

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

**INFLUÊNCIA DO ALBEDO DE PAVIMENTOS NO CAMPO TÉRMICO DE
CÂNIONS URBANOS: ESTUDO DE MODELO EM ESCALA REDUZIDA**

LUIZ FERNANDO KOWALSKI

SÃO CARLOS
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

**INFLUÊNCIA DO ALBEDO DE PAVIMENTOS NO CAMPO TÉRMICO DE
CÂNIONS URBANOS: ESTUDO DE MODELO EM ESCALA REDUZIDA**

LUIZ FERNANDO KOWALSKI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Érico Masiero

SÃO CARLOS
2019

Kowalski, Luiz Fernando

Influência do albedo de pavimentos no campo térmico de cânions urbanos:
estudo de modelo em escala reduzida / Luiz Fernando Kowalski. -- 2019.
124 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São
Carlos, São Carlos

Orientador: Érico Masiero

Banca examinadora: Érico Masiero, Léa Cristina Lucas de Souza, Eduardo
Leite Krüger

Bibliografia

1. Albedo. 2. Pavimentos urbanos. 3. Microclima urbano. I. Orientador.
II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Ronildo Santos Prado – CRB/8 7325

Agradecimentos

- Agradeço à Deus pela sabedoria;
- Aos meus pais, Luiz e Vilma, por serem minha inspiração e meus maiores incentivadores;
- Aos meus amigos, Valber, Igor, Thami, Edu e Maria Eugênia, pelo carinho e suporte emocional;
- Ao meu orientador, Dr. Érico Masiero, por ser o grande responsável pelo meu crescimento;
- À Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), pelo acolhimento;
- Ao Centro Universitário Adventista de São Paulo (UNASP), por todo apoio institucional, pelo investimento financeiro e incentivo ao aperfeiçoamento docente;
- Ao Núcleo de Tecnologia de Engenharia e Arquitetura (NUTEA/UNASP). Especialmente meus amigos, Igor, André, Mathews, Alberto, Eliane, Noemi, Thairini, João, Luidi, Nicolás, Ramon, Denison, Andrews e Lucas, pela amizade e pelo suporte na execução do experimento;
- À empresa TATU pré-moldados pelo fornecimento dos materiais da pesquisa;
- Aos meus amigos professores do curso de engenharia civil do UNASP – Dr. Ítalo Gatica Rísoli por me inspirar à carreira acadêmica e todo suporte com a instrumentação da pesquisa. Ao Dr. Artur Lenz Sartorti, pela amizade e pela flexibilização dos meus horários de trabalho. Ao Prof. Paulo Vaz por compartilhar sua experiência profissional e de vida;
- À Dra. Léa Cristina Lucas de Souza e ao Dr. Eduardo Leite Krüger por todo suporte técnico e pelas revisões no desenvolvimento desta pesquisa.

Resumo

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.

O clima urbano é diretamente influenciado pelo crescimento das cidades. Por meio da expansão da infraestrutura, a rede viária passa a ser parte constituinte desse cenário e proporcionalmente responsável pelas interferências no microclima local. Desta forma, o traçado e a morfologia urbana devem promover a ventilação, o sombreamento e o controle da temperatura do ambiente construído, a fim de reduzir efeitos climáticos, como a formação de ilhas de calor urbanas. Sendo assim, esta pesquisa busca analisar o efeito do albedo de pavimentos na redução da temperatura em cânions urbanos, através de um modelo em escala reduzida. O método consiste em monitorar variáveis do campo térmico através de um modelo físico no nível do pedestre. Este modelo é constituído por quatro colorações de pavimento intertravado de concreto de 8 cm de espessura, com 120 cm de largura e 500 cm de comprimento, separados lateralmente por barreiras de 40 cm e 80 cm de altura, que formam duas configurações urbanas. O material tomado como referência é o pavimento flexível com revestimento asfáltico escuro, em relação ao pavimento intertravado de concreto semi-permeável, nas colorações, vermelho, grafite e cinza. A escolha do material asfáltico como sendo o referencial é justificada por sua ampla utilização no espaço urbano construído no Brasil, o que proporciona melhor caracterização do ambiente real. Na etapa de instrumentação, foram instalados anemômetros e higrômetros para avaliar a movimentação de ar e umidade relativa no período; e termopares para a coleta de dados de temperatura superficial, temperatura do ar e temperatura de globo em diferentes níveis e morfologias. Por meio da análise de resultados, percebe-se que a orientação do cânion, a relação H/W e as variações do albedo em função do teor de umidade da superfície podem provocar variações de temperatura do ar e das superfícies dos cânions urbanos. O albedo dos pavimentos e a configuração dos elementos urbanos podem contribuir para a mitigação das ilhas de calor urbanas.

Palavras-chave: Albedo, Propriedades Térmicas de Superfícies, Clima Urbano, Pavimentação Urbana, Microclima, Ilha de calor urbana.

Abstract

The urban climate is directly influenced by the growth of the cities. By means of infrastructure expansion, the road network becomes a constituent part of this scenario and proportionally responsible for the interferences in local microclimate. This way, urban layout and morphology should promote ventilation, shading and temperature control of the built environment in order to reduce climatic effects, such as the urban heat islands. Thus, this research seeks to analyze the effect of pavement albedo on temperature reduction of urban canyons, through a reduced scale model. The method consists of monitoring thermal variables in a physical model. This model was constructed with four different colours of pavement 8 cm thick, 120 cm wide and 500 cm long, separated laterally by 40 cm and 80 cm high barriers, in two urban configurations. The material taken as reference will be the flexible dark asphalt pavement, in relation to the interlocking semi-permeable concrete floor, in the gray, red and graphite colours. The choice of asphalt material as the reference is justified by its wide use in built urban space of Brazil, which provides a better characterization of the real environment. In the instrumentation step, anemometers and hygrometers were installed to evaluate the air movement and the relative humidity of the period; and thermocouples to collect surface temperature, air temperature, and radiant temperature data at different levels and morphologies. Through the results analysis, it is seen that the orientation of the canyon, the increase of the aspect ratio, albedo differences and the surface moisture content, can cause temperature variations in the built environment. Finally, the albedo of urban pavements can contribute to the mitigation of urban heat islands.

Keywords: Albedo, Surface Thermal Properties, Urban Climate; Urban Pavement, Microclimate, Urban Heat Island.

Lista de Figuras

Figura 2.1. Fluxo de radiação.	17
Figura 2.2. Componentes da radiação solar.....	18
Figura 2.3. Espectro da radiação eletromagnética.	19
Figura 2.4. Distribuição espectral da energia solar ao nível do mar (radiação global) e acima da atmosfera terrestre (extraterrestre), e principais gases absorvedores da radiação solar.	20
Figura 2.5. Esquema com fluxos que compõem o balanço energético.....	24
Figura 2.6. Seção esquemática apresentando os componentes do balanço energético da superfície urbana.	25
Figura 2.7. Saldo de radiação e balanço energético em um modelo idealizado.	26
Figura 2.8. Perfil da velocidade dos ventos na Camada Limite.	27
Figura 2.9. Fluxo de ar ao redor de um obstáculo isolado: (a) Seções esquemáticas mostrando as linhas de fluxo; (b) nomenclatura das zonas de fluxo, e (c) ilustração do padrão de fluxo de ar ao redor de edifício alto e largo.	28
Figura 2.10. Representação do comportamento idealizado do fluxo de ar gerado no interior do cânion: (a) quando o vento no topo do dossel incide perpendicularmente ao eixo do cânion, (b) paralelamente ao eixo do cânion e (c) em ângulo com o eixo do cânion.	29
Figura 2.11. Típicos padrões de fluxo em cânions urbanos.	29
Figura 2.12. Efeito do aquecimento diferencial das superfícies do cânion no vórtice de sotavento e barlavento gerado por ventos fracos.....	30
Figura 2.13. Gradiente de temperatura do ar próximo à superfície.	32
Figura 2.14. Cânion urbano simétrico e seus descritores geométricos (a) e a relação entre a relação H/W e o fator de visão do céu (SVF) em cânions regulares (b).....	36
Figura 2.15. Influência da refletância do pavimento na energia absorvida pelas paredes de edificações orientadas N-S durante o inverno.	36
Figura 2.16. Fluxo radiante absorvido pelo pedestre em uma área aberta com pavimentos de diferentes albedos.	37
Figura 2.17. Intensidade do efeito do albedo na redução da temperatura das superfícies do cânion simulado.	38
Figura 2.18. Ilustração esquemática da absorção de radiação solar refletida no interior de um cânion urbano: (a) incidência da radiação solar direta em ângulos próximos à horizontal, (b) médios e (c) próximos ao Zênite.	38
Figura 2.19. Variação de temperatura do ar em uma área urbana e em uma área suburbana.....	40
Figura 2.20. Modelo em escala para avaliação das ICU em função da geometria do cânion.	42
Figura 2.21. Projeto do Modelo em escala a céu aberto - OASUS (<i>Open-air scaled urban surface</i>).....	44
Figura 2.22. Avaliação do efeito da evapotranspiração no modelo OASUS.....	44
Figura 2.23. Modelo COSMO2 na escala 1:5 e 1:50 da esquerda para a direita.....	45

Figura 2.24. Características e processos térmicos do pavimento.	48
Figura 2.25. Imagem de satélite da área reabilitada (a) e distribuição da temperatura do ar simulada na estação do verão para a área em estudo (b).	49
Figura 2.26. Distribuição da temperatura do ar antes e após a intervenção.	50
Figura 2.27. Comparação entre albedos de diferentes pavimentos.	51
Figura 2.28. Local de implantação (a), distribuição da temperatura do ar antes (b) e após a substituição do pavimento (c).	52
Figura 2.29. Índice de conforto calculado em oito pontos de referência do parque em dias de verão.	52
Figura 2.30. Desempenho térmico do pavimento antes e após a irrigação.	53
Figura 3.1. Fluxograma da pesquisa.	54
Figura 3.2. Localização da cidade de Engenheiro Coelho – SP.	55
Figura 3.3. Imagem aérea do campus universitário.	55
Figura 3.4. Localização do campo experimental em relação à malha urbana.	56
Figura 3.5. Localização do campo experimental.	56
Figura 3.6. Histograma para cidade de Engenheiro Coelho – Estação D4-107. Série 1978-2000.	57
Figura 3.7. Médias climatológicas de Engenheiro Coelho.	57
Figura 3.8. Esboço de implantação do campo experimental.	58
Figura 3.9. Representação em planta do modelo em escala (cm).	59
Figura 3.10. Representação dos cânions com fator $H/W = 0,66$	59
Figura 3.11. Representação dos cânions com fator $H/W = 0,33$	60
Figura 3.12. Execução dos pavimentos.	60
Figura 3.13. Coleta de dados.	61
Figura 3.14. Posição dos sensores – Coleta 1.	61
Figura 3.15. Posição dos sensores – Coleta 2.	62
Figura 3.16. Sensores HOBO instalados sobre os pavimentos.	66
Figura 3.17. Gráfico da variação de temperatura do ar sobre cada pavimento em relação à temperatura sobre o asfalto.	67
Figura 3.18. Dispositivo de proteção do sensor de temperatura e umidade relativa do ar.	67
Figura 3.19. Posicionamento dos anemômetros no interior do cânion (A), vista em planta no interior do cânion (B) e anemômetro instalado fora da malha (C).	68
Figura 3.20. Dispositivo de proteção do sensor de temperatura superficial (A), temperatura do ar no topo do cânion (B) e temperatura no interior do cânion (C).	70
Figura 4.1. Refletância espectral das amostras secas.	73
Figura 4.2. Refletância espectral das amostras saturadas.	73
Figura 4.3. Parcelas de refletância e absorvância das amostras de concreto, no estado seco e saturado.	74
Figura 4.4. Variação da refletância solar de uma amostra umida (ρ_{UM}) em relação a uma amostra seca (ρ_{SEC}), classificada por cor.	75
Figura 4.5. Velocidade do vento no período da coleta COL1.	76

Figura 4.6. Relação entre albedo e temperatura média superficial (TS) configurações urbanas (M2, M4)...	87
Figura 4.7. Relação entre albedo e temperatura média superficial (TS) durante o dia e durante a noite	87
Figura 4.8. Velocidade do vento no período da coleta COL2.	97
Figura 4.9. Radiação solar no período.....	97
Figura 4.10. Temperatura do ar no topo do cânion e umidade relativa.	98
Figura 4.11. Valores médios de velocidade do vento e Radiação global no período.	98
Figura 4.12. Representação da direção do fluxo de ar em cada configuração urbana.....	99
Figura 4.13. Velocidade máxima e direção do vento em cada configuração urbana.	99
Figura 4.14. Relação entre albedo e Temperatura média do ar no interior do cânion (TA20), no topo (TA) e superficial (TS).	108
Figura 4.15. Temperatura média do ar no nível do pedestre, durante o dia e noite.....	109
Figura 4.16. Temperatura radiante média no nível do pedestre, durante o dia e noite.....	110

Lista de Tabelas e Quadros

Quadro 2.1. Características de cada região do espectro eletromagnético.	19
Tabela 2.1. Propriedades radiantes de alguns materiais.	26
Quadro 2.2. Potencialidades e limitações dos modelos de simulação.....	45
Quadro 2.3. Classificação dos revestimentos.....	48
Quadro 3.1. Posicionamento dos sensores.	62
Quadro 3.2. Variáveis de estudo.	63
Quadro 3.3. Nomenclaturas adotadas para o experimento.	63
Quadro 3.4. Equipamentos para execução do projeto.	64
Quadro 3.5. Materiais para execução do modelo em escala.	64
Quadro 3.6. Especificações técnicas – Espectrômetro portátil.	65
Quadro 3.7. Especificações técnicas – Termo-higrômetro.....	66
Quadro 3.8. Especificações técnicas – Anemômetro.	68
Quadro 3.9. Especificações técnicas – Sensores de temperatura.	69
Quadro 3.10. Especificações técnicas – Sensores de temperatura de globo.	70
Quadro 3.11. Especificações técnicas – Câmera termográfica.....	71
Tabela 4.1. Tabela síntese com os valores de albedo.	75
Quadro 4.1. Dados de temperatura média horária – pavimento vermelho.....	78
Quadro 4.2. Dados de termografia– pavimento vermelho.	79
Quadro 4.3. Dados de temperatura média horária – pavimento cinza.....	80
Quadro 4.4. Dados de termografia – pavimento cinza.	81
Quadro 4.5. Dados de temperatura média horária – pavimento grafite.....	82
Quadro 4.6. Dados de termografia – pavimento grafite.	83
Quadro 4.7. Dados de temperatura média horária – pavimento asfalto.	84
Quadro 4.8. Dados de termografia – pavimento asfalto.....	85
Tabela 4.2. Tabela síntese com a variação de temperatura média [°C].	95
Tabela 4.3. Tabela síntese com a variação de temperatura durante o dia e à noite em [°C].....	96
Quadro 4.9. Dados de temperatura no interior do cânion – pavimento vermelho.....	101
Quadro 4.10. Dados de temperatura no interior do cânion – pavimento cinza.	102
Quadro 4.11. Dados de temperatura no interior do cânion – pavimento grafite.	103
Quadro 4.12. Dados de temperatura no interior do cânion – pavimento asfalto.....	104
Tabela 4.4. Tabela síntese da temperatura do ar no topo do cânion (TA) e temperatura do ar no interior do cânion (TA20).	109
Tabela 4.5. Tabela síntese da TRM e albedo.....	111
Tabela 4.6. Tabela síntese da estabilidade térmica dos pavimentos.....	113

Lista de Siglas

UTC	<i>Universal Time Coordinated</i> – Tempo Universal Coordenado
H/W	Relação entre altura das obstruções do entorno e largura do cânion urbano
FVC	Fator de visão do céu
M2	Morfologia com relação $H/W = 0,33$
M4	Morfologia com relação $H/W = 0,66$
COL1	Coleta 1 – Período da primavera
PAV	Pavimento
CIN	Pavimento de concreto na coloração cinza
VER	Pavimento de concreto na coloração vermelho
GRA	Pavimento de concreto na coloração grafite
ASF	Pavimento asfáltico
TS	Temperatura de superfície
TA	Temperatura do ar no topo do cânion
TA20	Temperatura do ar no interior do cânion (20 cm da superfície)
TG	Temperatura de globo
TRM	Temperatura radiante média
UR	Umidade relativa do ar
VV	Velocidade do vento
VV20	Velocidade do vento no interior do cânion (20 cm da superfície)
DV	Direção do vento
DV20	Direção do vento no interior do cânion (20 cm da superfície)
SEC	Pavimento no estado seco
SAT	Pavimento no estado saturado

Sumário

Capítulo 1. Introdução.....	14
1.1. OBJETIVOS	16
1.2. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	16
Capítulo 2. Revisão do Estado da Arte.....	17
2.1. CONCEITOS E PROCESSOS FÍSICOS	17
2.2. CLIMA URBANO.....	22
2.2.1. BALANÇO ENERGÉTICO	23
2.2.2. VARIÁVEIS	27
2.2.3. CONFIGURAÇÕES URBANAS E ALTERAÇÕES DO MICROCLIMA.....	34
2.2.4. ILHAS DE CALOR URBANAS	39
2.3. MODELOS FÍSICOS PARA SIMULAÇÃO DE CLIMA URBANO.....	42
2.5. PAVIMENTAÇÃO URBANA.....	46
2.5.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E APLICAÇÕES.....	46
2.5.2. MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO	47
Capítulo 3. Materiais e Método.....	54
3.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	54
3.2. IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL DE IMPLANTAÇÃO	55
3.2.1. ASPECTOS FÍSICOS E GEOGRÁFICOS	55
3.2.2. ASPECTOS CLIMÁTICOS.....	57
3.3. MODELO EM ESCALA REDUZIDA.....	58
3.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO.....	58
3.3.2. MONTAGEM DO EXPERIMENTO	60
3.4. VARIÁVEIS DE ESTUDO	63
3.5. COLETA DE DADOS E INSTRUMENTAÇÃO	64
3.5.1. ESPECTRÔMETRO PORTÁTIL.....	65
3.5.2. TERMO-HIGRÔMETRO	65
3.5.3. ANEMÔMETRO	68
3.5.4. SENSORES DE TEMPERATURA	69
3.5.5. SENSORES DE TEMPERATURA DE GLOBO.....	70
3.5.6. CÂMERA TERMOGRÁFICA	71
Capítulo 4. Análise dos Resultados.....	72
4.1. PROPRIEDADES RADIANTES DO PAVIMENTO	72
4.1.1. REFLETÂNCIA E TEOR DE UMIDADE	72
4.2. ALTERAÇÕES DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DO PAVIMENTO E DO FLUXO DE AR NO TOPO DO CÂNION	76

4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO DIA DA COLETA 1	76
4.3. TEMPERATURA E COLORAÇÃO	90
4.3.1. VARIAÇÃO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL E PAVIMENTO DE REFERÊNCIA	90
4.4. ALTERAÇÕES DO FLUXO DE AR E TEMPERATURA NO INTERIOR DO CÂNION ...	97
4.4.1. CARACTERIZAÇÃO DO DIA DA COLETA 2	97
4.4.2. VARIAÇÃO DO VENTO NO INTERIOR DE CADA MORFOLOGIA	99
4.4.3. TEMPERATURA DO AR E DE GLOBO NO NÍVEL DO PEDESTRE	100
4.4.4. ALBEDO E TEMPERATURA NO INTERIOR DOS CÂNIONS	105
4.4.5. TEMPERATURA RADIANTE MÉDIA E ALBEDO	110

Capítulo 5. Considerações Finais..... 115

Referências Bibliográficas..... 118

Anexos..... 124

Capítulo 1

Introdução

As alterações no clima urbano são diretamente influenciadas pelo crescimento das cidades. Por meio da expansão da infraestrutura, a rede viária passa a ser parte constituinte desse cenário e proporcionalmente responsável pelas interferências no microclima.

Globalmente, segundo informações do relatório emitido pela ONU (2014), há mais pessoas vivendo em áreas urbanas do que em áreas rurais. Em 1950, 30% da população mundial era urbana. Em 2014 esse cenário mudou para 54% e a perspectiva para 2050 é que 66% da população mundial viva nas grandes cidades. Em 2007 foi o ano em que tanto a população urbana, quanto a rural se igualaram em escala global. No contexto brasileiro, essa distribuição ficou próxima a 50% da população residente na área rural e 50% na área urbana entre os anos de 1963 e 1964.

O processo de urbanização das cidades, com seu acelerado crescimento populacional, acarreta alterações na atmosfera urbana (ROSSI, KRÜGER, 2005, p.94). Nesse processo, Cox (2008) menciona que dentre as modificações associadas à urbanização, a alteração das propriedades térmicas da superfície, devido ao predomínio de edificações e materiais de construção, são as mais impactantes quando comparado às áreas verdes. Pois esses materiais promovem a absorção de energia bem como a impermeabilização da superfície.

Para isso, é fundamental a compreensão dos fenômenos térmicos e escalas climáticas para o estudo do clima urbano. Os fatores que intervêm preponderantemente nesse estudo são: as propriedades térmicas das superfícies (pavimentada e verticais), a temperatura e a umidade do ar e a configuração do cânion urbano.

