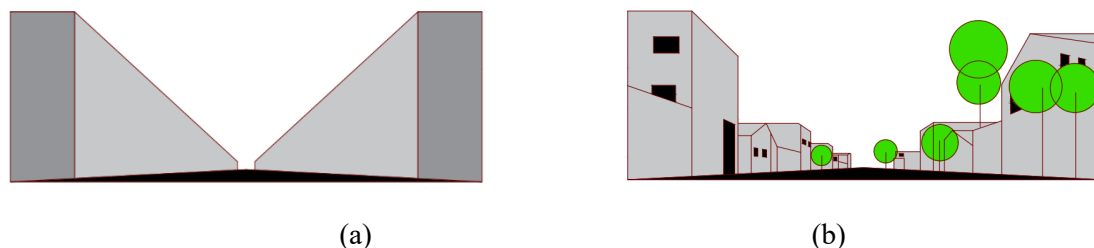
Análises	Local A	Local B	Temperatura do ar (Ta)				Temperatura superficial (Ts)			
			Equação	R ²	MAE	MAPE	Equação	R ²	MAE	MAPE
A1			$Ta_{URB} = 10,903 + 0,3859 \times Ta_{PHY}$	0,94	± 0,66	3,29%	$Ts_{URB} = 3,734 + 0,8949 \times Ts_{PHY}$	0,92	± 1,9	6,47%
A2			$Ta_{PHY} = -27,096 + 2,4587 \times Ta_{CFD_red}$	0,91	± 1,32	6,11%	$Ts_{PHY} = -10,482 + 1,525 \times Ts_{CFD_red}$	0,83	± 2,65	13,74%
A3			$Ta_{URB} = 5,0541 + 0,6059 \times Ta_{CFD_urb}$	0,94	± 0,59	2,88%	$Ts_{URB} = -2,0145 + 0,8626 \times Ts_{CFD_urb}$	0,94	± 1,51	5,64%
A4			$Ta_{CFD_urb} = -20,77 + 2,3565 \times Ta_{CFD_full}$	0,78	± 2,61	9,43%	$Ts_{CFD_urb} = 2,345 + 1,0411 \times Ts_{CFD_full}$	0,88	± 1,56	5,64%
A5			$Ta_{PHY} = -12,181 + 1,452 \times Ta_{CFD_urb}$	0,86	± 2,37	9,41%	$Ts_{PHY} = -5,5796 + 0,937 \times Ts_{CFD_urb}$	0,97	± 1,15	4,92%

Fonte: o Autor (2024)

A radiação recebida varia de acordo com o local, e as temperaturas de superfície registradas nem sempre são comparáveis devido às complexas interações de vários processos físicos, como a transferência de turbulência e a condução de calor do ar para as obstruções (KANDA, 2006). Considerando a complexidade de um bairro e a simplicidade de um modelo em escala composto de blocos de concreto sem objetos ao redor, a interação entre os elementos é diferente.

Tanto para estudos sobre a temperatura da superfície dos pavimentos quanto para a temperatura do ar, na faixa de 17°C a 32°C, a combinação A3 é a maneira mais comum de validar modelos de simulação usando o ENVI-met. Essa combinação apresenta um erro muito semelhante entre o modelo físico e o ambiente urbano (A1) na faixa de temperatura de 13°C a 37°C.

Figura 2.76. Esquema com os detalhes em um modelo físico em escala (a) e do Bairro em escala real (b).



Fonte: o Autor (2024).

A Figura 2.76 mostra que o PAVSCAM é um modelo extremamente simples para representar a complexidade da vizinhança em escala real. Entretanto, mesmo com todas as limitações de materiais, inércia e vegetação, ele apresentou um erro de $\pm 0,66$ na estimativa da temperatura do ar.

Para superar a incompatibilidade entre a inércia térmica do modelo e o mundo real, a modelagem em escala física deve ser complementada com modelos numéricos e medições de campo (KANDA, 2006). A investigação constatou que o modelo pode ser considerado uma ferramenta útil para a análise do clima urbano, desde que o usuário leve em conta suas limitações e características ao interpretar os resultados da simulação (TSOKA *et al.*, 2018).

O uso de modelos simulados no ENVI-met para validar um modelo físico (A5) resultou no menor erro percentual absoluto médio (MAPE) entre todas as combinações analisadas, com um valor de 4,9% para uma faixa de temperatura de 17°C a 32°C. Assim, ele representa o melhor método para validar simulações que avaliam a temperatura da superfície dos pavimentos.

O modelo ENVI-met para análise microclimática durante o verão, em condições de verão quente, relatou MAE de temperatura do ar de 1,34 °C (TSOKA *et al.*, 2018). Devido ao fato de que apenas alguns estudos foram realizados para condições semelhantes de inverno e estações intermediárias, os dados de entrada obtidos por meio de simulações

ENVI-met ou de escala urbana e modelo físico apresentaram os menores erros absolutos médios (MAE), a saber, $\pm 0,59$ e $\pm 0,66$, respectivamente.

Sob as mesmas condições de exposição, o efeito da diferença de inércia térmica das fachadas entre um modelo em escala urbana e um modelo em escala reduzida, conforme analisado neste estudo, explica o erro de 4% no modelo preditivo para a temperatura do ar no nível do pedestre e aproximadamente 6% para a temperatura da superfície.

Os materiais de inércia térmica mais alta apresentam uma faixa de temperatura diária menor e uma taxa de variação menor da temperatura da parede, porque armazenam e absorvem mais calor durante o dia e liberam mais à noite (CHEN *et al.*, 2020a). Aumentando 13 vezes a inércia térmica, a temperatura do ar no interior dos modelos aumenta em média $4,0^{\circ}\text{C}$ em climas quentes e temperados.

2.4. Considerações

Em relação à avaliação do balanço radiativo no interior de cânions urbanos, tanto o pavimento vermelho, quanto cinza apresentam, valores de fluxo semelhantes. No entanto, nos pavimentos intertravados de concreto vermelho e cinza, os edifícios de até 4 andares apresentam maior intensidade no fluxo de calor, ocorrendo algumas horas depois dos fluxos em áreas com casas térreas. No caso do fluxo por condução o atraso foi de 1 hora entre as duas configurações.

Pode ser observado que os maiores valores de fluxo de calor total médio ocorrem nos cânions com pavimento intertravado de concreto grafite, em seguida o pavimento asfalto. E que a morfologia mais crítica foi a com edifícios mais baixos, provavelmente pela maior exposição do pavimento à radiação. E que os menores valores de fluxo total médio foram nos cânions com pavimento na coloração cinza, em função do maior albedo. De maneira geral, os maiores valores médios horários ocorrem próximo ao meio dia, na morfologia com edifícios mais altos (M2), em função da dificuldade de dissipação do calor acumulado no interior do cânion.

Na avaliação dos erros de medição do PAVSCAM e do modelo numérico com ENVI-met, foram modificadas a escala de análise e o tipo de simulação, e avaliada a resposta dos pavimentos na temperatura ambiente e da superfície. As principais conclusões são as seguintes:

Para estudos sobre a temperatura da superfície de pavimentos, dentro da faixa de temperatura de 12°C a 37°C , recomenda-se calibrar modelos físicos usando dados derivados de modelos de simulação numérica como entrada, produzindo um erro percentual absoluto médio (MAPE) de 4,9%. Para estimar dados em escala urbana do mundo real,

dentro da faixa de temperatura do ar de 15 °C a 37 °C, propõe-se usar dados de saída de modelos simulados no ENVI-met, que apresentaram um erro médio absoluto (MAE) de $\pm 0,59$ ou modelos físicos (MAE = $\pm 0,66$).

O estudo atual foi realizado no inverno do hemisfério sul, e a configuração experimental foi localizada em uma cidade tropical. Portanto, recomenda-se aplicar esse método em diferentes estações e contextos climáticos para identificar a precisão dos modelos previstos. Além disso, os resultados não podem ser extrapolados para diferentes formas urbanas e diferentes coberturas de céu, porque não temos dados medidos ou simulados e, conseqüentemente, os erros estimados para esses cenários. Este estudo apresentou os erros considerando um modelo simplificado (feito de blocos de concreto) e medições de campo (feitas com diferentes cores de paredes, materiais e elementos) com valores médios de claridade do céu. Para diferentes formas urbanas e dias de céu não claro, sugerimos um novo estudo para analisar tais hipóteses.

Em geral, este estudo proporciona uma melhoria significativa na compreensão da interação entre simulações numéricas, modelos físicos reduzidos e dados em escala urbana do mundo real. Avaliando erros associados a metodologias, escalas de análise, ambientes e a interação entre eles. Por fim, fornecendo os parâmetros físicos necessários para a construção de melhores modelos de calibração.

2.5. 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. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102762>

ACERO & ARRIZABALAGA, 2016; ACERO, J. A., & ARRIZABALAGA, J. Evaluating the performance of ENVI-met model in diurnal cycles for different meteorological conditions. **Theoretical and applied climatology**, 131, 455-469, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1971-y>

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR. 9778: 2009**. Argamassa e Concreto Endurecidos—Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR. 12817:2012**. Concreto endurecido — Determinação do calor específico — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR. 7182: 2020**. Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR. 16916: 2021**. Agregado Miúdo – Determinação da Densidade e da Absorção de Água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ARAÚJO, A. C. H.; DORNELLES, K. A. Estação de envelhecimento natural para análise de degradação da absorvância de telhas e monitoramento de temperaturas superficiais. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 2, p. 247-267, 2022.

<https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000200603>

ASTM. 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. West Conshohocken: ASTM, 2016.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM. E1980-11**. Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces. West Conshohocken: ASTM, 2019.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM. C1371-15: 2022**. Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers. West Conshohocken: ASTM, 2022.

BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. **Incropera: Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BRETZ S.; AKBARI H. Long-term performance of high albedo roof coatings. **Energy and Buildings**, v.25, pp. 159–167, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01005-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01005-5)

CARNIELO, E.; ZINZI, M. Optical and thermal characterization of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand. **Building and Environment**, 60, 56–65, 2013. doi:10.1016/j.buildenv.2012.11.00.

CARLSON, J. D.; BHARDWAJ, R.; PHELAN, P. E.; KALOUSH, K. E.; GOLDEN, J. S. Determining thermal conductivity of paving materials using cylindrical sample geometry. **Journal of materials in civil engineering**, v. 22, n. 2, p. 186-195, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2010\)22:2\(186\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:2(186))

CARPIO, J. A. D del. **Uso de pigmentos de óxidos de metais mistos na pavimentação para a mitigação da ilha de calor urbana**. 2014. 437 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGECC da Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

CHEELA, V.; JOHN, M.; BISWAS, W.; SARKER, P. Combating Urban Heat Island Effect—A Review of Reflective Pavements and Tree Shading Strategies. **Buildings (Basel)**, v.11, n.3, p.93, 2021. <https://doi.org/10.3390/buildings11030093>

CHEN, J.; ZHANG, M.; WANG, H.; LI, L. Evaluation of thermal conductivity of asphalt concrete with heterogeneous microstructure. **Applied Thermal Engineering**, v. 84, p. 368-374, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.070>

CHEN, G. YANG, X., YANG, H., HANG, J., LIN, Y., WANG, X., . . . LIU, Y. The influence of aspect ratios and solar heating on flow and ventilation in 2D street canyons by scaled outdoor experiments. **Building and Environment**, v.185, p.107159, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107159>

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**, v.726, p. 138147, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138147>

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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117722>

CHEN, J; WANG, H.; XIE, P. Pavement temperature prediction: Theoretical models and critical affecting factors. **Applied Thermal Engineering**, v. 158, p. 113755, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113755>.

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**, v.801, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149527>

CHEN, T., YANG, H., CHEN, G., LAM, C. K. C., HANTG, 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**, 764, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142920>

COELHO, T. C. C.; GOMES, C. E. M; DORNELLES, K. A. Desempenho térmico e absorptância solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural. **Ambiente construído**, v. 17, n. 1, p. 147-161, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100129>

COOPER, P. I. The absorption of radiation in solar stills. **Solar energy**, 12.3: 333-346, 1969. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(69\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(69)90047-4)

CORTESÃO, J. **Thermal Retrofitting of Public Spaces in Compact Urban Areas. A Bioclimatic Approach**. Ph.D. Thesis, Porto University, Porto, Portugal, 2013.

COUTO, L. S. B., & DORNELLES, K. Análise comparativa entre espectrômetro portátil e espectrofotômetro com esfera integradora para medição da refletância solar de telhas. **Ambiente Construído**, 23, 81-99, 2023. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000200664>

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. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127582>

DI MARIA, V.; RAHMAN, M.; COLLINS, P.; DONDI, G.; SANGIORGI, C. Urban Heat Island Effect: thermal response from different types of exposed paved surfaces. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 6, n. 4, p. 414, 2013.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A., & BLAIR, N. **Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind**. 5.ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2020.

EKO. **Piranômetro EKO MS-602**. Disponível em: <https://www.eko-instruments.com/eu/categories/products/pyranometers/ms-60s-pyranometer>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.

EPA - U.S. Environmental Protection Agency. Cool Roofs. In: **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies**. Disponível em: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>. 2008. Acesso em 14 de Maio de 2022.

ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban Microclimate: Designing the Spaces between Buildings**. London: Earthscan, 2011.

ERELL, E., PEARLMUTTER, D., BONEH, D., & KUTIEL, P. B. Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. **Urban climate**, 10, 367-386, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.005>

FLUKE. **Câmera de Infravermelho Fluke Ti400**. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/cameras-termicas/ti400>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.

GIORDANO, Dominique E.; KRÜGER, Eduardo. Potencial de redução da temperatura de superfície pelo aumento do albedo nas diversas regiões brasileiras. **Paranoá**, v. 7, n. 11, p. 1-22, 2014. <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n11.2014.12080>

GONZALEZ, D. E. G. **Análise dos efeitos do albedo no microclima de cânions urbanos**. Curitiba, 2015. 175f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

HANG, J., & CHEN, G. Experimental study of urban microclimate on scaled street canyons with various aspect ratios. **Urban Climate**, 46, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101299>

HANG, J., WANG, D., ZENG, L., REN, L., SHI, Y., & ZHANG, X. Scaled outdoor experimental investigation of thermal environment and surface energy balance in deep and shallow street canyons under various sky conditions. **Building and Environment**, 225, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109618>

HART, M.A., SAILOR, D.J. Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. **Theor Appl Climatol** 95, 397-406, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0017-5>

HILBERSHEIMER, L. **The New City**: Principles of planning. Chicago: P. Theobald, 1944.

HIROSE, C., IKEGAYA, N., HAGISHIMA, A., & TANIMOTO, J. Outdoor measurement of wall pressure on cubical scale model affected by atmospheric turbulent flow. **Building and Environment**, 160, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106170>

HOBO. **HOBO U23 Pro v2 Temperature/Relative Humidity Data Logger**. Disponível em: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u23-001a?srsId=AfmBOorOoIIx2x5gXbiogvPLXljHpizuUHe5Xxc2kkD3zKUqommWDGfl>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). Cidades e Estados. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/engenheiro-coelho.html>. Acesso em 07 de Julho de 2023.

INAGAKI, A., & KANDA, M. Turbulent flow similarity over an array of cubes in near-neutrally stratified atmospheric flow. **Journal of Fluid Mechanics**, 615, 101-120, 2008. <https://doi.org/10.1017/S0022112008003765>

ISLAM, M. R.; TAREFDER, R. A. Determining thermal properties of asphalt concrete using field data and laboratory testing. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 297-306, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.040>

ISO. International Standard Organization. **ISO 7726: 2001**. Ergonomics of the Thermal Environment. Instruments for Measuring Physical Quantities. London: British Standards Institution, 2001.

KANDA, M. Progress in the scale modeling of urban climate: Review. **Theor. Appl. Climatol.** 84, 23–33, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0141-4>

KANDA, M., KAWAI, T., KANEGA, M., MORIWAKI, R., NARITA, K., & HAGISHIMA, A. A simple energy balance model for regular building arrays. **Boundary-Layer Meteorology**, 116(3), 423-443, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-7956-x>

KANDA, M., KAWAI, T., MORIWAKI, R., NARITA, K., HAGISHIMA, A., & SUGAWARA, H. Comprehensive outdoor scale model experiments for urban climate (COSMO). **In Proc., 6th Int. Conf. on Urban Climate**, pp. 270-273, 2006.

KAWAI, T., & KANDA, M. Urban energy balance obtained from the comprehensive outdoor scale model experiment. Part I: Basic features of the surface energy balance. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 49(7), 1341-1359, 2010. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC1992.1>

KAWAI, T., & KANDA, M. Urban energy balance obtained from the comprehensive outdoor scale model experiment. Part I: Basic features of the surface energy balance. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 49(7), 1341-1359, 2010a. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC1992.1>

KAWAI, T., & KANDA, M. Urban energy balance obtained from the comprehensive outdoor scale model experiment. Part II: Comparisons with field data using an improved energy partition. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 49(7), 1360-1376, 2010b. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC1993.1>

KAWAI, T., RIDWAN, M. K., & KANDA, M. Evaluation of the simple urban energy balance model using selected data from 1-yr flux observations at two cities. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 48(4), 693-715, 2009. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1891.1>

KLOK, L.; KLUCK, J. Reasons to adapt to urban heat (in The Netherlands). **Urban Climate**, v.23, pp.342–351, 2018.

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

KOWALSKI, L.F., MASIERO, E. & KRÜGER, E.L. Evaluating the impact of pavement reflectance and aspect ratio on thermal conditions in a scale model of a street canyon: introducing PAVSCAM. **Theoretical and Applied Climatology**, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04911-z>

KRÜGER, Eduardo Leite; GONZALEZ, Dominique Elena Giordano. Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. **Ambiente construído**, v. 16, n. 3, p. 89-106, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000300094>

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, pp.2090-2098, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.002>

KRÜGER, E. L., & PEARLMUTTER, D. The impact of densification on air-conditioning loads in a dry environment: Using a semi-empirical model for street canyon temperatures as input for thermal simulations. **Proceedings** of 10th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, CUPUM 2007, 2007.

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. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.034>

KYRIAKODIS, G. E.; SANTAMOURIS, M. J. U. C. Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates-Results from a large-scale urban mitigation project. **Urban Climate**, v. 24, p. 326-339, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.002>

LAI, LIU, GAN. T.; LIU, K.; CHEN, Q. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. **Science of the Total Environment**, 661, 15 April 2019, p. 337-353, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062>

LEE, H., MAYER, H., & CHEN, L. Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. **Landscape and Urban Planning**, 148, 37-50, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.004>

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

LI, L.; ZOU, Z.; ZHOU, T.; ZHOU, X.; LI, Q. Simulation and Analysis of Influencing Factors of Pavement Thermal Environments in Guangzhou. **Sustainability** (Basel, Switzerland), 14(12), 7251, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14127251>

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar energy**, v. 4, n. 3, p. 1-19, 1960.
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. <https://doi.org/10.3390/app10062193>

MORAKINYO, T. E., DAHANAYAKE, K. K. C., ADEGUN, O. B., & BALOGUN, A. A. Modelling the effect of tree-shading on summer indoor and outdoor thermal condition of two similar buildings in a Nigerian university. **Energy and Buildings**, 130, 721-732, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.087>

MORAKINYO, T. E., DAHANAYAKE, K. K. C., NG, E., & CHOW, C. L. Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study. **Energy and Buildings**, 145, 226-237, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.066>

MORRISON, W., KOTTHAUS, S., GRIMMOND, C. S. B., INAGAKI, A., YIN, T., GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P., . . . MERCHANT, C. J. A novel method to obtain three-dimensional urban surface temperature from ground-based thermography. **Remote Sensing of Environment**, 215, 268-283, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.004>

NAKAYOSHI, M., MORIWAKI, R., KAWAI, T., & KANDA, M. Experimental study on rainfall interception over an outdoor urban-scale model. **Water Resources Research**, 45(4), 2009. <https://doi.org/10.1029/2008WR007069>

NESTICÒ, ANTONIO; DE MARE, GIANLUIGI. A multi-criteria analysis model for investment projects in smart cities. *Environments*, 5(4), 50, 2018. <https://doi.org/10.3390/environments5040050>

NIKOLOPOULOU, M. (Ed.) **Designing Open Spaces in the Urban Environment: A Bioclimatic Approach**. RUROS: Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces; Centre for Renewable Energy Sources: Pikermi Attiki, Greece, 2004.

NIKOLOPOULOU, M.; BAKER, N.; STEEMERS, K. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Understanding the Human parameter. **Solar Energy**, 70, 227–235, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00093-1)

NOTTROT, A., ONOMURA, S., INAGAKI, A., KANDA, M., & KLEISSL, J. Convective heat transfer on leeward building walls in an urban environment: Measurements in an outdoor scale model. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 54(15-16), 3128-3138, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.020>

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2.ed. Londres: Taylor and Francis, 1987.

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

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. <https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban climates**. Cambridge University Press, 2017.

OLGYAY, V. **Arquitectura y Clima** – Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas. Editorial Gustavo Gili: Barcelona, 1963.

O'LOUGHLIN, E. M., & MACDONALD, E. G. Some roughness-concentration effects on boundary resistance. **La Houille Blanche**, (7), 773-783, 1964. <https://doi.org/10.1051/lhb/1964042>

OSAKA, H., & MOCHIZUKI, S. Streamwise vortical structure associated with the bursting phenomenon in the turbulent boundary layer over a d-type rough surface at a low Reynolds number. **Trans. Japan Soc. Mech. Eng.(Ser. B)**, 53(486), 371-379, 1987.

PAN, F.; PEI, J.; ZHANG, G.; WEN, Y.; ZHANG, J.; & LI, R. Building the cooling roads with high thermal conductivity pavements to relieve urban heat island effect. **Construction & Building Materials**, 346, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128276>

PEARLMUTTER, D., KRÜGER, E. L., & BERLINER, P. The role of evaporation in the energy balance of an open-air scaled urban surface. **International Journal of Climatology**, 29(6), 911-920, 2009. <https://doi.org/10.1002/joc.1752>

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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.03.017>

POMERANTZ, M. **Paving materials for heat island mitigation**. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1997.

POMERANTZ, M.; AKBARI, H.; HARVEY J. **Cooler reflective pavements give benefits beyond energy savings: durability and illumination**. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

QAID, A., & OSSEN, D. R. Effect of asymmetrical street aspect ratios on microclimates in hot, humid regions. **International journal of biometeorology**, 59, 657-677, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0878-5>

QAID, A., LAMIT, H. B., OSSEN, D. R., & SHAHMINAN, R. N. R. Urban heat island and thermal comfort conditions at micro-climate scale in a tropical planned city. **Energy and Buildings**, 133, 577-595, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.006>

QIN, Y. Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements. **Energy and Buildings**. n.96, p.86–94, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.005>

QIN, Y.; LIANG, J.; TA, K.; LI, F. Experimental Study the Albedo of Urban Canyon Prototype with Reflective Pavements (Atreets). **Advances in Geoscience**, v.3, n.1, p. 1-9, 2019.

QIN, Y.; ZHAO, Y.; CHEN, X.; WANG, L.; LI, F.; BAO, T. Moist curing increases the solar reflectance of concrete. **Construction & Building Materials**, 215, 114-118, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.164>

RAFAILIDIS, S. Influence of Building Areal Density and Roof Shape on the Wind Characteristics Above a Town. **Boundary-Layer Meteorology**, 85. 255–271, 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1000426316328>

RAHMAN, M. A., DERVISHI, V., MOSER-REISCHL, A., LUDWIG, F., PRETZSCH, H., RÖTZER, T., & PAULEIT, S. Comparative analysis of shade and underlying surfaces on cooling effect. **Urban Forestry and Urban Greening**, 63, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127223>

RIBEIRO, A.P., BOLLMANN, H.A., DE OLIVEIRA, A. The role of tree landscape to reduce effects of urban heat islands: a study in two Brazilian cities. **Trees** 37, 17–30, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02230-8>

RÍSPOLI, I. A. G.; MONTAUTE, M. G.; CASSUCI, J. L. F. Equacionamento simplificado para a estimativa da irradiação solar média anual em plano inclinado junto ao dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água no Brasil. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 19, 2015.

ROSSI, F.; CASTELLANI, B.; PRESCIUTTI, A.; *et al.* Experimental evaluation of urban heat island mitigation potential of retro-reflective pavement in urban canyons. **Energy and Buildings**, v.126, pp.340–352, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.036>

- ROSSO, F.; GOLASI, I.; CASTALDO, V. L.; et al. On the impact of innovative materials on outdoor thermal comfort of pedestrians in historical urban canyons. **Renewable Energy**, v.118, pp.825–839, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.074>
- SALATA, F., GOLASI, I., DE LIETO VOLLARO, R., & DE LIETO VOLLARO, A. Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. **Sustainable Cities and Society**, 26, 318-343, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.07.005>
- SALVATI, A., KOLOKOTRONI, M., KOTOPOULEAS, A., WATKINS, R., GIRIDHARAN, R., & NIKOLOPOULOU, M. Impact of reflective materials on urban canyon albedo, outdoor and indoor microclimates. **Building and Environment**, 207, 108459, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108459>
- SANJUÁN, M.; MORALES, A.; ZARAGOZA, A. Precast Concrete Pavements of High Albedo to Achieve the Net “Zero-Emissions” Commitments. **Applied Sciences**, 12(4), 1955, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12041955>
- 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. <https://doi.org/10.1080/14733315.2012.11683966>
- SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTSA, D. (Org). **Urban climate mitigation techniques**. New York: Routledge, 2016.
- SATO, A., MICHIOKA, T., & TAKIMOTO, H. Field experiments of flow and dispersion within a street canyon in outdoor urban scale model. **International Journal of Environment and Pollution**, 47(1-4), 184-192, 2011. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2011.047334>
- SHI, X. **Controlling thermal properties of asphalt concrete and their effects on pavement surface temperature**. Texas A&M University. Tese de Doutorado. 2015. <https://hdl.handle.net/1969.1/153498>
- SHI, X.; REW, Y.; IVERS, E.; SHON, C. S.; STENGER, E. M.; PARK, P. Effects of thermally modified asphalt concrete on pavement temperature. **International journal of pavement engineering**, v. 20, n. 6, p. 669-681, 2019. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1326234>
- SHISHEGAR, N. Street Design and Urban Microclimate: Analyzing the Effects of Street Geometry and Orientation on Airflow and Solar Access in Urban Canyons. **Journal of Clean Energy Technology**, 1, 52–56, 2013.
- SYNNEFA, A.; KARLESSI, T.; GAITANI, N.; SANTAMOURIS, M.; ASSIMAKOPOULOS, D.; PAPAKATSIKAS, C. Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. **Building and Environment**, 46(1), 38-44, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.014>

SOSA, M. B., CORREA, E. N., & CANTÓN, M. A. Neighborhood designs for low-density social housing energy efficiency: Case study of an arid city in Argentina. **Energy and Buildings**, 168, 137-146, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.006>

SPRONKEN-SMITH, R.A., OKE, T.R. Scale Modelling of Nocturnal Cooling in Urban Parks. **Boundary-Layer Meteorology** 93, 287–312, 1999. <https://doi.org/10.1023/A:1002001408973>

STEWART, I. D., & OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 93(12), 1879-1900, 2012. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

TAKIMOTO, H., SATO, A., BARLOW, J. F., MORIWAKI, R., INAGAKI, A., ONOMURA, S., & KANDA, M. Particle image velocimetry measurements of turbulent flow within outdoor and indoor urban Scale Models and flushing Motions in urban canopy Layers. **Boundary-Layer Meteorology**, 140(2), 295-314, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10546-011-9612-6>

TALEGHANI, M. The impact of increasing urban surface albedo on outdoor summer thermal comfort within a university campus. **Urban Climate**, v.24, pp.175–184, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.03.001>

TAMMINGA, K.; CORTESÃO, J. A. G.; BAKX, M. Convivial Greenstreets: A Concept for Climate-Responsive Urban Design. **Sustainability**, 12 (3790), 2020. <https://doi.org/10.3390/su12093790>

THEURER, W., BAECHLIN, W., & PLATE, E. J. Model study of the development of boundary layers above urban areas. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 41(1-3), 437-448, 1992. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90443-E](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90443-E)

TSOKA, S., TSIKALOUDAKI, A., & THEODOSIOU, T. Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. **Sustainable cities and society**, 43, 55-76, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>

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, p. 108251, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108251>

WANG, H., YI, H., PENG, J., WANG, G., LIU, Y., JIANG, H., & LIU, W. Deterministic and probabilistic forecasting of photovoltaic power based on deep convolutional neural network. **Energy conversion and management**, 153, 409-422, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108069>

WANG, Y., & AKBARI, H. Analysis of urban heat island phenomenon and mitigation solutions evaluation for Montreal. **Sustainable Cities and Society**, 26, 438-446, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.015>

WEDDING, J. B., LOMBARDI, D. J., & CERMAK, J. E. A wind tunnel study of gaseous pollutants in city street canyons. **Journal of the air pollution control association**, 27(6), 557-566, 1977. <https://doi.org/10.1080/00022470.1977.10470456>

WU, Y.; WANG, J. Y.; MONTEIRO, P. J.; ZHANG, M. H. Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings. **Construction and Building Materials**, v. 87, p. 100-112, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.004>

XIE, N.; LI, H.; ABDELHADY, A.; HARVEY, J. Laboratorial investigation on optical and thermal properties of cool pavement nano-coatings for urban heat island mitigation. **Building and Environment**, 147, 231-240, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.017>

YANG, H.; YANG, K.; MIAO, Y.; WANG, L.; YE, C. Comparison of Potential Contribution of Typical Pavement Materials to Heat Island Effect. **Sustainability**, 12(11), 4752, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12114752>

ZHENG, X., HU, W., LUO, S., ZHU, Z., BAI, Y., WANG, W., & PAN, L. Effects of vertical greenery systems on the spatiotemporal thermal environment in street canyons with different aspect ratios: A scaled experiment study. **Science of the Total Environment**, 859, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160408>

ZHOU, B., KAPLAN, S., PEETERS, A., KLOOG, I., & ERELL, E. "Surface," "satellite" or "simulation": Mapping intra-urban microclimate variability in a desert city. **International Journal of Climatology**, 40(6), 3099-3117, 2020. <https://doi.org/10.1002/joc.6385>

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. <https://doi.org/10.1007/s42114-019-00104-9>

Capítulo 3.