As mais significativas expressões da alteração do clima das cidades dizem respeito ao aquecimento do ar no cânion urbano em relação às regiões rurais circunvizinhas (OKE, 1987 *apud* COX (2008, p. 19))

Maitelli (1994), citado por Cox (2008, p.19), demonstra que o fluxo de calor estocado pelo tecido urbano juntamente com o fluxo de calor antropogênico produzido pela dinâmica urbana constituem a principal causa da formação de ilhas de calor urbano – ICU.

O estudo de ICU envolve uma grande quantidade de variáveis, sendo que as estratégias para mitigação desse fenômeno são atualmente direcionadas à utilização de materiais na construção de edifícios e pavimentos com propriedades térmicas mais favoráveis ao resfriamento das superfícies.

Kolokotroni e Giridharan (2008), na expectativa de estabelecer uma relação entre as características físicas da cidade e a formação das ICUs, propuseram:

[...] uma correlação da temperatura do ar com diversas variáveis de caracterização física de tecidos urbanos, a saber: razão altura/largura dos cânions, razão de densidade plana, razão de área vegetada, densidade de área vertical, albedo de superfície de massa térmica. Concluíram que, entre as diversas variáveis estudadas, o albedo era a mais crítica na determinação das mudanças de temperatura ambiente, tanto no período diurno, quanto no noturno (GONZALEZ, 2015, p.33).

Em contrapartida, Gonzalez (2015) destaca que somente superfícies com altos níveis de exposição solar se beneficiam do uso de materiais com albedos mais elevados para redução de suas temperaturas superficiais. Além disso, a redução da temperatura do ar pode não ser expressiva na escala microclimática do cânion. Por isso, é necessário considerar fatores como: orientação geográfica, características climáticas da cidade, além de fazer uma diferenciação entre o albedo de coberturas, fachadas e pisos.

Como possível estratégia de mitigação, pode-se mencionar a utilização de:

- Pavimentos permeáveis, pois permitem o resfriamento da superfície quando submetidos a uma situação de umidade, devido à facilidade de percolação de água pluvial; “Esses pavimentos podem ser fabricados em asfalto ou concreto, com camada de base constituída de materiais com capacidade de retenção de água, absorção e que promova evaporação por meio de capilaridade quando o pavimento aquece” (LI, 2016, p.22).

- Pavimentos frios, que permitem maior índice de reflexão das ondas de irradiação solar, evitando o acúmulo de calor nos cânions urbanos. Li e Harvey (2013, p.1) afirmam que o aumento do albedo da superfície pode reduzir significativamente a temperatura ao longo do dia nas estações quentes. O Ministério Japonês responsável por estudos em pavimento retentivo de água para controle de ilhas de calor (2004, s.p) afirma:

Resultados demonstram ser promissores, e os experimentos mostram que esse tipo de pavimento pode efetivamente reduzir a temperatura da superfície da estrada em até 25° C na metade do verão, quando a superfície atinge até 60°C. O que resulta numa redução de 2-3°C na temperatura do ar.

- Materiais que diminuam a temperatura de superfície da área pavimentada.

Os pavimentos permeáveis, (também classificados como piso drenante, asfalto poroso e *paver* em concreto intertravado), pavimento de alto índice de reflexão, pavimentos com resfriamento evaporativo e pavimento resfriado pelo sombreamento) são considerados pavimentos frios, pois podem reduzir potencialmente a temperatura de superfície e do ar, e por consequência mitigar o efeito das ilhas de calor e promover a redução do uso de energia para o resfriamento das edificações (AKBARI, POMERANTZ *et al.*, 2001, p.297).

Portanto, para que haja um avanço desse aspecto, faz-se necessário uma análise técnica, por meio de instrumentação e a aplicação de um método de estudo adequado, a fim de propor uma ação pontual e realmente efetiva aos problemas da cidade.

A análise de fenômenos relacionados ao clima urbano, consequência de um processo generalizado de urbanização em diversas partes do mundo, pode e deve servir de subsídio para o planejamento urbano (KRÜGER; PEARLMUTTER, 2011, p.54).

Assim, este estudo busca compreender os efeitos do albedo do pavimento no ambiente térmico urbano com intuito de melhorar as condições do microclima. A hipótese desta pesquisa é que o albedo, associado à forma urbana, pode contribuir na estabilização da temperatura superficial do pavimento.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a influência do albedo de pavimentos intertravados de concreto na temperatura do ar e das superfícies de cânions urbanos.

Como pontos específicos desta pesquisa são abordados os seguintes pontos:

- A construção de um modelo em escala reduzida para estudos no ambiente térmico urbano;
- A instrumentação e coleta de temperatura do ar em cânions urbanos e da temperatura de superfície do pavimento;
- A comparação das temperaturas superficiais entre quatro colorações distintas de pavimentos de tráfego leve aplicados em diferentes morfologias urbanas;
- A relação entre os dados de temperatura do ar e das superfícies entre duas configurações urbanas.

1.2. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está segmentado em cinco capítulos, apresentados a seguir:

- Capítulo 1 – A introdução contextualiza a problemática da pesquisa, justifica a relevância e apresenta os objetivos do trabalho.
- Capítulo 2 – A síntese da bibliografia fundamental aborda conceitos de clima urbano, pavimentação e os aspectos metodológicos e instrumentais da pesquisa.
- Capítulo 3 – São apresentados os materiais e o método utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. Descreve os procedimentos experimentais, aborda aspectos da instrumentação e coleta de dados.
- Capítulo 4 – A análise de resultados apresenta a relação da temperatura do ar e das superfícies de cânion urbano com a coloração do pavimento, em diferentes configurações urbanas e em estações do ano distintas.
- Capítulo 5 – Apresenta as principais conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão do Estado da Arte

2.1 CONCEITOS E PROCESSOS FÍSICOS

Os conceitos físicos para a análise do comportamento térmico dos pavimentos em diferentes morfologias urbanas estão relacionados às propriedades radiantes da superfície (absortância, refletância, temperatura superficial, temperatura radiante) e variáveis climáticas (temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento).

- *Energia solar*

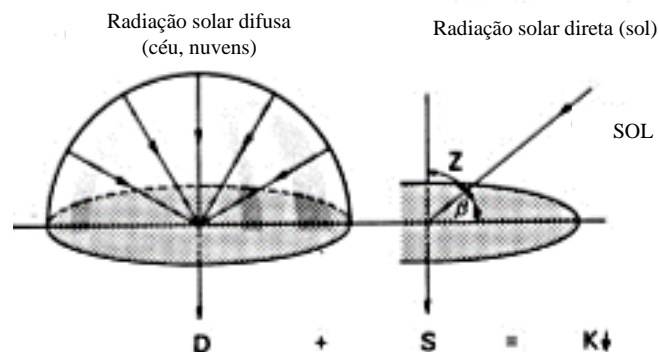
O fluxo de radiação sobre uma superfície próxima ao solo está associado aos processos físicos e alterações térmicas dos materiais. Sendo assim, é conveniente considerar a radiação em duas faixas de comprimento de onda: ondas longas e ondas curtas (DUFFIE; BECKMAN, 1984).

Radiação solar ou radiação de ondas curtas: É a radiação originada a partir do sol, com comprimento de onda entre 0,3 - 3,0 μ m. Essa terminologia usualmente não faz diferenciação entre a componente direta e difusa.

Radiação de ondas longas: É a radiação originada a partir de fontes com temperaturas próximas à temperatura ambiente. Apresenta comprimentos de onda superiores a 3,0 μ m e é emitida pela atmosfera ou quaisquer outros corpos na superfície terrestre.

O fluxo de radiação pode ser originado diretamente do sol (radiação direta e global) ou através dos raios refletidos pela atmosfera e pelas nuvens (componente difusa), conforme apresentado na Figura 2.1.

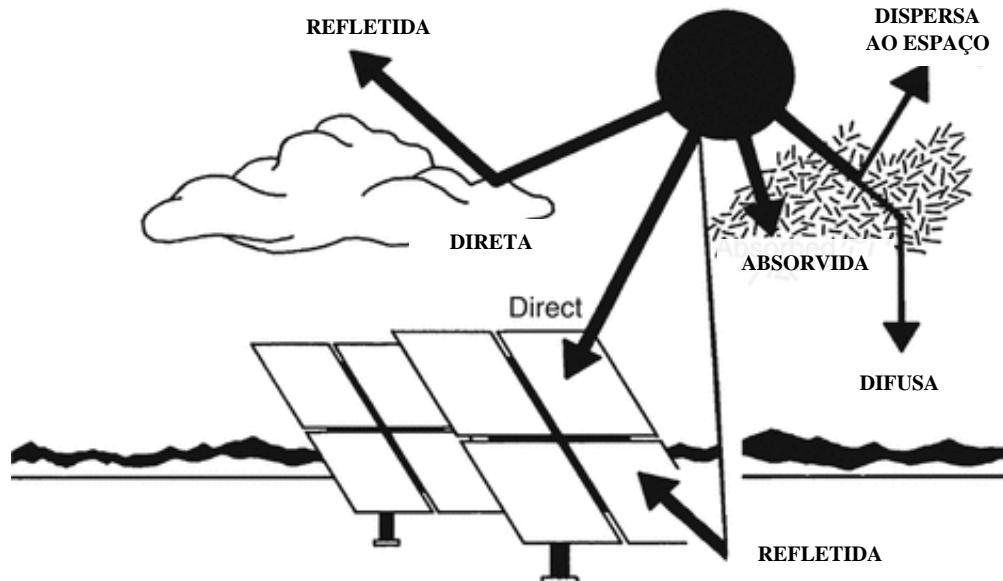
Figura 2.1. Fluxo de radiação.



Fonte: Adaptado de Oke (1987).

Ao entrar em contato com a atmosfera terrestre, parte da radiação solar incidente é desviada através da dispersão causada pela atmosfera ou pela absorção das moléculas do ar, nuvens e outros materiais particulados. A radiação que não sofreu esse processo de reflexão ou dispersão e que atinge diretamente a superfícies terrestre, é denominada radiação direta. Em contrapartida, a radiação dispersa é chamada difusa. Nesse processo parte da radiação pode incidir sobre uma superfície terrestre e ser imediatamente refletida pelo solo (DUFFIE; BECKMAN, 1984).

Figura 2.2. Componentes da radiação solar.



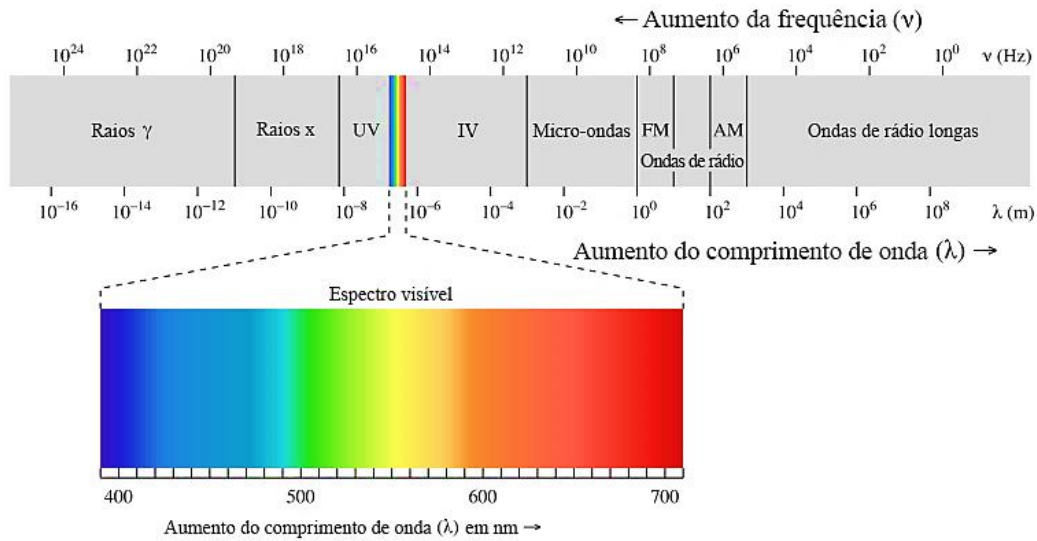
Fonte: Adaptado de Badescu (2008).

A irradiância total consistente de três componentes (direta, difusa e refletida) é e chamada radiação global ou total. A radiação total solar recebida por uma superfície inclinada, é uma combinação da radiação direta, difusa e radiação adicional refletida pelo solo e chamada de radiação hemisférica total sobre uma superfície inclinada (BADESCU, 2008), conforme apresentado na Figura 2.2.

- *Espectro eletromagnético e interação da radiação com a matéria*

A energia do espectro eletromagnético que atinge a Terra pode ser total ou parcialmente transferida para a matéria. Esta transferência se dá em níveis atômicos e envolve a interação dos fótons da radiação e os elétrons dos átomos do material onde a onda está incidindo. As regiões do espectro eletromagnético e os comprimentos de onda correspondentes estão apresentados na Figura 2.3.

Figura 2.3. Espectro da radiação eletromagnética.



Fonte: UC Davis ChemWiki (2019).

Ferreira e Prado (2013) mencionam quais são as principais características de cada região do espectro eletromagnético, conforme apresentado no Quadro 2.1.

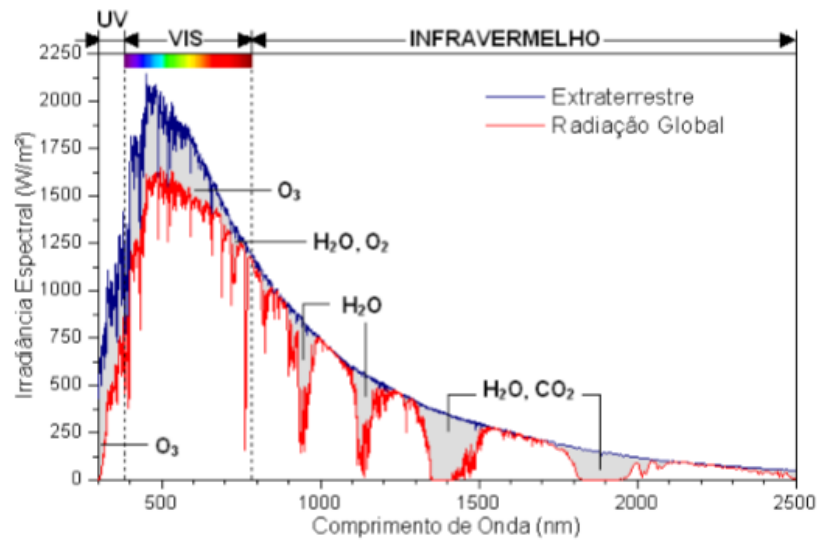
Quadro 2.1. Características de cada região do espectro eletromagnético.

REGIÃO	λ	ESPECTRO SOLAR	CARACTERÍSTICAS
<i>Ultravioleta (UV)</i>	290 e 380 nm	6%	Provoca efeitos físico-químicos nos materiais como danos na estrutura celular, desbotamento e descoloração.
<i>Visível (VIS)</i>	380 e 780 nm	46%	Sensível ao olho humano, suas alterações de frequência, compreendem as cores. Influi diretamente no grau de iluminação e está associada à intensidade de luz branca transmitida.
<i>Infravermelho (IV)</i>	780 e 2500 nm	43%	A natureza desta radiação é principalmente térmica.

Fonte: Adaptado de Ferreira e Prado (2013).

A curva de Radiação Global representa o espectro solar padrão e indica a proporção de energia proveniente do Sol correspondente à cada região do espectro solar que atravessa a atmosfera e atinge a superfície terrestre, distribuída nas seguintes proporções aproximadas: 3% no ultravioleta, 45% no visível e 52% no infravermelho (DORNELLES, 2008). As curvas de distribuição espectral da energia solar ao nível do mar e acima da atmosfera terrestre, conforme a norma ASTM-G173-03 estão apresentadas na Figura 2.4.

Figura 2.4. Distribuição espectral da energia solar ao nível do mar (radiação global) e acima da atmosfera terrestre (extraterrestre), e principais gases absorvedores da radiação solar.



Fonte: Dornelles (2008) adaptado de Duffie e Beckman (1984).

Os materiais que são capazes de transmitir luz com pouca absorção e reflexão, que permitem que a luz atravesse, descrevendo trajetórias regulares e bem definidas, são denominados transparentes. Os materiais cuja luz é transmitida de forma difusa, em que parte dos fótons ficam dispersos em seu interior, nos quais os feixes de luz descrevem trajetórias irregulares, com desvios e com intensa difusão, são denominados de translúcidos. Por fim, aqueles que são incapazes de transmitir a luz visível são chamados de opacos. Nesse tipo de material a luz não se propaga e após incidir é parcialmente absorvida e parcialmente refletida. A parte que é parcialmente absorvida é transformada em energia, como a energia térmica (CALLISTER, 1997).

Nesse sentido, surge o termo albedo, o qual é geralmente usado como sinônimo do termo refletância. Monteith (1959) *apud* Carpio (2014) aponta que o termo albedo se refere ao coeficiente de reflexão da luz na faixa visível do espectro, enquanto que refletância denota a fração refletida da energia de onda curta (radiação solar dispersa ao longo da faixa de comprimento de onda entre 380 a 3000 nm).

Denomina-se albedo a refletância de uma superfície em relação a toda faixa espectral de radiação de onda curta. Ou seja, o albedo é definido como a razão entre a radiação refletida pelo solo e a radiação global incidente no solo (DUFFIE, BECKMAN, 1984). Em outras palavras, o albedo é o índice de espalhamento (reflexão difusa) da radiação de onda curta (OC).

Para materiais opacos, o albedo é o inverso da absorvância, conforme apresentado pela Equação 2.1.

$$\frac{K \uparrow}{K \downarrow} = a \quad [2.1]$$

Sendo:

$K \uparrow$: Radiação de onda curta refletida pela superfície;
 $K \downarrow$: Radiação de onda curta incidente na superfície;
 a: Albedo da superfície;

A radiação incidente sobre uma superfície há apenas três possibilidades:

- Ser transmitida através do material, quando este for translúcido;
- Ser refletida (de forma especular ou difusa) pela superfície do material;
- Absorvida pela superfície.

Materiais transparentes possuem propriedades radiantes como transmissividade (τ), refletância (ρ) e absorvância (α), as quais variam de acordo com o comprimento da onda eletromagnética. Segundo Oke (1987), a igualdade da Equação 2.2 só é válida para cada comprimento de onda individualmente.

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad [2.2]$$

Assim, um valor de albedo $a = 0$ representa uma superfície que se comporta semelhante a um corpo negro, ou seja, que absorve toda a radiação incidente, em todos os comprimentos de onda curta (OC). Enquanto $a = 1$ indica uma superfície refletora perfeita, que devolve ao ambiente 100% da radiação de OC incidente, incluindo a radiação da faixa visível (VIS), portanto teria aspecto branco (GONZALEZ, 2015, p.44).

Segundo o Natural Stone Council (2009) *apud* Carpio *et al.* (2014), “o albedo de um material é influenciado, inicialmente, pelos seguintes fatores: composição, textura da superfície e orientação da radiação solar”. O desgaste, envelhecimento podem influenciar ao longo dos anos na alteração do albedo.

A exposição às intempéries faz com que as superfícies tenham uma alteração no albedo em função do tempo (FERREIRA, PRADO, 2003). Bretz, Akbari (1997) mencionam ainda que os efeitos do envelhecimento em um contexto de cobertura, provocam uma perda na refletância de aproximadamente 15% no primeiro ano de utilização. Sendo assim, a estimativa da refletância no estado envelhecido das superfícies pode ser calculada através da adaptação da Equação 2.3, proposta Levinson, Akbari *et al.* (2005):

$$\rho' = 0,20 + 0,70 (\rho - \rho_0) \quad [2.3]$$

Sendo:

ρ' : Refletância no estado envelhecido;

ρ : Refletância no estado inicial

2.2. CLIMA URBANO

À medida em que a população aumenta e as pressões sociais e econômicas convencem as pessoas a viverem nos centros urbanos, passa a haver um crescimento cada vez mais expressivo nessas áreas. Todos os elementos que compõem o clima são alterados, mas a evolução desses contrastes entre as áreas urbanas e rurais são ainda mais evidentes (CHANDLER, 1965).

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).

As mudanças no microclima são diretamente influenciadas pelo processo de urbanização. Essas mudanças, segundo Oke (1978), causam alterações nos balanços energético, hídrico, térmico e nos fluxos aerodinâmicos.

Essas alterações às quais Oke (1978) se refere, estão relacionadas à radiação que as regiões sombreadas deixam de receber e ao aumento da radiação refletida nos cânions urbanos, bem como ao armazenamento de calor pelos materiais do ambiente construído. Além disso, isso se dá pela redução de radiação de onda longa emitida pela área urbanizada para a atmosfera devido às obstruções locais (MINELLA, ROSSI *et al.*, 2011).

Por definição, segundo Ayoade (1988), clima refere-se às características da atmosfera, inferidas de observações contínuas durante um longo período. Em contrapartida, a climatologia urbana, segundo Cox (2008, p.11), busca descrever as transformações climáticas que ocorrem na atmosfera da cidade, caracterizando padrões climáticos para cada época ou estação do ano.

Para os estudos de clima, o autor menciona que variáveis como temperatura, chuvas, ventos, radiação solar, devem ser consideradas, bem como as características bioclimáticas referentes ao meio ambiente urbano e os fatores antrópicos (COX, 2008).

Neste contexto, o clima urbano é uma das variáveis de estudo das cidades e possui relação direta com a sociedade e com o meio ambiente. Desta forma, a intervenção no ambiente construído a fim de melhorar as condições de conforto da população e a eficiência energética das edificações, passa a ser uma medida justificável (SANTAMOURIS *et al.*, 2011).

Oke (1978) *apud* Rossi, Krüger (2005, p.94) define o clima urbano como sendo o resultado das modificações causadas pelo processo de urbanização na superfície terrestre e das características atmosféricas de um determinado local. Em paralelo, Monteiro (2003, p.19) afirma que “o clima urbano é um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização”.

A rápida urbanização do século XX ocorreu em escala mundial e a maioria da população é essencialmente urbana. Essas alterações causadas pela expansão das cidades, produziu alterações simultâneas no microclima urbano (LANDSBERG, 1981).

2.2.1. Balanço Energético

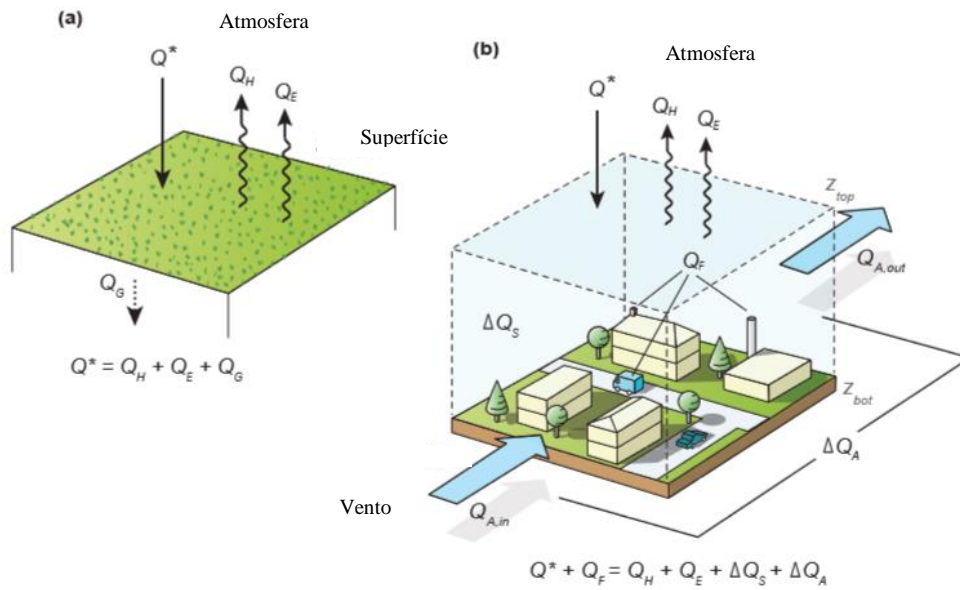
A equação de balanço de energia no ambiente urbano idealizada por Oke (1978) tem sido explorada como a base para estudos da alteração do microclima urbano e explica de forma genérica como a energia é transferida para a superfície terrestre. O conceito se baseia na primeira lei da termodinâmica, a qual aborda a conservação da energia. Isso significa que toda a energia absorvida pela Terra, tanto a de origem solar quanto antropogênica, ou aquece o ar acima as superfícies, ou é armazenada nos materiais, ou é usada para evaporar a água (MASIERO, 2014).

Segundo Oke (1987), as trocas térmicas, que estão associadas ao balanço energético, podem ocorrer através do processo de condução ou convecção. A *condução* ocorre através da colisão de moléculas em movimento rápido. É o modo mais comum de transferência de calor em materiais sólidos e pouco expressivo em líquidos e gases. De modo geral, ela é desprezível em aplicações atmosféricas. Porém, muito importante nos estudos da transferência de calor sob a superfície.

O processo de *convecção* envolve uma troca de massas de ar no sentido vertical e ocorre apenas com substâncias líquidas e gasosas. A *convecção natural* é provocada apenas pela diferença de densidade entre os fluidos que compõe o sistema; e *convecção forçada* quando o movimento do fluido é causado por meios externos ao processo de convecção, por exemplo, ventilação mecânica ou vento atmosférico. A convecção promove o transporte do calor sensível e do calor latente, as trocas de dióxido de carbono e poluentes entre a superfície e atmosfera, além das misturas no ambiente urbano.

Conforme Alves e Vecchia (2012), o balanço de radiação em uma determinada superfície é resultado da soma de toda energia radiante recebida e perdida pela superfície indicada. Na Figura 2.5 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 2.5. 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 2.4.

$$Q^* + QF = QH + QE + \Delta QS + \Delta QA \quad [2.4]$$

Sendo:

Q^* : Radiação líquida ($W.m^{-2}$)

QF : Calor antropogênico ($W.m^{-2}$)

QH : Calor sensível ($W.m^{-2}$)

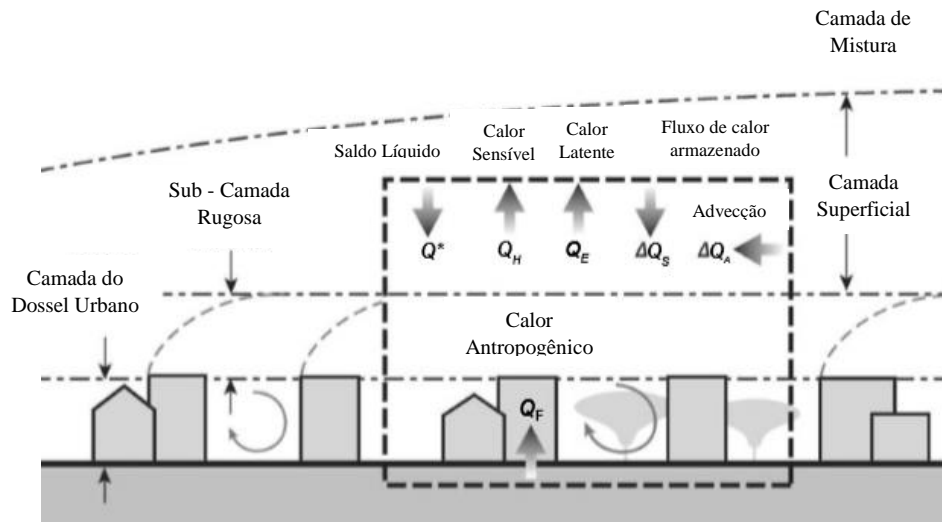
QE : Calor latente ($W.m^{-2}$)

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

ΔQA : 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. A Figura 2.6 apresenta graficamente o fenômeno do balanço energético na superfície urbana.

Figura 2.6. Seção esquemática apresentando os componentes do balanço energético da superfície urbana.



Fonte: Adaptado de Erell, Pearlmutter e Williamson (2011).

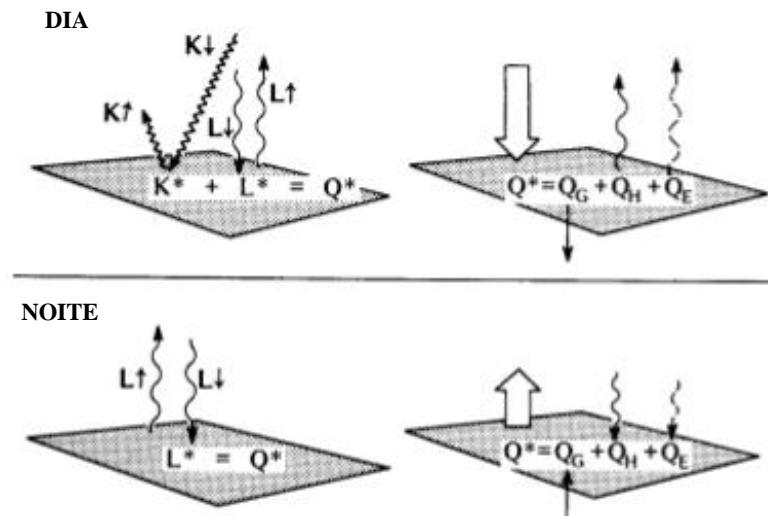
A radiação infravermelha emitida pelos edifícios e superfícies pavimentadas das cidades colide com as superfícies do entorno e é aprisionada no interior do cânion urbano. Além disso, a quantidade total de radiação solar absorvida é aumentada devido a múltiplas reflexões entre os edifícios (SANTAMOURIS, ASSIMAKOPOULOS, 1997).

Além disso, Doulos (2004) ressalta que, o calor antropogênico aumenta a intensidade da ilha de calor através do uso de combustíveis de fontes móveis e estacionárias. Finalmente, a radiação solar incidente e todos os tipos de calor disponíveis aumentam o armazenamento de calor sensível na estrutura da cidade durante o dia. Durante o período noturno, o calor armazenado é liberado na atmosfera urbana. Portanto, a quantidade total de balanço de energia aumenta e as temperaturas do ar se tornam mais altas (SANTAMOURIS *et al.*, 1998).

Oke (1987) menciona que a distribuição do saldo de energia radiante entre os componentes do balanço de energia depende das características da superfície e do quanto as condições são favoráveis para o transporte de calor através de cada modo. Podem ser destacadas propriedades como: a condutividade térmica, a umidade do solo e da atmosfera, bem como condições do clima, como a atmosfera estável ou instável e a nebulosidade.

A Figura 2.7 apresenta um resumo esquemático dos fluxos envolvidos no saldo de radiação ao longo do dia e da noite e do balanço energético.

Figura 2.6. Saldo de radiação e balanço energético em um modelo idealizado.



Fonte: Oke (1987).

Durante o período do dia, devido à predominância da radiação de ondas curtas, proveniente do sol que incide sobre a superfície, o acúmulo de calor é mais expressivo. Em contrapartida, no período noturno, devido ao predomínio da radiação de ondas longas emitida pelas superfícies aquecidas, a maior parte do calor acumulado durante o dia é liberado para a atmosfera.

O balanço de radiação para uma determinada superfície, segundo Alves, Vecchia (2012) depende de fatores químicos e físicos associados ao sistema superfície-atmosfera como: elementos de rugosidade, albedo de superfície, difusividade térmica e emissividade. A Tabela 2.1 apresenta os principais valores de albedo e emissividade das superfícies.

Tabela 2.1. Propriedades radiantes de alguns materiais.

SUPERFÍCIE	ALBEDO	EMISSIVIDADE
<i>Solo</i>	0,05 – 0,40	0,90 – 0,94
<i>Gramma</i>	0,16 – 0,26	0,90 – 0,95
<i>Floresta</i>	0,13 – 0,23	0,97 – 0,99
<i>Água</i>	0,08 – 0,10	0,85 – 0,95
<i>Concreto</i>	0,10 – 0,35	0,90 – 0,96
<i>Asfalto</i>	0,05 – 0,20	0,95
<i>Tijolo</i>	0,20 – 0,40	0,90 – 0,92
<i>Rocha</i>	0,20 – 0,35	0,85 – 0,95
<i>Cascalho</i>	0,08 – 0,18	0,92
<i>Cerâmica</i>	0,10 – 0,35	0,90

Fonte: Adaptado de Oke (1978) e Alves e Vecchia (2012).

Masiero (2014) destaca em sua pesquisa sobre resfriamento evaporativo que o fenômeno físico da convecção, o qual é formado pela diferença de densidade de um fluido submetido a um

gradiente de temperatura, é influenciado pela intensidade do vento, pela rugosidade das superfícies e pela diferença de temperatura entre os meios sólido (solo), líquido (corpo d'água) ou gasoso (ar atmosférico urbano).

Um equilíbrio térmico mais positivo pode ser alcançado reduzindo os ganhos térmicos no ambiente urbano e, em particular, reduzindo a radiação solar absorvida. O papel dos materiais de construção é decisivo para a redução de ganhos térmicos e superaquecimento. Esse desempenho, segundo Doulos (2004), é determinado principalmente pelas suas características óticas e térmicas; o albedo, a radiação solar e a emissividade à radiação de onda longa são os fatores mais significativos.

2.2.2. Variáveis

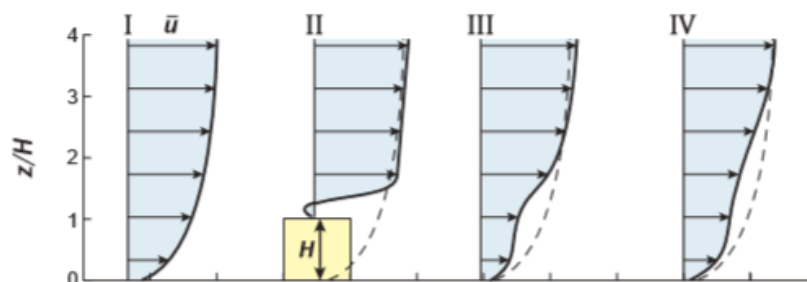
O objetivo desta seção é abordar conceitos e definições relativos às principais variáveis presentes nos estudos em clima urbano, como o vento, a temperatura superficial, temperatura e umidade relativa do ar, temperatura do ar próximo à superfície e temperatura radiante média.

▪ Vento

O vento pode fluir horizontalmente e a origem deste fluxo pode ser gerada por diferenças de pressão entre regiões ou verticalmente, pela diferença de densidades através do processo de convecção natural. Qualquer alteração do nível do solo, seja devido a topografia, vegetação ou elementos construtivos, irá exercer uma perturbação ao fluxo de vento, modificando seu padrão (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011).

Devido ao efeito da fricção, a velocidade do vento é menor junto à superfície terrestre (BROWN; DEKAY, 2004). Por isso, terrenos com diferentes rugosidades induzem diferentes perfis de vento e a alteração desse perfil é uma das alterações introduzidas pela cidade, conforme apresentado na Figura 2.8.

Figura 2.8. Perfil da velocidade dos ventos na Camada Limite.



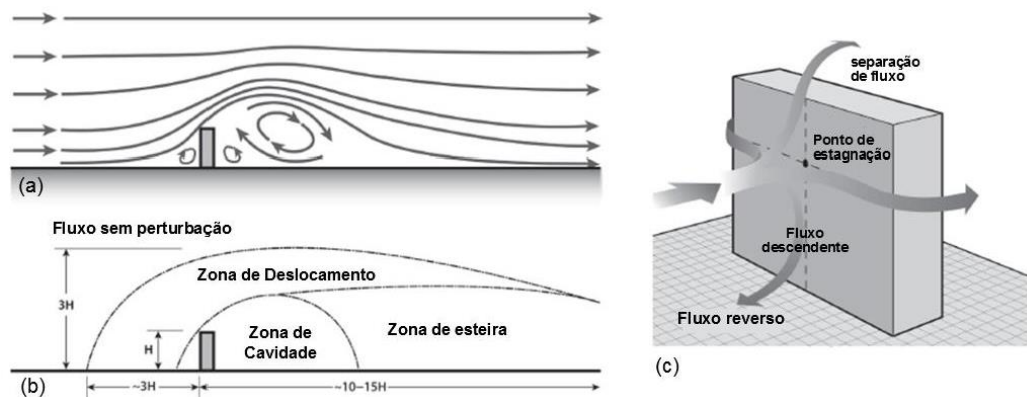
Fonte: Adaptado de Oke *et al.* (2017).

Quanto ao perfil vertical de velocidade do vento, Gonzalez (2015, p.57) destaca:

“[...] a viscosidade do ar e a inércia fazem com que as camadas de menor velocidade junto à superfície exerçam uma força de arraste sobre as camadas de logo acima delas. Em oposição ao arraste, as camadas superiores da atmosfera, com maior velocidade, exercem o efeito de momento, induzindo o movimento das camadas de ar logo abaixo delas. A combinação dos efeitos opostos de arraste e momento criam um perfil vertical de velocidade dos ventos, onde as velocidades são maiores quanto maior for a altitude da camada de ar”.

Ao analisar um elemento isolado de barreira ao fluxo de vento, percebe-se a formação à barlavento, de uma zona de alta pressão, a qual desvia o fluxo de ar para cima do obstáculo. A Figura 2.9-a mostra as linhas de corrente (linhas paralelas à direção do fluxo de ar) ao redor de um obstáculo. Esse deslocamento cria uma zona de baixa pressão a sotavento (zona de cavidade), gerando turbulência na parte posterior do obstáculo, como ilustrado na Figura 2.9-a-b.

Figura 2.9. Fluxo de ar ao redor de um obstáculo isolado: (a) Seções esquemáticas mostrando as linhas de fluxo; (b) nomenclatura das zonas de fluxo, e (c) ilustração do padrão de fluxo de ar ao redor de edifício alto e largo.

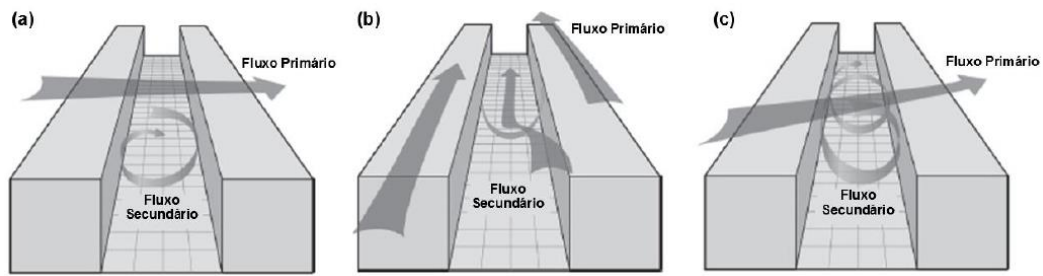


Fonte: Gonzalez (2015) Adaptado de Erell, Pearlmutter e Williamson (2011).

Essas diferenças de pressão entre as regiões a barlavento e a sotavento de um obstáculo podem alterar tanto a intensidade como a direção do vento nas proximidades e pode ainda gerar ventos de grande velocidade junto à base ou laterais, especialmente no caso de edifícios altos, o que eventualmente impactará o conforto de pedestres.

No interior de cânions, o padrão de fluxo do vento é afetado por diversos fatores, conforme mencionam Erell, Pearlmutter e Williamson (2011). São eles: a proporção do cânion (relação H/W), sua forma (simétrico ou assimétrico), orientação do eixo em relação à direção do vento, velocidade do vento no topo do dossel, dentre outros. A Figura 2.10 apresenta de maneira simplificada o fluxo de ar dentro de um cânion simétrico, de acordo com o ângulo do vento.

Figura 2.10. Representação do comportamento idealizado do fluxo de ar gerado no interior do cânion: (a) quando o vento no topo do dossel incide perpendicularmente ao eixo do cânion, (b) paralelamente ao eixo do cânion e (c) em ângulo com o eixo do cânion.

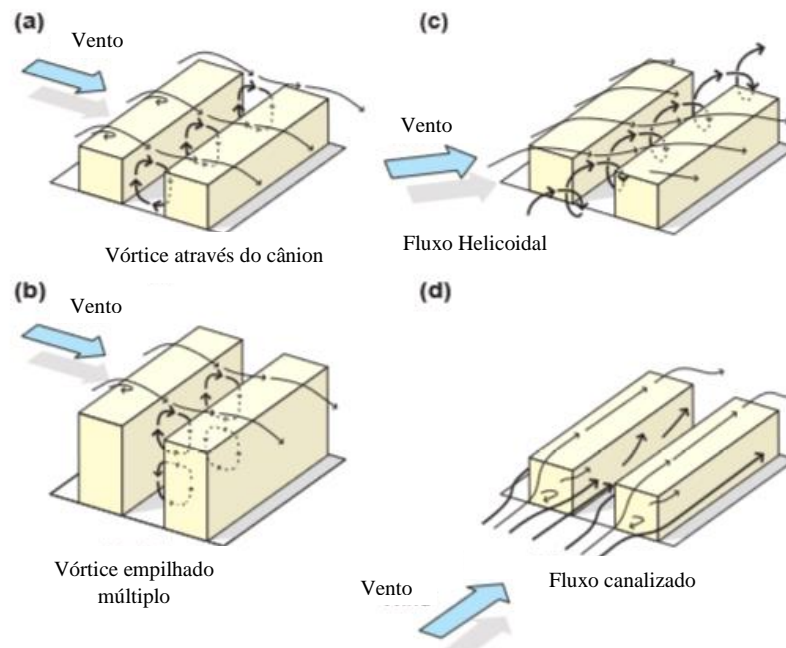


Fonte: Gonzalez (2015) Adaptado de Erell, Pearlmutter e Williamson (2011).

Gonzalez (2015) destaca que, em muitas configurações geométricas, o interior do cânion representa um obstáculo ou “proteção” contra o vento, especialmente em configurações mais densas e regulares, à exceção de quando o eixo do cânion se alinha à direção do vento.