Pavimento e Conforto

Térmico

Este capítulo tem por objetivo analisar a relação entre a alteração de pavimentos urbanos na resposta ao *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) em diferentes contextos climáticos brasileiros. O estudo foi realizado durante a estação do verão por meio de um modelo de simulação no ENVI-met. Inicialmente, uma área representativa foi escolhida como referência, e, sobre ela, foram modelados dois cenários: um com pavimento asfáltico na coloração preta e outro com pavimento intertravado de concreto cinza claro. Sob as mesmas condições, esses cenários foram simulados em 10 zonas bioclimáticas para identificar as maiores diferenças entre o UTCI sobre as áreas pavimentadas.

3.1. Contextualização

Uma das questões fundamentais da biometeorologia humana, apontada por Jendritzky *et al.* (2002) é a avaliação do ambiente atmosférico de forma útil e significativa do ponto de vista termofisiológico. Devido ao fato de a temperatura do ar não ser a única variável relevante, mais de 100 índices térmicos simples foram desenvolvidos nos últimos 150 anos para descrever as complexas condições de troca de calor entre o corpo humano e seu ambiente térmico, conforme apontadas ao longo das últimas décadas por Fanger (1970), Landsberg (1972), Givoni (1976) e Driscoll (1992).

A fim de considerar a complexidade do saldo energético e as trocas de calor, novos modelos surgem e possuem os atributos essenciais para serem utilizados operacionalmente. O *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) emerge com uma ampla gama de aplicações, em vários domínios, demonstrando sua utilidade na avaliação do conforto térmico externo, no planejamento urbano e nas avaliações bioclimáticas. Estudos destacam a importância da vegetação em temperaturas extremas, mostrando como ela pode proporcionar microclimas mais favoráveis (DJAGHROURIL *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2021), bem como a relevância da geometria urbana na modificação das condições microclimáticas, especialmente em climas quentes de verão, sublinhando o papel crucial dos métodos de desenho urbano na melhoria do conforto térmico (SEDIRA e MAZOUZ, 2023; AL-HUMAIRI *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2017).

Embora o UTCI seja uma ferramenta versátil e de ampla aplicação, há fatores associados ao seu uso que devem ser cuidadosamente considerados. Entre as principais dificuldades está a determinação da temperatura radiante média, a qual faz parte do procedimento de cálculo do índice. Esses desafios podem resultar em imprecisões ou, até mesmo, equívocos na sua utilização (BŁAŻEJCZYK e KUCHCIK, 2021).

Por isso, de acordo com o COST Action 730 (2012), o UTCI considera como referência de cálculo, os seguintes parâmetros de exposição do pedestre ao ambiente urbano:

- Velocidade do vento: 0,5 m/s a 10 metros de altura (aproximadamente 0,3 m/s a 1,1 metros);
- A temperatura radiante média (TRM) é igual à temperatura do ar;
- A atividade (M) de uma pessoa que se move a uma velocidade de 4 km/h. Isso equivale a uma taxa de metabolismo de 135 W/m²;

O UTCI é amplamente empregado em estudos relacionados ao bioclima urbano, em pesquisas sobre o impacto do clima na saúde humana, em previsões biometeorológicas, no planejamento de atividades de turismo e análises de mudanças climáticas (BŁAŻEJCZYK e KUCHCIK, 2021; KRÜGER, 2021; LOPES *et al.*, 2013, NOURI e MATZARAKIS, 2021). Além disso, é um método muito aplicado para avaliar o conforto térmico humano em ambientes urbanos (VATANI *et al.*, 2016; BRÖDE *et al.*, 2013; KUZMANOVIĆ *et al.*, 2023; PETRALLI *et al.*, 2020, SILVA *et al.*, 2024).

A temperatura UTCI, para uma determinada combinação de vento, radiação, umidade e temperatura do ar, é definida como a temperatura do ar na condição padrão desses elementos meteorológicos para os quais o índice é calculado. De acordo com a Ação COST 730, a percepção do UTCI usa a escala apresentada na Tabela 3.0.

Tabela 3.0. Temperatura equivalente UTCI categorizada por stress térmico.

UTCI (°C)	Classificação de Stress
Superior a +46	Stress por calor extremo
+38 a +46	Stress por calor muito intenso
+32 a +38	Stress por calor intenso
+26 a +32	Stress por calor moderado
+9 a +26	Sem stress térmico
0 a +9	Stress por frio leve
0 a -13	Stress por frio moderado
+13 a -27	Stress por frio intenso
-27 a -40	Stress por frio muito intenso
Abaixo de -40	Stress por frio extremo

Fonte: adaptado de IPMA (2024).

Embora seu foco principal seja avaliar o nível de exposição ao stress térmico do pedestre, estudos demonstraram diferenças notáveis nos valores de UTCI devido à alteração de elementos do tecido urbano. Fatores como radiação solar, sombreamento e arborização afetam as características térmicas dos materiais de pavimentação (PETRALLI *et al.*, 2020), os quais podem afetar as condições de conforto e saúde humana nas cidades.

O desempenho do pavimento urbano é crucial para determinar as condições de exposição dos cidadãos a possíveis situações de stress térmico. Neste sentido, a incorporação dos dados de temperatura do ar, da umidade, do vento e da radiação nos cálculos do UTCI ressaltam a importância das variáveis ambientais sobre o conforto e o bem-estar humano. Assim, é possível investigar as relações entre as variações do UTCI e o desempenho dos pavimentos. Como resultado da compreensão destas relações, é possível incorporar estratégias de melhoria do planejamento urbano usando a infraestrutura como fator de mitigação dos efeitos maléficos do calor urbano nos pedestres.

A capacidade dos pavimentos urbanos, sobretudo os frios, e das infraestruturas verdes de aliviar as ilhas de calor urbanas (ICUs) e o stress térmico também é amplamente investigada no mundo. Del Serrone *et al.* (2022) e Peluso *et al.* (2022) descobriram que a combinação de pavimentos reflexivos com vegetação leva a uma redução substancial das temperaturas do ar e da superfície, bem como da temperatura radiante média. Conseqüentemente, isso aumenta o conforto térmico humano. Shao e Kim (2022) corroboram essas descobertas, enfatizando as inúmeras vantagens da infraestrutura verde na mitigação das ICUs.

Kousis e Pisello (2023) destacam a necessidade de mais investigações sobre a eficácia dos pavimentos reflexivos em ambientes externos e o estabelecimento de critérios de monitoramento adequados. Assim, para entender a relação entre o impacto da infraestrutura rodoviária no índice UTCI, este capítulo tem como objetivo analisar as relações entre variação do albedo de pavimentos no *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) em dez zonas bioclimáticas brasileiras durante as condições de verão.

3.2. Aplicação III - Índice UTCI e o Albedo de Pavimentos Urbanos

3.2.1. Materiais e Métodos

Este é um trabalho experimental baseado em modelos de simulação numérica e está dividido principalmente em três etapas, como segue:

- Modelagem computacional usando o software ENVI-met de áreas urbanas genéricas;
- Cálculo do índice UTCI sobre condições de verão em dez cidades brasileiras situadas em diferentes regiões climáticas;
- Análise comparativa do em diferentes materiais (asfalto e concreto) de pavimentação e contextos climáticos.

As cidades estudadas inicialmente foram selecionadas com base em suas características climáticas, usando o Método de Zoneamento Climático de Walsh, Cóstola,

Labaki (2023) e arquivos climáticos do banco de dados Climate One Building (2023) para 10 zonas brasileiras diferentes. Os arquivos climáticos foram criados usando dados climatológicos normais de estações automáticas do INMET localizadas dentro do perímetro da cidade. Os modelos de simulação foram criados para as cidades mais populosas de cada zona, conforme mostrado na Tabela 3.1.

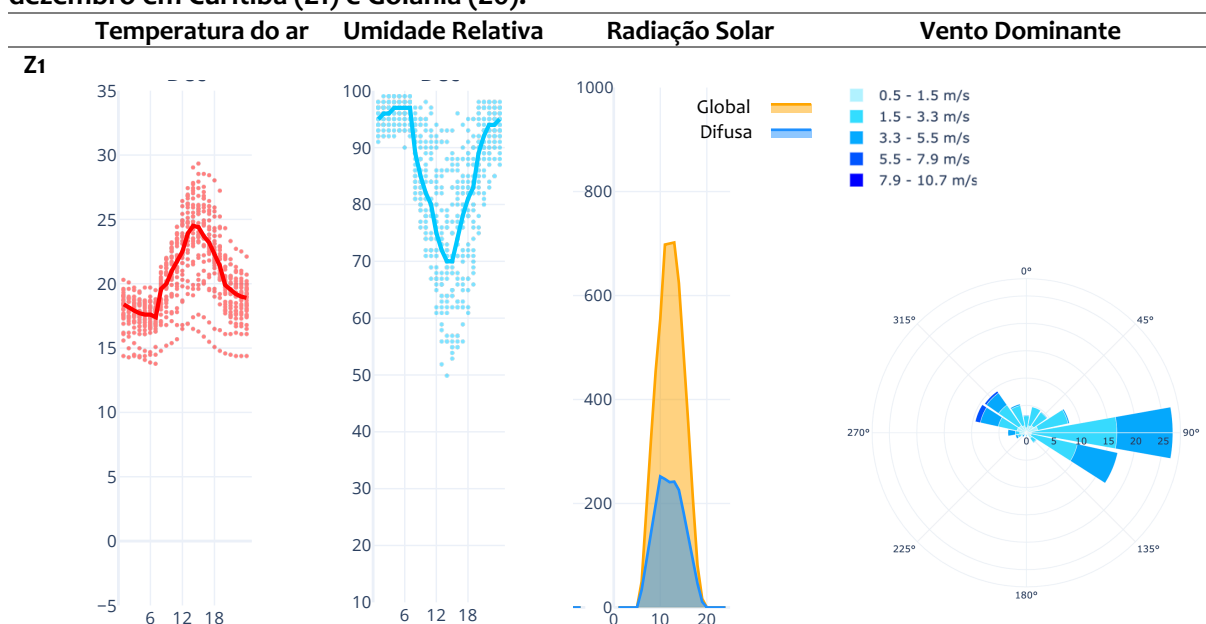
Tabela 3.1. Atributos das cidades de estudo.

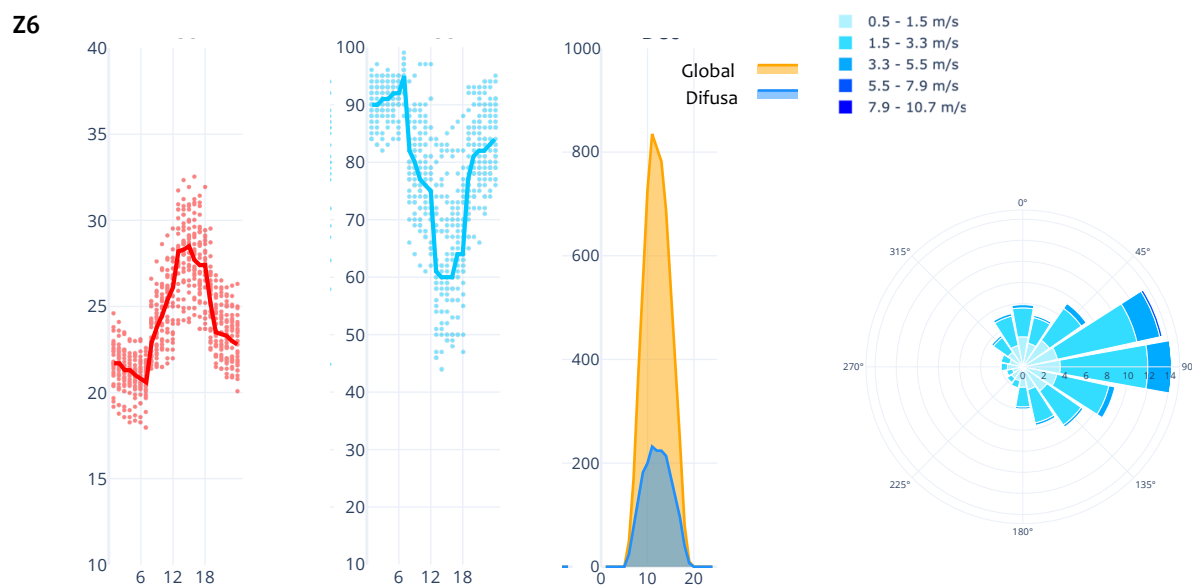
Zona	Latit.	Longit.	Cidade	UF	Região	Contexto Climático	Classific. Köppen-Geiger
Z1	-25,43	-49,27	Curitiba	PR	Sul	Frio e úmido	Cfb
Z2	-30,03	-51,23	Porto Alegre	RS	Sul	Quente e frio	Cfa e Cfb
Z3	-23,56	-46,60	São Paulo	SP	Sudeste	Transição	Cfa e Cwa
Z4	-19,93	-43,94	Belo Horizonte	MG	Sudeste	Quente e seco	Aw e Cfa
Z5	-22,91	-43,20	Rio de Janeiro	RJ	Sudeste	Quente e úmido	A
Z6	-16,68	-49,26	Goiânia	GO	Centro-oeste	Quente e seco	A
Z7	-12,97	-38,51	Salvador	BA	Nordeste	Quente e úmido	Am
Z8	-9,4	-40,51	Petrolina	PE	Nordeste	Quente e seco	BSh
Z9	-1,46	-48,50	Belém	PA	Norte	Quente e úmido	Am
Z10	-5,09	-42,80	Teresina	PI	Nordeste	Quente e seco	As

Fonte: adaptado de Walsh, Cóstola, Labaki (2023) e IBGE (2023).

Na caracterização dos arquivos climáticos utilizados nas simulações do ENVI-Met, das cidades de Curitiba e Goiânia, estão indicados os valores médios de temperatura, umidade, radiação e vento dominante do mês de dezembro, conforme apresentado na Figura 3.0.

Figura 3.0. Temperatura do ar, umidade relativa, radiação e direção do vento no mês de dezembro em Curitiba (Z1) e Goiânia (Z6).





Fonte: adaptado de CBE Berkeley (2024).

Na Tabela 3.2 estão apresentadas algumas características dos arquivos climáticos em EPW utilizados na simulação numérica de cada zona.

Tabela 3.2. Características dos arquivos climáticos de Curitiba (Z1) e Goiânia (Z6)

Parâmetro	Curitiba - PR	Goiânia - GO
Zona	Z1	Z6
Nome do arquivo	BRA_PR_Curitiba.869330_TMYx.2007-2021.epw	BRA_GO_Goiania.867340_TMYx.2007-2021.epw
Latitude	-25,449	-16,667
Longitude	-49,23	-49,25
Altitude	925,0	771,5
Temperatura Média Anual	18,1°C	24,1°C
Temperatura Máxima Anual	29,°C	34,2°C
Temperatura Mínima Anual	7,4°C	14,2°C
Radiação Solar Horizontal Acumulada Anual	1578,68 kWh/m ²	1998,22 kWh/m ²

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de CBE Berkeley (2024).

a. Modelagem Computacional Utilizando ENVI-met

Uma área representativa localizada em Campinas, São Paulo, Brasil, nas coordenadas geográficas 22.83891 S; 47.03152 W foi modelada com edifícios de 10 metros de altura e 8 metros de largura, possuindo uma área de 30% de pavimento asfáltico. Todas as simulações térmicas foram realizadas utilizando essa mesma área nos 10 contextos climáticos utilizando o software ENVI-met v.5.5.1. O mesmo recorte urbano, o qual é baseado em uma geometria genérica de uma área de Campinas, foi usado para ser reproduzido e simulado nos diferentes contextos climáticos. A Figura 3.1 apresenta os limites da simulação com um polígono vermelho, a área modelada e a posição dos pontos de interesse.

Figura 3.1. Área de estudo para simulação no ENVI-Met.



Fonte: o Autor (2024).

Os pontos de interesse – R1 ao R7 – foram posicionados em vias com orientação Norte-Sul e Leste-Oeste, com o objetivo de avaliar a variação do UTCI com a mudança do albedo e material dos pavimentos. Associado a isso, avaliar a resposta térmica do pavimento em função do sombreamento dos edifícios sobre a via, assim como a influência de ventos paralelos ou perpendiculares à seção do cânion urbano.

Com o objetivo de considerar o efeito da rugosidade no microclima, os pontos de interesse analisados foram posicionados no interior da malha, em vias em que o vento incide perpendicular e paralelamente ao cânion. O entendimento é que em vias onde o vento é paralelo, há uma maior dissipação do calor e em vias em que ele é perpendicular do topo do edifício, há uma maior dificuldade em dissipar o calor do interior do cânion. Sendo assim, há dois cenários de análise traçados para discussão.

O modelo criado no *software* ENVI-met teve como proposta a identificação da interação e da transferência de calor entre as superfícies urbanas e a atmosfera, utilizando um conjunto de dados meteorológicos. Os dados de verão foram usados como referência para essa simulação devido à maior frequência de dias com céu claro e condições climáticas extremas de calor. Os principais parâmetros de entrada para o modelo de simulação estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Parâmetros de entrada no modelo de simulação numérica.

Parâmetro	Valor
Dia de início da simulação	07 de Dezembro, 2020
Hora de início da simulação	6 am
Tempo total de simulação em horas (h)	48
Albedo das paredes e telhados dos edifícios (-)	0,7690 ± 0,0267
Emissividade do solo [Solo argiloso] (-)	0,90
Albedo do pavimento asfáltico (-)	0,0918
Albedo do pavimento intertravado de concreto cinza claro (-)	0,2440
Espessura da camada de revestimento do asfalto (cm)	5,0
Espessura da camada de revestimento do pavimento de concreto (cm)	8,0
Espessura da camada de base do pavimento asfáltico (cm)	15,0
Espessura da camada de base do pavimento de concreto (cm)	5,0

Grid [x; y; z]	[50; 50; 40]
dx; dy, dz (m)	[7,50; 7,50; 7,50]
Altura de início do fator telescópico (m)	[10,0]
dx; dy, dz (m)	[6,66; 6,66; 3,00]

Fonte: o Autor (2024).

O dia 08 de dezembro foi tomado como referência por ser um dia com kt superior a 0,7 e vento inferior a 2 m/s, além de ter passado pelo menos 24 horas da simulação no ENVI-Met. As propriedades geométricas do modelo urbano foram derivadas de imagens de satélite, e as dimensões das camadas do pavimento asfáltico foram coletadas em campo. A área estudada consiste em pavimentos asfálticos com uma espessura de camada superficial de 5 cm e uma espessura de camada de base de 15 cm. As espessuras da camada de pavimento intertravado de concreto, que seria uma das medidas de mitigação propostas neste documento, mas que não está de fato em vigor, foram obtidas a partir de dimensões comerciais: camada superior de 8 cm e camada de base de 5 cm. Na Tabela 3.4 estão apresentadas as propriedades térmicas, geométricas e ópticas das superfícies.

Tabela 3.4. Parâmetros dos pavimentos: propriedades geométricas, térmicas e ópticas.

	Concreto – Cinza claro	Asfalto - Preto
Espessura (m)	0,08	0,05
Densidade (kg/m^3)	2706,42	2300,00
Condutividade térmica (W/mK)	1,75	1,15
Calor específico (kJ/kgK)	0,98	0,92
Capacidade térmica (kJ/m^2K)	213,63	105,80
Albedo	0,24	0,09
SRI (%) – Vento fraco (0-2 m/s)	22,70	4,60

Fonte: o Autor (2024).

b. Aplicação do Índice UTCI

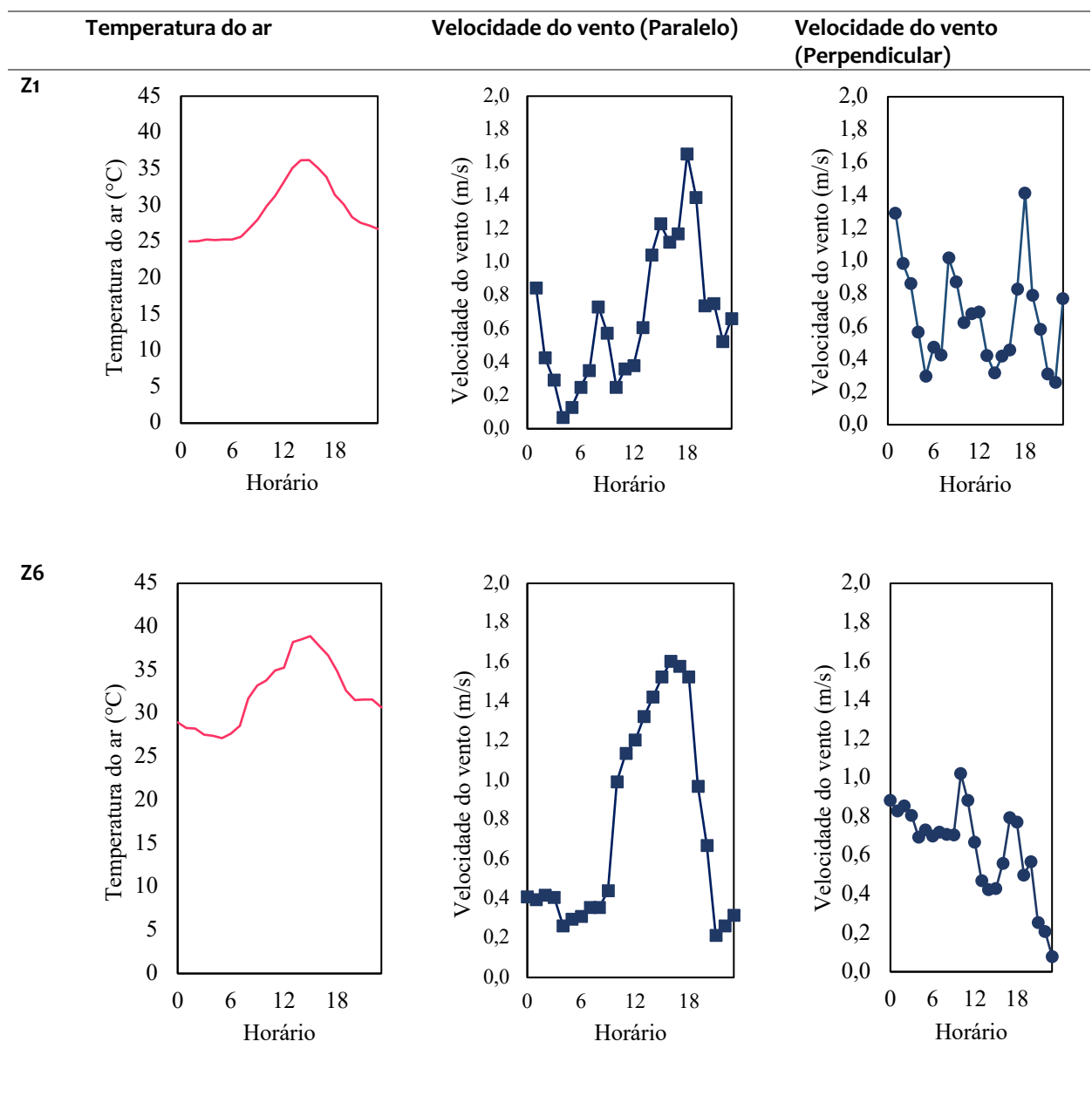
O índice UTCI foi calculado usando a função BIO-met do software ENVI-met, levando em consideração variáveis como temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa e velocidade do vento a 10 metros de altura. Os resultados foram analisados ao longo do dia para determinar a hora em que ocorrem os pontos extremos de UTCI.

Após processar previamente as dez regiões do país, selecionamos duas áreas principais: Curitiba (Z1), uma zona fria e úmida localizada no sul do Brasil (classificação de Köppen-Geiger como Cfb), e Goiânia (Z6), uma área quente e seca localizada na região Centro-Oeste (classificação Aw). A proposta é relatar e avaliar mais detalhadamente as principais influências do pavimento urbano, sob diferentes condições climáticas e geométricas urbanas na variação de UTCI. As zonas Z1 e Z6 foram selecionadas por apresentarem características de temperatura e umidade opostas (quente/seca e fria/úmida). Os resultados de ventilação, temperatura do ar e UTCI das demais zonas estão apresentadas na seção de apêndices e os efeitos em outras áreas são semelhantes.

3.2.2. Resultados e Discussões

Os resultados foram avaliados considerando a relação entre o aumento do albedo dos pavimentos, a orientação das vias (norte-sul ou leste-oeste), a incidência do vento sobre a seção do cânion urbano (paralelas ou perpendiculares) e a resposta do UTCI. Para caracterizar as condições atmosféricas, a temperatura do ar e a velocidade do vento em ruas perpendiculares e paralelas na Zona 1 (Z1) e na Zona 6 (Z6) no dia 8 de dezembro, a 1,5 metros de altura, durante o verão do hemisfério sul, são apresentadas na Figura 3.2.

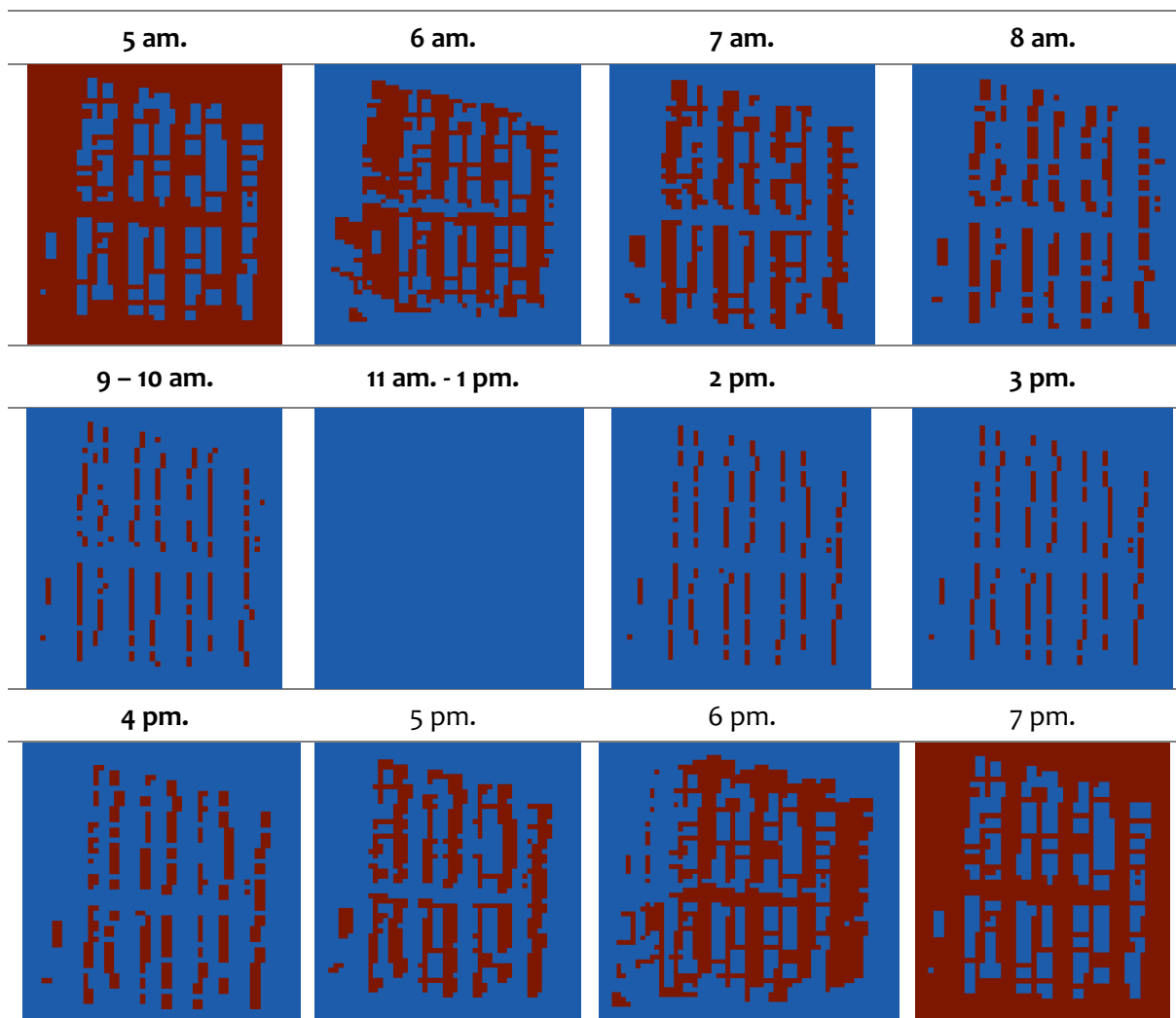
Figura 3.2. Temperatura do ar, velocidade do vento em vias com ventos perpendiculares e paralelos à seção do cânion – Zona 1 e Zona 6.



Fonte: o Autor (2024).

Na Figura 3.3 estão apresentados os padrões de sombreamento das vias, em função do horário neste período do ano. O padrão de sombra de ambas as cidades não apresenta diferenças significativas, considerando a escala do bairro.

Figura 3.3. Sombreamento dos pavimentos em função do horário.



Fonte: o Autor (2024).

É provável que o sombreamento também contribua para a análise dos resultados. Por isso, na Tabela 3.5 estão apresentados os horários de sombreamento dos pontos de interesse em função da orientação das vias.

Tabela 3.5. Características do ponto de posicionamento dos pontos de interesse.

Pontos	Vento	Orientação da via	Sombreamento	Horas de Sombra
R1	Paralelo	Leste-Oeste	6 pm. – 7 pm.	1 h
R2	Paralelo	Leste-Oeste	6 pm. – 7 pm.	1 h
R3	Paralelo	Leste-Oeste	6 pm. – 7 pm.	1 h
R4	Perpendicular	Norte-Sul	6 am. – 10 am. e 2 pm. – 7 pm.	9 h
R5	Perpendicular	Norte-Sul	6 am. – 10 am. e 2 pm. – 7 pm.	9 h
R6	Perpendicular	Norte-Sul	6 am. – 10 am. e 2 pm. – 7 pm.	9 h
R7	Perpendicular	Norte-Sul	6 am. – 10 am. e 2 pm. – 7 pm.	9 h

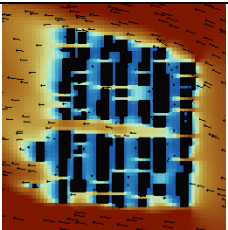
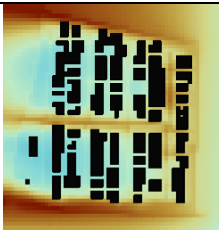
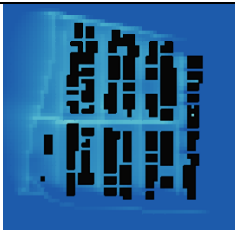
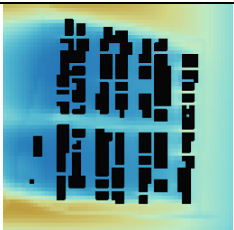
Fonte: o Autor (2024).

Para ambas as zonas, apesar de apresentar diferentes declinações magnéticas e por consequência, diferentes níveis de exposição solar, não foi identificada diferença significativa no comprimento da sombra ao avaliar a variação horária nesta época do ano. Por isso, o que pode-se notar, é que:

- Vias Leste-Oeste não são sombreadas. Além disso, apresentam vento paralelo à seção do cânion. Ou seja, neste cenário há uma elevada exposição à radiação de onda curta ao longo do dia e por consequência um maior acúmulo de calor por parte do pavimento.
- Vias Norte-Sul possuem 3 horas com pavimento totalmente sombreado e 6 horas de sombreado parcial. Além disso, apresentam vento perpendicular. Portanto, neste cenário há uma menor exposição à radiação de onda curta.
- Pavimento asfáltico possui menor inércia térmica (105,80 kJ/m²K) em relação ao pavimento intertravado de concreto (213,63 kJ/m²K), em função das camadas que compõem a estrutura da via. Ou seja, tende a liberar calor mais rapidamente.
- Pavimento intertravado de concreto cinza possui maior albedo (0,24) em relação ao pavimento asfáltico (0,09). Ou seja, possui uma maior capacidade de reflexão de onda longa.

Os registros com as máximas temperaturas do ar sobre os pavimentos em concreto e asfalto, ao nível do pedestre (1,5 m de altura) das zonas 1 e 6 estão apresentados no Quadro 3.1 e Quadro 3.2, respectivamente.

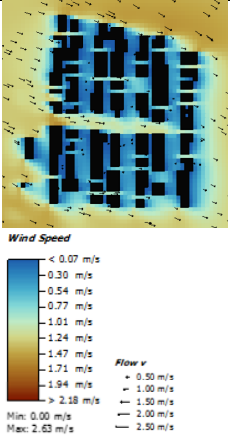
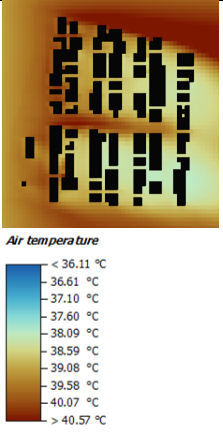
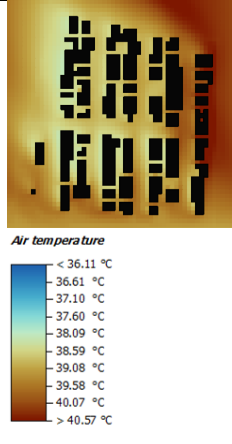
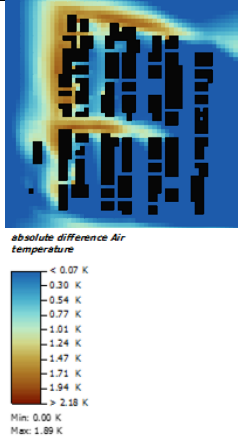
Quadro 3.1. Horário com máximos registros de temperatura do ar sobre os pavimentos em asfalto e concreto – Zona 1 (Z1).

Zona	Horário	Velocidade do Vento	Temperatura do Ar – Asfalto	Temperatura do Ar – Concreto	Diferença de Temperatura do Ar (Asfalto – Concreto)
Z1	2 p.m	 <p>Wind Speed</p> <p>< 0.07 m/s 0.30 m/s 0.54 m/s 0.77 m/s 1.01 m/s 1.24 m/s 1.47 m/s 1.71 m/s 1.94 m/s > 2.18 m/s</p> <p>Flow v</p> <p>0.50 m/s 1.00 m/s 1.50 m/s 2.00 m/s 2.50 m/s</p> <p>Min: 0.00 m/s Max: 2.63 m/s</p>	 <p>Air temperature</p> <p>< 26.48 °C 26.63 °C 26.78 °C 26.93 °C 27.08 °C 27.23 °C 27.38 °C 27.52 °C 27.67 °C > 27.82 °C</p> <p>Min: 26.48 °C Max: 28.02 °C</p>	 <p>Air temperature</p> <p>< 26.48 °C 26.63 °C 26.78 °C 26.93 °C 27.08 °C 27.22 °C 27.37 °C 27.52 °C 27.67 °C > 27.82 °C</p> <p>Min: 26.05 °C Max: 26.89 °C</p>	 <p>absolute difference Air temperature</p> <p>< 0.07 K 0.30 K 0.54 K 0.77 K 1.01 K 1.24 K 1.47 K 1.71 K 1.94 K > 2.18 K</p> <p>Min: 0.00 K Max: 1.89 K</p>

Fonte: o Autor (2024).

Na Zona 1 (fria e úmida), percebe-se que as maiores diferenças de temperatura do ar ocorrem na via com orientação leste-oeste, ou seja, a via que não é sombreada. Sendo que, a temperatura do ar sobre o pavimento em asfalto foi superior a 1K, em relação ao concreto. Ao mesmo tempo, sobre essa mesma via, a velocidade do vento é inferior a 2 m/s.

Quadro 3.2. Horário com máximos registros de temperatura do ar sobre os pavimentos em asfalto e concreto – Zona 6 (Z6).

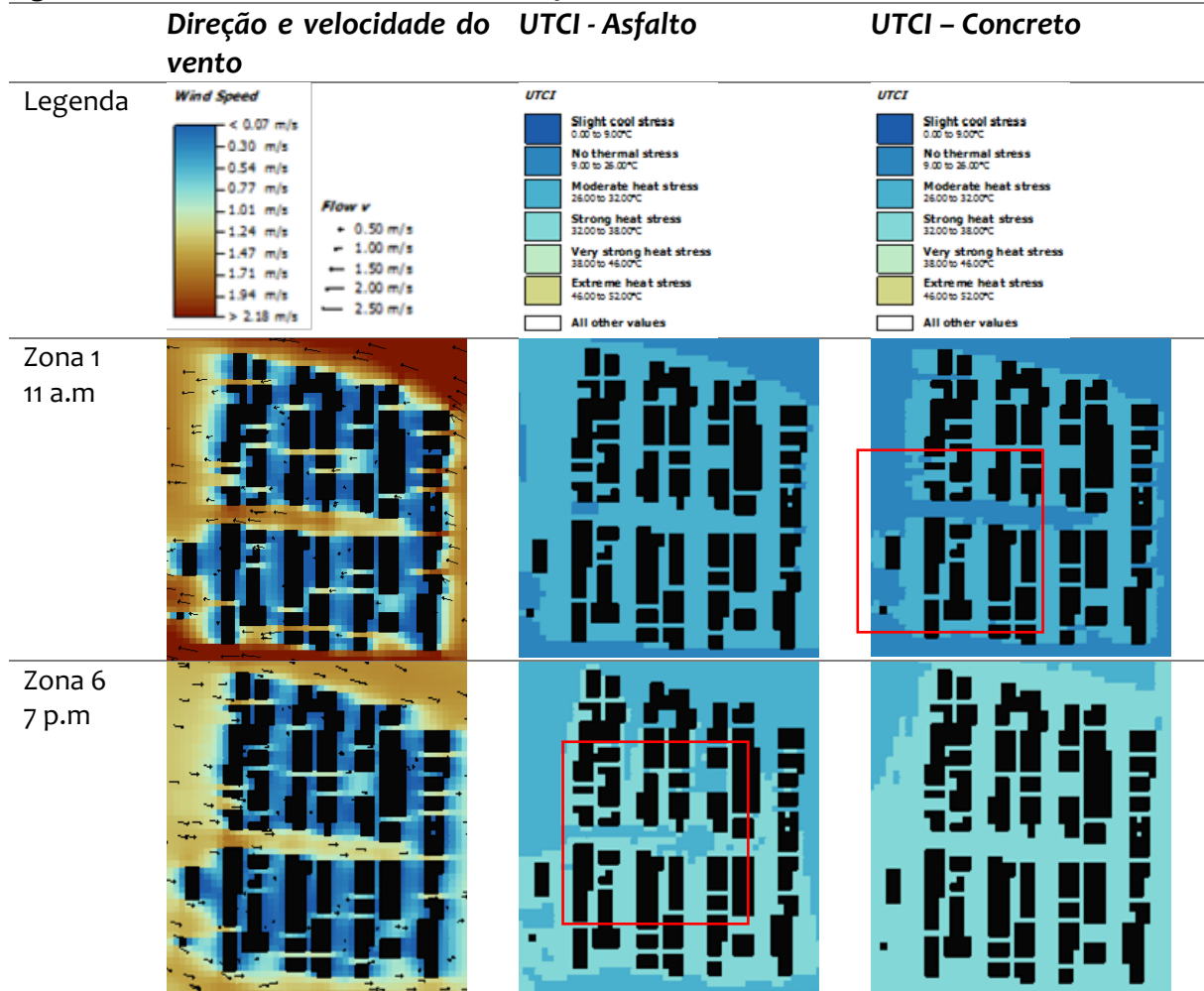
Zona	Horário	Velocidade do Vento	Temperatura do Ar – Asfalto	Temperatura do Ar – Concreto	Diferença de Temperatura do Ar (Asfalto – Concreto)
Z6	2 p.m	 <p>Wind Speed</p> <p> < 0.07 m/s 0.30 m/s 0.54 m/s 0.77 m/s 1.01 m/s 1.24 m/s 1.47 m/s 1.71 m/s 1.94 m/s > 2.18 m/s Min: 0.00 m/s Max: 2.63 m/s </p> <p>Flow v</p> <p> + 0.50 m/s - 1.00 m/s + 1.50 m/s - 2.00 m/s + 2.50 m/s </p>	 <p>Air temperature</p> <p> < 36.11 °C 36.61 °C 37.10 °C 37.60 °C 38.09 °C 38.59 °C 39.08 °C 39.58 °C 40.07 °C > 40.57 °C </p>	 <p>Air temperature</p> <p> < 36.11 °C 36.61 °C 37.10 °C 37.60 °C 38.09 °C 38.59 °C 39.08 °C 39.58 °C 40.07 °C > 40.57 °C </p>	 <p>absolute difference Air temperature</p> <p> < 0.07 K 0.30 K 0.54 K 0.77 K 1.01 K 1.24 K 1.47 K 1.71 K 1.94 K > 2.18 K Min: 0.00 K Max: 1.89 K </p>

Fonte: o Autor (2024).

Na Zona 6 (quente e seca), nota-se que as maiores diferenças de temperatura do ar, assim como na zona 1, ocorrem na via com orientação leste-oeste, ou seja, a via que não é sombreada. Além disso, a temperatura do ar sobre o pavimento em asfalto foi superior a 1,5K, em relação ao concreto. Ao mesmo tempo, sobre essa mesma via, a velocidade do vento também foi inferior a 2 m/s.

Ou seja, em ambas as zonas, sob condições não sombreadas e vento fraco (inferior a 2 m/s), na perspectiva do campo térmico, o pavimento em asfalto apresentou registros de temperatura do ar superiores em relação ao concreto. Entretanto, é imprescindível avaliar também a interação entre a superfície pavimentada e o pedestre. Por isso, a seguir são relatados e discutidos os dados de stress térmico, por meio da variação do índice UTCI. A Figura 3.4 mostra o índice UTCI sobre os pavimentos de asfalto e concreto nas zonas Z1 e Z6 e a distribuição espacial do vento. Foram selecionados dois horários para discussão (um horário próximo ao meio dia e outro próximo ao pôr-do-sol) por apresentarem as maiores variações. Nesses dois horários ocorrem dois fenômenos importantes, uma elevada intensidade de radiação de onda curta e uma elevada intensidade de emissão de onda longa, respectivamente.

Figura 3.4. Velocidade do vento, UTCI sobre pavimentos de asfalto e concreto - Z1 e Z6.

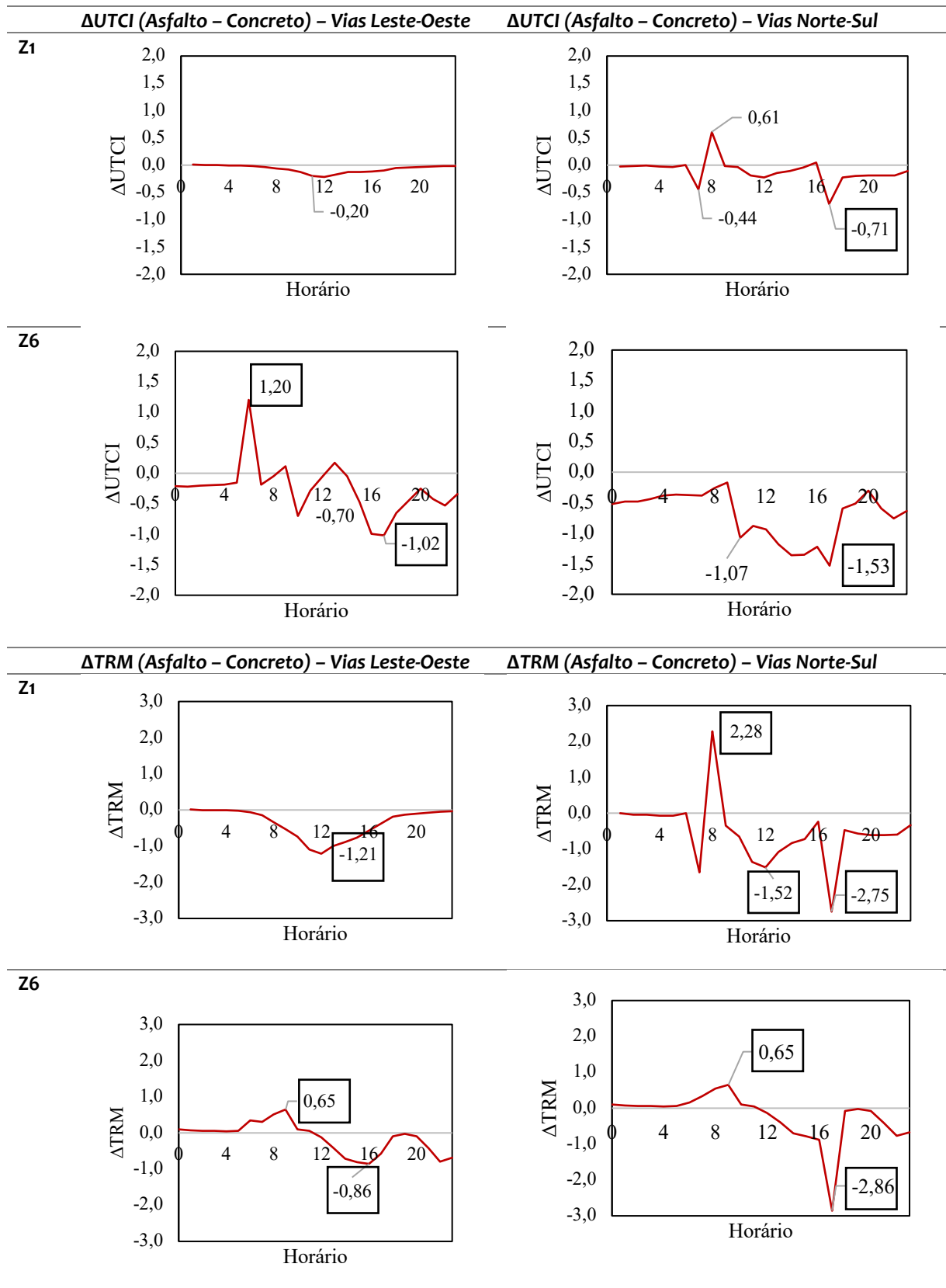


Fonte: o Autor (2024).

Com relação às faixas de stress térmico UTCI, na zona fria e úmida (Z1), pode-se observar que, por volta do meio-dia, o aumento do albedo reduziu as condições de stress térmico de Stress Térmico Forte para Stress Térmico Moderado, embora a velocidade do vento fosse baixa, aproximadamente 0,5 m/s. Ou seja, no horário com as maiores incidências de radiação de ondas longas, o pavimento intertravado de concreto provou ser uma alternativa viável, em função da sua capacidade de refletância e facilidade de dissipação do calor.

Na zona quente e seca (Z6), observa-se no final da tarde que um aumento no albedo excede as condições de stress por calor nas ruas, mesmo com ventos paralelos e com velocidades até 0,5 m/s no interior do cânion urbano. A faixa de stress sobre o pavimento asfalto. De “Stress por Calor Forte” sobre o pavimento em asfalto, pode ser observado um nível de “Stress por Calor Muito Forte” sobre o pavimento intertravado de concreto. Ou seja, nessas condições climáticas, o pavimento intertravado de concreto não foi propício para reduzir o stress térmico dos pedestres ao final da tarde, quando há maior emissão de radiação de ondas longas. A Figura 3.5 mostra as diferenças horárias de UTCI e da Temperatura Radiante Média (TRM) para pavimentos de asfalto e concreto nas duas zonas (Z1 e Z6).

Figura 3.5. Δ UTCI (Asfalto – Concreto) e Δ TRM (Asfalto – Concreto) - Vias com diferentes orientações- Zona 1 e Zona 6.



Fonte: o Autor (2024).

Os resultados da Figura 3.5 indicam que o aumento do albedo do pavimento nas ruas com orientação Leste-Oeste, nas primeiras horas do dia teve uma resposta positiva, reduzindo o UTCI em 1,2K na zona quente e seca (Z6). Como nesse horário do dia, há pouco calor acumulado, a inércia térmica não é a propriedade que mais interfere no comportamento, e sim o albedo da camada de revestimento.

No final da tarde, o UTCI sobre o pavimento intertravado de concreto era aproximadamente 1K mais alto, como também observado na Figura 3.4. Como a via Leste-Oeste não é sombreada, neste horário do dia, há maior acúmulo de calor, e em função da maior inércia térmica, por consequência emite mais onda longa. Sendo assim, afeta negativamente o UTCI.

Na zona fria e úmida (Z1) o pavimento intertravado de concreto próximo ao meio-dia apresentou na via Leste-Oeste uma redução do stress térmico, mesmo não sendo sombreada. Como as condições de exposição à radiação e ventilação foram as mesmas sobre o asfalto e o concreto, as únicas diferenças foram nas propriedades da via, ou seja, o albedo da camada de revestimento e a inércia da estrutura do pavimento.

O concreto possui um albedo 66% maior, em relação ao asfalto, o que favorece a reflexão de ondas curtas. Entretanto, apresenta uma inércia térmica 50% superior, que tende a ser um fator agravante na intensidade da emissão de onda longa próximo ao horário do pôr-do-sol, e como pôde também ser observado na zona quente e seca.

Em vias Norte-Sul, como há sombreamento durante quase todo o dia, há menor acúmulo de calor e neste caso, as maiores variações no UTCI foram de 0,6K (às 9 am.), sendo que sobre o asfalto foi identificado o maior nível de stress térmico. Ao final da tarde, a variação do UTCI foi de 0,7K, sendo o maior stress sobre o pavimento intertravado de concreto.

É importante observar que, nesse estudo de caso, em algumas circunstâncias, a diferença no UTCI foi relativamente baixa - 0,2K (como Z1 em vias Leste-Oeste). Entretanto, apesar da pequena diferença, ficou evidente que a mudança de material teve um impacto significativo na categoria de stress térmico. A substituição do asfalto por concreto alterou o UTCI de “Stress por calor muito forte” para “Stress por calor moderado”, o que indica que pode haver benefícios para a resposta térmica do pedestre.

Em contrapartida, ao substituir o asfalto por concreto no final do dia na zona 6, observamos um aumento no UTCI de aproximadamente 1,5K. E essa diferença não causou uma mudança na categoria de stress por calor (stress por calor muito forte).

Em boa parte dos cenários apresentados, com ou sem sombra, o pavimento intertravado de concreto, ao final do tarde apresentou um UTCI superior ao pavimento em asfalto, com uma variação entre 0,7 e 1,5K, especialmente nas últimas horas de sol (5 pm.), aproximadamente.

O *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) é significativamente influenciado pelo sombreamento em ambientes exteriores. A presença desses elementos de

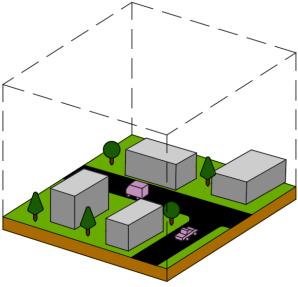
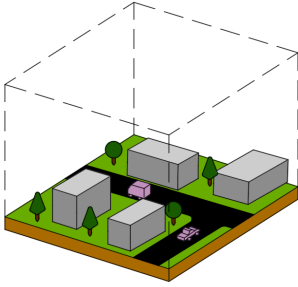
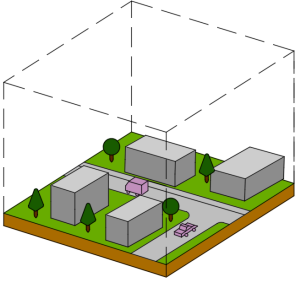
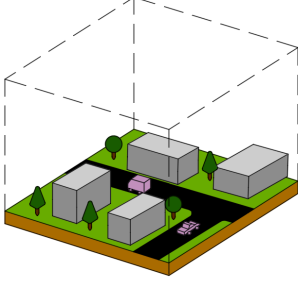
sombreamento, com as árvores, pode criar um microclima mais favorável, conduzindo a valores mais baixos de UTCI e a um melhor conforto térmico, conforme observado nos estudos de Djaghrouri *et al.* (2023) e Petrali *et al.* (2020).

Embora os materiais de elevado albedo possam atenuar os efeitos das ilhas de calor urbana, eles tendem a aumentar o desconforto. Assim, o sombreamento continua a ser um fator crucial para minimizar o UTCI e reduzir o stress térmico dos pedestres em ambientes exteriores (ERELL *et al.*, 2013; ERELL *et al.*, 2014; YANG *et al.*, 2015).

Entretanto, conforme observado neste pesquisa e também por Schrijvers *et al.* (2016), materiais com albedo elevado, reduzem a temperatura do ar, mas elevam a temperatura radiante média, ou influenciaram negativamente o Índice de Stress Térmico (ITS), conforme observado por Giordano *et al.* (2014). Desta forma, o efeito da mudança do albedo demonstra ser inferior aos efeitos do sombreamento e pode não ser uma opção viável em todos os contextos climáticos, para superfícies expostas aos pedestres.