Oke *et al.* (2017) apresentam o comportamento do fluxo de ar no interior do cânion, em função do ângulo de incidência do vento na malha urbana, conforme apresentado na Figura 2.11.

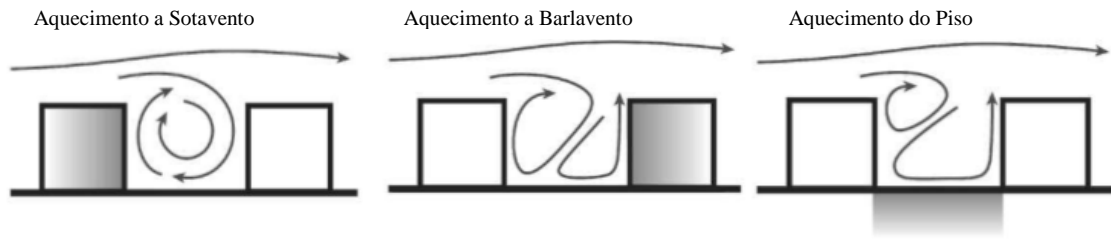
Figura 2.11. Típicos padrões de fluxo em cânions urbanos.



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

Erell, Pearlmutter e Williamson (2011) mencionam que, quando o vento é fraco e as cargas radiantes são fortes, os efeitos de flutuação são fortes e interrompem o vórtice simétrico. A ruptura depende da orientação da superfície aquecida em relação ao vento que se aproxima. Conforme apresentado na Figura 2.12.

Figura 2.12. Efeito do aquecimento diferencial das superfícies do cânion no vórtice de sotavento e barlavento gerado por ventos fracos.



Fonte: Adaptado de Erell, Pearlmutter e Williamson (2011).

“O transporte do calor convectivo horizontal (sensível e latente) da malha, é denominado advecção” (OKE, 1987, p.27). Em casos de ventos fortes, a advecção é predominante, mesmo na presença de fortes cargas radiantes, e a estrutura geral do fluxo do cânion é afetada pela flutuação térmica, porém em menor escala.

Assim, é comum que a velocidade média do vento seja baixa no interior do cânion e, nestas condições, a trocas de calor sensível entre as superfícies e ar, e entre pedestres e ar, se tornam bastante limitadas, deixando espaço para que as trocas radiantes exerçam papel preponderante entre as trocas de energia no interior do cânion (GONZALEZ, 2015).

- *Temperatura de Superfície*

Prado e Ferreira (2005) concluíram que as cores claras geralmente apresentam grande refletância na região visível (VIS) e também tendem a ter grande refletância na região do Infravermelho próximo (*Near Infrared - NIR*) do espectro solar. Entretanto, uma elevada refletância na faixa VIS não implica em um elevado albedo, visto que este está diretamente relacionado à refletância na região NIR do material, a qual corresponde, aproximadamente, 40% da radiação solar que atinge a superfície terrestre (CARPIO, 2014).

O ganho de calor destes materiais é função tanto do albedo como das suas características térmicas. Este ganho de calor pode ser analisado em função da temperatura superficial que as coberturas atingem quando são expostos à radiação solar (CARPIO, 2014; PRADO, FERREIRA, 2005)

Bretz *et al.* (1998) apresentam a Equação 2.5 para a determinação da temperatura de equilíbrio superficial que o material pode atingir em função da sua emissividade quando exposto à radiação solar.

$$(1 - a)I = \sigma\varepsilon(TS^4 - Tsky^4) + hc(TS - Ta) = \rho_0 + c(\rho - \rho_0) \quad [2.5]$$

Sendo:

a : Albedo ou refletância solar;
 I : Radiação solar incidente na superfície (W/m^2);
 ε : Emitância da superfície;
 σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^8 W/m^2 \cdot K^4$);
 TS : Temperatura de equilíbrio superficial (K);
 $Tsky$: Temperatura radiativa do céu (K);
 Ta : Temperatura do ar (K);
 hc : Coeficiente de convecção (W/m^2).

Prado e Ferreira (2005) mencionam que alguns valores da Equação 4 podem ser tomados da norma ASTM 1980-98 - *Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces*, desde que a coleta de dados seja em condições padronizadas de vento moderado.

Sendo:

I : $1000 W/m^2$;
 σ : $5,67 \cdot 10^8 W/m^2 \cdot K^4$;
 $Tsky$: $300 K$;
 Ta : $310 K$;
 hc : $12 W/m^2$.

▪ *Temperatura e Umidade Relativa do Ar*

Os conceitos de temperatura e umidade relativa do ar não podem ser desassociados. O princípio físico da primeira lei da termodinâmica é a base para o entendimento dessas duas variáveis. Ao relacioná-las é necessário utilizar o conceito da psicrometria para melhor compreensão. “A psicrometria é a ciência que estuda o envolvimento das propriedades do ar úmido (uma mistura de ar seco e vapor d’água) e do processo (secagem, umidificação, resfriamento, aquecimento) na mudança da temperatura ou do conteúdo de vapor d’água da mistura” (BRITO, 2010, p.36)

Britto (2010, p.37) define as variáveis utilizadas na psicrometria:

- *Temperatura de bulbo seco (TBS)*: indica a quantidade de energia na forma de calor contido no ar. Expresso em °C. Sua variação é designada como calor sensível (que pode ser medido diretamente).
- *Temperatura de bulbo úmido (TBU)*: indica a quantidade de energia na forma de calor contido no ar úmido. Está associado à mínima temperatura em que a água em estado líquido se transforma em vapor (temperatura de evaporação) para uma determinada quantidade física de

água contida no ar (ver umidade específica). Também permite definir a condição de ponto de orvalho e a pressão parcial de vapor de d'água. Expresso em °C.

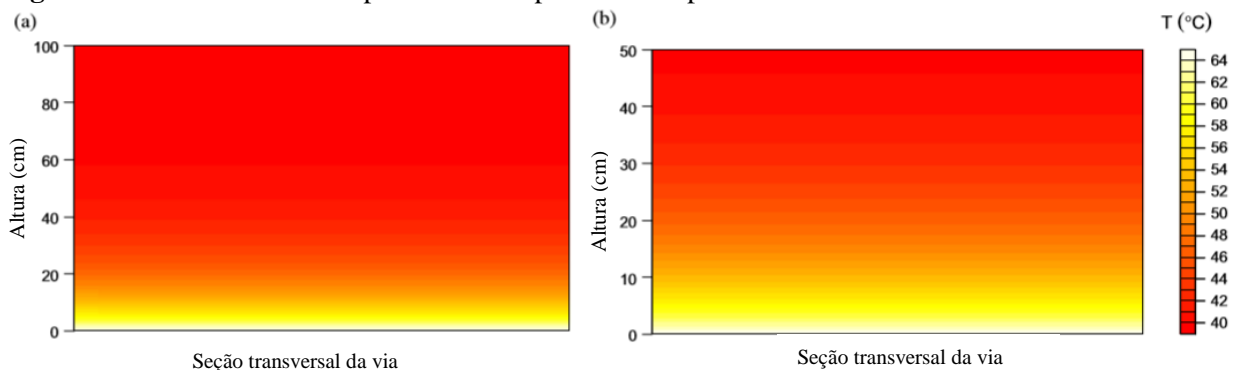
- *Ponto de orvalho (DP)*: expressa a condição mínima de temperatura de bulbo seco em que uma mistura ar-vapor consegue manter água no estado gasoso (vapor), abaixo da qual ocorre a condensação da umidade (ou a formação de névoa). Expresso em °C.
- *Umidade Relativa (UR)*: expressa a relação entre a máxima pressão parcial de vapor que se pode obter a uma determinada temperatura de bulbo seco (condição de saturação de umidade) e a pressão parcial de vapor em determinado instante. Indica a proporção do afastamento vertical entre o ponto e a curva de saturação. Expresso em %.

Segundo Masiero (2014, p.26), “a compreensão do comportamento da umidade é fundamental para melhor quantificar e analisar o balanço de energia no ambiente urbano”. O autor ainda ressalta que a variação da temperatura do ar e umidade pode ser explicada pelas trocas de calor provenientes do resfriamento evaporativo, geralmente mais acentuadas em áreas naturais e periféricas da cidade.

▪ *Temperatura do Ar Próximo à Superfície*

O pavimento pode realizar a troca de calor com o ar próximo à superfície (*near-surface air temperature*) através da radiação solar de ondas curtas, da radiação de ondas longas emitida e através do processo de convecção com a superfície pavimentada. Esses processos de interação térmica irão influenciar o gradiente de temperatura do ar próximo à superfície e conseqüentemente nas condições de conforto humano e qualidade do ar (LI, 2016). A Figura 2.13 apresenta o gradiente de temperatura em duas escalas, até 1 m (a), até 50 cm (b).

Figura 2.13. Gradiente de temperatura do ar próximo à superfície.



Fonte: Adaptado de Li (2016).

Através de modelagens realizadas por Li (2016), nota-se que temperatura do ar próximo à superfície (*Near surface air temperature*) durante períodos quentes, reduz gradualmente, quanto mais se afasta da superfície, conforme representado no diagrama da seção transversal.

Além disso, a temperatura do ar próxima à superfície é muito mais expressiva até uma altura de 10 cm quando comparada à temperatura do ar a 2m do solo. A forma do gradiente de temperatura espacial é influenciada pela temperatura de superfície, temperatura do ar e velocidade do vento.

▪ *Temperatura Radiante Média (TRM)*

A TRM é a temperatura média da superfície dos elementos que envolvem determinado espaço. Segundo a Norma ISO 7726/1998, a temperatura radiante média é definida em relação ao corpo humano. O formato esférico do termômetro de globo é utilizado, pois pode ser uma aproximação razoável de uma pessoa sentada.

A escolha da equação para o cálculo da TRM é definida em função do tipo de convecção do local de estudo, em que o termômetro de globo está instalado. Para a verificação no caso de convecção natural, utiliza-se a Equação 2.6:

$$h_{cg} = 1,4 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D}\right)^{\frac{1}{4}} \quad [2.6]$$

Sendo:

h_{cg} : Coeficiente de transferência de calor por convecção ao nível do globo [W/m².K]

ΔT : Variação da temperatura de globo e temperatura do ar [°C];

D : Diâmetro do globo [m];

No caso de convecção natural, o cálculo da TRM segundo a recomendação da norma, pode ser obtida pela Equação 2.7.

$$TRM = \left[(T_g + 273)^4 + \frac{0,25 \cdot 10^8}{\varepsilon_g} \cdot \left(\frac{|T_g - T_a|}{D}\right)^{1/4} \cdot (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273 \quad [2.7]$$

Sendo:

T_g : Temperatura de globo [°C];

ε_g : Emissividade do globo;

D : Diâmetro do globo [m];

T_a : Temperatura do ar [°C];

Na maioria dos casos, devido ao processo de ventilação natural ou mecânica, faz-se a verificação da convecção forçada, utiliza-se a Equação 2.8:

$$h_{cg} = 6,3 * \left(\frac{V_a^{0,6}}{D^{0,4}} \right) \quad [2.8]$$

Sendo:

h_{cg} : Coeficiente de transferência de calor por convecção ao nível do globo [W/m².K]
 V_a : Velocidade do ar no nível do globo [m/s];
 D : Diâmetro do globo [m];

A TRM para convecção forçada pode ser obtida através da Equação 2.9, conforme a ISO 7726/1998.

$$TRM = \left[(T_g + 273)^4 + \frac{1,1 * 10^8 * V_a^{0,6}}{\varepsilon_g * D^{0,4}} * |T_g - T_a| \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad [2.9]$$

Sendo:

T_g : Temperatura de globo [°C];
 V_a : Velocidade do ar [m/s];
 ε_g : Emissividade do globo;
 D : Diâmetro do globo [m];
 T_a : Temperatura do ar [°C];

A TRM, segundo Gagge *et al.* (1986) é um dos mais importantes parâmetros que governam o balanço energético humano, especialmente em dias ensolarados e quentes. A temperatura radiante média também tem uma forte influência nos índices de conforto termo-fisiológicos.

A diferença entre a temperatura radiante média e a temperatura do ar é um ponto importante a ser considerado em avaliações de conforto ambiental. A temperatura do ar é a média da temperatura de determinado ambiente, enquanto a TRM é a média dos ganhos e das perdas do calor radiante do ambiente (GAGGE *et al.*, 1986)

2.2.3. Configurações Urbanas e Alterações do Microclima

Ao analisar as configurações ou morfologias das cidades, é necessário abordar alguns conceitos fundamentais, como Cânion Urbano, bem como alguns descritores como a relação altura-largura, orientação geográfica e fator de visão do céu.

- *Cânion Urbano*

O cânion urbano se refere a um espaço linear, como uma rua por exemplo, delimitada em ambos os lados por elementos verticais, como paredes de edifícios adjacentes. Erell, Pearlmutter e Williamson (2010) ressaltam que o cânion urbano, como um modelo, pode representar tanto um módulo recorrente a partir do qual a superfície urbana é composta, como um espaço individual habitado ao nível do solo, por pessoas e atividades humanas.

A geometria do cânion pode ser caracterizada por três descritores principais: razão altura-largura (H/W), orientação axial do cânion (θ) e fator de visão do céu (SVF).

- *Relação H/W*

Pode ser definida como a razão entre a altura média dos elementos verticais adjacentes (como as fachadas de edifícios) e a média das larguras do espaço (como a distância de parede a parede ao longo da rua). Assim, quanto maior a razão H/W , mais profundo o cânion e mais verticalizado é o tecido urbano.

- *Fator de visão do Céu (FVC)*

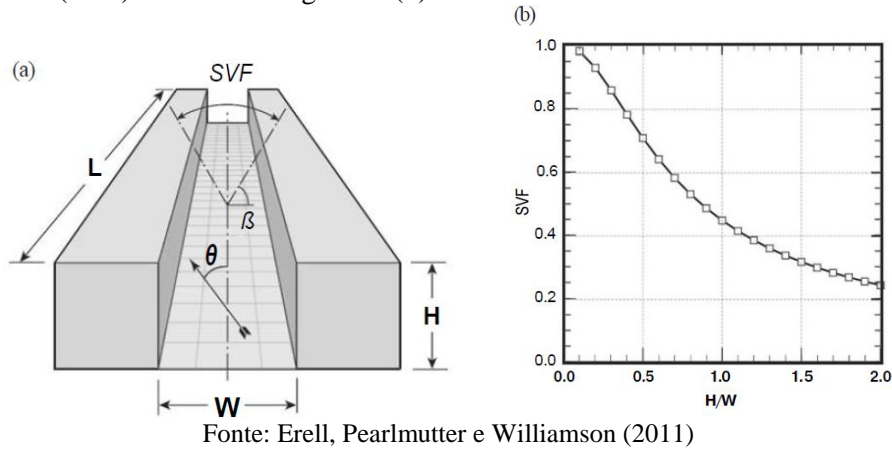
O fator de visão do céu – *sky view fator (SVF)*, “é um parâmetro adimensional também chamado de fator de configuração ou ainda fator angular. Ele indica uma relação geométrica entre a terra e o céu e representa uma estimativa da área visível de céu” (SOUZA *et al.*, 2010, p. 156).

Está intimamente relacionado com a relação H/W , pois é descrito também uma proporção da seção transversal do cânion urbano. O FVC é a taxa de céu visível vista a partir do nível da superfície no centro do cânion, considerando um comprimento semi-infinito, integrando toda a área (ERELL, PEARLMUTTER, WILLIAMSON, 2011).

- *Orientação axial do cânion*

Erell, Pearlmutter, Williamson (2011) definem a orientação axial do cânion como direção do espaço linear prolongado, mensurado em graus, como o ângulo horário entre o alinhamento do eixo da via e o eixo de referência (Norte – Sul). Ele é geralmente descrito pela direção cardinal mais próxima (N – S, L – O) ou diagonal (NO – SE, NE – SO). A Figura 2.14 apresenta os principais descritores geométricos dos cânions urbanos regulares.

Figura 2.14. Cânion urbano simétrico e seus descritores geométricos (a) e a relação entre a relação H/W e o fator de visão do céu (SVF) em cânions regulares (b).

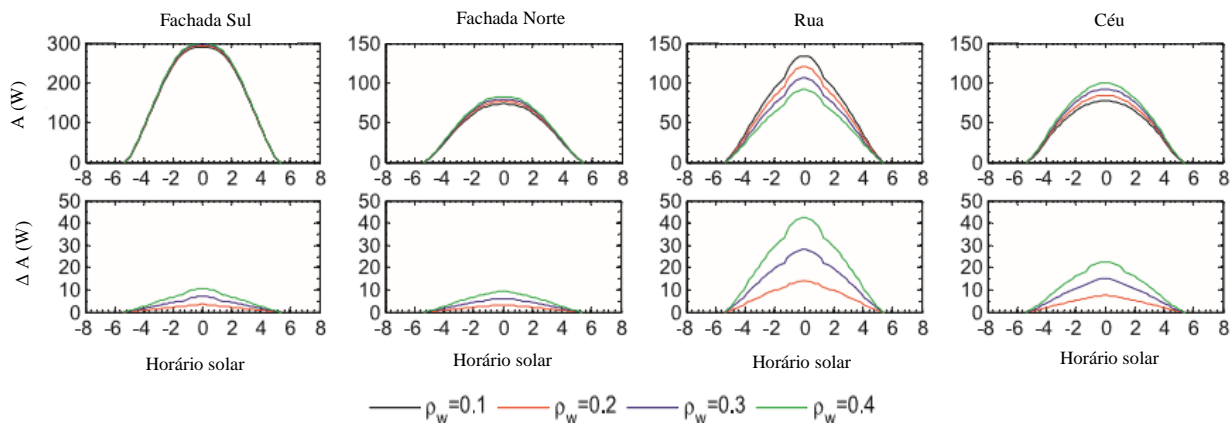


A geometria de uma cidade, as dimensões das ruas, o espaçamento entre as construções e a altura das construções podem influenciar a quantidade de calor absorvido tanto pelo pavimento como pelas outras estruturas. Os edifícios altos ao longo das ruas estreitas criam o que é chamado de cânion urbano. O cânion urbano tem dois efeitos opostos: pode incrementar o efeito de ilha de calor significativamente reduzindo o resfriamento noturno radiativo, e ao mesmo tempo, a sombra dos edifícios cobre a superfície do pavimento durante o dia, limitando a absorção de calor.

Um pavimento rodeado por edifícios altos terá uma menor exposição ao céu e desta forma as construções bloquearão ou absorverão o calor emitido pelo pavimento, evitando que escape da camada de ar do dossel.

Um modelo numérico foi desenvolvido por Qin (2015) para predição do albedo em cânions urbanos – *urban canyon albedo* (UCA), com validação através de observações experimentais, conforme apresentado na Figura 2.15. A primeira linha de gráficos apresenta a energia absorvida (A), em Watts, pelas superfícies do cânion. A segunda fileira apresenta o acréscimo de energia que é absorvida (ΔA), em Watts, pelas superfícies, em função da variação da refletância dos pavimentos.

Figura 2.15. Influência da refletância do pavimento na energia absorvida pelas paredes de edificações orientadas N-S durante o inverno.

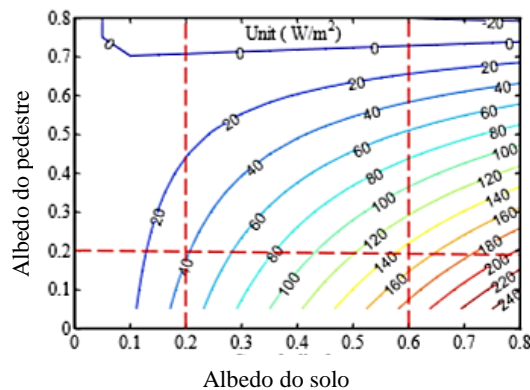


Uma avaliação sensível aos parâmetros que influenciam no albedo do cânion urbano, demonstra que o fator que se sobressai é a relação H/W – Razão entre a altura do cânion (H) e largura das vias (W). Portanto, aumentar o albedo do pavimento poderia efetivamente elevar o UCA somente se o cânion tivesse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

Outro fator importante ressaltado pelo autor é que o uso de pavimento reflexivo em um cânion urbano reflete como um adicional considerável de irradiação difusa nas paredes adjacentes.

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), conforme apresentado na Figura 2.16.