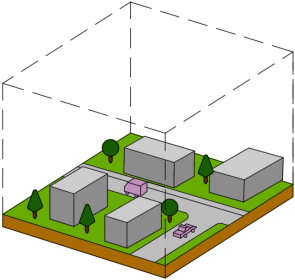
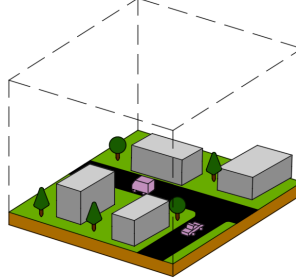

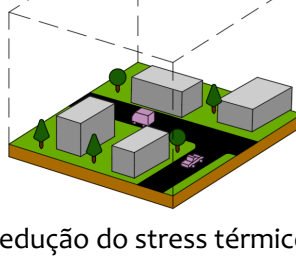
A fim de tornar acessível esta metodologia aos gestores e planejadores urbano, no Quadro 3.3 há uma proposta sintética com as melhores soluções de pavimentos na perspectiva do conforto térmico do pedestre em zona fria e úmida. E no Quadro 3.4 em zona quente e seca.

Quadro 3.3. Soluções de pavimentação para diferentes contextos do projeto de planejamento urbano – Zona Fria e Úmida. Modelo Simulado no ENVI-Met.

Critérios	Meio-Dia	Início da Noite
Menor Temperatura Radiante Média (TRM)		
Menor Desconforto Térmico (UTCI)		
Comportamento: As vias orientadas Leste-Oeste promoveram a redução do stress térmico ao meio-dia, de Forte para Moderado.		
Aplicação: Pavimento de concreto em vias de circulação de pedestres e ciclistas durante o dia foram mais confortáveis em zonas frias e úmidas.		

Fonte: o Autor (2024).

Quadro 3.4. Soluções de pavimentação para diferentes contextos do projeto de planejamento urbano – Zona Quente e Seca. Modelo Simulado no ENVI-Met.

Critérios	Até o Meio-Dia	Início da Noite
Menor Temperatura Radiante Média (TRM)		
Menor Desconforto Térmico (UTCI)		
<p>Comportamento: As vias orientadas Leste-Oeste promoveram a redução do stress térmico no início da noite sobre o pavimento em asfalto.</p>		
<p>Aplicação: Pavimentos em asfalto em vias de circulação de pedestres e ciclistas tanto durante o dia, quanto à noite foram mais confortáveis em zonas quentes e secas. Neste contexto, pavimentos reflexivos (como o pavimento de concreto cinza) promoveram maior desconforto térmico.</p>		

Fonte: o Autor (2024).

3.3. Considerações

Este trabalho teve como objetivo analisar a influência de diferentes albedos de pavimentos no *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) em zonas climáticas brasileiras, usando um modelo numérico com o *software* ENVI-met. Foi avaliada a relação entre o aumento do albedo do pavimento, com ventos incidindo paralela e perpendicularmente aos cânions urbanos e a resposta térmica na variação do UTCI.

Na perspectiva do campo térmico no interior do cânion urbano, em ambas as zonas, sob condições não sombreadas (por exemplo em vias com orientação Leste-Oeste) e vento fraco (inferior a 2 m/s), o pavimento em asfalto apresentou registros de temperatura do ar superiores em relação ao recorte urbano com pavimento intertravado de concreto. Ou seja, as vias de concreto são boas propostas para a seção do leito carroçável da via e favorecem a dissipação do calor do interior da malha.

Entretanto, por apresentar uma maior inércia do que os pavimentos em asfalto, houve uma maior emissão de radiação de ondas longas ao final da tarde, sendo um fator agravante para o UTCI, especialmente nas vias não-sombreadas, com orientação Leste-

Oeste. Por isso, podem ter uma aplicação favorável no leito carroçável da via e não para calçadas e passeios.

Na **perspectiva do pedestre** no interior do cânion, em função da zona climática analisada, foram identificados comportamentos distintos.

O aumento do albedo reduziu as condições de stress térmico do meio-dia na zona fria e úmida (Z1). Apesar das velocidades modestas do vento (cerca de 0,5 m/s), essa mudança reduziu o stress térmico de “Forte” para “Moderado”, mostrando que os pavimentos intertravados de concreto podem ser uma intervenção eficaz para aumentar o conforto dos pedestres nessas condições.

Por outro lado, na zona quente e seca (Z6), as vias com orientação Leste-Oeste, ou seja não-sombreada, apresentaram aumento do stress por calor ao final da tarde, como resultado do aumento do albedo ou pela inércia. Nesse caso, o stress térmico nos pavimentos intertravados de concreto foram de “Forte” para “Muito Forte”, sugerindo que as superfícies com albedo ou inércia elevados, e nesses tipos de condições, podem fazer com que as pessoas se sintam mais desconfortáveis dentro do cânion urbano.

Este estudo conclui que, embora materiais de maior albedo, como o concreto, possam melhorar as condições térmicas em zonas mais frias e úmidas, favorecendo a dissipação do calor e reduzindo a temperatura do ar, seus benefícios podem não se estender a todas as situações. Especialmente na avaliação do conforto térmico e nas últimas horas do dia.

Bröde e Kampmann (2023) utilizaram o índice UTCI para avaliar os efeitos do vento no stress térmico, a fim de sugerir estratégias sustentáveis de mitigação do calor. Neste trabalho, em boa parte dos cenários, as vias sombreadas não apresentaram variações mais favoráveis ao UTCI, o que sugere que o vento que incidia perpendicular ao topo do cânion deixou as condições de stress térmico mais desfavoráveis, por dificultar a dissipação da radiação de ondas longas emitidas, ou das ondas curtas refletidas.

Entende-se que o sombreamento tenha um papel importante na redução do UTCI, mas o efeito do vento que incide perpendicularmente ao topo do edifício provoca uma barreira, que se torna mais desfavorável em termos de conforto. Já em vias com o vento paralelo, mesmo sem sombreamento, a inércia do pavimento e o albedo do revestimento promoveram uma redução do UTCI, pelo processo convectivo.

3.4. Referências

AL-HUMAIRI, S. F. I.; ALIAS, A.H.; HARON, N.A.; HASSIM, S.; MOHD JAKARNI, F. Sustainable pavement: A review on the usage of pavement as a mitigation strategy for UHI. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **IOP Publishing**, v.1075, p. 012010, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1075/1/012010>

BŁAŻEJCZYK, K.; & KUCHCIK, M. UTCI applications in practice (methodological questions). **Geographia Polonica**, v.94, n.2, p.153-165, 2021. <https://doi.org/10.7163/GPol.0198>

BRÖDE, P.; KRÜGER, E. L.; & FIALA, D. UTCI: validation and practical application to the assessment of urban outdoor thermal comfort. **Geographia Polonica**, v.86, n.1, p.11-20, 2013. [10.7163/GPOL.2013.2](https://doi.org/10.7163/GPOL.2013.2)

BRÖDE, P., & KAMPMANN, B. Temperature–Humidity-Dependent Wind Effects on Physiological Heat Strain of Moderately Exercising Individuals Reproduced by the Universal Thermal Climate Index (UTCI). **Biology**, 12(6), 802, 2023. <https://doi.org/10.3390/biology12060802>

CBE. Center for the Built Environment. **CBE Clima Tool**. Disponível em: <https://clima.cbe.berkeley.edu>. Acesso em: 29 dez. 2024.

CLIMATE ONE BUILDING. **Repository of free climate data for building performance simulation**. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org/>. Acesso em: 10 de julho de 2023.

COST Action 730. **The universal thermal climate index UTCI for assessing the thermal environment of the human being** (pp. 1–13). COST, 2012.

DEL SERRONE, Giulia; PELUSO, Paolo; MORETTI, Laura. Evaluation of microclimate benefits due to cool pavements and green infrastructures on urban heat islands. **Atmosphere**, v.13, n.10, p.1586, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13101586>

DJAGHROURIL, D.; BOUDJELLAL, L.; AFREN, R.; & BENABBAS, M. The Universal Thermal Climate Index (UTCI) applications for microclimatic analysis in urban thermal environments. Case study; Oasis University campus, Algeria. **Technium Soc. Sci. J.**, v.39, p. 873, 2023. <https://doi.org/10.47577/tssj.v39i1.8198>

DRISCOLL, D.M. Thermal Comfort Indexes. Current Uses and Abuses. **Nat. Weather Digest**, 17, (4), 33-38, 1992.

ERELL, E., BONEH, D., PEARLMUTTER, D., & BAR-KUTIEL, P. Effect of high-albedo materials on pedestrian thermal sensation in urban street canyons in hot climates. **In PLEA**, 2013.

ERELL, E., PEARLMUTTER, D., BONEH, D., & KUTIEL, P. B. Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. **Urban climate**, 10, 367-386, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.005>

FANGER, P.O. Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering. **Danish Technical Press**, Copenhagen, 1970.

GIORDANO., D.E., KRÜGER, E.L., ERELL, E. Efeito do albedo em cânions urbanos de cidades médias brasileiras. In: **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2014. doi: 10.17012/ENTAC2014.373

GIVONI, B. Man, Climate and Architecture. **Appl. Sci.** Publishers, London, 483, 1976.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2023. **Cidades**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em Jun. 2024.

IPMA. Instituto Português de Mar e Atmosfera. **Universal Thermal Climate Index**. Disponível em: <https://www.ipma.pt/en/enciclopedia/amb.atmosfera/index.bioclima/index.html?page=utci.xml>. Acesso em Ago. 2024.

JENDRITZKY, G., MAAROUF, A., FIALA, D., & STAIGER, H. An update on the development of a Universal Thermal Climate Index. In: **15th Conf. biomet. aerobiol. and 16th ICB02**. Kansas City: AMS, 2002. p. 129-133. https://ams.confex.com/ams/15BioAero/techprogram/paper_49599.htm

KOUSIS, I.; & PISELLO, A. L. Evaluating the performance of cool pavements for urban heat island mitigation under realistic conditions: A systematic review and meta-analysis. **Urban Climate**, v.49, p.101470, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101470>

KRÜGER, E.L. Literature Review on UTCI Applications. In: KRÜGER, E.L. (eds) Applications of the Universal Thermal Climate Index UTCI in Biometeorology. **Biometeorology**, vol 4. Springer, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76716-7_3

KUZMANOVIĆ, D.; SKOK, G.; & BANKO, J. Improving the operational forecasts of outdoor UTCI with post-processing (No. EMS2023-4). **Copernicus Meetings**, 2023. 10.5194/ems2023-4

LANDSBERG, H.E. **The Assessment of Human Bioclimate, a Limited Review of Physical Parameters**. World Meteorological Organization, Technical Note No. 123, WMO-No. 331, Geneva, 1972.

LOPES, A.; ALVES, E.; ALCOFORADO, M.; MACHETE, R. Lisbon urban heat island updated: New highlights about the relationships between thermal patterns and wind regimes. **Advances in Meteorology**, 2013:1–11. <https://doi.org/10.1155/2013/487695>

NOURI, A.S.; MATZARAKIS, A. Human Biometeorological Models: Existing and Future Reflections for Lisbon. In: PALME, M., SALVATI, A. (eds) **Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies**. Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4_21

PELUSO, P.; PERSICHETTI, G.; & MORETTI, L. Effectiveness of road cool pavements, greenery, and canopies to reduce the urban heat island effects. **Sustainability**, v.14, n.23, p.16027, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142316027>

PETRALLI, M.; MASSETTI, L.; PEARLMUTTER, D.; BRANDANI, G.; MESSERI, A.; & ORLANDINI, S. UTCI field measurements in an urban park in Florence (Italy). **Miscellanea Geographica**, v.24, n.3, p.111-117, 2020. [10.2478/MGRSD-2020-0017](https://doi.org/10.2478/MGRSD-2020-0017)

SANTOS, R. G., PRATA-SHIMOMURA, A. R., CORREIA, E., FRANCO, M. D. A. R., & LOPES, A. S. Morfologia urbana e corredores de ventilação como subsídio à resiliência urbana. **Revista LABVERDE**, v. 8, n. 2, p. 12-37, 2017.

SCHRIJVERS, P. J. C., JONKER, H. J. J., DE ROODE, S. R., & KENJERES, S. The effect of using a high-albedo material on the Universal Temperature Climate Index within a street canyon. **Urban Climate**, 17, 284-303, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.02.005>

SEDIRA, S.; & MAZOUZ, S. The effect of urban geometry on outdoor thermal comfort. **Application of the UTCI index in hot and arid climates**, v.6, p.23-31, 2023. <https://doi.org/10.47577/technium.v2021i.8140>

SHAO, H.; & KIM, G. A comprehensive review of different types of green infrastructure to mitigate urban heat islands: Progress, functions, and benefits. **Land**, v.11, n.10, p.1792, 2022. <https://doi.org/10.3390/land11101792>

SILVA, T., LOPES, A., VASCONCELOS, J. *et al.* Thermal stress and comfort assessment in urban areas using Copernicus Climate Change Service Era 5 reanalysis and collected microclimatic data. **Int J Biometeorol**, 68, 949–963, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02639-z>

VATANI, J.; GOLBABAIEI, F.; DEGHAN, S. F.; & YOUSEFI, A. Applicability of Universal Thermal Climate Index (UTCI) in occupational heat stress assessment: a case study in brick industries. **Industrial health**, v.54, n.1, p.14-19, 2016. [10.2486/INDHEALTH.2015-0069](https://doi.org/10.2486/INDHEALTH.2015-0069)

WALSH, A.; CÓSTOLA, D; LABAKI, L. **Proposta de zoneamento climático brasileiro para edificações residenciais**. 1ed. São Paulo: Angélica Walsh, 2023.

WANG, C.; WANG, Z. H.; KALOUSH, K. E.; & SHACAT, J. Cool pavements for urban heat island mitigation: A synthetic review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.146, p.111171, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111171>

YANG, Jiachuan; WANG, Zhi-Hua; KALOUSH, Kamil E. Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a ‘silver bullet’ for mitigating urban heat island?. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 47: 830-843, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.092>

Capítulo 4. Método Multicritério, Pavimentação e Planejamento do Território

Este capítulo se propõe a trazer uma aplicação do método multicritério AHP-Gaussiano, na perspectiva do campo térmico, para tomada de decisão sobre a aplicação mais adequada de pavimento urbano em função do clima local e das configurações urbanas. Para isso foram considerados os dados de duas diferentes configurações urbanas e quatro tipos de pavimentos. A aplicação de métodos multicritério para tomada de decisão no contexto das cidades foi tema de um artigo publicado no periódico *Serbian Journal of Management*.

Kowalski, L.F., Masiero, E., Lopes, A.M.S., Santos, M. dos., Gomes, C.F.S., Stanujkic, D. Designing streets for people: a multicriteria decision-making study. *Serbian Journal of Management*, v.19, n.2, 2024. <https://doi.org/10.5937/sjm19-48257>

4.1. Contextualização

4.1.1 Modelos Multicritério para Tomada de Decisão

Há inúmeras variáveis que podem contribuir para as avaliações no processo de tomada de decisão no planejamento urbano. Os métodos multicritério para tomada de decisão (MCDM) têm sido amplamente utilizados ao longo das últimas décadas no campo da pesquisa operacional, para auxiliar gestores de projetos em processos de seleções e, mais recentemente, na gestão das cidades (SANTOS, COSTA e GOMES, 2021).

Os métodos de tomada de decisão e análise multicritério são aplicados quando há necessidade de selecionar, classificar ou descrever as alternativas presentes em processo decisivo complexo, com múltiplos critérios e objetivos conflitantes (SILVA *et al.*, 2018).

Para corroborar no entendimento do método, é válida uma apresentação sintética de conceitos, como: matriz de decisão, monotônico de custo e lucro, normalização de resultados e fator gaussiano, conforme indicado no Quadro 4.0.

Quadro 4.0. Conceito dos termos mais usuais na aplicação do método AHP-Gaussiano.

Termo	Conceito	Referência
Matriz de Decisão	Ferramenta que organiza alternativas e critérios para facilitar a comparação e escolha da melhor opção em um processo decisório. A matriz apresenta alternativas em suas linhas e critérios de decisão em suas colunas.	Ramdhani e Jamari (2018)
Monotonicidade	Montônico de custo, quando se busca minimizar, e de lucro quando se busca maximizar o retorno.	Santos <i>et al.</i> (2023)
Normalização de Resultados	O objetivo é tornar os dados da matriz adimensionais	Santos <i>et al.</i> (2023)
Fator Gaussiano	Relacionado à distribuição normal (ou distribuição gaussiana), o fator gaussiano refere-se à função utilizada para descrever a curva de distribuição normal, caracterizada por uma média (valor central) e um desvio padrão (dispersão dos dados em torno da média).	Silva <i>et al.</i> (2018)

Fonte: O autor (2024).

Bellman e Zadeh (1970) iniciam a discussão utilizando métodos de tomada de decisão em um ambiente *fuzzy*. Na década seguinte, foi concebido e publicado o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), Saaty (1980), que consiste em um modelo aditivo linear que converte avaliações subjetivas de importância relativa em um conjunto de pontuações e pesos. Este procedimento é baseado em comparações pareadas, nas quais, apenas os fatores indicados são avaliados. As variáveis de entrada em um processo analítico podem ser quali ou quantitativas, inclusive com diferentes escalas e unidades. Por fim, a avaliação é realizada aplicando uma função de valor aos indicadores.

Os métodos multicritérios de avaliação de fatores mais tradicionais e as recomendações de aplicação estão apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1. Métodos Multicritérios mais comuns para a tomada de decisão.

Método	Descrição	Referência
ÉLECTRE	<i>Élimination Et Choix Traduisant la Réalité</i> Eliminação e escolha traduzindo a realidade	Roy (1968)
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> Processo hierárquico analítico	Saaty (1980)
AHP-GAUSSIANO	<i>Analytic Hierarchy Process – Gaussiano</i> Processo hierárquico analítico – gaussiano	Santos, Costa e Gomes (2021)
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i> Técnica para preferência de ordem por similaridade com a solução ideal	Hwang e Yoon (1981)
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation</i> Método de classificação de preferência para avaliação de enriquecimento	Brans, Vincke e Mareschal (1986)
SAPEVO	<i>Simple Aggregation of Preferences Expressed by Ordinal Vectors Group Decision Making</i> Agregação simples de preferências expressas pela tomada de decisão do grupo de vetores ordinais	Gomes, Mury, Gomes (1997)

Fonte: O autor, adaptado de Roy (1968), Saaty (1980), Hwang e Yoon (1981), Gomes, Mury, Gomes (1997) e Santos, Costa e Gomes (2021).

Entretanto, essas ferramentas ainda são pouco exploradas na área do planejamento das cidades. O processo de seleção das melhores opções para pavimentação em uma cidade, por exemplo, enfrenta diversos percalços, ou seja, os critérios que podem qualificar um determinado sistema construtivo estão sujeitos a inúmeros fatores, desde o custo de implementação, ao seu desempenho térmico, o que dificulta o processo de tomada de decisão.

Jato-Espino *et al.* (2019) realizaram um estudo de caso, considerando um modelo de tomada de decisão para seleção de pavimentos permeáveis. O método empregado foi o Modelo de Valor Integrado para Avaliações Sustentáveis (*Integrated Value Model for Sustainable Assessment - MIVES*). Em função da falta de informações precisas para a modelagem do comportamento das alternativas, foi decidido por um processo de simulação estocástica baseado no modelo de Monte Carlo. Associado a isso, foram entrevistados dez especialistas de diversos setores relacionados à gestão da água para

opinar sobre a importância do conjunto de critérios selecionados, de acordo com os níveis de comparação do Processo Analítico Hierárquico (AHP).

Gupta *et al.* (2021) avaliaram a influência de fibra de aramida, polpa de aramida, fibra híbrida de vidro e fibra de celulose para melhorar a resistência à abrasão e a resistência das misturas asfálticas porosas, mantendo suas características funcionais. O método multicritério para a tomada de decisão foi a Avaliação Ponderada do Produto de Soma Agregada (*Weighted Aggregated Sum Product Assessment - WASPAS*) em combinação com o método Importância dos Critérios Através da Correlação Inter-critérios (*Criteria Importance Through Inter-criteria Correlation - CRITIC*) como método de ponderação. Este sistema se apresentou eficiente para garantir a melhor escolha de um pavimento em determinadas situações urbanas.

A fachada das edificações e o pavimento urbano são as duas principais estruturas que formam os cânions urbanos, além da vegetação. Entretanto, a fachada também possui uma contribuição determinante no desempenho termo energético interno da edificação e nas condições de conforto ambiental. A relação entre os materiais de revestimentos externos de edificações e os pavimentos é determinante para as condições de conforto no ambiente externo. Por ser um dos maiores componentes construtivos, a escolha das superfícies mais adequadas pode ser um desafio para projetistas, especialmente considerando fachadas e pisos com múltiplos materiais. É importante, contudo, considerar que a geometria urbana pode influenciar sobremaneira o clima urbano, logo, não basta conhecer apenas as propriedades térmicas dos materiais de superfície, e sim, a interação entre eles a partir de diferentes configurações geométricas, tais como relações largura e altura ou o fator de visão do céu de cânions urbanos, por exemplo.

Nesse contexto, Gilani *et al.* (2022) se propuseram a selecionar o melhor material de fachada, na cidade de Barcelona, a fim de atender aos requisitos: custo, desempenho energético, estética e capacidade de manutenção. Esses critérios foram determinados pelas partes interessadas, ou seja, por cliente, autoridades e projetistas. A grande contribuição dessa pesquisa foi trabalhar em um cenário com múltiplas variáveis, sendo boa parte delas, subjetivas e incertas.

Em função da complexidade das redes urbanas, da grande variedade de materiais (concreto, rocha, asfalto, solo) e suas diferentes funções (tráfego, pedestres ou ambos), há poucos métodos que podem ser utilizados na avaliação das condições de uso de pavimentos urbanos, principalmente para se conhecer os efeitos da combinação entre os materiais sob diversas condições de exposição. Por isso, Pujadas *et al.* (2017) propuseram uma abordagem na gestão de pavimentos, utilizando um método multicritério adaptável a vários ambientes urbanos. Os conceitos utilizados são a combinação da Tomada de Decisão Multicritério e a Teoria da Utilidade Multi-Atributo.

Após a aplicação da metodologia, a sensibilidade foi avaliada por meio de um estudo de caso na cidade de Barcelona. A sequência de trabalho iniciou com a determinação do índice de qualidade dos pavimentos e um levantamento de problemas. Em seguida, foi realizada uma categorização sistemática dos pavimentos da rede urbana, para tornar o método preciso, consistente e repetível (PUJADAS *et al.*, 2017)

Por fim, *Cots et al. (2022)* realizaram uma revisão sistemática utilizando o Modelo de Valor Integrado para Avaliações Sustentáveis (MIVES). Os trabalhos que relacionam métodos multicritérios para tomada de decisão e planejamento urbano estão apresentados no Quadro 4.2. Este quadro representa os principais estudos desenvolvidos a respeito da aplicação de métodos multicritérios para a tomada de decisão referentes à implantação de infraestrutura urbana.

Quadro 4.2. Métodos Multicritérios aplicado em estudos de planejamento urbano.

Tema	Contexto de aplicação	Objetivo do estudo
Novidades em estudos de infraestrutura	Modelos de priorização MIVES na administração pública	Sustentabilidade como a chave para priorizar investimentos em infraestruturas públicas. <i>[Sustainability as the key to prioritize investments in public infrastructures] (PARDO-BOSCH, AGUADO, 2016)</i>
	Aplicação de MIVES nos investimentos municipais de Barcelona	MIVES Abordagem multi-critério para avaliação, priorização, e seleção de projetos de investimento público. <i>[MIVES multi-criteria approach for the evaluation, prioritization, and selection of public investment projects. A case study in the city of Barcelona] (PUJADAS et al., 2017)</i>
	Novas infraestruturas urbanas	Uma proposta para comparar infraestrutura urbana utilizando análise multi-critério. <i>A proposal to compare urban infrastructure using multi-criteria analysis (VILLEGAS et al., 2021)</i>
	Avaliações ou modelos de priorização de edificações de serviço público	Modelo holístico para analisar e priorizar edificações urbanas sustentáveis para serviços públicos. <i>Holistic model to analyze and prioritize urban sustainable buildings for public services (PARDO-BOSCH, AGUADO, PINO, 2019)</i>
	Priorização de investimento nos países em desenvolvimento	Aplicação de sistema de classificação de infraestruturas sustentáveis para países em desenvolvimento (SIRSDEC). <i>Application of the sustainable infrastructure rating system for developing countries (SIRSDEC) to a case study (DIAZ-SARACHAGA, JATO-ESPINO, CASTRO-FRESNO, 2017a)</i> Metodologia para desenvolvimento de um novo sistema de classificação de infraestruturas sustentáveis para países em desenvolvimento (SIRSDEC) <i>Methodology for the development of a new sustainable infrastructure rating system for developing countries (SIRSDEC) (DIAZ-SARACHAGA, JATO-ESPINO, CASTRO-FRESNO, 2017b)</i>
	Modelos de seleção de pavimento urbano	Um modelo multicritério estocástico Fuzzy para a seleção de pavimentos urbanos permeáveis.

		<i>A fuzzy stochastic multi-criteria model for the selection of urban pervious pavements (JATO-ESPINO et al., 2014)</i>
Manutenção e reabilitação de estruturas urbanas	Estudos sobre manutenção de estruturas hidráulicas	Prioridades de investimento para o gerenciamento de estruturas hidráulicas. <i>Investment priorities for the management of hydraulic structures (PARDO-BOSCH, AGUADO, 2015)</i>
	Priorização de investimento em reabilitação em La Habana	Tomada de decisão multicritério para a classificação da reabilitação de sítios patrimoniais. Aplicação no centro histórico de La Habana. <i>Multi-criteria decision-making for grading the rehabilitation of heritage sites. Application in the historic center of La Habana (PIÑERO et al., 2017)</i>
	Análises das condições de uso de pavimentos urbanos	Avaliação multicritério MIVES das condições de uso do pavimento urbano: aplicação para um estudo de caso em Barcelona. <i>MIVES multi-criteria assessment of urban-pavement conditions: application to a case study in Barcelona (PUJADAS, CAVALARO, AGUADO, 2019)</i>

Fonte: O autor, adaptado de Cots et al. (2022).

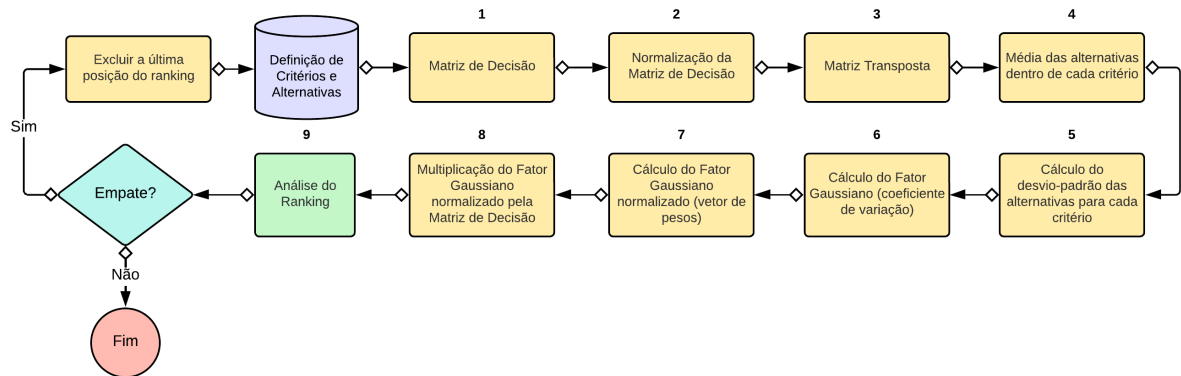
O objetivo deste trabalho é ordenar 4 opções de pavimento urbano em função de fatores microclimáticos e de duas diferentes configurações urbanas, por meio do método multicritério AHP-Gaussiano.