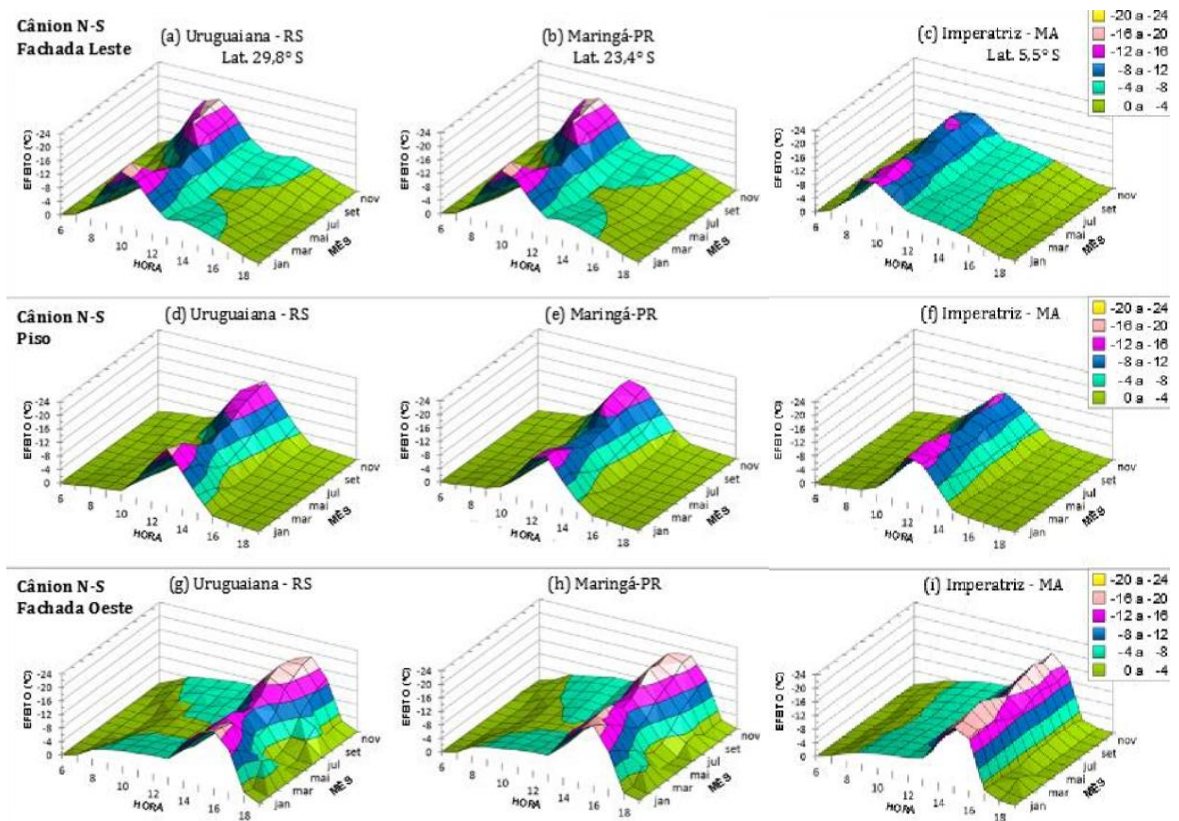
Figura 2.16. Fluxo radiante absorvido pelo pedestre em uma área aberta com pavimentos de diferentes albedos.



Fonte: Qin (2019).

Gonzalez (2015) realizou uma pesquisa por simulação com o modelo CAT – *Modelo de simulação em Fortran que simula as condições microclimáticas dentro de um cânion urbano infinito*, utilizado em oito cidades brasileiras, uma em cada zona bioclimática, com o objetivo de compreender o efeito do albedo sobre o microclima de cânions urbanos através de três variáveis: a temperatura do ar no interior do cânion, a temperatura média das superfícies do cânion, e as condições de conforto térmico ao nível do pedestre. O modelo ITS, utilizado para predição do conforto térmico de pedestres dentro de um cânion simétrico foi implementado através de planilhas eletrônicas, e aplicado nos cânions das cidades simuladas com o CAT. Foi um estudo exploratório do tema, o qual visou avaliar o maior número de cenários possíveis, conforme exemplificado na Figura 2.15.

Figura 2.15. Intensidade do efeito do albedo na redução da temperatura das superfícies do cânion simulado.

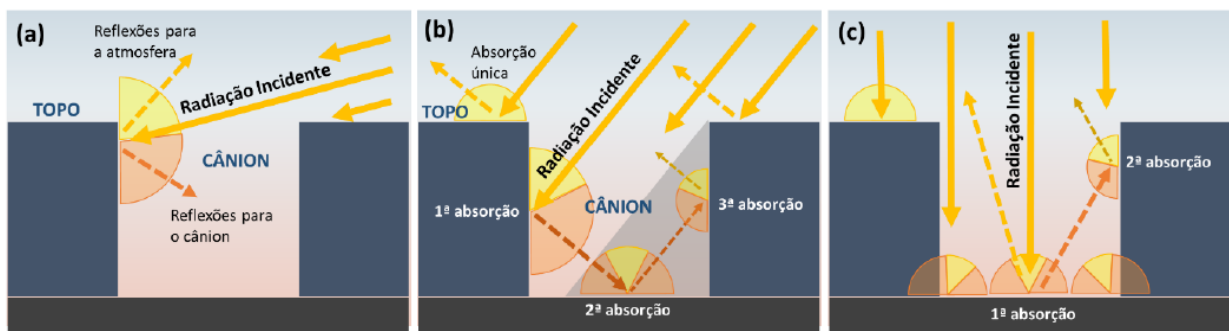


Fonte: Gonzalez (2015).

Os resultados obtidos para diferentes latitudes do Brasil demonstram que no interior do cânion, o efeito do albedo na superfície horizontal e vertical, sobre as temperaturas superficiais é limitado pelas condições de exposição da superfície ao sol, conforme apresentado na Figura 2.18.

Além disso, verificou-se que seu impacto sobre a temperatura do ar é pequeno e, em geral, o aumento do albedo das superfícies tende a piorar os níveis de conforto térmico do pedestre, ao avaliar utilizando o índice ITS, devido à radiação de ondas longas, refletida pelas superfícies incidir sobre o pedestre no interior no cânion.

Figura 2.18. Ilustração esquemática da absorção de radiação solar refletida no interior de um cânion urbano: (a) incidência da radiação solar direta em ângulos próximos à horizontal, (b) médios e (c) próximos ao Zênite.



Fonte: Gonzalez (2015).

Por fim, a autora conclui que o uso de albedos altos não deve ser prescrito a todas as superfícies de cânions urbano de forma indiscriminada, exigindo uma avaliação das condições locais para identificar as superfícies em que há suficiente exposição solar para seu uso como estratégia de mitigação de ilhas de calor.

2.2.4. Ilhas de Calor Urbanas

O clima urbano, de modo mais generalista, pode ser definido como a formação de uma cobertura de aerossóis, vapor, associado a fatores como radiação solar, vento, precipitação e temperatura. O clima pode ser analisado de uma perspectiva voltada a regiões específicas de uma cidade: área residencial, industrial, central, congestionada ou não. Ou ainda, o clima urbano pode ser avaliado em ruas específicas, de acordo com a geometria de insolação, direção do vento, largura das vias e localização das praças (KRATZER, 1956).

O processo de urbanização, bem como alguns fenômenos atrelados a isso, direta ou indiretamente, favorecem a formação de microclimas diferenciados em diferentes regiões da cidade, ocorrendo assim o fenômeno denominado ilha de calor. Este clima específico gerado nas cidades é designado clima urbano (ROSSI, KRÜGER, 2005, p.94).

As ilhas de calor urbanas (ICU) têm sido objeto de pesquisas desde que foi descrita por Luke Howard pela primeira vez na cidade de Londres. Pelo fato de sua intensidade variar de forma sazonal e também de acordo com o período do dia, é considerada um processo complexo de ser compreendido (ERELL, PEARLMUTTER, WILLIAMSON, 2010, p. 67).

Desta forma, o traçado e a morfologia urbana devem ter cuidado especiais em relação à ventilação, o sombreamento e as variações da temperatura das superfícies do ambiente construído, a fim de reduzir efeitos climáticos, como a formação de ilhas de calor urbanas.

O processo de formação do fenômeno ilha de calor está diretamente ligado à morfologia dos centros urbanos, ou seja, é decorrente da forma e características das estruturas que compõem a cidade, pois estas possibilitam a retenção da radiação solar nos centros urbanos, assim como diminuem a velocidade do vento, dificultam a dispersão da poluição e não retém umidade (LEMOS, 2011, p.4277).

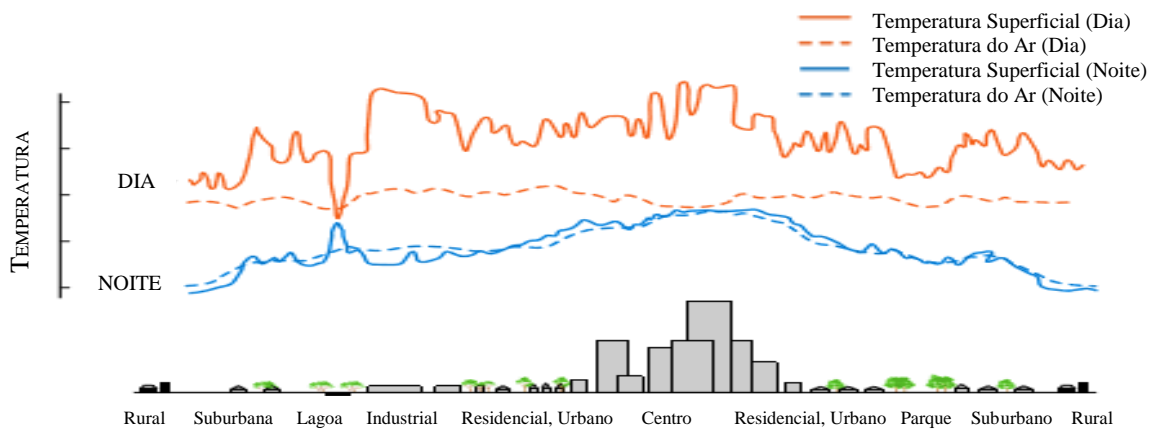
Segundo Golden *et al.* (2006), por definição o fenômeno de ilha de calor urbana se refere ao aumento da temperatura urbana de determinada área, comparada à temperatura das áreas suburbanas. A modificação da superfície urbana é a principal causa da formação de ICU. A substituição de áreas vegetadas por materiais artificiais, caracterizados baixa permeabilidade, alta absorção solar e propriedades térmicas favoráveis ao acúmulo de energia e irradiação de calor (ROMEIO, ZINZI, 2013).

A máxima intensidade da ilha de calor na cidade ocorre geralmente em condições de céu aberto, com vento calmo e após o pôr do sol (OKE, 1987, p.288).

Os parâmetros que têm maior influência no desenvolvimento da ICU são: o tipo de uso do solo, geometria urbana e emissões de calor antropogênico. Os materiais utilizados em substituição do terreno natural são os fatores que mais contribuem para a alteração da temperatura das cidades, devido ao baixo valor de albedo e à elevada capacidade de absorver e armazenar calor, além de ter menor permeabilidade em relação ao solo natural (CARPIO, 2014).

O fenômeno de ilha de calor urbana se refere ao aumento da temperatura urbana de determinada área, comparada à temperatura das áreas suburbanas, conforme apresentado na Figura 2.19.

Figura 2.19. Variação de temperatura do ar em uma área urbana e em uma área suburbana.



Fonte: Adaptado de Li (2015).

O fenômeno está relacionado ao balanço térmico positivo criado no ambiente urbano, devido ao crescente ganho de calor, como a alta absorção da irradiação solar e calor antropogênico, e a diminuição das perdas térmicas (GOLDEN *et al.*, 2006).

Oke (1978), em uma de suas primeiras pesquisas sobre Ilhas de Calor Urbanas, demonstrou que há uma correlação entre ICU e a morfologia urbana através do fator H/W. O fator de visão do céu pode ser aproximado à relação da altura dos edifícios (H) e a largura das ruas (W).

Sendo assim, a máxima intensidade da ilha de calor noturna (ΔT_{u-r} (máx)) pode ser mensurada como sendo a diferença de temperatura do ar entre a área urbana e a área rural próxima, conforme apresentado na Equação 2.10.

$$\Delta Tu - r(\text{máx}) = 7,45 + 3,97 * (\ln \frac{H}{W}) \quad [2.10]$$

Sendo:

$\Delta Tu - r(\text{máx})$: Intensidade máxima da ilha de calor (°C);
 $\frac{H}{W}$: Razão entre altura e largura do cânion urbano.

Para a avaliação da influência do FVC na intensidade da ilha de calor na escala do pedestre para a área de estudo, Souza *et al.* (2010, p. 156) citam o modelo desenvolvido por Oke (1981), que relaciona o FVC com a intensidade máxima da ilha de calor.

Desenvolvido por regressão linear, com $r^2 = 0,88$ e erro de $\pm 0,92^\circ\text{C}$, o modelo de Oke é expresso pela Equação 2.11.

$$\Delta Tu - r(\text{máx}) = 15,27 - 13,88 \psi_s \quad [2.11]$$

Sendo:

$\Delta Tu - r(\text{máx})$: Intensidade máxima da ilha de calor (°C);
 $\psi_{5,5}$: Fator de visão do céu.

▪ *Estratégias de mitigação de ICU*

Tecnologias de mitigação visam diminuir a absorção da radiação solar no ambiente urbano. Isso é possível através do uso de materiais com alta refletância associada a um alto fator de emissividade. Esses materiais, conhecidos como materiais frios, são utilizados em telhados, fachadas, estruturas urbanas e pavimentos. Segundo Santamouris (2003) e Li (2016), pode-se destacar as seguintes estratégias de mitigação das ICU:

1. Materiais reflexivos, pavimentos frios, materiais com menor absorção da radiação solar e alta emissividade, o que provoca uma redução da temperatura superficial e minimiza a liberação do calor sensível para a atmosfera;
2. Tecnologias que visam aumentar a evapotranspiração no ambiente urbano. Isso pode ser concretizado através da implantação intensiva de infraestrutura verde, instalação de corpos d'água em áreas urbanas, telhado verde e uso de pavimentos retentivos de água;
3. Tecnologias e sistemas que visam dissipar o excesso de calor urbano, adequação da geometria urbana para favorecer o fluxo de ar e a ventilação natural;
4. Técnicas e tecnologias que buscam diminuir a liberação de calor antropogênico na atmosfera urbana.

2.3. MODELOS FÍSICOS PARA SIMULAÇÃO DE CLIMA URBANO

De acordo com Oke (1984), Svensson, Eliasson e Holmer (2002) e Nakata-Osaki (2016), três tipos de modelos podem ser aplicados em pesquisas relacionadas ao clima em ambientes urbanos: modelos com base empírica, numérica e física.

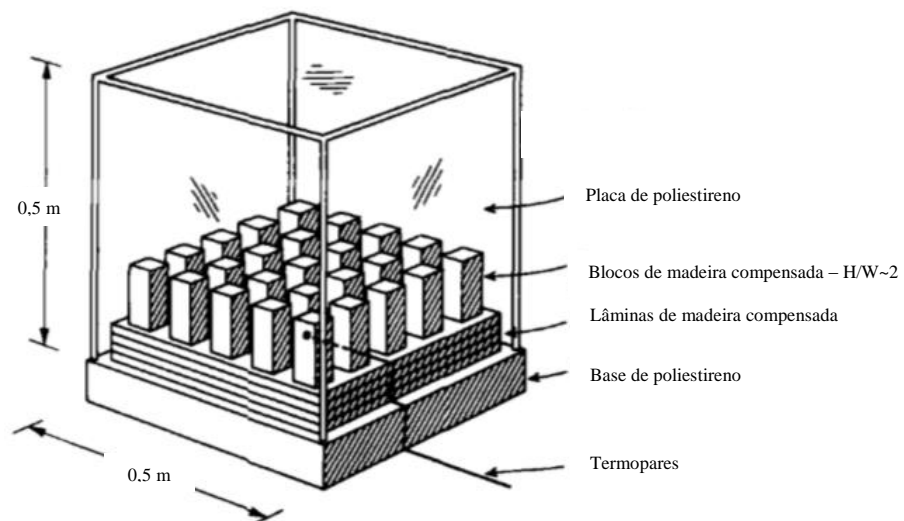
Os modelos físicos em escala são utilizados principalmente nos estudos sobre ventilação urbana e a influência de arranjos de edifícios (ASSIS, 2006), podendo ser especificamente aplicados para estudos sobre padrões de dispersão, fluxo e rugosidade de superfície, transferência radiativa e balanço de energia de superfície (BALÁZS *et al.*, 2009).

Entretanto, Nakata-Osaki (2016) destaca que a limitação da simulação física está na visão sobre o equilíbrio térmico, que durante o dia pode não ser adequado em comparação com a escala real. Apesar dos experimentos ao ar livre utilizarem materiais urbanos reais, as parcelas de radiação que incidem no local, as temperaturas de superfície e do ar observadas não são necessariamente iguais, devido às influências complexas de outros processos físicos, tais como transferência de turbulência para o ar e condução de calor para obstáculos.

Nas simulações físicas, a maior problemática está na inércia térmica dos materiais, que estão em escala. Esta é a principal razão pela qual há pouco trabalho na modelagem de escala de balanço energético (KANDA, 2006; NAKATA-OSAKI, 2016).

Oke (1981) propõe um modelo em escala a fim de avaliar a influência da geometria do cânion na formação de ICU noturnas e comparar essas informações com observações em campo. Na Figura 2.20 está apresentado o modelo.

Figura 2.20. Modelo em escala para avaliação das ICU em função da geometria do cânion.



Fonte: Adaptado de Oke (1981).

O modelo urbano construído sobre base quadrada com 50 cm de lado e 50 cm de altura, fabricada com material isolante e cobertura de polipropileno. Termopares foram instalados no piso do cânion e no centro do modelo a fim de monitorar a temperatura.

A metodologia proposta pelo autor estabelece condições de simulação. Pois, o modelo utilizado é simples e não pode ser considerado literalmente em proporções reais, devido à complexidade encontrada nas cidades. A proposta foi delimitada às seguintes condições:

- Condições noturnas;
- Condições meteorológicas de céu aberto e vento calmo;
- Cidades e estações em que o calor antropogênico é substancial no balanço energético;
- Condição de Camadas do Dossel Urbano (*Urban Canopy Layer*);
- Simulações dos efeitos da geometria urbana e das variações térmicas;

Pearlmutter (2006) propõe um modelo que consiste em um campo experimental, denominado OASUS, *Open-air scaled urban surface*. O modelo permite analisar diferentes condições climáticas urbanas. Ao descrevê-lo, Krüger e Pearlmutter (2011, p.57) afirmam:

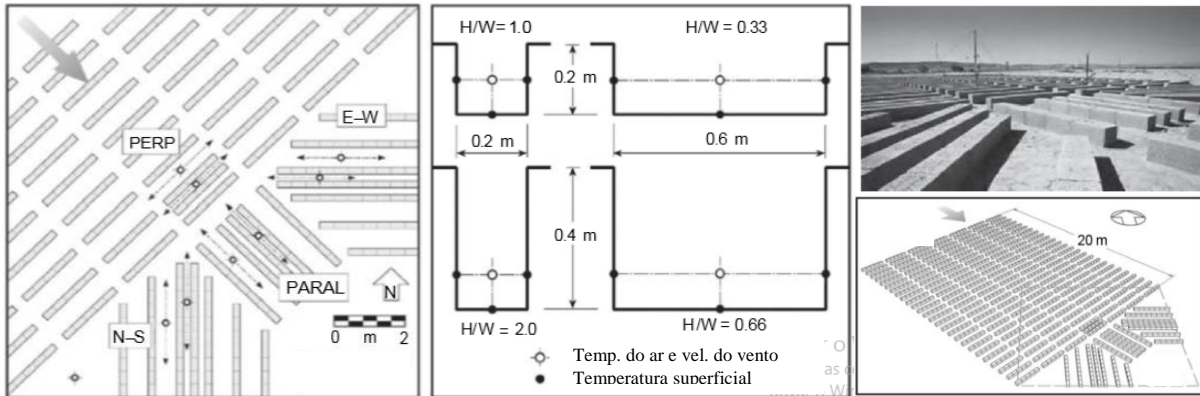
O modelo consiste de uma malha de prédios e ruas, construída sobre uma área aberta. As fileiras de prédios são compostas por blocos de concreto vazado de 0,2 x 0,2 x 0,4 m e apresentam características análogas aos materiais encontrados em construções do Negev.

O OASUS (*Open-air scaled urban surface*) foi construído no sítio experimental localizado em um local árido, na latitude 30,8° N e altitude de 480 m acima do nível do mar, no campus da Universidade de Ben-Gurion, deserto de Negev, ao sul de Israel. É composto por blocos de concreto agrupados em fileiras sobre solo arenoso nu e tem sido utilizado para quantificar as trocas de energia no ambiente urbano em dois níveis: entre a superfície e a atmosfera e entre o pedestre e o meio urbano. Ambas as situações são analisadas em função do posicionamento dos sensores na seção do cânion.

As medições de temperatura do ar e temperatura superficial foram realizadas ao nível do pedestre e acima da malha. O modelo apresenta um comprimento de rugosidade, determinado pelo número de blocos e altura das fileiras, com 20 m de extensão na direção do vento predominante.

A similaridade do modelo, na escala 1:10, com um cenário urbano em escala real foi validada inúmeras vezes através de um análise semi-empírica, comparando-o a um local com configuração urbana semelhante, na cidade de Dimona, cuja latitude é 31° 04' 16.57" N. O projeto, bem como a disposição dos sensores no modelo, está apresentado na Figura 2.21.