4.1.2. Método AHP-Gaussiano

O método multicritério para a tomada de decisão, denominado *Analytic Hierarchy Process (AHP)* – Gaussiano, será utilizado para a determinação do pavimento mais adequado neste contexto de estudo, considerando um ambiente térmico que tenha baixa temperatura do ar e menor acúmulo de calor na malha intraurbana.

O método aplicado neste estudo consiste em criar uma matriz de decisão, formada pelos critérios e alternativas adotados, os quais precisam ser posteriormente normalizados. Para isso, é necessário identificar se o critério é monotônico de custo (MC), ou seja, quanto menor o seu valor, melhor, ou se este é monotônico de lucro (ML), quanto maior o valor, melhor, conforme apresentado. Na Figura 4.1 está apresentada a metodologia do AHP-Gaussiano.

Figura 4.1. Fluxograma das etapas do método AHP-Gaussiano.



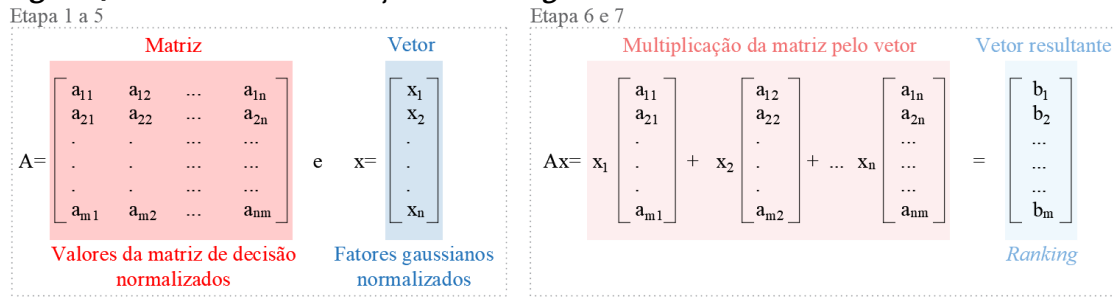
Fonte: adaptado pelo autor (2024) de Santos, Costa e Gomes (2021).

As equações de cada etapa do método AHP-Gaussiano são:

- Para cada linha e coluna da matriz temos um valor de a_{ij} . Sendo i o valor quantitativo da alternativa no critério j .
- Para critérios monotônicos de lucro $a_{ij} = a_{ij}$. Para critérios monotônicos de custo $a_{ij} = \left(\frac{1}{a_{ij}}\right)$.
- A normalização dos dados se dá pela equação: $x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$.
- O cálculo da média é dado por: $\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n}$.
- O cálculo do desvio-padrão é por meio da equação: $\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n}}$.
- Para calcular o Fator Gaussiano para cada critério: $g_j = \frac{\sigma_j}{\bar{x}_j}$.
- Para a construção dos pesos de cada critérios: $w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j}$.
- A determinação do valor agregado (v_i) é dada por: $v_i = \sum_{j=1}^m w_j x_{ij}$
- Quanto à ordenação, quanto maior for o valor agregado (v_i), mais favorável será a alternativa (a_i) como forma de solução para o problema.

A partir da matriz de decisão normalizada, são calculadas as médias, desvios padrões e fatores gaussianos das alternativas de cada critério. Com estes valores é realizada a obtenção do *ranking*, por meio do produto entre a matriz de decisão normalizada e um vetor, composto pelo fator gaussiano normalizado de cada critério. Este procedimento pode ser visto na Figura 4.2.

Figura 4.2. Processo de obtenção do ranking.



Fonte: adaptado pelo autor de Anton e Rorres (2012).

4.2. Aplicação IV – AHP-Gaussiano Aplicado à Escolha de Pavimentos

4.2.1. Materiais e Métodos

Para a aplicação do método AHP-gaussiano serão propostas inicialmente 14 alternativas de configuração de pavimento para a tomada de decisão. Caso haja empate no ranking das alternativas, será descartada a alternativa que obtiver a menor pontuação, e o modelo deverá ser recalculado.

Na primeira etapa, serão considerados 6 critérios, em um contexto de verão, como: Média diária da Temperatura do Ar próxima à superfície (Ta), Temperatura Superficial (Ts), Temperatura Subsuperficial (Tss), Temperatura Superficial da Camada de Base (Tsb), absorvância e Saldo de radiação líquida (Q*) acima dos pavimentos intertravados de concreto vermelho (VER), cinza (CIN), grafite (GRA) e asfalto (ASF), conforme apresenado no Quadro 4.3.

Quadro 4.3. Definição do monotônicos, critérios e alternativas para a estação de verão.

Sim.	Critérios	M1-VER	M1-CIN	M1-GRA	M1-ASF	M2-VER	M2-CIN	M2-GRA	M2-ASF
1	Ta	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC
	Ts	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC
	Tss	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC
	Tsb	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC
	α	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC
	Q*	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC

Fonte: o Autor (2024).

Na segunda etapa, serão considerados os mesmos critérios do cenário 8 critérios em um contexto de inverno, sendo: Média diária da Temperatura do Ar próxima à superfície (Ta), Temperatura de globo (Tg), Temperatura Superficial (Ts), Temperatura Subsuperficial (Tss), Temperatura da camada de Base (Tsb), Temperatura Superficial das Fachadas (Ts-par) nordeste (NE) e sudoeste (SW) e absorvância dos pavimentos concreto vermelho (VER), cinza (CIN), grafite (GRA) e asfalto (ASF), conforme apresentado no Quadro 4.4.

Quadro 4.4. Definição da monotonicidade, critérios e alternativas para a estação de inverno.

Simulações	Critérios	M2-VER	M2-CIN	M2-GRA	M2-ASF
1	Ta	MC	MC	MC	MC
	Ts	MC	MC	MC	MC
	Tss	MC	MC	MC	MC
	Tsb	MC	MC	MC	MC
	Ts-par NE	MC	MC	MC	MC
	Ts-par SW	MC	MC	MC	MC
	Tg	MC	MC	MC	MC
	α	MC	MC	MC	MC

Fonte: o Autor (2024).

Por fim, serão construídas matrizes de decisão, para diferentes morfologias urbanas. Sendo a primeira, para relação $H/W = 0,33$ (M1) e a segunda para relação $H/W = 0,66$ (M2), representando configurações típicas sombreadas, para um recorte urbano de casas térreas (M1) e edificações de até 4 pavimentos (M2).

Levando em consideração que esta pesquisa considera 6 critérios e 16 alternativas, e que o método AHP clássico, proposto por Saaty (1980), está limitado a uma matriz de ordem 15. Então será utilizado o método AHP-Gaussiano, idealizado por Santos, Costa e Gomes (2021), o qual não apresenta uma limitação do número de alternativas e critérios.

Este método multicritério para a tomada de decisão, possui um fator de sensibilidade de escolha denominado Fator Gaussiano da Matriz de Decisão, o qual consiste na razão entre o desvio padrão e a média dos critérios e leva em consideração a distribuição normal da curva de Gauss. Diferente do método de Saaty, que considera uma escala de prioridades e cabe ao decisor atribuir os pesos.

4.2.2. Resultados e Discussões

Uma questão de elevada complexidade é a escolha da melhor configuração urbana, incluindo as propriedades de pavimento e configuração geométrica de cânions, frete às inúmeras variáveis que interagem entre si, de maneira distinta e de forma dinâmica ao longo do dia. Por isso, o objetivo desta seção é aplicar os valores obtidos em um modelo de tomada de decisão multicritério, denominado AHP-gaussiano.

Com base nos resultados obtidos para dois cenários estudados, foram analisados quais os pavimentos que apresentam mais características desejáveis para cada contexto microclimático das cidades, considerando características do tecido, como relação H/W e albedo dos pavimentos.

a. Variáveis do Pavimento e Atmosfera

Os critérios utilizados foram no cenário 1 (pavimentos sombreados) foram valores médios, e, no cenário 2, valores máximos de: Temperatura do Ar próxima à superfície (Ta),

Temperatura Superficial (Ts), Temperatura Subsuperficial (Tss), Temperatura Superficial da Camada de Base (Tsb), Temperatura do Subleito (Tso) em duas configurações urbanas distintas, com relação H/W: 0,33 e relação H/W: 0,66, coletados em campo.

Os dados da matriz de decisão para o cenário 1 (valores médios), morfologia M1 e M2 estão apresentados na Tabela 4.1 e 4.2 respectivamente.

Tabela 4.1. Matriz de decisão para o cenário A1, utilizando valores médios da morfologia M1 (Cânion com relação H/W de 0,33).

E1-A1	Q_méd	Ta_méd	Ts_méd	Tss_méd	Tsb_méd	Absortância
	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN
M1_Asf	249,4935	21,44782	24,54221	23,1731	21,94387	0,9082
M1_Gra	252,8992	21,41109	24,43765	22,97049	21,76176	0,8584
M1_Ver	243,87	21,06421	23,35882	20,95255	20,88422	0,8014
M1_Cin	227,6449	21,04397	23,59304	21,83235	21,42608	0,776

Fonte: o Autor (2024).

Tabela 4.2. Matriz de decisão para o cenário B1, utilizando valores médios da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).

E1-B1	Q_méd	Ta_méd	Ts_méd	Tss_méd	Tsb_méd	Absortância
	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN
M2_Asf	270,7896	21,39742	24,10873	21,18588	20,11196	0,9082
M2_Gra	280,0399	20,50492	21,75735	17,79059	19,23706	0,8584
M2_Ver	267,7452	20,33549	22,97363	19,32686	19,48755	0,8014
M2_Cin	252,6744	20,22446	21,68157	18,19951	19,35441	0,776

Fonte: o Autor (2024).

Os dados da matriz de decisão para o cenário 2 (valores máximos), morfologia M1 e M2 estão apresentados na Tabela 4.3 e 4.4 respectivamente.

Tabela 4.3. Matriz de decisão para o cenário A2, utilizando valores máximos da morfologia M1 (Cânion com relação H/W de 0,33).

E1-A2	Q_máx	Ta_máx	Ts_máx	Tss_máx	Tsb_máx	Absortância
	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN
M1_Asf	756,0537	28,535	37,32	31,365	25,89667	0,9082
M1_Gra	776,6879	28,21833	34,33	29,445	25,39	0,8584
M1_Ver	743,1316	28,82667	33,575	25,14667	23,8	0,8014
M1_Cin	709,6487	27,56833	33,48667	26,08833	24,46167	0,776

Fonte: o Autor (2024).

Tabela 4.4. Matriz de decisão para o cenário B2, utilizando valores máximos da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).

E1-B2	Q_máx	Ta_máx	Ts_máx	Tss_máx	Tsb_máx	Absortância
	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN
M2_Asf	784,4149	29,29333	37,26667	31,91	22,605	0,9082
M2_Gra	795,6883	28,1	33,09	22,34	21,81833	0,8584
M2_Ver	770,3166	26,97667	34,39	24,41833	22,67667	0,8014

M2_Cin	727,7741	26,76167	32,57167	20,89	24,58167	0,776
---------------	----------	----------	----------	-------	----------	-------

Fonte: o Autor (2024).

A partir da matriz de decisão foi realizada a normalização dos dados. Em seguida, foram calculadas: a média, o desvio padrão e o fator gaussiano (fator de sensibilidade na tomada de decisão) de cada critério, conforme apresentado na Tabela 4.5 à 4.8.

Tabela 4.5. Dados normalizados e fator gaussiano, cenário A1 (valores médios) da morfologia M1 (Cânion com relação H/W de 0,33).

E1-A1	Q_méd	Ta_méd	Ts_méd	Tss_méd	Tsb_méd	Absortância
M1_Asf	0,243572	0,247579	0,24419	0,239452	0,244902	0,229271
M1_Gra	0,240291	0,248003	0,245235	0,241564	0,246951	0,242573
M1_Ver	0,249188	0,252088	0,256561	0,264829	0,257328	0,259826
M1_Cin	0,266949	0,25233	0,254014	0,254156	0,25082	0,26833

Média	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Desvio Padrão	0,011881	0,002558	0,006208	0,011827	0,005467	0,017487
Fator Gaussiano	0,047525	0,010233	0,024832	0,047306	0,021867	0,069948
Fator G. Norma.	0,214356	0,046156	0,112003	0,213368	0,098629	0,315489

Fonte: o Autor (2024).

Tabela 4.6. Dados normalizados e fator gaussiano, cenário B1 (valores médios) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).

E1-B1	Q_méd	Ta_méd	Ts_méd	Tss_méd	Tsb_méd	Absortância
M2_Asf	0,246912	0,240747	0,234223	0,224662	0,242915	0,229271
M2_Gra	0,238756	0,251225	0,259537	0,267538	0,253963	0,242573
M2_Ver	0,249719	0,253319	0,245796	0,246272	0,250699	0,259826
M2_Cin	0,264614	0,254709	0,260444	0,261527	0,252423	0,26833

Média	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Desvio Padrão	0,010795	0,006333	0,012471	0,019117	0,004908	0,017487
Fator Gaussiano	0,043181	0,025331	0,049885	0,076468	0,019631	0,069948
Fator G. Norma.	0,151809	0,089056	0,175376	0,268833	0,069016	0,245911

Fonte: o Autor (2024).

Tabela 4.7. Dados normalizados e fator gaussiano, cenário A2 (valores máximos) da morfologia M1 (Cânion com relação H/W de 0,33).

E1-A2	Q_máx	Ta_máx	Ts_máx	Tss_máx	Tsb_máx	Absortância
M1_Asf	0,246535	0,24776	0,231851	0,221496	0,239997	0,229271
M1_Gra	0,239986	0,25054	0,252045	0,235939	0,244787	0,242573
M1_Ver	0,250822	0,245253	0,257712	0,276268	0,26114	0,259826
M1_Cin	0,262657	0,256447	0,258392	0,266296	0,254076	0,26833

Média	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Desvio Padrão	0,009542	0,00481	0,012429	0,025598	0,009451	0,017487
Fator Gaussiano	0,038169	0,019241	0,049717	0,102392	0,037803	0,069948
Fator G. Norma.	0,120304	0,060644	0,156704	0,322729	0,119151	0,220469

Fonte: o Autor (2024).

Tabela 4.8. Dados normalizados e fator gaussiano, cenário B2 (valores máximos) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).

E1-B2	Q_máx	Ta_máx	Ts_máx	Tss_máx	Tsb_máx	Absortância
M2_Asf	0,24498	0,236802	0,229673	0,190016	0,253006	0,229271
M2_Gra	0,241509	0,246858	0,258663	0,271415	0,262128	0,242573
M2_Ver	0,249464	0,257137	0,248885	0,248314	0,252206	0,259826
M2_Cin	0,264046	0,259203	0,262779	0,290254	0,232661	0,26833
Média	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Desvio Padrão	0,009914	0,010323	0,014751	0,043512	0,012405	0,017487
Fator Gaussiano	0,039657	0,041293	0,059004	0,174049	0,049619	0,069948
Fator G. Norma.	0,091467	0,09524	0,136089	0,401432	0,114442	0,16133

Fonte: o Autor (2024).

Por fim, foi calculado o fator AHP-G, através da soma dos produtos entre o fator gaussiano normalizado e os valores de cada critério normalizado. Os fatores AHP-G e o ranking resultante estão apresentados na Tabela 4.9 à Tabela 4.12.

Tabela 4.9. Ranking dos pavimentos, cenário A1 (valores médios) da morfologia M1 (Cânion com relação H/W de 0,33).

	AHP-G	RANK
M1_Asf	0,238566	4
M1_Gra	0,242849	3
M1_Ver	0,257644	2
M1_Cin	0,260941	1

Fonte: o Autor (2024).

Tabela 4.10. Ranking dos pavimentos, cenário B1 (valores médios) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).

	AHP-G	RANK
M2_Asf	0,233542	4
M2_Gra	0,253237	2
M2_Ver	0,250978	3
M2_Cin	0,262243	1

Fonte: o Autor (2024).

Tabela 4.11. Ranking dos pavimentos, cenário A2 (valores máximos) da morfologia M1 (Cânion com relação H/W de 0,33).

	AHP-G	RANK
M1_Asf	0,231643	4
M1_Gra	0,242352	3
M1_Ver	0,262991	2
M1_Cin	0,263015	1

Fonte: o Autor (2024).

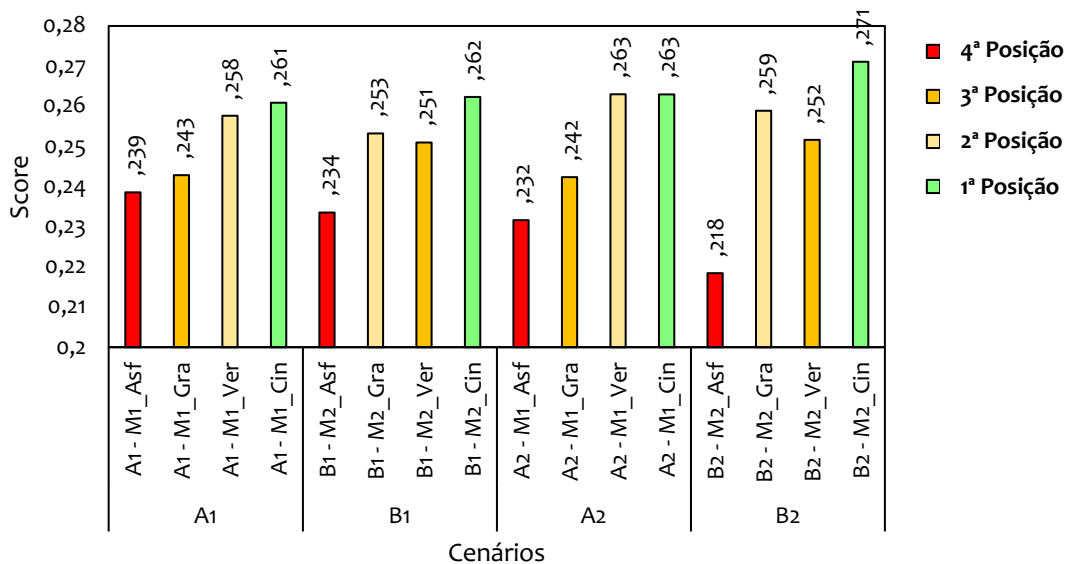
Tabela 4.12. Ranking dos pavimentos, cenário B2 (valores máximos) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).

	AHP-G	RANK
M2_Asf	0,218438	4
M2_Gra	0,258889	2
M2_Ver	0,25164	3
M2_Cin	0,271033	1

Fonte: o Autor (2024).

A partir dos dados analisados, considerando apenas as características dos pavimentos, incluindo suas camadas subsuperficiais, nota-se que o pavimento cinza para todas as configurações e cenários apresentou a melhor pontuação, ou seja, que está mais aderente às características que traduzem o que seria um pavimento com bom desempenho (que tenha menor absorvância, menor temperatura do ar, menores temperaturas superficiais, subsuperficiais, de base, e menor fluxo de calor). Ademais, o pior desempenho, considerando os cenários avaliados, foi para o pavimento asfalto, que obteve a última posição no *ranking*, conforme Figura 4.3. Usualmente o pavimento asfáltico é empregado em função de questões culturais, custo menos elevado e facilidade de manutenção. Entretanto, em termos de desempenho mecânico e térmico tem demonstrado ser a pior alternativa.

Figura 4.3. Ranking dos pavimentos – Etapa 1 (Verão, variáveis de pavimento e atmosfera).



Fonte: o Autor (2024).

Além disso, ao avaliar a importância do fluxo de calor (Q) na tomada de decisão, notou-se durante o processo de aplicação do método, que esta variável juntamente com a absorvância auxiliaram na convergência dos resultados. Outro ponto a ser considerado, é que a decomposição do fluxo de calor total em fluxo radiativo, condutivo e convectivo não auxiliou o processo de tomada de decisão. Uma hipótese por não haver essa convergência foi o fato da dificuldade em se determinar qual dos critérios são monotônicos de custo e monotônicos de lucro.

b. Variáveis do Pavimento, Fachadas e Atmosfera

Ao avaliar as condições de inverno e as temperaturas superficiais das fachadas, na segunda etapa, os critérios utilizados no cenário 1 foram valores médios e no cenário 2, valores máximos de: Temperatura do Ar próxima à superfície (T_a), Temperatura Superficial (T_s), Temperatura Subsuperficial (T_{ss}), Temperatura Superficial da Camada de Base (T_{sb}), Temperatura superficial da fachada Nordeste ($T_{s-par NE}$), Temperatura superficial da

fachada Sudoeste (Ts-par SW), Temperatura de globo (Tg) e absorptância (α) em uma configuração urbana com relação H/W: 0,66.

Os dados da segunda etapa, da matriz de decisão para o cenário 1 (valores médios), morfologia M2 estão apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13. Matriz de decisão para o cenário B1, utilizando valores médios da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).

E2-B1	Ta_méd	Ts_méd	Tss_méd	Tsb_méd	Ts-par NE_méd	Ts-par SW_méd	Tg_méd	Absortância
	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN
M2_Asf	20,755	24,876	27,025	28,653	25,233	25,839	21,953	0,9082
M2_Gra	20,554	22,224	26,749	27,387	25,329	26,014	21,591	0,8584
M2_Ver	20,58	21,916	26,752	27,063	22,344	23,193	22,017	0,8014
M2_Cin	20,788	22,304	27,011	27,362	25,667	23,055	22,425	0,776

Fonte: o Autor (2024).

Os dados da matriz de decisão para o cenário 2 (valores máximos), morfologia M2 estão apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14. Matriz de decisão para o cenário B2, utilizando valores máximos da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).

E2-B2	Ta_méd	Ts_méd	Tss_méd	Tsb_méd	Ts-par NE_méd	Ts-par SW_méd	Tg_méd	Absortância
	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN
M2_Asf	26,895	38,705	39,29	31,948	32,368	32,791	30,032	0,9082
M2_Gra	26,353	32,837	34,887	30,575	32,53	33,07	28,71	0,8584
M2_Ver	26,547	32,847	34,798	31,027	32,258	32,575	29,87	0,8014
M2_Cin	26,817	31,668	34,522	31,35	33,367	32,054	30,766	0,776

Fonte: o Autor (2024).

A partir da matriz de decisão foi realizada a normalização dos dados. Em seguida, foram calculadas: a média, o desvio padrão e o fator gaussiano (fator de sensibilidade na tomada de decisão) de cada critério, conforme apresentado na Tabela 4.15 e Tabela 4.16, para os valores médios e máximos, respectivamente.

Tabela 4.15. Dados normalizados e fator gaussiano, cenário B1 (valores médios) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).

E2-B1	Ta_méd	Ts_méd	Tss_méd	Tsb_méd	Ts-par NE_méd	Ts-par SW_méd	Tg_méd	Absortância
M2_Asf	0,248961	0,228848	0,248692	0,240838	0,243392	0,236512	0,25045	0,229271
M2_Gra	0,251396	0,256157	0,251258	0,251972	0,24247	0,234921	0,254649	0,242573
M2_Ver	0,251078	0,259757	0,25123	0,254988	0,274862	0,263495	0,249722	0,259826
M2_Cin	0,248566	0,255238	0,248821	0,252202	0,239277	0,265072	0,245179	0,26833

Média	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Desvio Padrão	0,001443	0,014235	0,001437	0,00626	0,016668	0,016518	0,003879	0,017487

Fator Gaussiano	0,005772	0,056941	0,005749	0,025039	0,066672	0,066074	0,015516	0,069948
------------------------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Fator G. Norma.	0,018517	0,182674	0,018442	0,080327	0,213892	0,211971	0,049777	0,2244
------------------------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	--------

Fonte: o Autor (2024).

Tabela 4.16. Dados normalizados e fator gaussiano, cenário B2 (valores máximos) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).

E2-B2	Ta_máx	Ts_máx	Tss_máx	Tsb_máx	Ts-par NE_máx	Ts-par SW_máx	Tg_máx	Absortância
M2_Asf	0,2477342	0,2183761	0,2276136	0,2442798	0,2519849	0,248682811	0,248286	0,229271426
M2_Gra	0,2528293	0,25740016	0,2563401	0,2552495	0,2507301	0,24647	0,2597187	0,242572587
M2_Ver	0,2509817	0,25737	0,2569957	0,2515310	0,2528442	0,25033179	0,24963262	0,2598256
M2_Cin	0,248454	0,266901	0,2590504	0,2489395	0,2444406	0,2544006	0,2423625	0,2683302

Média	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
Desvio Padrão	0,002	0,022	0,015	0,005	0,004	0,003	0,007	0,017
Fator Gaussiano	0,009	0,086	0,060	0,018	0,015	0,013	0,029	0,070

Fator G. Norma.	0,0311	0,2863	0,1988	0,0612	0,0506	0,0440	0,0957	0,2323
------------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Fonte: o Autor (2024).

Por fim, foi calculado o fator AHP-G, através da soma dos produtos entre o fator gaussiano normalizado e os valores de cada critério normalizado. Os fatores AHP-G e o ranking resultante estão apresentados na Tabela 4.17 e Tabela 4.18.

Tabela 4.17. Ranking dos pavimentos, cenário B1 (valores médios) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).

	AHP-G	RANK
M2_Asf	0,236455325	4
M2_Gra	0,245089808	3
M2_Ver	0,262594933	1
M2_Cin	0,255859934	2

Fonte: o Autor (2024).

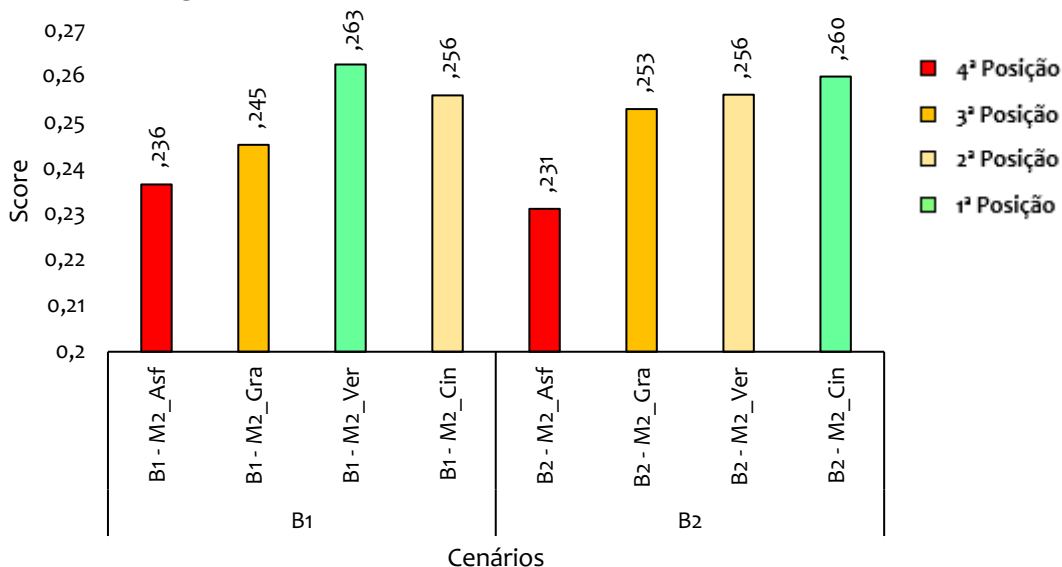
Tabela 4.18. Ranking dos pavimentos, cenário B2 (valores máximos) da morfologia M2 (Cânion com relação H/W de 0,66).

	AHP-G	RANK
M2_Asf	0,231138265	4
M2_Gra	0,252880846	3
M2_Ver	0,256016772	2
M2_Cin	0,259964117	1

Fonte: o Autor (2024).

A partir dos dados analisados, considerando as características dos pavimentos, das fachadas, incluindo a temperatura de globo, nota-se que o pavimento cinza para todos os cenários apresentou uma das melhores pontuações. Ademais, o pior desempenho, considerando os cenários avaliados, foi sempre para o pavimento asfalto, que obteve a última posição no ranking, conforme Figura 4.4.

Figura 4.4. Ranking dos pavimentos – Etapa 2 (Verão, variáveis de pavimento e atmosfera).



Fonte: o Autor (2024).

4.3. Considerações

Este capítulo teve por objetivo ordenar 4 opções de pavimentos urbanos, no contexto térmico, utilizando o método multicritério AHP-Gaussiano. Foram considerados dados de duas morfologias urbanas e diferentes critérios do campo térmico.

Na primeira etapa, foram avaliados seis critérios durante o verão: média diária da temperatura do ar próxima à superfície (T_a), temperatura superficial (T_s), temperatura subsuperficial (T_{ss}), temperatura superficial da camada de base (T_{sb}), absorvância e saldo de radiação líquida (Q^*), para pavimentos intertravados de concreto vermelho (VER), cinza (CIN), grafite (GRA) e asfalto (ASF).

Na segunda etapa, foram considerados oito critérios durante o inverno: média diária da temperatura do ar próxima à superfície (T_a), temperatura de globo (T_g), temperatura superficial (T_s), temperatura subsuperficial (T_{ss}), temperatura da camada de base (T_{sb}), temperatura superficial das fachadas (T_{s-par}) nordeste (NE) e sudoeste (SW) e absorvância dos pavimentos intertravados de concreto vermelho (VER), cinza (CIN), grafite (GRA) e asfalto (ASF).

A análise dos dados, levando em conta a ponderação apenas das características dos pavimentos e suas camadas subsuperficiais, revelou que o pavimento cinza obteve a melhor pontuação em todas as configurações e cenários, provavelmente em função da sua elevada capacidade de refletir ondas curtas e provocando menor acúmulo de calor no interior do cânion. Por outro lado, o pavimento de asfalto teve o pior desempenho, ficando na última posição do *ranking*.

Além disso, a avaliação do fluxo de calor (Q) mostrou que essa variável, juntamente com a absorptância, foi crucial para a convergência dos resultados. No entanto, a decomposição do fluxo de calor total em fluxo radiativo, condutivo e convectivo não facilitou a tomada de decisão. Isso pode ser atribuído à dificuldade de identificar quais critérios são monotônicos de custo e quais são monotônicos de lucro.

Por fim, apesar de serem consideradas as temperaturas superficiais das fachadas e a temperatura de globo no interior do cânion, uma das limitações desta análise é a falta de consideração do fluxo de calor entre fachadas e pavimento; além do gradiente de velocidade do vento que podem melhorar a precisão das análises no processo de tomada de decisão.

4.4. Referências

ANTON, H. A.; RORRES, C. **Álgebra Linear com aplicações**. Porto Alegre: Bookman, 2012.

BELLMAN, R. E.; ZADEH, L. A. Decision-making in a fuzzy environment, **Management Science**, v.17, p.141-164, 1970. <https://doi.org/10.1287/mnsc.17.4.B141>

BRANS, J. P.; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method. **European Journal of Operational Research**, v. 24, n. 2, p. 228-238, 1986. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5)

COTS, D. B.; PARDO-BOSCH, F.; BLANCO, A.; AGUADO, A.; PUJADAS, P. A systematic review on MIVES: A sustainability-oriented multi-criteria decision-making method. **Building and Environment**, p. 109515, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109515>

DÍAZ-SARACHAGA, J. M.; JATO-ESPINO, D.; CASTRO-FRESNO, D. Application of the sustainable infrastructure rating system for developing countries (SIRSDEC) to a case study. **Environmental Science and Policy**, v.69 (September), p.73–80, 2017a. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.011>

DÍAZ-SARACHAGA, J. M.; JATO-ESPINO, D.; CASTRO-FRESNO, D. Methodology for the development of a new sustainable infrastructure rating system for developing countries (SIRSDEC). **Environmental Science and Policy**, v.69, p.65–72, 2017b. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.010>

GILANI, G.; HOSSEINI, S. A.; PONS-VALLADARES, O.; DE LA FUENTE, A. An enhanced multi-criteria decision-making approach oriented to sustainability analysis of building facades: A case study of Barcelona. **Journal of Building Engineering**, 104630, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104630>

GOMES, L. F. A. M.; MURY, A. R.; GOMES, C. F.S. Multicriteria ranking with ordinal data. **Systems Analysis Modelling Simulation**, v.27, n.2, p.139-145, 1997.

GUPTA, A.; CASTRO-FRESNO, D.; LASTRA-GONZALEZ, P.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J. Selection of fibers to improve porous asphalt mixtures using multi-criteria analysis. **Construction and Building Materials**, 266, 121198, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121198>

HWANG, C. L.; YOON, K. P. **Multiple Attributes Decision Making Methods and Applications**, Berlin: Springer-Verlag, 1981.

JATO-ESPINO, D.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J.; ANDRÉS-VALERI, V. C.; BALLESTER-MUÑOZ, F. A fuzzy stochastic multi-criteria model for the selection of urban pervious pavements. **Expert Systems with Application**, v.41, n.15, p. 6807–6817, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.008>

PARDO-BOSCH, F.; AGUADO, A. Investment priorities for the management of hydraulic structures. **Structure and Infrastructure Engineering**, v.11, n.10, p. 1338–1351, 2015.
<https://doi.org/10.1080/15732479.2014.964267>

PARDO-BOSCH, F.; AGUADO, A. Sustainability as the key to prioritize investments in public infrastructures. **Environmental Impact Assessment Review**, v.60, p.40–51, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.03.007>

PARDO-BOSCH, F.; AGUADO, A.; PINO, M. Holistic model to analyze and prioritize urban sustainable buildings for public services. **Sustainable Cities and Society**, v.44, p.227–236, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.028>

PIÑERO, I.; SAN-JOSÉ, J. T.; RODRÍGUEZ, P. LOSÁÑEZ, M. M. Multi-criteria decision-making for grading the rehabilitation of heritage sites: Application in the historic center of La Habana. **Journal of Cultural Heritage**, v.26, p.144–152, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.01.012>

PUJADAS, P.; PARDO-BOSCH, F.; AGUADO-RENTER, A.; AGUADO, A. MIVES multi-criteria approach for the evaluation, prioritization, and selection of public investment projects: A case study in the city of Barcelona. **Land Use Policy**, v.64, p.29–37, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.02.014>

PUJADAS, P.; CAVALARO, S.H.P.; AGUADO, A. MIVES multi-criteria assessment of urban-pavement conditions: application to a case study in Barcelona. **Road Materials and Pavement Design**, v.20, n.8, p.1827-1843, 2019.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1474788>

RAMDHANI, Safarudin; JAMARI, J. The Modeling Of A Conceptual Engineering Design System Using The Decision-Matrix Logic. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. p. 02022.

ROY, B. Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE). **La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO)**, v.8, p.57–75, 1968.

SAATY, T. L. **Multicriteria decision making: the analytic hierarchy process: planning, priority setting resource allocation**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SANTOS, M. dos; COSTA, I. P. de A.; GOMES, C. F. S. Multicriteria decision-making in the selection of warships: a new approach to the AHP method. **International Journal of The Analytic Hierarchy Process**, v. 13, n. 1, p. 147-169, 2021. <https://doi.org/10.13033/ijahp.v13i1.833>

SANTOS, M. dos; GOMES, C. F. S.; MOREIRA, M. A. L.; COSTA, I. P. de A.; GOMES, C. F. S. **Ferramentas Computacionais de Apoio à Tomada de Decisão**. 1.ed. Rio de Janeiro: Ed. Dos Autores, 2023.

SILVA, M. C.; GOMES, C. F. S.; COSTA JUNIOR, C. L. A hybrid multicriteria methodology Topsis-Macbeth-2n applied in the ordering of technology transfer offices. **Pesquisa Operacional**, v.38, n.3, p.413-439, 2018. <https://doi.org/10.1590/0101-7438.2018.038.03.0413>

VILLEGAS, N.; CRUZ SALVADOR, L. C.; DOS SANTOS, A. C. P.; MADERO, Y. S. A proposal to compare urban infrastructure using multi-criteria analysis. **Land Use Policy**, v.101 (July 2020), p.105173, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105173>

Capítulo 5.

Conclusões

5.1. Principais Contribuições

Esta tese propõe a utilização combinada de um modelo físico (PAVSCAM) para coleta de dados em campo, apoiando simulações numéricas em estudos de pavimentos urbanos. Além disso busca responder à problemática sobre quais seriam as propriedades termofísicas dos pavimentos que mais influenciam no balanço radiativo do cânion urbano em estudos microclimáticos. Para isso, a proposta foi avaliar o nível de interação microclimática do pavimento com o solo e com atmosfera, por meio de um modelo físico e numérico de avaliação em espaço aberto. A fim de cumprir o objetivo, foi analisado o campo térmico de cânions com diferentes materiais e expostos à diferentes geometrias urbanas, afim de identificar quais configurações são mais adequadas para cada contexto climático.

Em relação aos impactos da **alteração do material de revestimento**, com a incorporação de borracha ao asfalto, nota-se que:

- A camada subsuperficial do pavimento com borracha apresentou menores temperaturas superficiais durante o dia, devido à sua baixa condutividade térmica.
- Apesar de ter maior capacidade de armazenamento de calor, não provocou temperatura do ar mais alta no período da noite. Pelo fato de dissipar o calor por condução até o solo, o que ainda é pouco explorado em estudos de clima urbano.

Quanto aos impactos da **alteração do albedo** das superfícies do cânion:

- Quanto mais profunda a camada, menor a amplitude térmica das temperaturas do subsolo.
- O menor registro de temperatura superficial média foi na fachada com a face orientada à sudoeste no cânion com pavimento vermelho.
- Os maiores valores de temperatura superficial nas fachadas foram registrados nas cotas próximas à superfície do pavimento e no topo da edificação. A hipótese é que os maiores registros nas cotas mais baixas, sejam em função do efeito combinado da emissão da radiação de ondas longas dos pavimentos, e que nas cotas mais altas, pelo tempo de exposição à radiação solar direta ao longo do dia, e ao processo convectivo, que concentra o ar quente na parte superior do cânion urbano.

Em relação aos impactos da **forma urbana** e sua interação com os pavimentos:

- Na morfologia M1 o menor registro foi do pavimento vermelho (26°C) e na M2 foi pavimento cinza (22,05°C).
- Há uma tendência de que, quanto maior o albedo, maior é o tempo para se atingir o pico de temperatura, na camada subsuperficial.
- As temperaturas médias subsuperficiais noturnas dos pavimentos intertravados de concreto na morfologia M2 foram superiores em relação ao período diurno.
- As temperaturas médias noturnas na camada de base de todos os pavimentos na morfologia M2 foram superiores em relação ao dia.
- As temperaturas médias noturnas na camada do subleito são superiores à camada de base, o que indica que há uma dissipação através das camadas mais profundas do solo, e que são muitas vezes pouco consideradas.

Em relação ao **gradiente de temperatura** e estratificação do calor na estrutura do pavimento:

- 80% das maiores amplitudes térmicas se encontram na região da camada de revestimento e base.
- Investigar a interação da camada de base e de revestimento, de maneira combinada, na variação da temperatura do ar de cânions urbanos pode ser uma alternativa para avaliação no campo térmico na malha intraurbana.

As principais constatações ao observar a **alteração dos processos de transferência de calor** nos diferentes tipos de pavimento são:

- Todos os pavimentos da morfologia M2 apresentaram os maiores valores de fluxo de calor total. Uma hipótese é devido à maior dificuldade de dissipação do calor no interior do cânion, em relação à M1, em função da maior altura das fachadas.
- No caso do fluxo por condução o atraso foi de até 2 horas entre as duas configurações.
- Os maiores valores de fluxo de calor total médio ocorrem nos cânions com pavimento de concreto grafite, em seguida o pavimento asfalto. E que a morfologia mais crítica foi a M2. E que os menores valores de fluxo total médio foram nos cânions com pavimento na coloração cinza.

Em relação ao **modelo físico**, como conclusões gerais, podemos relatar o seguinte:

- Grandes diferenças na temperatura da superfície (T_s) são observadas entre as diferentes formas urbanas. Portanto, atribuídas aqui aos efeitos de sombreamento no cânion com maior relação H/W, embora, em geral, para a T_s , a refletância do pavimento seja um fator importante;
- As diferenças na temperatura do ar (T_a) são bastante afetadas pela relação H/W e, em termos de refletância da superfície, surge um efeito de aquecimento das

- superfícies mais claras na temperatura do ar, que é reduzido no cânion mais profundo;
- Também para T_a , as diferenças nas propriedades do material (concreto *versus* asfalto) para refletâncias de pavimento semelhantes levaram a diferenças no comportamento térmico;
 - As diferenças na temperatura do globo (T_g) entre as amostras mostram o impacto da refletância da superfície, sobre o pavimento mais claro, menor temperatura de globo, do que os mais escuros;
 - A relação de forma urbana, no entanto, é um fator mais relevante para as reduções de T_g , com maior poder de resfriamento do que as alterações na refletância visível (a troca do asfalto pelo concreto cinza-claro reduziu cerca de 0,9K a temperatura de globo. Enquanto que entre os cânions com H/W 0,33 e 0,66, para a amostra de concreto cinza-claro, a diferença foi de 1,9 K).

Por fim, em relação ao processo de **tomada de decisão multicritério**:

No contexto tropical, onde o estudo foi desenvolvido e relacionando variáveis do campo térmico no interior de cânions urbanos, com pavimentos com albedos elevados e baixos:

- O pavimento cinza, de refletância igual à 0,224, para todas as configurações e cenários apresentou a melhor pontuação.
- O fluxo de calor total (Q) juntamente com a absorvância auxiliaram na convergência dos resultados na aplicação do método AHP-gaussiano.
- Entretanto, a decomposição do fluxo de calor total em fluxo radiativo, condutivo e convectivo não auxiliou o processo de tomada de decisão. Uma hipótese por não haver essa convergência foi o fato da dificuldade em se determinar qual dos critérios são monotônicos de custo e monotônicos de lucro.

5.2. Discussões

- a) O **modelo físico** em escala reduzida, nomeado PAVSCAM, foi importante para monitorar e observar o comportamento dos pavimentos sob diferentes condições de sombreamento, ventilação e exposição à radiação. A proposta é ter uma ferramenta de baixo custo e com observações em campo, considerando toda a complexidade da morfologia e dos materiais e de modo controlado. Além disso, monitorar as variáveis relacionados aos processos de troca de calor, entre a estrutura do pavimento (sub-leito, base e revestimento), com o solo e com a atmosfera.

Como limitação do estudo, pode-se destacar a diferença de inércia térmica entre o modelo reduzido e o ambiente em escala real. Além disso, a dificuldade em

considerar o efeito do *fetch*, que representa o efeito da rugosidade urbana no entorno do PAVSCAM em um contexto real. Esta limitação foi parcialmente resolvida dispondo as ruas a favor do vento dominante, de modo a que as trocas de calor por convecção fossem praticamente iguais nas filas paralelas do cânion. A instrumentação também poderia ser aprimorada com a inclusão de medições de fluxo de calor, radiação omnidirecional e vento tridimensional. No entanto, numa investigação de baixo orçamento, os custos relacionados com as placas de fluxo de calor, os radiômetros de rede e os anemômetros sônicos seriam de elevados custos.

A análise da atenuação do calor devido à refletância do pavimento mostrou ainda ser uma combinação complexa, envolvendo sombreamento, propriedades do material e albedo. Desta forma, a caracterização completa das amostras é fundamental para uma interpretação correta dos resultados.

- b) O **modelo numérico**, utilizando o ENVI-met, para avaliação do desempenho térmico do pavimento permitiu a validação do modelo físico. Auxiliou, inclusive, no entendimento dos erros envolvendo esses diferentes métodos de simulação e escalas de análise. Para estudos sobre a temperatura da superfície de pavimentos, dentro da faixa de temperatura de 12°C a 37 °C, recomenda-se calibrar modelos físicos usando dados derivados de modelos de simulação numérica como entrada, produzindo um erro percentual absoluto médio (MAPE) de 4,9%. Para estimar dados em escala urbana do mundo real, dentro da faixa de temperatura do ar de 15 °C a 37 °C, propõe-se usar dados de saída de modelos simulados no ENVI-met, que apresentaram um erro médio absoluto (MAE) de $\pm 0,59$ ou modelos físicos (MAE = $\pm 0,66$).
- c) Os **modelos multicritério para tomada de decisão**, como o AHP-Gaussiano, foram importantes ao considerar diferentes variáveis do campo térmico (temperatura de todas as camadas do pavimento, temperatura do ar e fluxo de calor), assim como cenários, compostos por diferentes materiais de pavimento (asfalto e concreto) e configurações urbanas (Relação H/W 0,33 e 0,66). A análise dos dados, levando em conta a ponderação das características dos pavimentos e suas camadas subsuperficiais, revelou que o pavimento cinza obteve a melhor pontuação em todas as configurações e cenários, por apresentar os menores valores de Temperatura, Albedo e Fluxo. Por outro lado, o pavimento de asfalto teve o pior desempenho, ficando na última posição do *ranking*.

Além disso, a avaliação do fluxo de calor (Q) mostrou que essa variável, juntamente com a absorptância, foi crucial para a convergência dos resultados. No entanto, a decomposição do fluxo de calor total em fluxo radiativo, condutivo e convectivo não facilitou a tomada de decisão. Isso pode ser atribuído à dificuldade de identificar quais critérios são monotônicos de custo e quais são monotônicos de lucro nesse contexto de aplicação.

- d) Na perspectiva do **balanço radiativo**, relacionando o acúmulo de calor no interior do cânion, pode ser observado que os maiores valores de fluxo de calor total médio ocorrem nos cânions com pavimento intertravado de concreto grafite, em seguida

o pavimento asfalto. E que a morfologia mais crítica foi a com menor relação H/W (0,33) . Além disso, os menores valores de fluxo total foram nos cânions com pavimento na coloração cinza.

- e) Na perspectiva do **campo térmico** no interior do cânion, em ambas as zonas, sob condições não sombreadas e vento fraco, o pavimento em asfalto apresentou registros de temperatura do ar superiores em relação ao concreto.

Entretanto, por apresentar uma maior inércia do que os pavimentos em asfalto, houve uma maior emissão de radiação de ondas longas ao final da tarde, sendo um fator agravante para o UTCI, especialmente nas vias não-sombreadas, com orientação Leste-Oeste. Por isso, podem se ter um aplicação favorável no leito carroçável da via e não para calçadas e passeios.

- f) Na perspectiva do **pedestre** no interior do cânion, em função da zona bioclimática analisada, foram identificados comportamentos distintos. O aumento do albedo reduziu as condições de stress térmico do meio-dia na zona fria e úmida (Z1). Apesar das velocidades modestas do vento (cerca de 0,5 m/s), essa mudança reduziu o stress térmico de “Forte” para “Moderado”, mostrando que os pavimentos intertravados de concreto podem ser uma intervenção eficaz para aumentar o conforto dos pedestres nessas condições.

Por outro lado, na zona quente e seca (Z6), as vias não-sombreadas, apresentaram aumento do stress por calor ao final da tarde, como resultado do aumento do albedo ou da inércia térmica. Nesse caso, o stress térmico nos pavimentos intertravados de concreto foram de “Forte” para “Muito Forte”, sugerindo que as superfícies com albedo ou inércia altas, podem fazer com que as pessoas se sintam mais desconfortáveis dentro do cânion urbano.

Desta forma, esta pesquisa se encontra com a gestão pública ao oferecer uma metodologia que combina simulações computacionais com observações em campo, através de um modelo físico reduzido, na escolha de pavimentos urbanos, superfícies de estacionamentos, cobertura de parques, áreas de lazer e revestimentos de calçadas, ciclofaixas e ciclovias. Em função do usuário, do horário de utilização e do contexto climático, é possível observar quais variáveis ambientais são predominantes e consequentemente avaliar quais são os aspectos mais críticos. Por meio dos modelos de simulação, pode-se quantificar o comportamento das superfícies sob a ótica do acúmulo de calor no interior do cânion urbano e do stress térmico o qual o pedestre está sujeito.

Assim, o planejamento do território pode efetivamente considerar as superfícies pavimentadas em um plano de resiliência climática e orientar as políticas públicas municipais na elaboração de parâmetros mais eficientes no uso e ocupação do solo e na construção de cidades mais saudáveis, confortáveis e adaptáveis às transformações.

Este trabalho oferece um conjunto de ferramentas para análise de pavimentos urbanos, com o objetivo de considerá-los em projetos responsivos ao clima no contexto tropical. São propostas: a utilização de modelos físicos, como o PAVSCAM, para análise do

campo térmico; modelos numéricos, como ENVI-met para complementar as análises do comportamento das superfícies e do stress térmico sobre o pedestre; e métodos multicritério para tomada de decisão, como o AHP-Gaussiano. Desta forma, os dados coletados em campo, são complementados por essas novas perspectivas, o que permite uma análise mais robusta e efetiva para aplicações no contexto das cidades. O que converge e favorece um planejamento urbano de infraestruturas de pavimento com melhor resposta ao clima local.

5.3. Trabalhos Futuros

Essa metodologia pode ser ampliada, tanto na perspectiva da coleta de dados utilizando o PAVSCAM, quanto nos métodos de análise de dados. Por isso, como sugestão de trabalhos futuros podem ser pontuados:

- Avaliação de fachadas no interior que compõem o cânion urbano, utilizando o modelo físico, com aplicação de novos materiais e diferentes morfologias.
- Calibração do modelo físico para avaliação de conforto térmico urbano.
- Atualização do AHP-gaussiano com a inserção de novos critérios, como temperatura de fachadas e propriedades resultantes de diferentes inércias na camada de base do pavimento.
- Aplicação de outros métodos multicritérios para tomada de decisão, como o WISP, SWARA-MOORA, PROMETHEE, THOR ou ELECTRE.

Referências

ABIKO, A. **Urban Engineering: Concepts and Challenges, Methods and Techniques in Urban Engineering**. Armando Carlos de Pina Filho and Aloisio Carlos de Pina (Ed.), InTech, 2010. <http://www.intechopen.com/books/methods-and-techniques-in-urban-engineering/urban-engineering-concepts-and-challenges>

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.

ADEGUN, Olumuyiwa Bayode. Strategies for addressing exposure to extreme heat in a slum community. In: **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer**. Emerald Publishing Limited, 2023. p. 1-11. <https://doi.org/10.1680/jmuen.23.00022>

ALCOFARADO, M. J., & MATZARAKIS, A. Planning with urban climate in different climatic zones. **Geographicalia**, v.57, p. 5-39, 2010.

ANDRZEJEWSKA, A. Challenges of Spatial Planning in Poland in the Context of Global Climate Change—Selected Issues. **Buildings**. 2021. <https://doi.org/10.3390/buildings11120596>.

ANTING, N.; DIN, M. F. M.; IWAO, K.; PONRAJ, M.; SIANG, A. J. L. M.; YONG, L. Y., & PRASETIJO, J. Optimizing of near infrared region reflectance of mix-waste tile aggregate as coating material for cool pavement with surface temperature measurement. **Energy and Buildings**, 158, 172–180, 2018. doi:10.1016/j.enbuild.2017.10.001.

BALBO, T. J.; ASFÁLTICA, **Pavimentação: Materiais, projeto e restauração**. 1.ed, 3ª reimpressão. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2007.

BITAN, ArieH. The methodology of applied climatology in planning and building. **Energy and Buildings**, v. 11, n. 1-3, p. 1-10, 1988.

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

BULKELEY, H., & TUTS, R. Understanding urban vulnerability, adaptation and resilience in the context of climate change. **Local Environment**, v.18, p.646 – 662, 2013. <https://doi.org/10.1080/13549839.2013.788479>.

BUSAYO, E., KALUMBA, A., & ORIMOLOYE, I. **Spatial planning and climate change adaptation assessment: Perspectives from Mdantsane Township dwellers in South Africa.** *Habitat International*, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.HABITATINT.2019.04.005>.

BUSH, J., & DOYON, A. Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute?. **Cities**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102483>.

CAI, Z., PAGE, J., & CVETKOVIC, V. Urban Ecosystem Vulnerability Assessment of Support Climate-Resilient City Development. **Urban Planning**, 2021. <https://doi.org/10.17645/up.v6i3.4208>.

CAPARROS-MIDWOOD, D., BARR, S., & DAWSON, R. Spatial Optimization of Future Urban Development with Regards to Climate Risk and Sustainability Objectives. **Risk Analysis**, v. 37, p.2164 – 2181, 2017. <https://doi.org/10.1111/risa.12777>.

CARPIO, J. A. D del. **Uso de pigmentos de óxidos de metais mistos na pavimentação para a mitigação da ilha de calor urbana.** 2014. 437 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

CARTER, J., CAVAN, G., CONNELLY, A., GUY, S., HANDLEY, J., & KAŻMIERCZAK, A. Climate change and the city: Building capacity for urban adaptation. **Progress in Planning**, v.95, p.1-66, 2015. <https://doi.org/10.1016/J.PROGRESS.2013.08.001>.

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.

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.

CORDEIRO, A. M. R. The Importance of the Holistic View in Urbanism: The Role of Physical Geography in the Sustainable City of the 21st Century. *Advances in Social Sciences Research Journal*, 2022, 9.12.

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.

DHAR, T., & KHIRFAN, L. A multi-scale and multi-dimensional framework for enhancing the resilience of urban form to climate change. **urban climate**, v.19, p.72-91, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2016.12.004>.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1984.

ELIASSON, Ingegård. The use of climate knowledge in urban planning. **Landscape and urban planning**, v. 48, n. 1-2, p. 31-44, 2000.

ELMQVIST, T., ANDERSSON, E., FRANTZESKAKI, N., MCPHEARSON, T., OLSSON, P., GAFFNEY, O., TAKEUCHI, K., & FOLKE, C. Sustainability and resilience for transformation in the urban century. *Nature Sustainability*, v.2, p.267-273, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0250-1>.

EPA. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems - **Volume IV: Meteorological Measurements**. Washington, DC: US EPA, 2008.

FALLMANN, J., & EMEIS, S. How to bring urban and global climate studies together with urban planning and architecture?. **Developments in the Built Environment**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100023>.

FORBES, R. J. **Notes on the history of ancient roads and their construction**. Amsterdam: NV Noord-Hollandsche, Archaeologisch-historische Bijdragen, Deel III, University of Amsterdam, 1934.

FRANKLING INSTITUTE, Committee on Science and Arts. Report on the best modes of paving highways. **Journal of Frankling Institute**, v. 6, n. 3, Setembro, pp. 145-148, 1843.

GONZALEZ, D. E. G. **Análise dos efeitos do albedo no microclima de cânions urbanos**. Curitiba, 2015. 175f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GRABOWSKI, Z., MCPHEARSON, T., MATSLER, A., GROFFMAN, P., & PICKETT, S. What is green infrastructure? A study of definitions in US city planning. **Frontiers in Ecology and the Environment**, 2022. <https://doi.org/10.1002/fee.2445>.

HAMILTON, A. M.; FRANK, L. **Oregon Solar Highway Program Development Manual**. Salem, OR (United States): Oregon Department of Transportation, 2016.

HARRELL, J. A; BOWN, T. M. An old kingdom basalt quarry at Widan el-Faras and the quarry road to Lake Moeris. **Journal of American Research Center in Egypt**, n.32, p.71-1, 1995.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2.ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.

HURLIMANN, A., & MARCH, A. The role of spatial planning in adapting to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v.3, 2012. <https://doi.org/10.1002/wcc.183>.

HVEEM, F. N.; CARMANY, R. M. The Factors Underlying the Rational Design of Pavements. **Proceedings Highway Research Board**, Dezembro, p.7-10, 1948.