Figura 2.21. Projeto do Modelo em escala a céu aberto - OASUS (*Open-air scaled urban surface*).



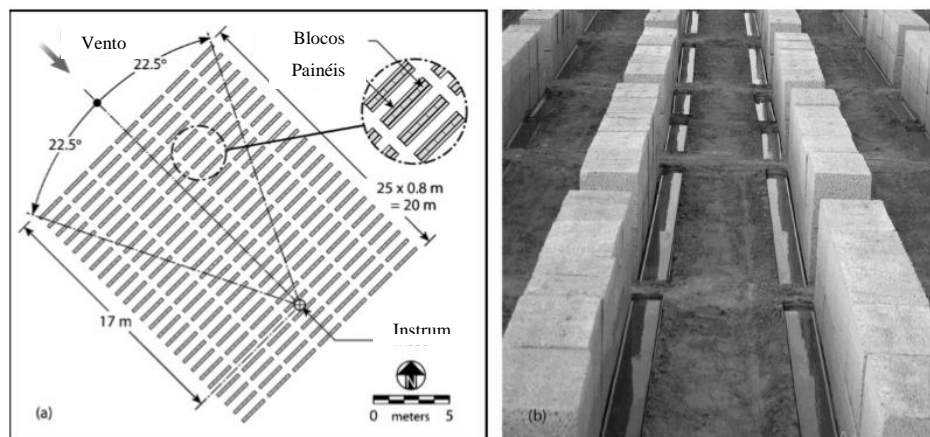
Fonte: Adaptado de Pearlmutter (2006).

No modelo OASUS, Krüger e Pearlmutter (2008) analisaram o efeito a evapotranspiração em arranjo urbano sob condições desérticas. Os autores mencionam que uma das principais vantagens do modelo em escala é de possibilitar o controle de variáveis que afetam o microclima.

O trabalho pretendeu avaliar o impacto de adicionar umidade às “ruas” entre “fileiras de prédios” na temperatura do ar em cânions do modelo físico e no balanço energético de superfície (acima da malha urbana, *surface energy balance – SEB*) acima da malha.

A adição de áreas “molhadas” foi realizada por meio da inserção de painéis evaporativos aos diversos cânions do modelo físico, conforme apresentado na Figura 2.22, e pode ser correlacionada à introdução de áreas vegetadas (superfícies gramadas) em cidades quente e secas.

Figura 2.22. Avaliação do efeito da evapotranspiração no modelo OASUS.



Fonte: Adaptado de Krüger e Pearlmutter (2008).

Os resultados, segundo os autores, indicaram que há uma redução expressiva da temperatura do ar no cânion, na presença de painéis evaporativos em ambos os lados das fileiras. Essa redução é mais significativa no arranjo urbano com um bloco de altura. Entretanto, dado que essa redução da temperatura local é obtida por meio da adição de conteúdo de umidade sob condições desérticas, a

verificação da quantidade de água evaporada indica que uma utilização mais racional de áreas vegetadas deveria ocorrer com um maior adensamento da malha urbana.

Além do OASUS, outro modelo em escala foi construído campus do Instituto de Tecnologia de Nippon, Saitama, Japão, nas coordenadas 36°01'N, 139°42'E, conhecido como COSMO2 (*Comprehensive Outdoor Scale Model Experiments for Urban Climate*), conforme apresentado na Figura 2.23. O principal objetivo do COSMO2 era analisar sistematicamente o balanço de energia de forma integral e utilizar os dados de campo como parâmetros de entrada para simulações de modelos computacionais (KANDA *et al.*, 2006).

Figura 2.23. Modelo COSMO2 na escala 1:5 e 1:50 da esquerda para a direita.



Fonte: Adaptado de Kanda *et al.* 2006).

O modelo foi construído nas escalas 1:5 e 1:50 e era possível fazer satisfatoriamente análises de albedo e do efeito aerodinâmico do vento. Entretanto, assim como qualquer modelo de simulação física, era incapaz de reproduzir a inércia térmica das superfícies.

▪ *Potencialidades e Limitações dos Modelos*

Com base nas informações apresentadas acima, o Quadro 2.2 sintetiza e compara as principais limitações e potencialidades dos modelos de simulação de clima urbano.

Quadro 2.2. Potencialidades e limitações dos modelos de simulação.

MODELO	POTENCIALIDADES	LIMITAÇÕES
<i>Numérico</i>	É geralmente desenvolvido para trabalhar em qualquer cidade sob diferentes condições	Necessita ser submetido a um processo de validação antes de ser utilizado
<i>Físico</i>	Tende a contribuir para o entendimento de um processo ou condições específicas	A dificuldade em obter similaridade de inércia térmica dos elementos
<i>Empírico</i>	A previsão é muito próxima da realidade	Simula apenas as condições específicas sob as quais foi desenvolvido.

Fonte: Adaptado de Nakata-Osaki (2016).

Nakata-Osaki (2016, p.43) conclui que “[...] enquanto modelos físicos têm sua aplicação limitada pelas condições de escala, os modelos empíricos geralmente têm sua aplicabilidade restrita às condições de tempo sob os quais foram desenvolvidos”.

2.5. PAVIMENTAÇÃO URBANA

2.5.1. Contextualização e Aplicações

O pavimento é uma estrutura de várias camadas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada a resistir aos esforços de tráfego e distribuí-los na sua estrutura, melhorar as condições de rolamento e segurança, além de resistir aos esforços horizontais e intempéries o qual estará exposto (SENÇO, 2007; LOSS, 2018).

Além disso, Carvalho (2010) menciona que também é atribuída ao pavimento a função de melhorar a trafegabilidade, oferecendo aos usuários condições de mobilidade e acessibilidade com conforto, segurança e economia.

A classificação dos pavimentos, segundo o manual do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (BRASIL, 2006, p.95) são:

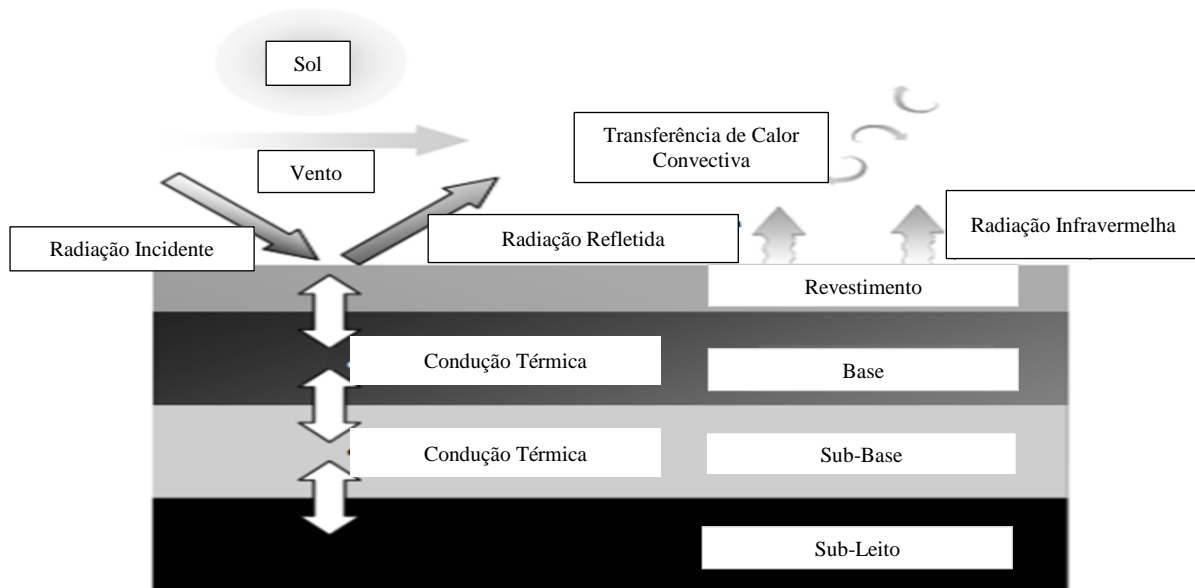
- *Pavimento Flexível:* É aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Exemplo: pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada ou macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica.
- *Pavimento Semi-Rígido:* Caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias. Exemplo: Camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.
- *Pavimento rígido:* É aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Exemplo: Pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland.

O pavimento é constituído por uma sequência de camadas, de espessuras determinadas a partir do dimensionamento, considerando as propriedades mecânicas dos materiais e a necessidade de utilização da via (LOSS, 2018).

A espessura das camadas do pavimento pode influenciar na condução térmica dentro da estrutura. Um pavimento mais fino aquecerá mais rápido durante o dia, mas também esfriará mais rápido durante a noite. A espessura efetiva do pavimento dependerá em parte de quão bem o calor pode ser conduzido desde o revestimento até as camadas de base e sub-base (CARPIO, 2014).

As propriedades térmicas dos materiais que compõem a mistura influenciam nos processos térmicos do pavimento. A interação entre as camadas do pavimento e sua relação com o meio estão apresentados na Figura 2.24.

Figura 2.24. Características e processos térmicos do pavimento.



Fonte: Adaptado de Cambridge Systematics (2005).

Segundo Carpio (2014), as superfícies pavimentadas, nas primeiras horas do dia, absorvem uma grande quantidade de calor e permitem que o ar se conserve fresco. O calor absorvido pela camada de revestimento é transmitido para as camadas inferiores através do processo de condução. Assim, ao longo do dia, o pavimento se torna mais quente do que o meio. Por fim, durante a noite, o calor armazenado nas camadas inferiores é transmitido para o revestimento, o qual irradia o excesso de calor para a camada de dossel.

2.5.2. Materiais para Pavimentação

▪ *Camada de Revestimento*

O revestimento da superfície pavimentada das cidades pode ser construído a partir de diversos tipos de materiais. Carpio (2014) destaca cinco principais tipos: os revestimentos com mistura asfáltica; os revestimentos de concreto de cimento Portland; e os revestimentos de peças pré-moldadas de concreto (*pavers*), blocos de pedra (paralelepípedo) e pedra tipo *petit pavê*. A coloração natural do revestimento das vias urbanas depende do tipo de revestimento, do tipo de rocha empregada e da idade do revestimento.

Senço (2007) detalha a classificação dos revestimentos, tanto de pavimentos rígidos quanto flexíveis, conforme apresentado no Quadro 2.3.

Quadro 2.3. Classificação dos revestimentos.

REVESTIMENTO	RÍGIDOS	<i>Concreto de Cimento Portland</i>			
		<i>Macadame de Cimento Portland</i>			
		<i>Paralelepípedos rejuntados com cimento</i>			
	FLEXÍVEIS	Betuminosos	<i>Concreto Asfáltico</i>		Usinados
			<i>Pré-misturado a quente</i>		
			<i>Pré-misturado a frio</i>		
		Tratamento Superficial	<i>Penetração Direta</i>	Simples	
				Duplo	
			<i>Penetração Invertida</i>	Triplo	
				Quádruplo	
Calçamento Articulado	<i>Alvenaria Poliédrica</i>				
	<i>Paralelepípedos</i>				
	<i>Peças pré-moldadas de concreto</i>				

Fonte: Adaptado de Senço (2007).

Na construção de pavimentos, a mistura asfáltica é o material mais utilizado. Sua composição é basicamente formada por ligante asfáltico e agregados. Desde que a dosagem da mistura seja adequada, esse tipo de pavimento possui um bom desempenho. Além disso, é considerado um pavimento durável, pois resiste mecanicamente à fadiga, à deformação e à fissuração provocado pelas baixas temperaturas (CARPIO, 2014).

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, o que contribui com o aquecimento do ar na região próxima à sua superfície.

Pois, a cor preta do ligante asfáltico tem dificuldade em refletir a radiação solar incidente. Sendo assim, a energia absorvida pela superfície incrementa a temperatura do pavimento e em consequência, a temperatura do ar que está próximo a ele, contribuindo para o aquecimento das cidades (POMERANTZ *et al.*, 2000).

▪ *Pavimentos Frios*

O uso destes “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).

Além disso, cores claras geralmente apresentam grande refletância na região visível e também tendem a ter grande refletância na região do espectro na faixa do infravermelho. No entanto, uma alta refletância na região visível não implica num alto albedo, já que o desempenho do albedo está

diretamente relacionado com a refletância do material na região infravermelho, a qual corresponde à aproximadamente 43% da radiação solar que atinge a superfície terrestre (PRADO, FERREIRA, 2005).

Nesse sentido, é crescente também a discussão sobre a aplicação do pavimento frio como um dos instrumentos para mitigação das ICU. Li e Harvey (2013, p.1) afirmam que o aumento do albedo da superfície pode reduzir significativamente a temperatura ao longo do dia nas estações quentes.

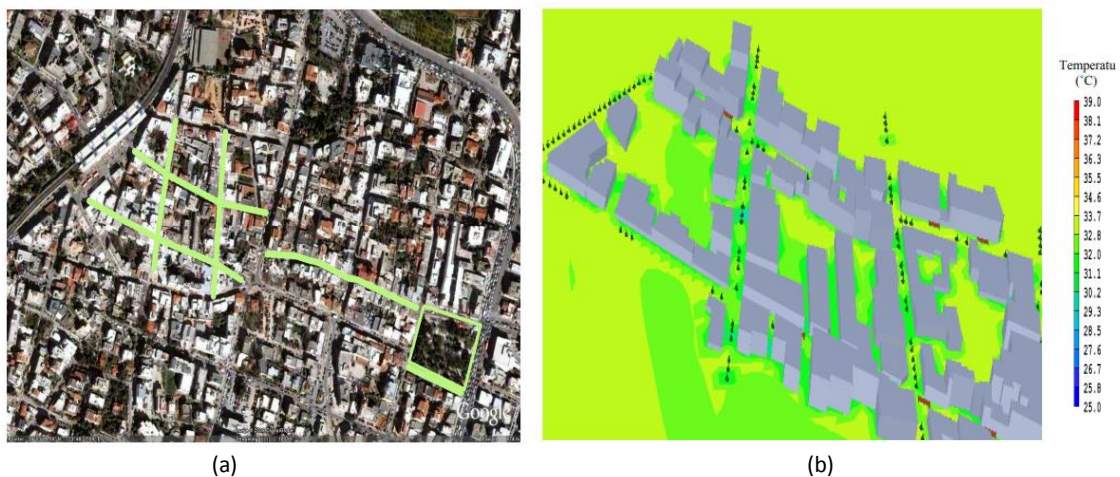
Há um número crescente de trabalhos reportados na literatura nos últimos anos. Pomerantz *et al.* (1997) e Pomerantz *et al.* (2000) conduziram alguns estudos em pavimentos reflexivos e seus benefícios, mensurando o albedo de pavimentos de concreto com cimento Portland com agregados de coloração clara.

Levinson e Akbari (2001) desenvolveram um estudo sobre os efeitos da dosagem de concreto na alteração da refletância solar da superfície. Synnefa *et al.* (2009) mensuraram as propriedades ópticas e o desempenho térmico de amostras de asfalto colorido no ambiente urbano. Wong *et al.* (2009) desenvolveram um estudo da efetividade da cobertura de pavimentos na mitigação de ilhas de calor em Singapura, através da medição do albedo para diferentes tratamentos superficiais.

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

O projeto envolveu as seguintes intervenções: Ampliação da área sombreada através de uso de pergolados e arborização a fim de aumentar a evapotranspiração; uso de pavimentos reflexivos com refletância entre 0,7 e 0,8; e uso de sistema de circulação de ar em zonas específicas. A Figura 2.25 apresenta a área de estudo e o resultado da simulação.

Figura 2.25. Imagem de satélite da área reabilitada (a) e distribuição da temperatura do ar simulada na estação do verão para a área em estudo (b).

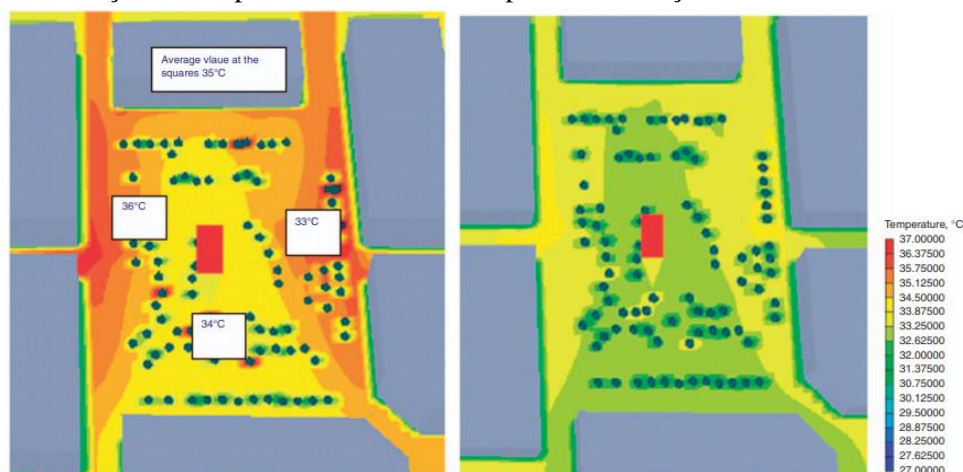


Fonte: Santamouris *et al.* (2012b).

Percebe-se que a distribuição da temperatura do ar após a instalação dos pavimentos frios reduziu em média de 2,3 - 3,4°C durante o período do verão.

Gaitani *et al.* (2011) realizaram a reabilitação de uma praça no centro de Atenas de 4160 m², utilizando pavimentos frios e outras tecnologias de mitigação como a implantação de áreas verdes. A área foi monitorada e com os dados obtidos foram realizadas simulações numéricas para complementar as análises. Na Figura 2.26 está apresentado o local antes e após a intervenção.

Figura 2.26. Distribuição da temperatura do ar antes e após a intervenção.



Fonte: Gaitani *et al.* (2011).

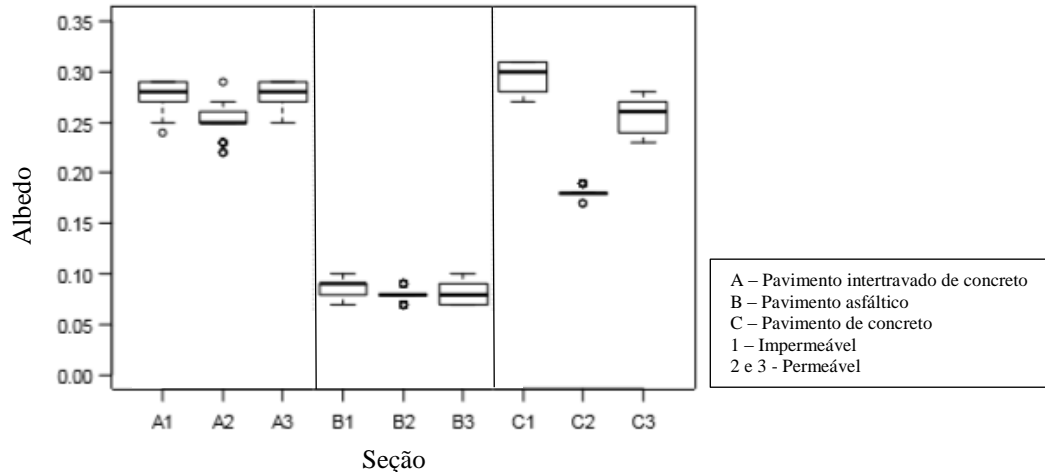
A temperatura do ar em campo a 1,5 m de altura, demonstra que a temperatura ambiente reduziu 1–2°C comparando com a situação existente.

Sendo assim, percebe-se que os pavimentos representam um importante fator no clima urbano. As altas temperaturas superficiais aumentam o calor sensível liberado para atmosfera e contribuem no desenvolvimento de ilhas de calor urbanas. Algumas pesquisas apontam que o pavimento reflexivo e pavimentos permeáveis sejam uma possível estratégia de mitigação. Agora, esses projetos têm sido estendidos para simulações laboratoriais e monitoramentos em campo para identificar o comportamento do ambiente construído em outras escalas (SANTAMOURIS, 2016).

Pesquisas apontam que os pavimentos frios possuem um melhor desempenho térmico em relação aos convencionais. Entretanto, há a necessidade de trabalhos direcionados a avaliar o real potencial de resfriamento desses materiais e propor uma melhor documentação desses parâmetros na comercialização das peças.

Li *et al.* (2013) apresentam um estudo o qual consiste no monitoramento de nove tipos de pavimento, intertravado de concreto, concreto e asfalto, nas condições permeável e impermeável. A Figura 2.27 apresenta a alteração do albedo em função das propriedades de cada uma das amostras.

Figura 2.27. Comparação entre albedos de diferentes pavimentos.



Fonte: Adaptado de Li (2013).

Observa-se que os pavimentos de concreto apresentaram um maior albedo em relação aos pavimentos asfálticos. Entretanto, os pavimentos intertravado de concreto, independentemente de sua capacidade drenante, apresentaram albedos semelhantes e com baixa variabilidade. Vale ressaltar que o único pavimento que apresentou um menor albedo em relação aos demais do mesmo grupo, foi o pavimento de concreto permeável.