JAMSHIDI, A.; KURUMISAWA, K.; WHITE, G.; NISHIZAWA, T.; IGARASHI, T.; NAWA, T.; MAO, J. State-of-the-art of interlocking concrete block pavement technology in Japan as a post-modern pavement. **Construction & Building Materials**, 200, 713-755, 2019.

JUSCHTEN, M., REINWALD, F., WEICHSELBAUMER, R., & JIRICKA-PÜRRER, A. Developing an Integrative Theoretical Framework for Climate Proofing Spatial Planning Across Sectors, Policy Levels and Planning Areas. **Land**, 2021. <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS202105.0410.V1>.

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.

KIM, D., & LIM, U. Urban Resilience in Climate Change Adaptation: A Conceptual Framework. **Sustainability**, v.8, p.405, 2016. <https://doi.org/10.3390/SU8040405>.

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.

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.

LAI, LIU, GAN. T.; LIU, K.; CHEN, Q. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. **Science of the Total Environment**, 661, 15 April 2019, p. 337-353, 2019.

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

LI, L.; ZOU, Z.; ZHOU, T.; ZHOU, X.; LI, Q. Simulation and Analysis of Influencing Factors of Pavement Thermal Environments in Guangzhou. **Sustainability (Basel, Switzerland)**, 14(12), 7251, 2022.

LIN, B., OSSOLA, A., ALBERTI, M., ANDERSSON, E., BAI, X., DOBBS, C., ELMQVIST, T., EVANS, K., FRANTZESKAKI, N., FULLER, R., GASTON, K., HAASE, D., JIM, C.,

KONIJNENDIJK, C., NAGENDRA, H., NIEMELÄ, J., MCPHEARSON, T., MOOMAW, W., PARNELL, S., PATAKI, D., RIPPLE, W., & TAN, P. Integrating solutions to adapt cities for climate change. **The Lancet**. Planetary health, v.57, e479-e486, 2021. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00135-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00135-2).

MAHMUD, M. S.; WAZEDUR-RAHMAN, M.; LIPU, M. H.; AL MAMUN, A.; ANNUR, T.; ISLAM, M. M.; ... & ISLAM, M. A. Solar highway in Bangladesh using bifacial PV. In: **2018 IEEE International Conference on System, Computation, Automation, and Networking (ICSCAN)**. IEEE, 2018. p. 1-7.

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.

MATTHEWS, T., LO, A., & BYRNE, J. Reconceptualizing green infrastructure for climate change adaptation: Barriers to adoption and drivers for uptake by spatial planners. **Landscape and Urban Planning**, v.138, p.155-163, 2015. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2015.02.010>.

MCPHEARSON, T., HAASE, D., KABISCH, N., & GREN, Å. Advancing understanding of the complex nature of urban systems. **Ecological Indicators**, v.70, p.566-573, 2016. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2016.03.054>.

MILLS, G. Progress toward sustainable settlements: a role for urban climatology. **Theor. Appl. Climatol.** V.84, p.69–76, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0145-0>

MILLS, G., CLEUGH, H., EMMANUEL, R., ENDLICHER, W., ERELL, E., MCGRANAHAN, G., ... & STEEMER, K. Climate information for improved planning and management of mega cities (needs perspective). **Procedia Environmental Sciences**, v. 1, p. 228-246, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.015>

MILLS, Gerald. Urban climatology: History, status and prospects. **Urban climate**, v. 10, p. 479-489, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.004>

MOHAJERANI, A.; BAKARIC, J.; JEFFREY-BAILEY, T. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. **Journal of Environmental Management**, 197, 522-538, 2017.

MOUNTAIN, A. C. **Report on paved roadways**. City of Sydney, 1880.

NIK, V., PERERA, A. & CHEN, D. Towards climate resilient urban energy systems: a review. **National Science Review**, v.8, 2020. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa134>.

NWAKAIRE, C.; YAP, S.; ONN, C.; YUEN, C.; MOOSAVI, S. Utilization of Recycled Concrete Aggregates for Sustainable Porous Asphalt Pavements. **The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering**, 17(1), 117-142, 2022.

OKE, T. R. **The Urban Boundary Layer**, London, Routledge, 1987.

OKE, T.R. **Keynote Address to the Technical Conference on Tropical Urban Planning with urban climate in different climatic zones Climates (TeCTUC)**, WMO/TD n.647, p. 23-27, 1994.

OKE, T.R. Towards better scientific communication in urban climate. **Theoretical and applied climatology**, v. 84, p. 179-190, 2006. DOI 10.1007/s00704-005-0153-0

ONSET. **HOBO U30 Station (U30-NRC) User's Guide**. Disponível em: <https://www.onsetcomp.com/support/manuals/11866-u30-nrc-manual>. Acesso em: 04 de outubro de 2022.

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.

POMERANTZ, M. **Paving materials for heat island mitigation**. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1997.

POMERANTZ, M.; AKBARI, H.; HARVEY J. **Cooler reflective pavements give benefits beyond energy savings: durability and illumination**. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

PUCHOL-SALORT, P., O'KEEFFE, J., REEUWIJK, M., & MIJIĆ, A. An urban planning sustainability framework: Systems approach to blue green urban design. **Sustainable Cities and Society**, 2020. <https://doi.org/10.31223/x5759q>.

QIN, Y. Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements. **Energy and Buildings**. n.96, p.86–94, 2015.

RANJAN, E. R. Solar Power Roads: Revitalizing Solar Highways, Electrical Power and Smart Grids. **International Journal of Engineering Research and General Science**, v. 3, n. 1, p. 380-385, 2015.

ROSSO, F.; GOLASI, I.; CASTALDO, V. L.; et al. On the impact of innovative materials on outdoor thermal comfort of pedestrians in historical urban canyons. **Renewable Energy**, v.118, pp.825–839, 2018.

SALATA, K., & YIANNAKOU, A. The Quest for Adaptation through Spatial Planning and Ecosystem-Based Tools in Resilience Strategies. **Sustainability**, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12145548>.

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>

SILVA, J., KERNAGHAN, S., & LUQUE, A. A systems approach to meeting the challenges of urban climate change. **International Journal of Urban Sustainable Development**, v.4, p.125 – 145, 2012. <https://doi.org/10.1080/19463138.2012.718279>.

SILVA, L. P. C. DA; GOMES, C. F. S.; SANTOS, M. DOS. Avaliação de aquisições hospitalares a partir do método multicritério AHP-Gaussiano. **In: Simpósio de Engenharia de Produção**, 28. 2021, Bauru. Anais [...]. Bauru, UNESP, 2021, p. 1 – 14.

SYNNEFA, A.; KARLESSI, T.; GAITANI, N.; SANTAMOURIS, M.; ASSIMAKOPOULOS, D.; PAPAKATSIKAS, C. Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. **Building and Environment**, 46(1), 38-44, 2011.

TALEGHANI, M. The impact of increasing urban surface albedo on outdoor summer thermal comfort within a university campus. **Urban Climate**, v.24, pp.175–184, 2018.

TATARANNI, P.; SANGIORGI, C. Synthetic Aggregates for the Production of Innovative Low Impact Porous Layers for Urban Pavements. **Infrastructures (Basel)**, 4(3), 48, 2019.

TYLER, S., & MOENCH, M. A framework for urban climate resilience. **Climate and Development**, v. 4, p.311 – 326, 2012. <https://doi.org/10.1080/17565529.2012.745389>.

VENTURA, K. S.; MENEZES, D. B.; GUERREIRO, T. C. M.; GONÇALVES, L. M. (Org.). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana – PPGEU: 25 anos. São Carlos: UFSCar/CPOL, 2020.

VIGINIA ASPHALT ASSOCIATION - VAA. **The history of asphalt**. Disponível em: <https://vaasphalt.org/the-history-of-asphalt/>. Acesso em: 04 de dezembro de 2022.

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**, 205, 108251, 2021.

WARD, Kevin. Urban Geographies: Comparative and Relational Urbanisms. In: *The Routledge Handbook of Methodologies in Human Geography*. Routledge, 2022. p. 270-278.

WASHINGTON ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION – WAPA. **Asphalt pavement history**. Disponível em: <https://www.asphaltwa.com/welcome-asphalt-pavement-history>. Acesso em: 10 de novembro de 2022.

WIERNGA, J. Representative roughness parameters for homogeneous terrain. **Boundary-Layer Meteorology**, 63(4), 323–363, 1993. doi:10.1007/bf00705357.

WILSON, E. Adapting to Climate Change at the Local Level: The Spatial Planning Response. **Local Environment**, v.11, p.609 – 625, 2006. <https://doi.org/10.1080/13549830600853635>.

YIANNAKOU, A., & SALATA, K. Adaptation to Climate Change through Spatial Planning in Compact Urban Areas: A Case Study in the City of Thessaloniki. *Sustainability*, v.9, p.271, 2017. <https://doi.org/10.3390/SU9020271>.

ZANON, B., & VERONES, S. Climate change, urban energy and planning practices: Italian experiences of innovation in land management tools. *Land Use Policy*, v.32, p.343-355, 2013. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2012.11.009>.

ZHANPING YOU, M. O.; HAMZAH, H.; WANG, A.; DIAB, Q. D. "Advanced Pavement Materials for Sustainable Transportation Infrastructure". *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2018, Article ID 3175651, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3175651>.

ZHOU, B.; PEI, J.; XUE, B.; GUO, F.; WEN, Y.; ZHANG, J.; LI, R. Solar/road from 'forced coexistence' to 'harmonious symbiosis'. *Applied Energy*, 255, 113808, 2019.

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>

Apêndice – Capítulo 2

Seção: Modelo Físico em Escala Reduzida

Figura 1. Ensaio para determinação do calor específico dos materiais, utilizando um calorímetro.



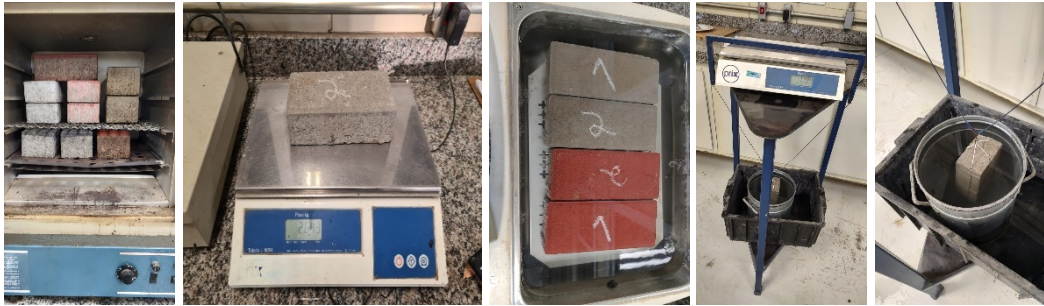
Fonte: o Autor (2024).

Figura 2. Ensaio para determinação da densidade das fachadas.



Fonte: o Autor (2024).

Figura 3. Ensaio para determinação da densidade dos pavimentos de concreto.



Fonte: o Autor (2024).

Figura 4. Produção dos poços de coleta para instrumentação.

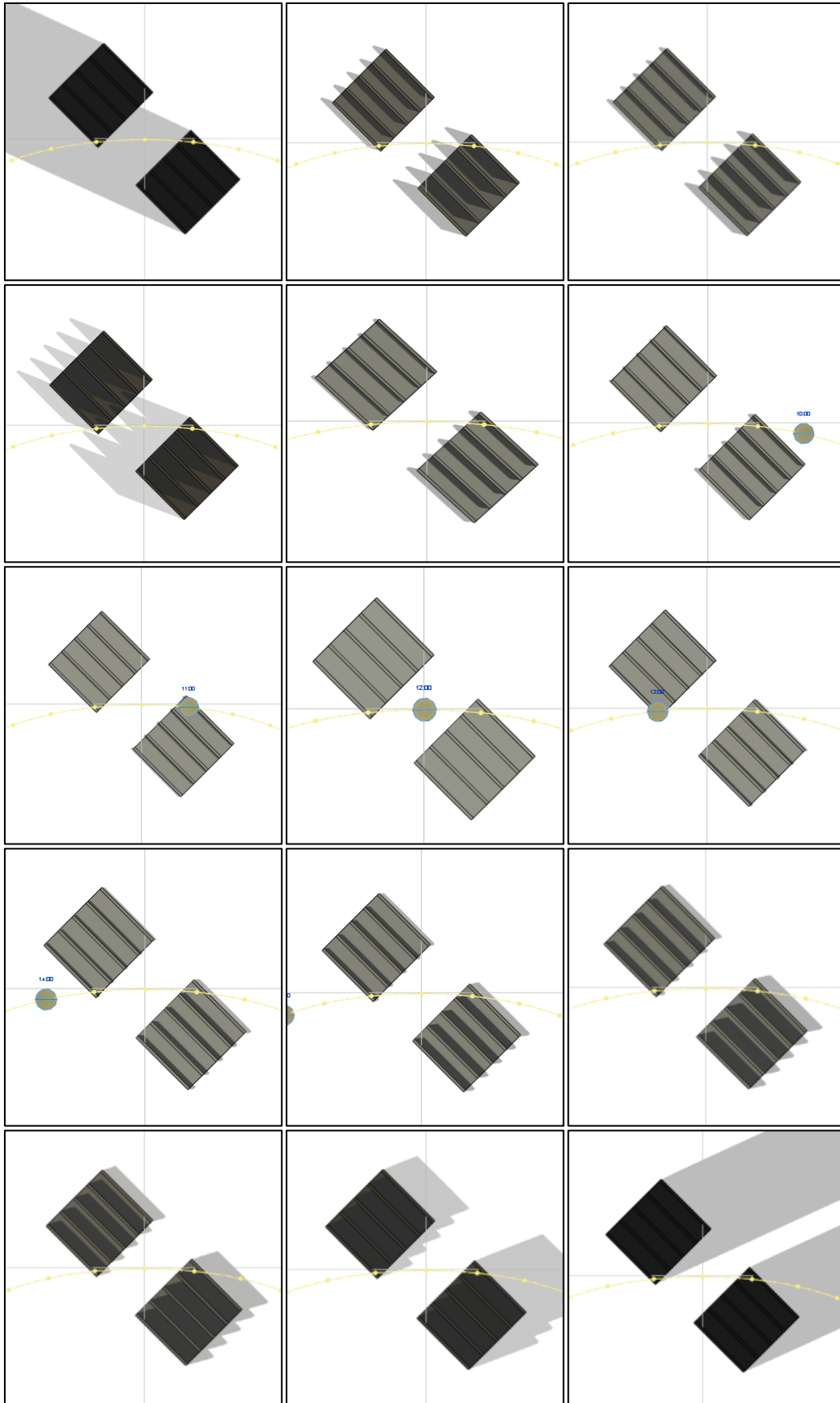


Fonte: o Autor (2024).

Figura 5. Controle de umidade relativa do solo durante o experimento.

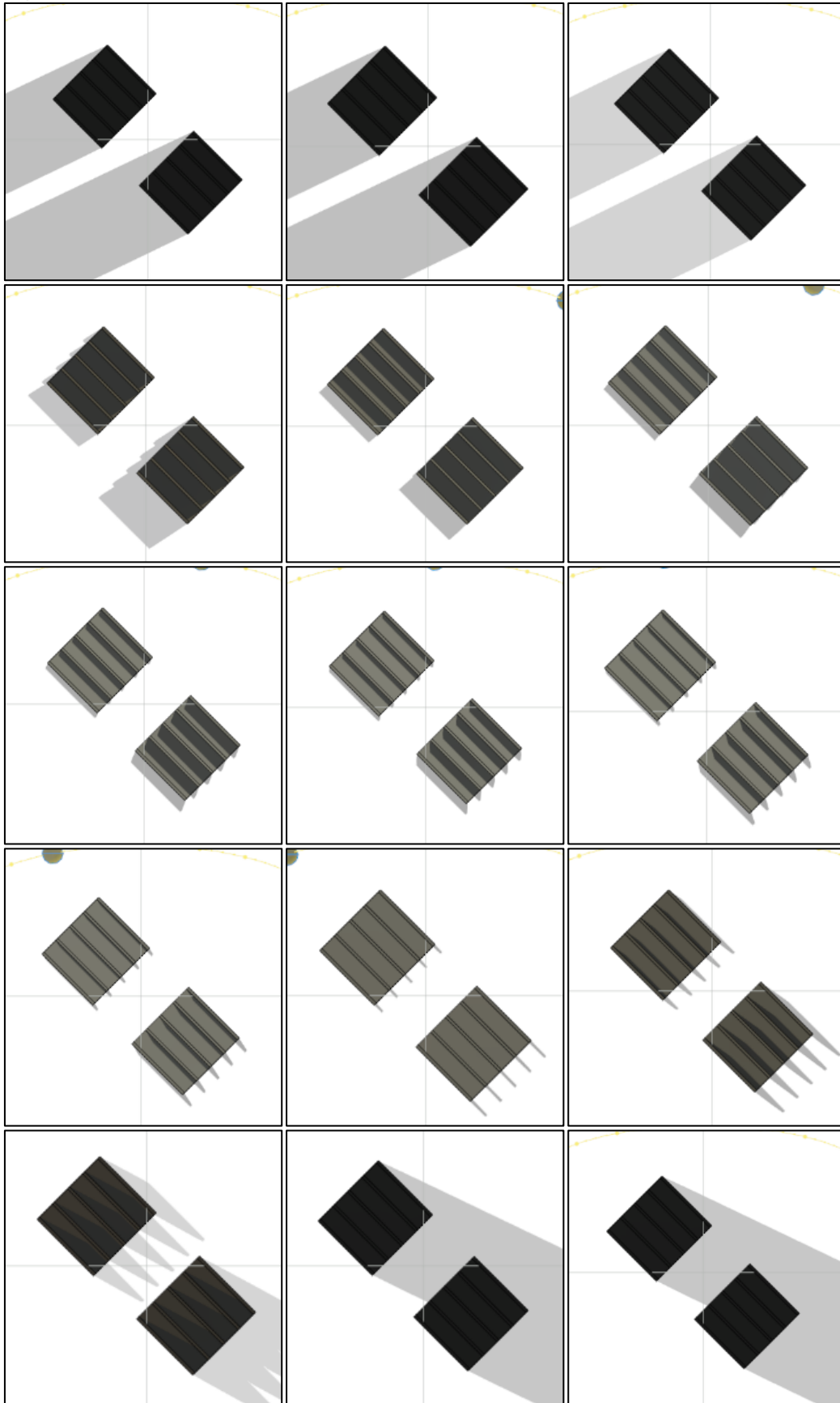


Fonte: o Autor (2024).

Figura 6. Geometria de insolação durante o verão (05h – 19h).

Fonte: o Autor (2024).

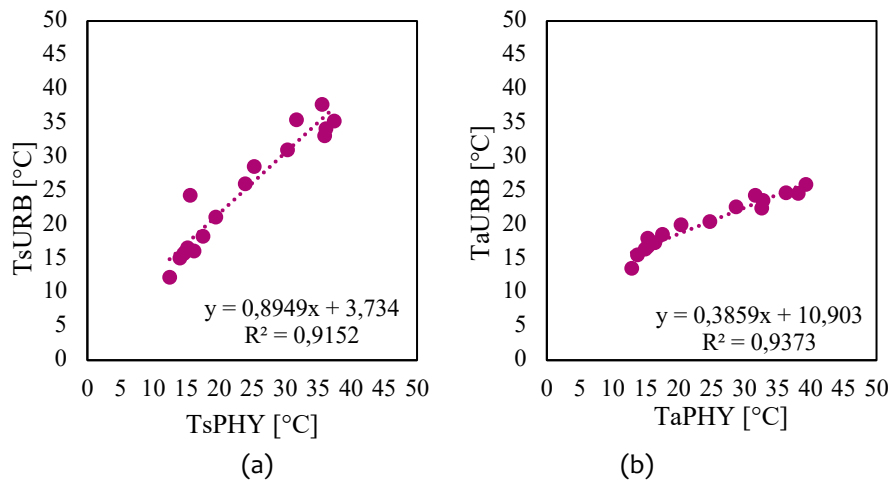
Figura 7. Geometria de insolação durante o inverno (05h – 19h).



Fonte: o Autor (2024).

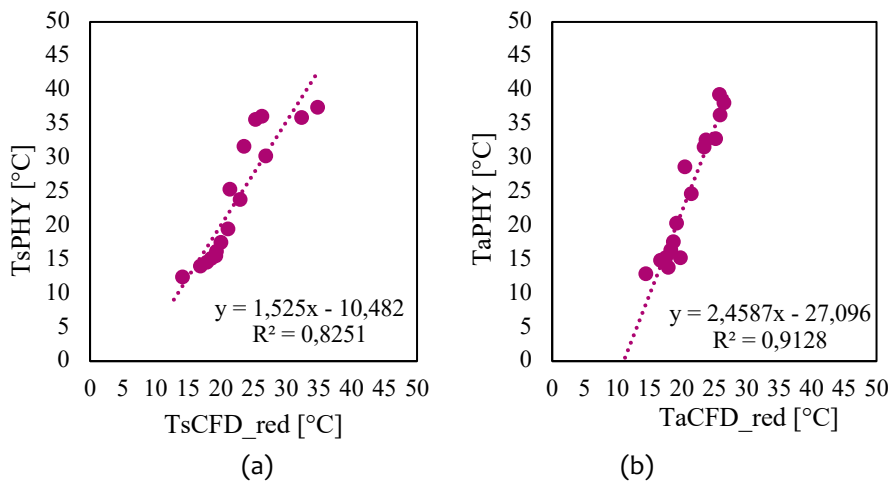
Seção: Análise de Erros entre Diferentes Escalas e Modelos de Simulação

Figura 1. Análise A1 - Correlação entre diferentes escalas: física (PHY) e urbana (URB). a. temperatura da superfície do pavimento no local (Ts); b. temperatura do ar no local (Ta).



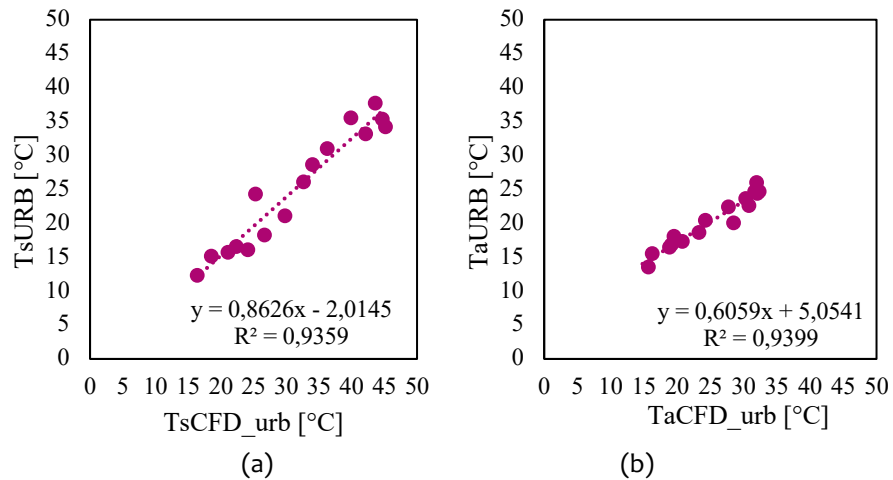
Fonte: o Autor (2024).

Figura 2. Análise A2 - Correlação entre diferentes modelagens de simulação: Numérica (CFD_red) e física (PHY). a. temperatura da superfície do pavimento (Ts); b. temperatura do ar (Ta).



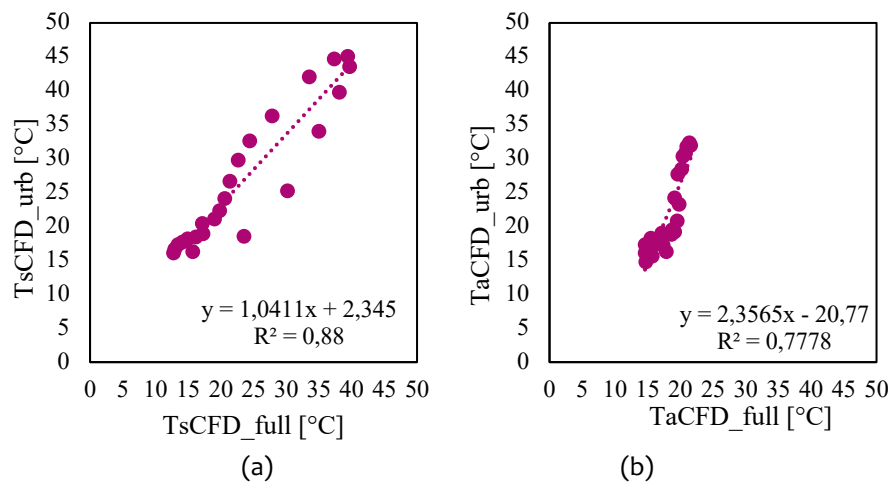
Fonte: o Autor (2024).

Figura 3. Análise A3 - Correlação entre a simulação CFD em ambiente urbano (CFD_urb) e os dados coletados no local (URB): a. temperatura da superfície do pavimento (Ts); b. temperatura do ar (Ta).



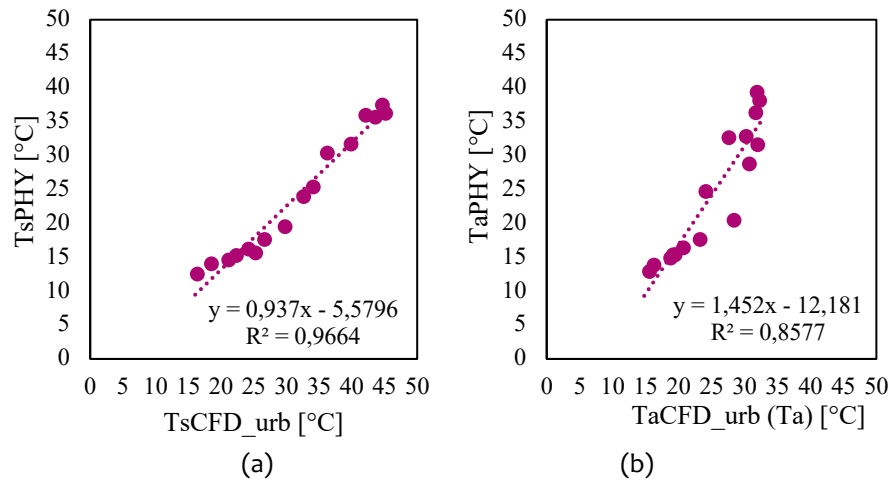
Fonte: o Autor (2024).

Figura 4. Análise A4 - Correlação entre a simulação CFD em escala numérica total (CFD_full) e os dados simulados em escala urbana (CFD_urb): a. temperatura da superfície do pavimento (Ts); b. temperatura do ar (Ta).



Fonte: o Autor (2024).

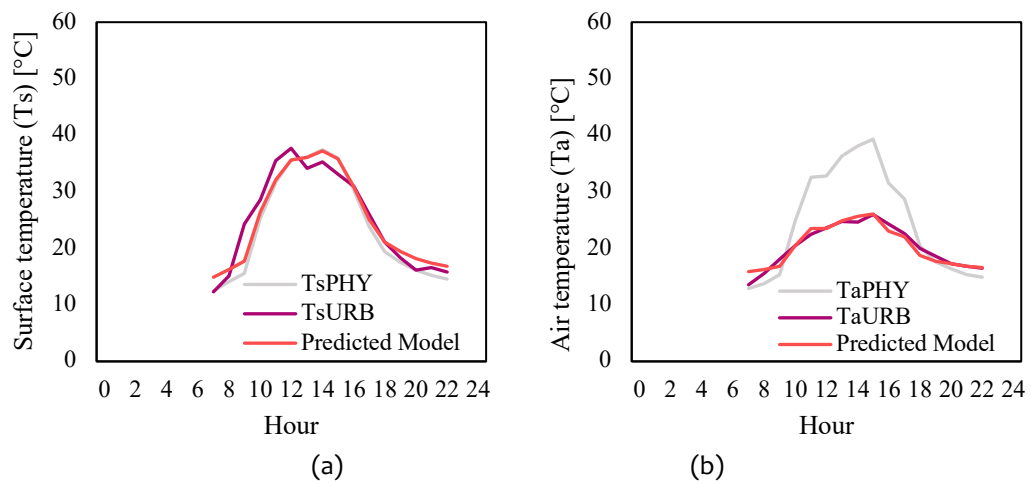
Figura 5. Análise A5 - Correlação entre os dados simulados em escala urbana (CFD_urb) e a modelagem física (PHY): a. temperatura da superfície do pavimento (Ts); b. temperatura do ar (Ta).