Além disso, as amostras foram reavaliadas no estado envelhecido em um período de 1 a 5 anos e variando composição do concreto com materiais polímeros, borracha e diferentes formas de produção do concreto asfáltico, misturado a quente e à frio. Através deste estudo foi possível identificar mudanças significativas na taxa de refletância da superfície ao propor novos materiais e variações na composição dos pavimentos.

Outro projeto em que foram implantados pavimentos intertravados de concreto, corresponde ao parque Flisvos, localizado no sudoeste de Atenas, o qual possui uma área de 80000m². Antes da reabilitação, os pavimentos eram de asfalto e materiais escuros. A absorvância dos pavimentos estava entre 0,79 e 0,89. Além disso, pesquisas experimentais demonstravam que esta área estava entre as zonas mais quentes da cidade (SANTAMOURIS, 2016, p. 104).

O projeto foi implementado em duas fases. Durante a primeira etapa foram plantadas 2500 árvores e arbustos. Na segunda fase, quase 4500 m² do pavimento existente foram substituídos por pavimentos semi-permeáveis de concreto.

Considerando a refletância e sua alteração devido ao processo de envelhecimento, o fator de emissividade, a durabilidade e a estética, foram selecionados pequenos blocos de concreto na coloração amarelo claro. Os quais foram coloridos utilizando pigmentos reflexivos na faixa do infravermelho misturados durante o processo de manufatura.

O desempenho térmico do parque foi monitorado e a distribuição espacial da temperatura ambiente simulada apresentou uma redução de 1,9 K devido ao pavimento frio, conforme apresentado na Figura 2.28.

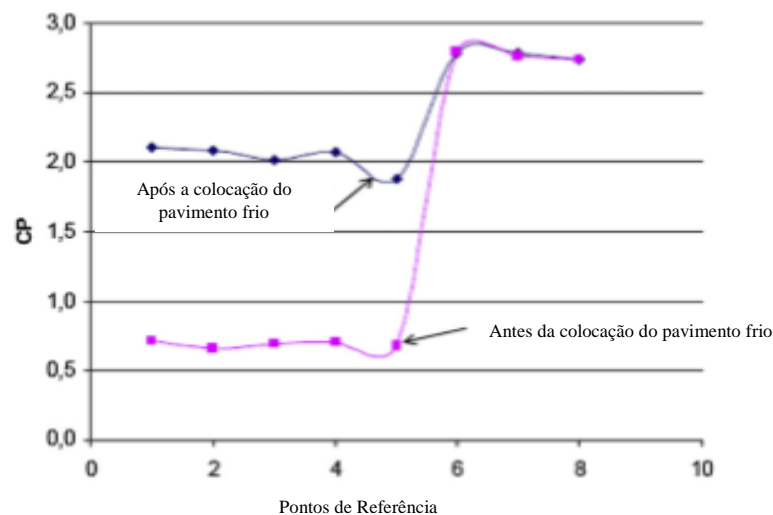
Figura 2.28. Local de implantação (a), distribuição da temperatura do ar antes (b) e após a substituição do pavimento (c).



Fonte: Santamouris (2016).

As condições de conforto do local foram calculadas através do potencial de resfriamento – *cooling power (CP)* em oito pontos da área de estudo. Os resultados antes e após a substituição dos pavimentos estão apresentados na Figura 2.29.

Figura 2.29. Condição de conforto calculada em oito pontos de referência do parque em dias de verão.



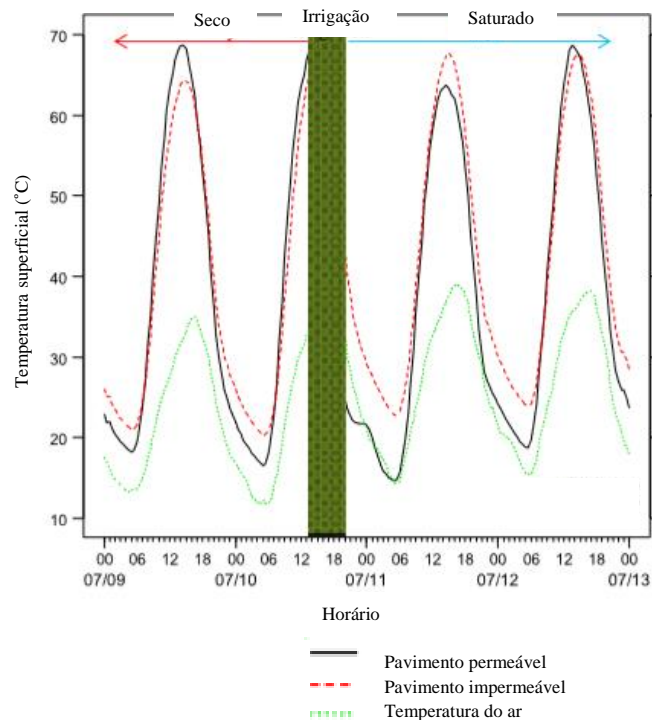
Fonte: Adapdo de Santamouris (2016).

Percebe-se que após o aumento da massa vegetada e a substituição do pavimento houve um aumento no índice de conforto em mais da metade dos pontos de análise do parque.

Li *et al.* (2013) realizaram uma comparação do desempenho térmico de pavimentos permeáveis sob a condição seca e saturada. A fim de examinar o desempenho térmico e o efeito de resfriamento da superfície durante o verão, foi realizado um processo de irrigação das 15:00 às 23:00

horas, utilizando uma vazão de aproximadamente $0,35 \text{ m}^3/\text{h}$ até atingir a saturação. Na Figura 2.30 está apresentado o desempenho térmico do pavimento na condição seca e saturada.

Figura 2.30. Desempenho térmico do pavimento antes e após a irrigação.



Fonte: Li *et al.* (2013).

No estado seco, os resultados alcançados demonstram que o pavimento permeável de concreto gerou uma temperatura superficial mais alta durante o dia, quando comparado ao pavimento impermeável de revestimento asfáltico, cerca de 5°C . Entretanto, nas condições saturadas, após a irrigação, o pavimento de concreto apresentou temperaturas inferiores em relação ao pavimento impermeável, de aproximadamente 5°C também. O que vale ressaltar, é que, imediatamente após a irrigação iniciar, o pavimento permeável reduziu a temperatura superficial em 30°C , devido ao efeito da água fria. Assim, foi constatado através deste experimento, que o poder de resfriamento de pavimentos permeáveis através da irrigação tem notória eficiência devido ao processo de evaporação e da infiltração até as camadas de base. Essas observações sugerem que a irrigação pode ajudar a reduzir a temperatura superficial durante o dia.

Capítulo 3

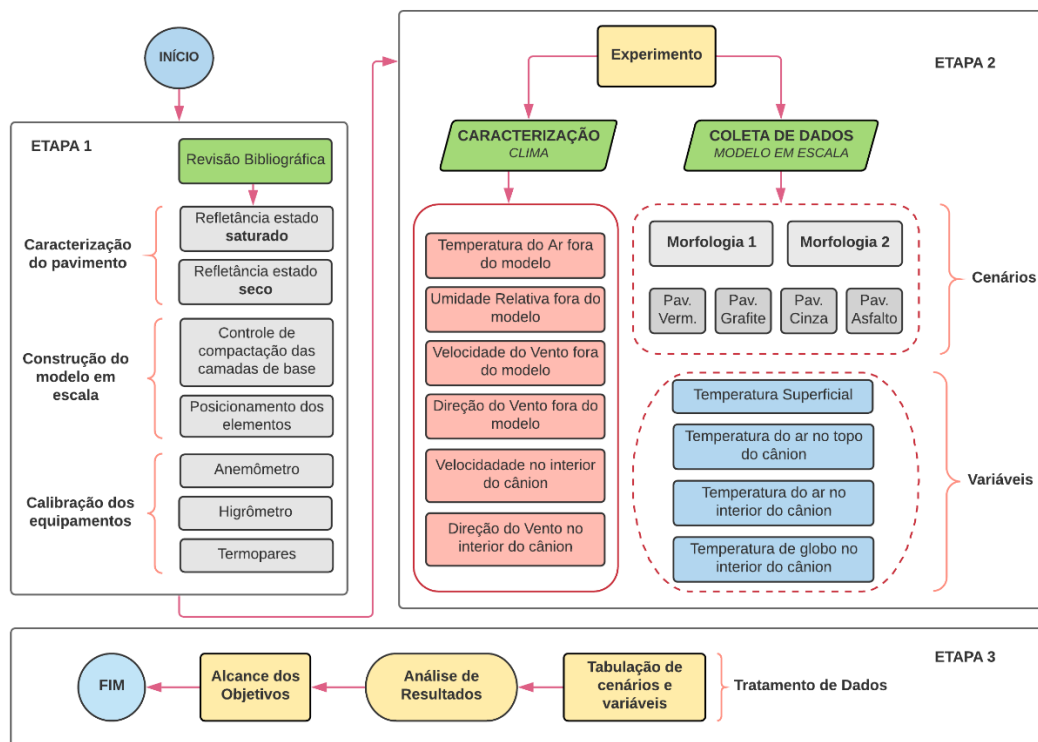
Materiais e Método

3.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A pesquisa se classifica como um estudo teórico-experimental e está dividida em três etapas: fundamentação teórica e montagem e experimentação de modelo físico em escala, coleta de dados em campo e análise dos resultados. Cada etapa foi subdividida de modo a avaliar a calibrar os instrumentos, validar e aferir a precisão dos resultados e atestar a eficiência dos procedimentos propostos.

O início dos procedimentos experimentais é dado pela caracterização do local de implantação e dos materiais utilizados na construção do modelo. Em seguida, pela calibração dos equipamentos, pela construção do modelo proposto e o início da coleta de dados. As informações coletadas são da temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento, temperatura superficial, de globo, do ar no topo e no interior do cânion construído com quatro colorações de pavimento, em duas configurações urbanas distintas. Por fim, a análise de resultados ocorre com o cruzamento de dados de temperatura, cor dos pavimentos e morfologia do cânion, conforme representado na Figura 3.1.

Figura 3.1. Fluxograma da pesquisa.



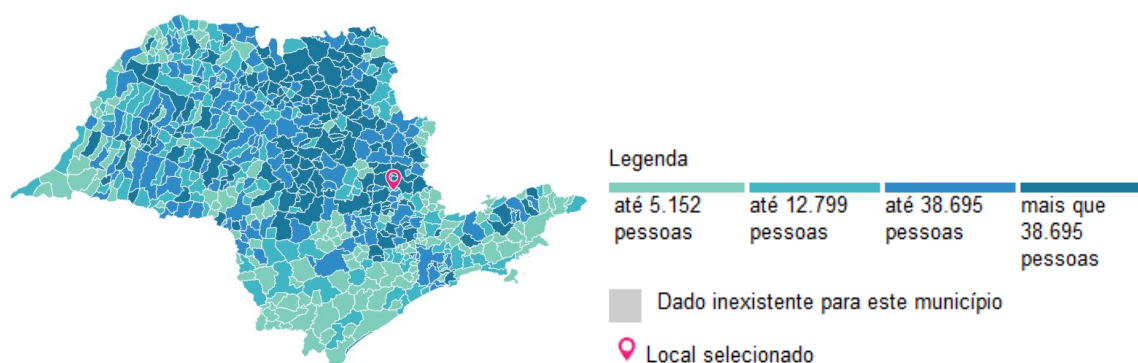
Fonte: o Autor (2019).

3.2. IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL DE IMPLANTAÇÃO

3.2.1 Aspectos Físicos e Geográficos

O modelo em escala foi construído na cidade de Engenheiro Coelho – SP. Um município de pequeno porte que se encontra na região leste do Estado de São Paulo. O município pertence à sede administrativa da região metropolitana de Campinas, SP e é formado por uma população estimada de 20.284 habitantes, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019).

Figura 3.2. Localização da cidade de Engenheiro Coelho – SP.



Fonte: IBGE (2019).

Conforme apresentado na Figura 3.2, estende-se por uma área de 110 km², com altitude média de 880 m em relação ao nível do mar, nas coordenadas geográficas 22°17'00"S; 47°07'00"W. A coleta de dados da pesquisa foi realizada no campus do Centro Universitário Adventista de São Paulo (UNASP), apresentado na Figura 3.3.

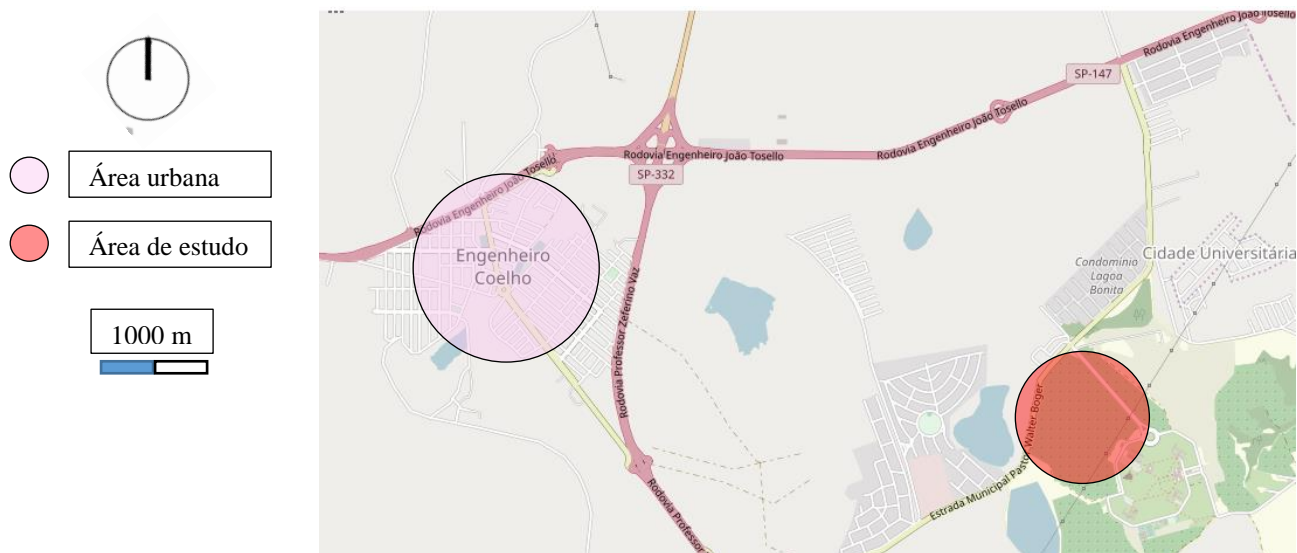
Figura 3.3. Imagem aérea do campus universitário.



Fonte: UNASP (2019).

O campus está situado a um raio de 4 km da malha urbana de Engenheiro Coelho, em uma área rural, porém rodeado por condomínios residenciais. A área delimitada na Figura 3.4 representa o local de implantação do experimento em relação à malha urbana.

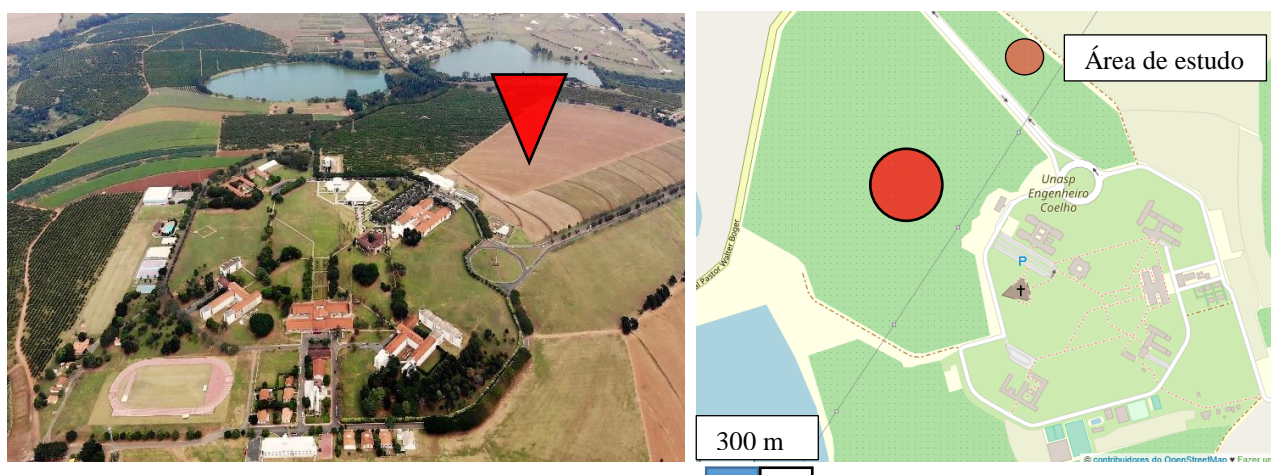
Figura 3.4. Localização do campo experimental em relação à malha urbana.



Fonte: OpenStreetMap (2019).

A estrutura física do campus está concentrada em uma região de fazendas cujo relevo é relativamente plano e com altitude média de 550m. O campo experimental está implantado em uma área da fazenda de uso predominantemente agrícola, situada a um raio de 200m da estrutura, conforme indicado na Figura 3.5.

Figura 3.5. Localização do campo experimental.



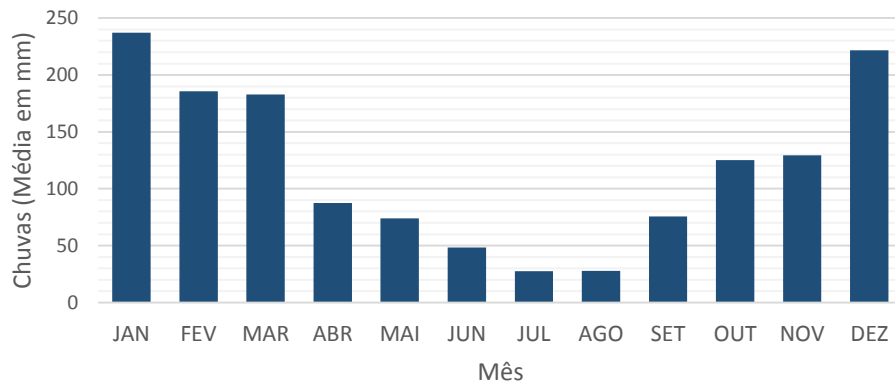
Fonte: Adaptado de UNASP (2019) e OpenStreetMap (2019).

3.2.2. Aspectos Climáticos

A classificação climática de Köppen-Geiger para Engenheiro Coelho – SP é clima tropical com estação seca de inverno (Aw). O município é caracterizado por apresentar temperatura média anual de 20°C, oscilando entre mínima média de 13,7°C e máxima média de 26,2°C, segundo dados do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI, 2018).

O município de Engenheiro, quanto à pluviosidade, apresenta precipitação média anual de 1541mm, conforme dados da estação pluviométrica D4-107 do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE, 2019), indicado na Figura 3.6.

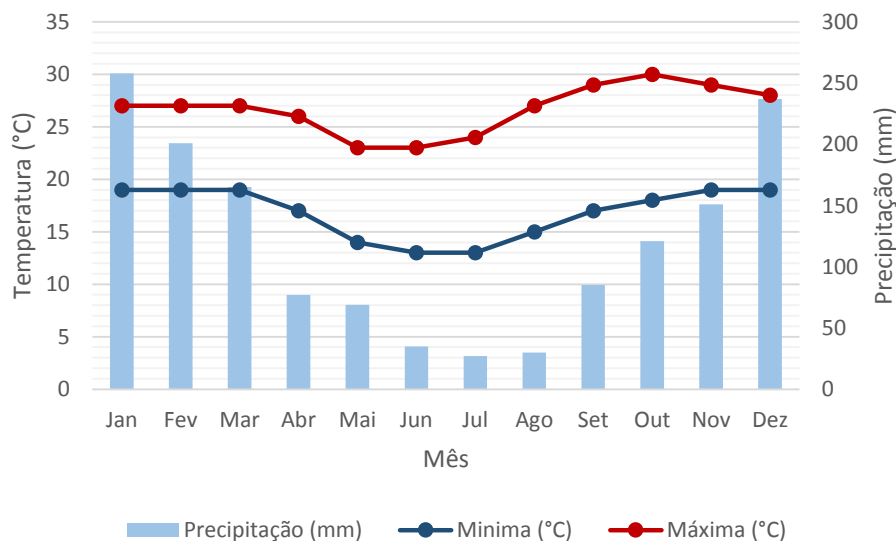
Figura 3.6. Histograma para cidade de Engenheiro Coelho – Estação D4-107. Série 1978-2000.



Fonte: Adaptado de DAEE (2019).

As médias climatológicas estão apresentadas na Figura 3.7 e foram calculadas a partir de uma série histórica entre os anos de 1987-2017, segundo dados do CLIMATEMPO (2019).

Figura 3.7. Médias climatológicas de Engenheiro Coelho.



Fonte: Adaptado de CLIMATEMPO (2019).