Fonte: o Autor (2024).

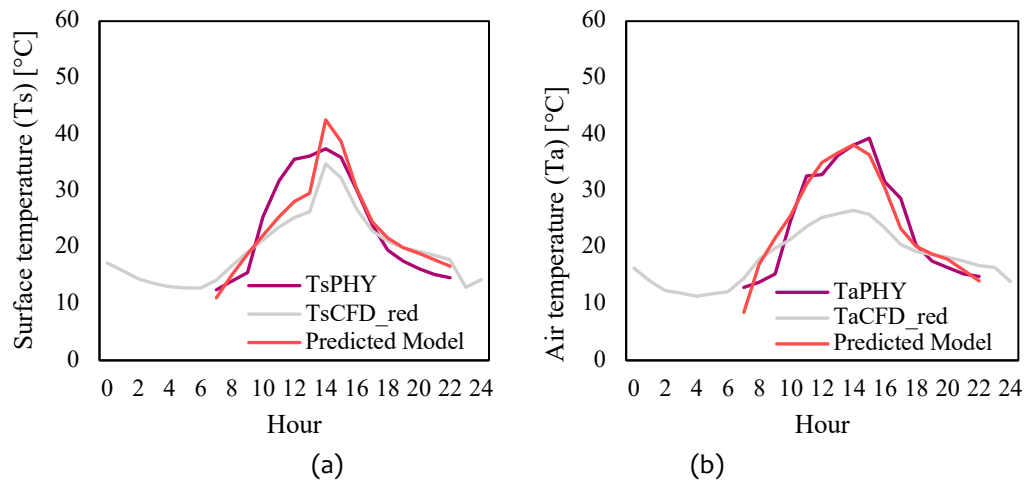
Variação temporal da temperatura do ar e da superfície

Figura 6. Análise A1 - Modelos observados e previstos: a. temperatura horária da superfície (Ts); b. temperatura horária do ar (Ta).



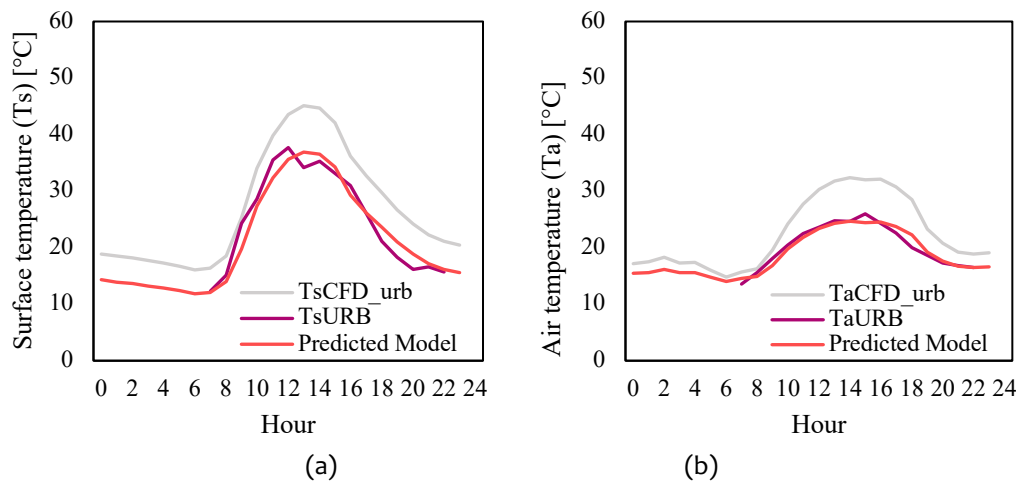
Fonte: o Autor (2024).

Figura 7. Análise A2 - Modelos observados e previstos: a. temperatura horária da superfície (Ts); b. temperatura horária do ar (Ta). CFD em escala e modelo físico.



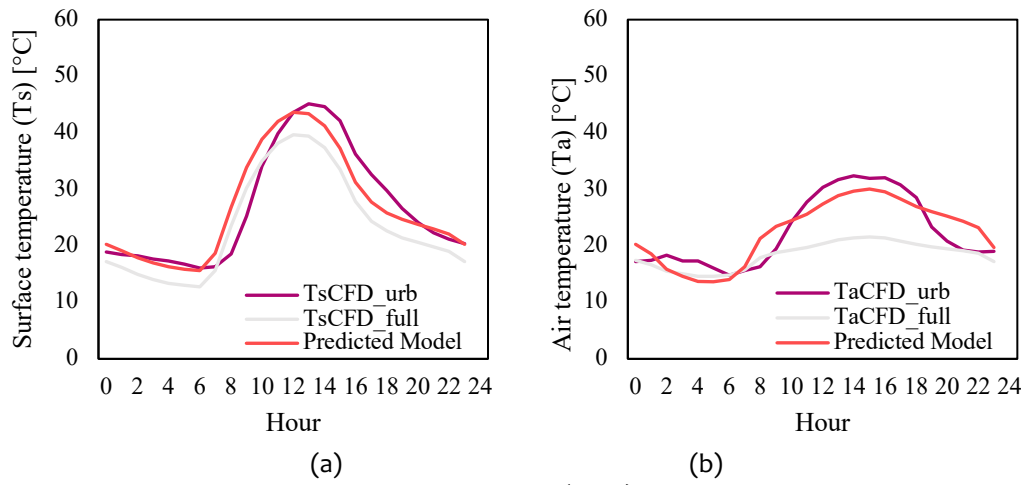
Fonte: o Autor (2024).

Figura 8. Análise A3 - Modelos observados e previstos: a. temperatura horária da superfície (Ts); b. temperatura horária do ar (Ta). Modelo urbano, no local e CFD.



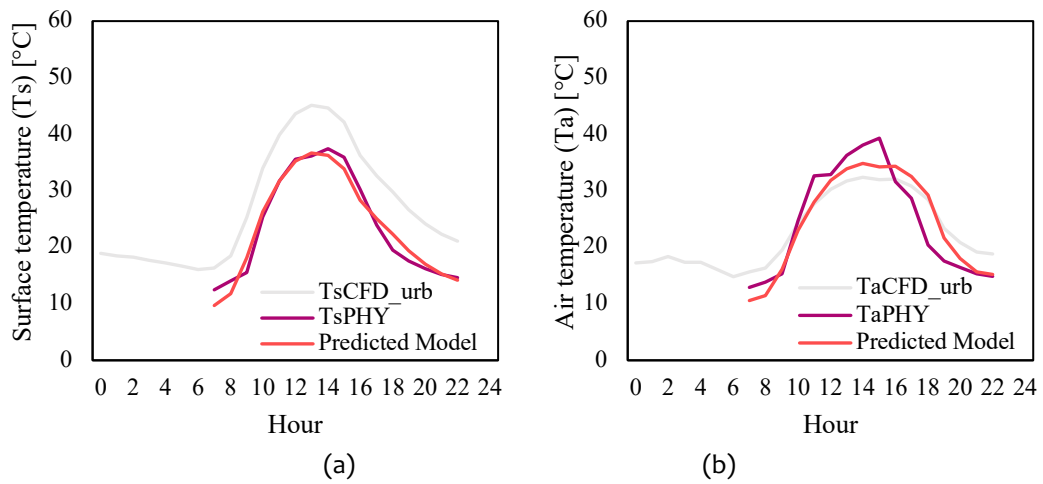
Fonte: o Autor (2024).

Figura 9. Análise A4 - Modelos observados e previstos: a. temperatura horária da superfície (Ts); b. temperatura horária do ar (Ta). Modelo CFD urbano e em escala.



Fonte: o Autor (2024).

Figura 10. Análise A5 - Modelos observados e previstos: a. temperatura horária da superfície (Ts); b. temperatura horária do ar (Ta). Modelo CFD físico e urbano.

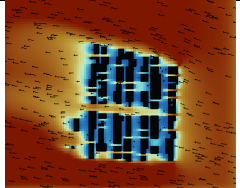
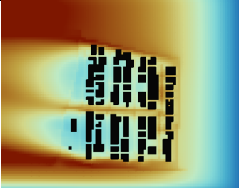

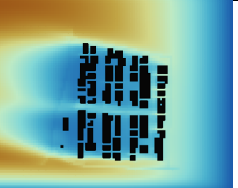
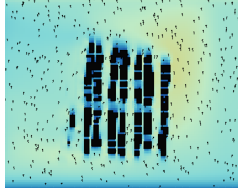
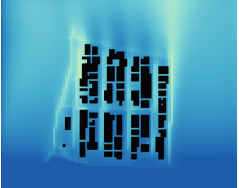
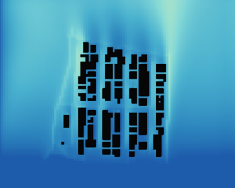



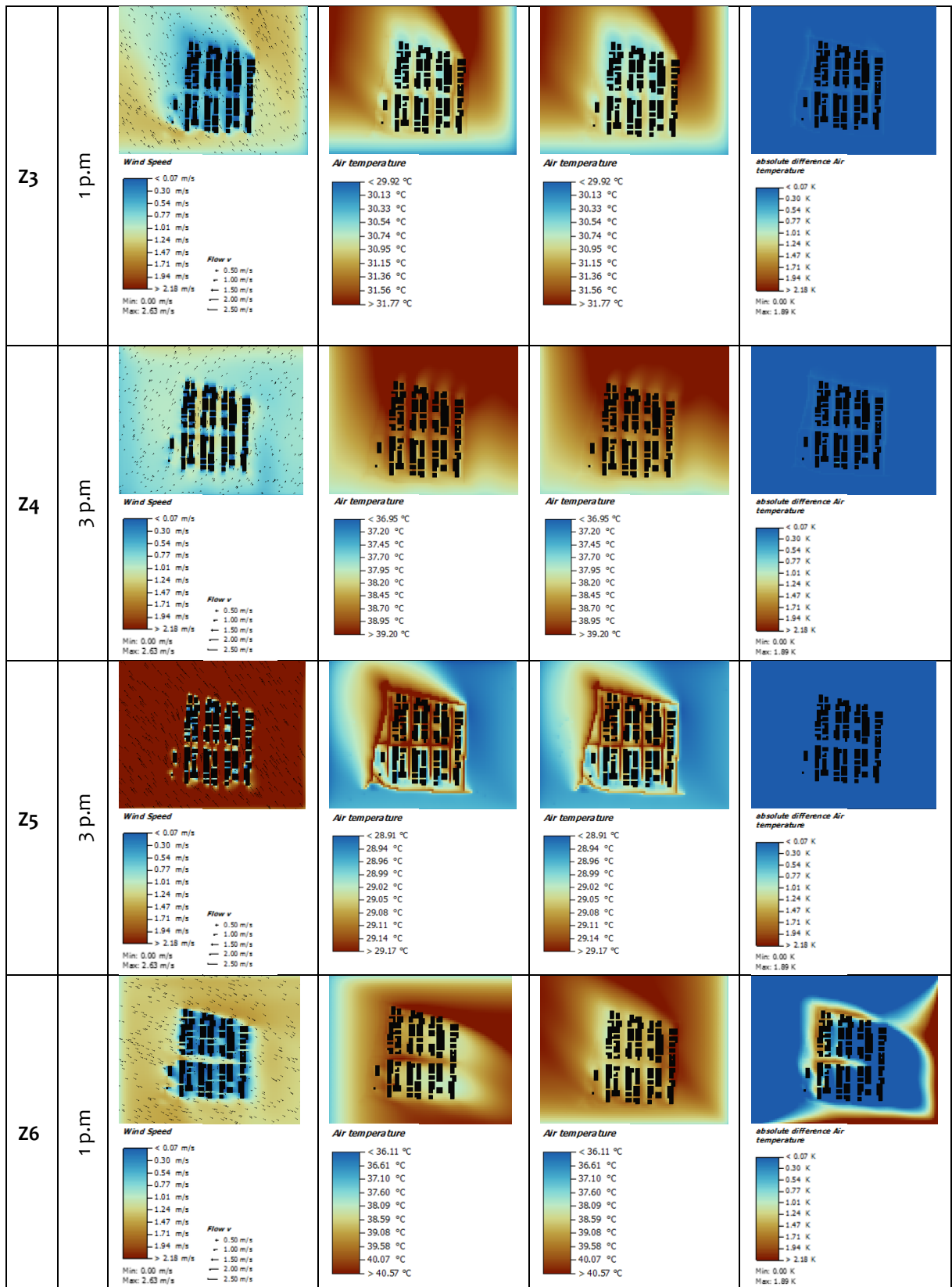
Fonte: o Autor (2024).

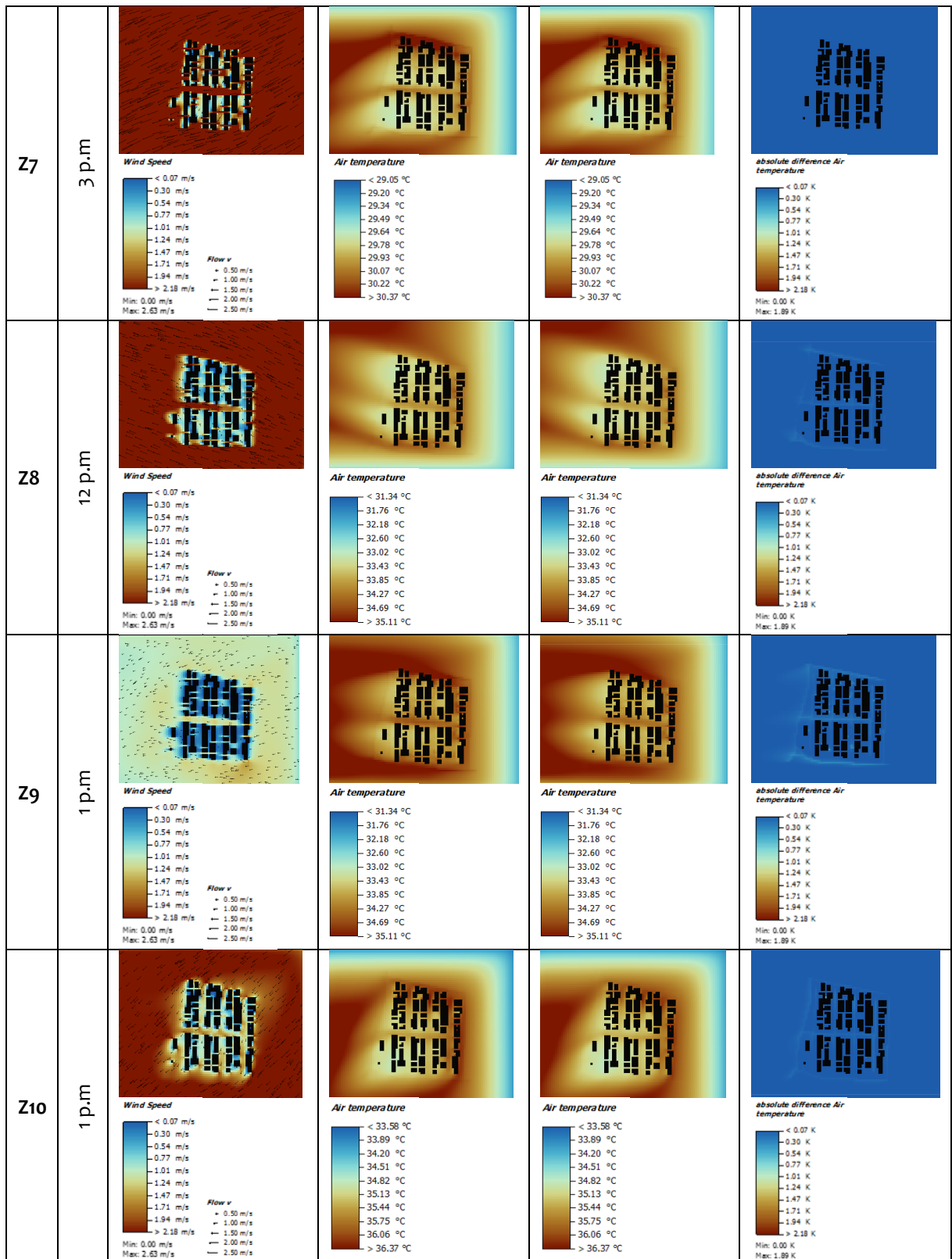
Apêndice – Capítulo 3

Seção: Pavimento e Conforto Térmico

Quadro 1. Horário com máximos registros de temperatura do ar sobre os pavimentos em asfalto e concreto.

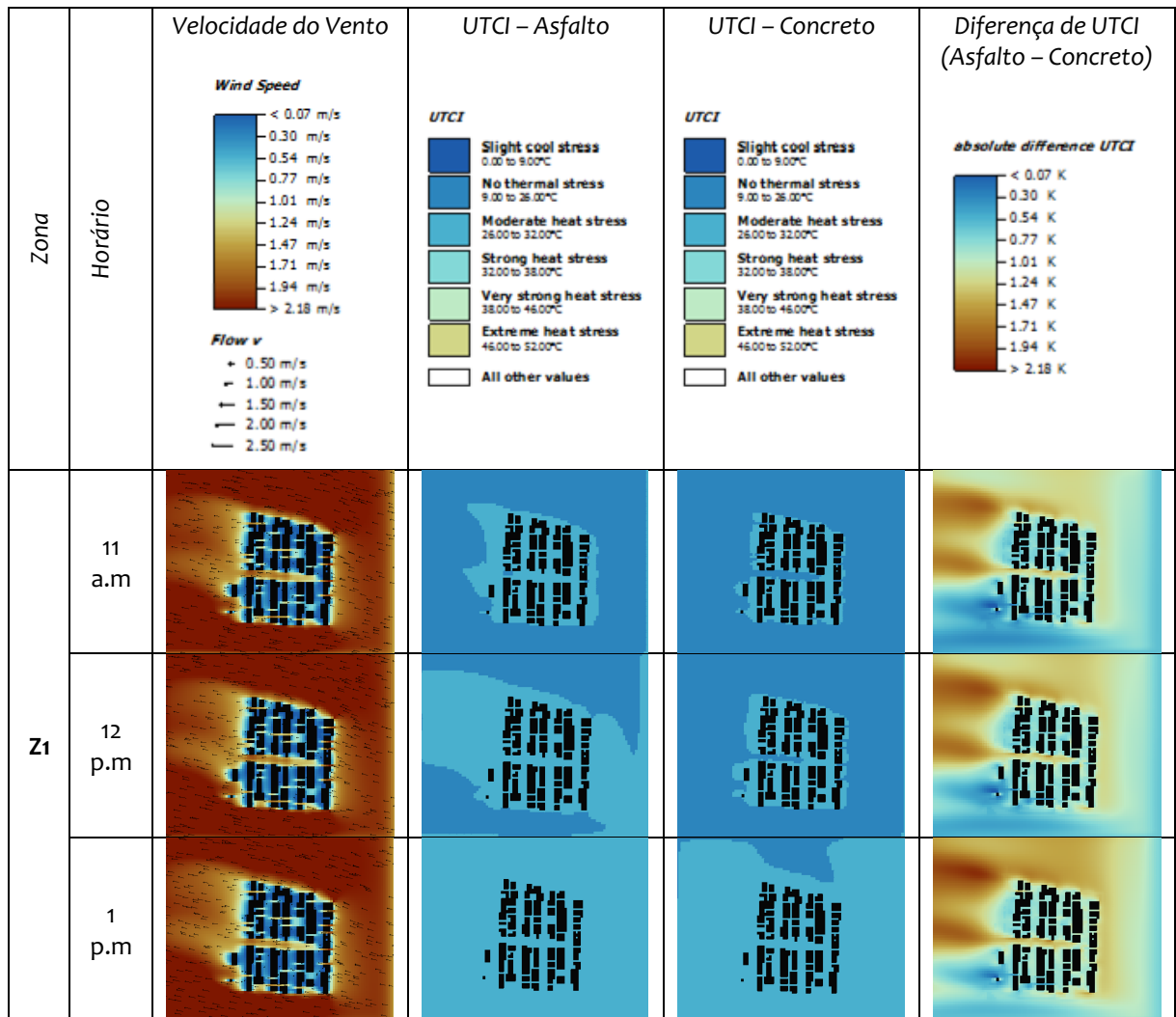
Zona	Horário	Velocidade do Vento	Temperatura do Ar – Asfalto	Temperatura do Ar – Concreto	Diferença de Temperatura do Ar (Asfalto – Concreto)
Z1	2 p.m	 <p>Wind Speed</p> <ul style="list-style-type: none"> < 0.07 m/s 0.30 m/s 0.54 m/s 0.77 m/s 1.01 m/s 1.24 m/s 1.47 m/s 1.71 m/s 1.94 m/s > 2.18 m/s <p>Flow v</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.50 m/s 1.00 m/s 1.50 m/s 2.00 m/s 2.50 m/s <p>Min: 0.00 m/s Max: 2.63 m/s</p>	 <p>Air temperature</p> <ul style="list-style-type: none"> < 26.48 °C 26.63 °C 26.78 °C 26.93 °C 27.08 °C 27.23 °C 27.38 °C 27.52 °C 27.67 °C > 27.82 °C <p>Min: 26.48 °C Max: 28.02 °C</p>	 <p>Air temperature</p> <ul style="list-style-type: none"> < 26.48 °C 26.63 °C 26.78 °C 26.93 °C 27.08 °C 27.22 °C 27.37 °C 27.52 °C 27.67 °C > 27.82 °C <p>Min: 26.05 °C Max: 26.89 °C</p>	 <p>absolute difference Air temperature</p> <ul style="list-style-type: none"> < 0.07 K 0.30 K 0.54 K 0.77 K 1.01 K 1.24 K 1.47 K 1.71 K 1.94 K > 2.18 K <p>Min: 0.00 K Max: 1.89 K</p>
Z2	2 p.m	 <p>Wind Speed</p> <ul style="list-style-type: none"> < 0.07 m/s 0.30 m/s 0.54 m/s 0.77 m/s 1.01 m/s 1.24 m/s 1.47 m/s 1.71 m/s 1.94 m/s > 2.18 m/s <p>Flow v</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.50 m/s 1.00 m/s 1.50 m/s 2.00 m/s 2.50 m/s <p>Min: 0.00 m/s Max: 2.63 m/s</p>	 <p>Air temperature</p> <ul style="list-style-type: none"> < 21.00 °C 21.50 °C 22.00 °C 22.50 °C 23.00 °C 23.50 °C 24.00 °C 24.50 °C 25.00 °C > 25.50 °C <p>Min: 21.00 °C Max: 25.50 °C</p>	 <p>Air temperature</p> <ul style="list-style-type: none"> < 21.00 °C 21.50 °C 22.00 °C 22.50 °C 23.00 °C 23.50 °C 24.00 °C 24.50 °C 25.00 °C > 25.50 °C <p>Min: 21.00 °C Max: 25.50 °C</p>	 <p>absolute difference Air temperature</p> <ul style="list-style-type: none"> < 0.07 K 0.30 K 0.54 K 0.77 K 1.01 K 1.24 K 1.47 K 1.71 K 1.94 K > 2.18 K <p>Min: 0.00 K Max: 1.89 K</p>





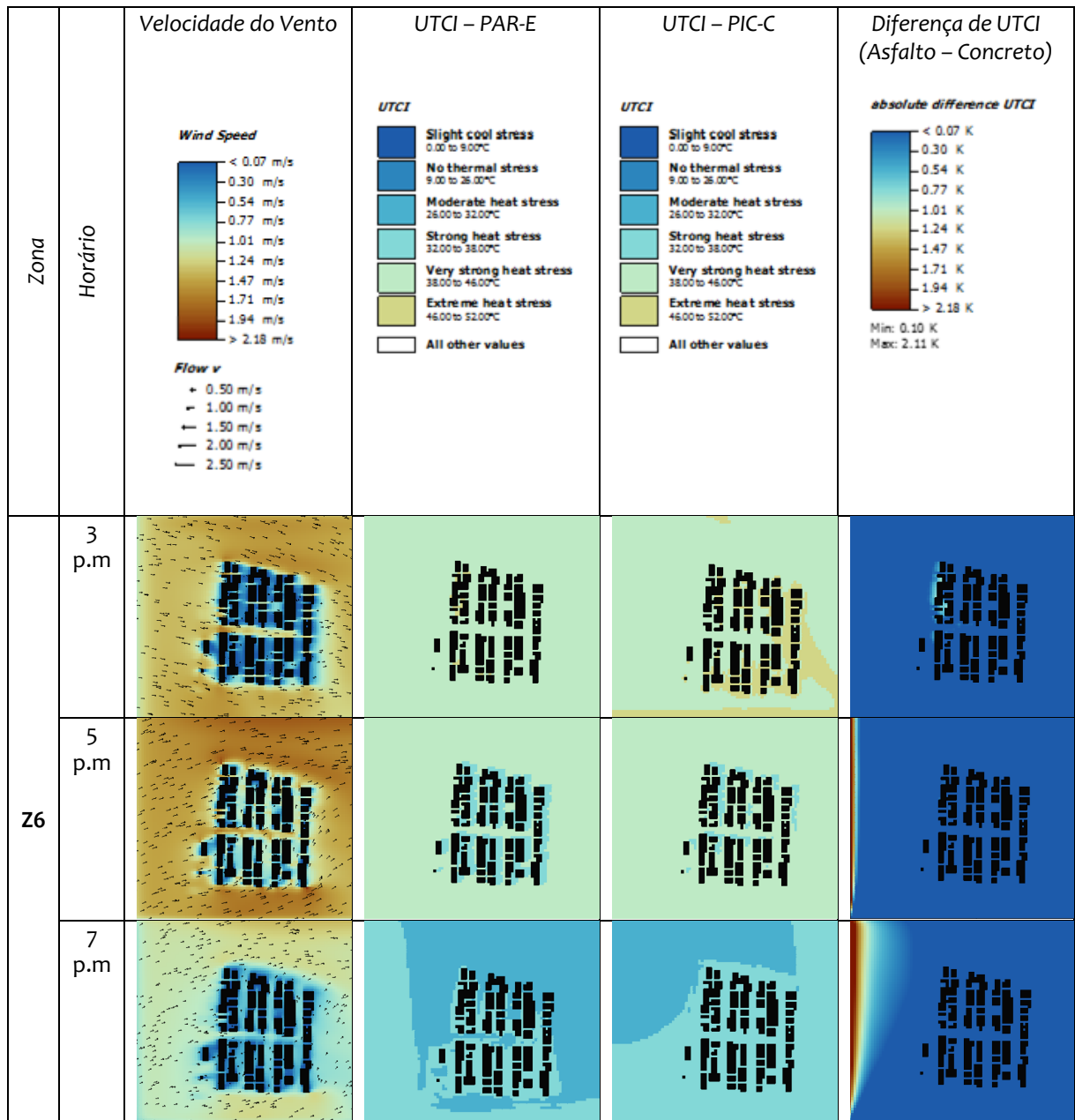
Fonte: o Autor (2024).

Quadro 2. Horário com máximos registros de UTCI sobre os pavimentos em asfalto e concreto – Zona 1.



Fonte: o Autor (2024).

Quadro 3. Horário com máximos registros de UTCI sobre os pavimentos em asfalto e concreto – Zona 6.



Fonte: o Autor (2024).