3.3. MODELO EM ESCALA REDUZIDA

Este modelo proposto é constituído por um pavimento asfáltico de referência e três colorações de pavimento intertravado de concreto de 8 cm de espessura, com 120 cm de largura e 500 cm de comprimento, separados lateralmente por barreiras de 40 cm e 80 cm de altura, que forma duas configurações urbanas.

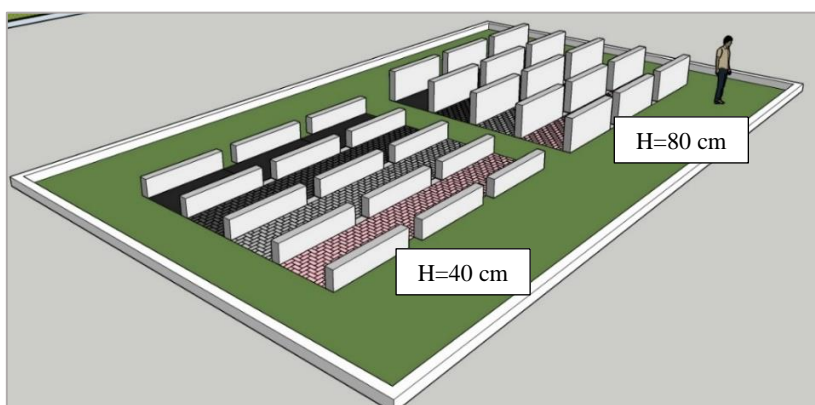
Por se tratar de um modelo idealizado, sem obstáculos e elementos no interior do cânion, a fim de caracterizar o objeto de estudo, foi utilizada relação proposta por Erell, Pearlmutter e Williamson (2011), na determinação do fator de visão do céu (SVF) em função da relação H/W.

A execução em escala 1:15 segue as recomendações normativas previstas pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens – DNER para a determinação da largura das vias e o traçado do campo está embasado no modelo proposto por Pearlmutter *et al.* (2006).

3.3.1. Caracterização do Objeto

O traçado do modelo foi determinado a fim de garantir os seguintes critérios: estabelecer um local livre de obstruções, considerar a direção predominante do vento e posicionar os termopares nas superfícies pavimentadas e os sensores de temperatura do ar em alturas estratégicas, para realizar a coleta de dados de temperatura em cada forma urbana. Neste trabalho a geometria das vias é denominada cânion urbano. Na Figura 3.8 é apresentada uma proposta de traçado para implantação do campo.

Figura 3.8. Esboço de implantação do campo experimental.

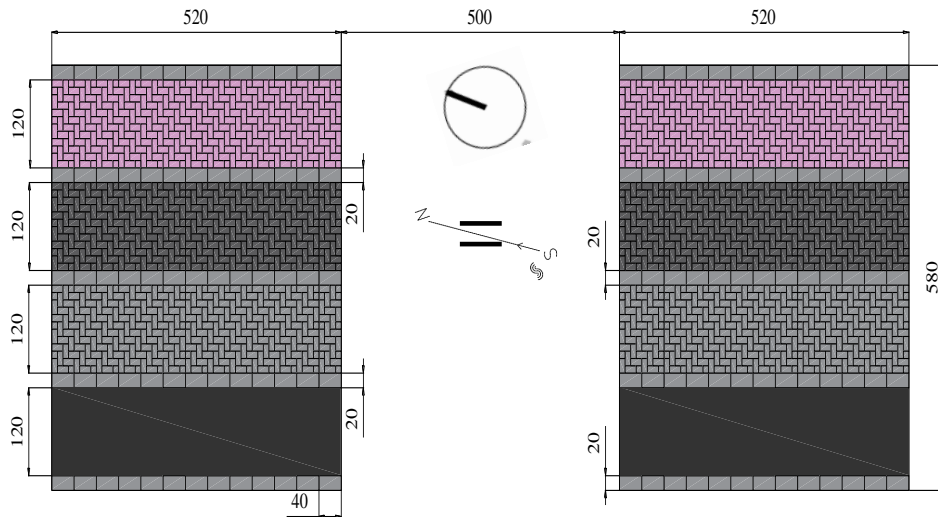


Fonte: o Autor (2019).

O modelo experimental foi construído, simulando vias urbanas com largura de 14 m e as calçadas com 2,5 m. Além disso, as edificações, em escala real, teriam um gabarito de no máximo 10 m de altura.

Desta forma, a proposta é implantar o 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, perpendicularmente à direção do vento predominante, conforme apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9. Representação em planta do modelo em escala (cm).

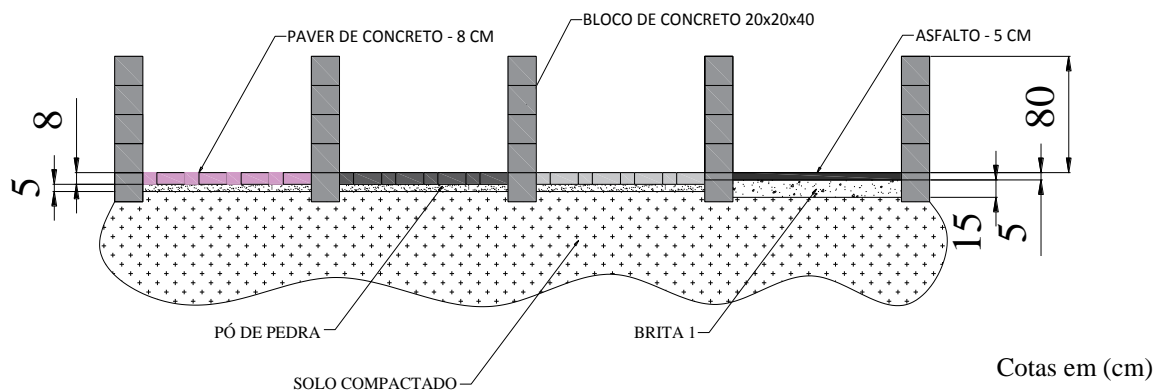


Fonte: o Autor (2019).

Os dados coletados são referentes à duas configurações distintas de cânions urbanos. O primeiro com uma relação $H/W = 0,66$ e o segundo modelo com $H/W = 0,33$, conforme representado pela Figura 3.10 e 3.11.

Além disso, são utilizados blocos de concreto com diferentes alturas, paralelos à faixa pavimentada, que representarão as massas construídas que formam os arranjos urbanos.

Figura 3.10. Representação dos cânions com fator $H/W = 0,66$.

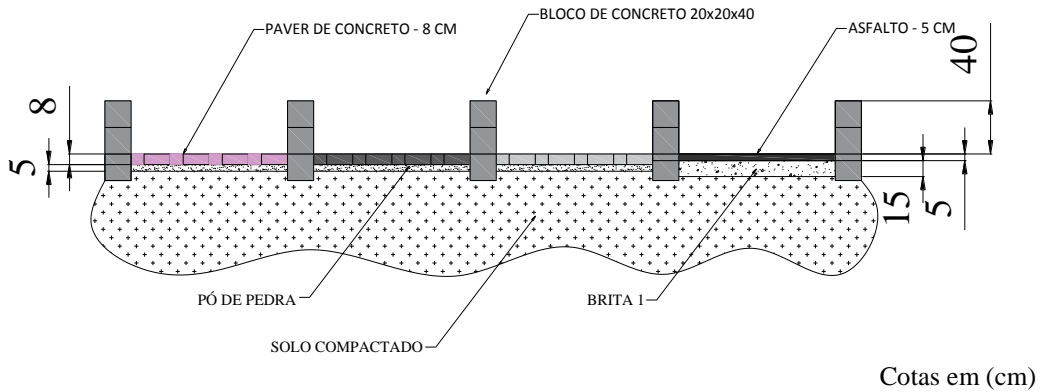


Fonte: o Autor (2019)

A configuração com relação $H/W = 0,66$ é denominada M4 e possui um Fator de Visão do Céu ($SVF \cong 0,60$) e a morfologia com $H/W = 0,33$, M2, com um $SVF \cong 0,85$. Os pavimentos 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.

Figura 3.11. Representação dos cânions com fator $H/W = 0,33$.



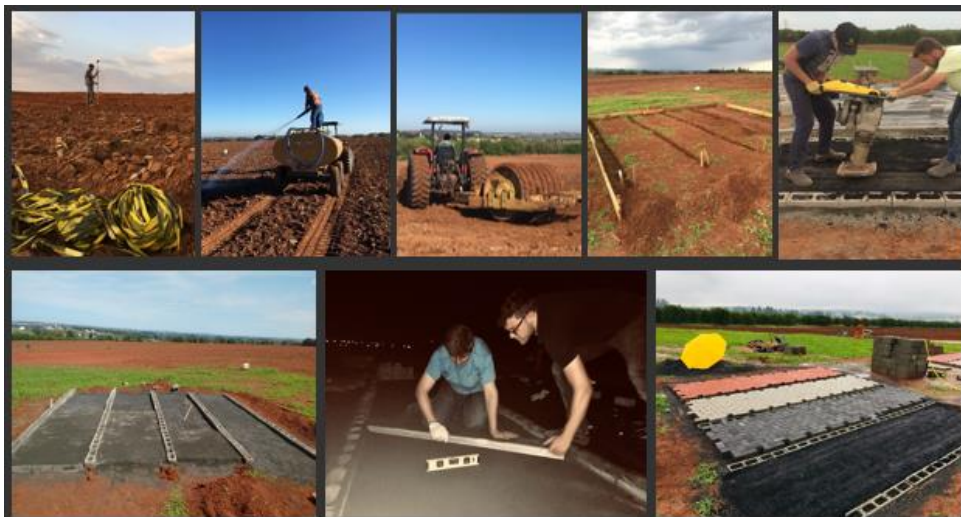
Fonte: o Autor (2019).

O modelo OASUS era composto por fileira de bloco, por uma extensão de 20 m, com a finalidade de criar obstruções ou rugosidade (*fetch ou roughness*) (PEARLMUTTER *et al.*, 2006). Para considerar o efeito da rugosidade no modelo, é coletada a temperatura do ar no interior do cânion.

3.3.2. Montagem do Experimento

A execução do campo experimental se inicia com os serviços topográficos, em seguida com a compactação do solo, o preparo das camadas de base dos pavimentos, a fundação das barreiras e o assentamento dos pisos intertravado de concreto conforme representado na Figura 3.12.

Figura 3.12. Execução dos pavimentos.



Fonte: o Autor (2019).

O solo foi submetido ao ensaio de proctor. As amostras foram moldadas com energia normal, seguindo as recomendações normativas da NBR 7182 - ABNT (2016), com o objetivo em determinar a umidade ótima de compactação e a máxima densidade aparente do solo. A ideia deste ensaio é garantir que o canteiro experimental seja executado de acordo com as normas exigidas e procedimentos padrões para a execução de pavimentos urbanos. A ficha com o controle de compactação do solo está no Anexo 2.

A segunda etapa corresponde à coleta de dados, para isso os sensores de temperatura foram instalados nas duas morfologias, denominadas M2 ($H/W = 0,33$) e M4 ($H/W = 0,66$). Os termopares foram protegidos da radiação direta e a câmera termográfica foi posicionada em um local em que contemplasse a área frontal do campo, conforme apresentado na Figura 3.13.

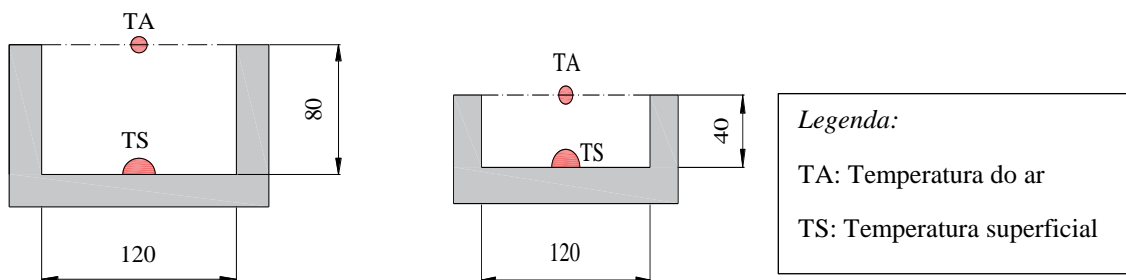
Figura 3.13. Coleta de dados.



Fonte: o Autor (2019).

O posicionamento dos sensores de temperatura da coleta 1, em cada configuração, está apresentado na Figura 3.14.

Figura 3.13. Posição dos sensores – Coleta 1.

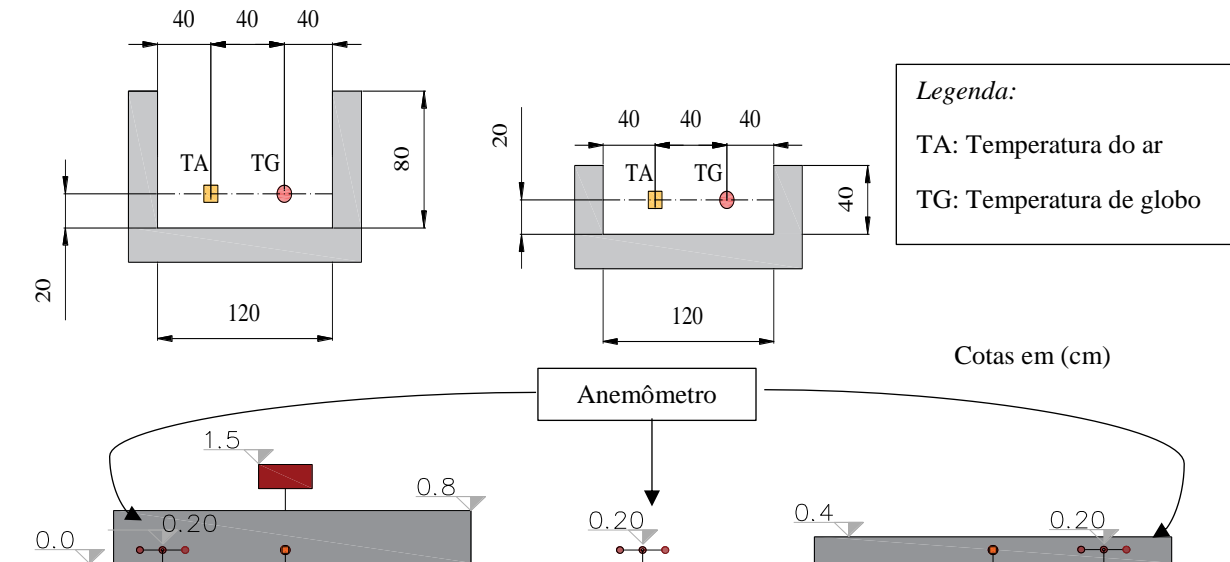


Fonte: o Autor (2019).

Cotas em (cm)

O posicionamento dos sensores de temperatura e velocidade do vento da coleta 2, em cada configuração, está apresentado na Figura 2. Os demais sensores e outras vistas do estão representadas no anexo desta pesquisa.

Figura 3.13. Posição dos sensores – Coleta 2.



Fonte: o Autor (2019).

A altura de coleta das variáveis e a distribuição dos sensores entre as morfologias estão descritas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1. Posicionamento dos sensores.

LOCAL	VARIÁVEL	EQUIPAMENTO	ALTURA
Campo aberto	Imagens termográficas	Câmera termográfica	Acima do Dossel - 2,00 m
M2/M4	Imagens termográficas	Câmera termográfica	Nível do Pedestre - 0,50 m
Campo aberto	Umidade relativa do ar - [%]	Termo-Higrômetro	Acima do Dossel - 1,50 m
Campo aberto	Temperatura do ar - [°C]	Termo-Higrômetro	
M2	Temperatura do ar no topo do cânion - [°C]	Termopares	Topo do cânion - 0,40 m
M4	Temperatura do ar no topo do cânion - [°C]	Termopares	Topo do cânion - 0,80 m
M2/M4/Campo aberto	Velocidade do vento - [m/s]	Anemômetros	Nível do Pedestre - 0,20 m
M2/M4	Temperatura do ar no interior do cânion - [°C]	Termopares	Nível do Pedestre - 0,20 m
M2/M4	Temperatura radiante - [°C]	Termômetros de globo	Nível do Pedestre - 0,20 m
M2/M4	Temperatura superficial - [°C]	Termopares	Sobre a Superfície - 0,00m

Fonte: o Autor (2019).

3.4. VARIÁVEIS DE ESTUDO

As variáveis consideradas para cada etapa desta pesquisa estão representadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2. Variáveis de estudo.

ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3
<i>Caracterização</i>	<i>Coleta de dados</i>	<i>Variáveis para análise</i>
Refletância solar do pavimento (ρ) seco	Umidade relativa do ar - [%]	Coloração do pavimento
Refletância solar do pavimento (ρ) saturado	Temperatura do ar - [°C]	Relação H/W do cânion
	Velocidade do vento - [m/s]	
	Temperatura do ar no topo do cânion - [°C]	
	Temperatura do ar no interior do cânion - [°C]	
	Temperatura radiante - [°C]	
	Temperatura superficial - [°C]	

Fonte: o Autor (2019).

A primeira etapa consistiu na construção do campo experimental e na caracterização dos materiais usados com o objetivo em determinar as propriedades radiantes do pavimento no estado seco e saturado e propriedades mecânicas do solo. Em seguida, foi realizada a coleta de dados, com o objetivo de uma caracterização climatológica dos períodos de análise e obter informações do comportamento térmico do modelo em escala. Por fim, a variação dos dados de temperatura e umidade relativa do ar foi analisada em diferentes cenários.

Com o intuito de facilitar a análise de resultados, são apresentados no Quadro 3.2 os principais termos da pesquisa.

Quadro 3.3. Nomenclaturas adotadas para o experimento.

SIGLA	SIGNIFICADO
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i> – Tempo Universal Coordenado
H/W	Relação entre altura das obstruções do entorno e largura do cânion urbano
FVC	Fator de visão do céu
M2	Morfologia com relação H/W = 0,33
M4	Morfologia com relação H/W = 0,66
COL1	Coleta 1 – Período da primavera
PAV	Pavimento
CIN	Pavimento de concreto na coloração cinza
VER	Pavimento de concreto na coloração vermelho
GRA	Pavimento de concreto na coloração grafite
ASF	Pavimento asfáltico
TS	Temperatura de superfície
TA	Temperatura do ar no topo do cânion
TA20	Temperatura do ar no interior do cânion (20 cm da superfície)
TG	Temperatura de globo
TRM	Temperatura radiante média
UR	Umidade relativa do ar
VV	Velocidade do vento

VV20	Velocidade do vento no interior do cânion (20 cm da superfície)
DV	Direção do vento
DV20	Direção do vento no interior do cânion (20 cm da superfície)
SEC	Pavimento no estado seco
SAT	Pavimento no estado saturado

Fonte: o Autor (2019).

3.5. COLETA DE DADOS E INSTRUMENTAÇÃO

Os equipamentos para a coleta das variáveis propostas foram inicialmente calibrados em laboratório e todos satisfizeram os limites de precisão estabelecidos pela EPA (*Environmental Protection Agency*, 2008). A relação de equipamentos está descrita no Quadro 3.4.

Quadro 3.4. Equipamentos para execução do projeto.

EQUIPAMENTO	MARCA/MODELO
Estação total	Ruide RT 820
Espectrômetro portátil	Lunar and Planetary Institute / ALTA II
Termo-higrômetro	HOBO Pro V2 U23-001
Anemômetro	Instrutherm /AD-250
Termômetro digital	Instrutherm / THDL-400
Datalogger	Microcontrolador Esp32 (WROOM)
16 Sensores de Temperatura	DS18B20 Tipo Sonda
8 Termômetros de Globo	DS18B20 Tipo Sonda com esfera de 40 mm na cor cinza médio
Câmera termográfica	Fluke / Ti 400 9 Hz

Fonte: o Autor (2019).

Os materiais necessários para a construção do modelo em escala, estão descritos no Quadro 3.5.

Quadro 3.5. Materiais para execução do modelo em escala.

MATERIAIS	QUANTIDADE
Bloco de concreto – 40 x 20 x 20	520 un.
Piso intertravado de concreto – vermelho - 9,8 x 10 x 8	13 m ²
Piso intertravado de concreto – grafite - 9,8 x 10 x 8	13 m ²
Piso intertravado de concreto – cinza - 9,8 x 10 x 8	13 m ²
Concreto asfáltico – 5 cm de espessura	1,5 t
Camada de base – Brita 0 (15 cm)	3 m ³
Emulsão asfáltica	15 litros


Fonte: o Autor (2019).

3.5.1. Espectrômetro Portátil

- *Especificações técnicas*

O Quadro 3.6 apresenta as principais especificações técnicas e características do espectrômetro portátil.

Quadro 3.6. Especificações técnicas – Espectrômetro portátil.

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

Fonte: o Autor (2019).

- *Coleta de dados*

Através do espectrômetro portátil é possível obter a refletância solar das amostras de pavimento, que serão relacionadas aos dados de temperatura. Segundo Muniz-Gäll *et al.* (2018, p.507), “o espectrômetro portátil ALTA II mede refletâncias correspondentes à radiação emitida em onze comprimentos de onda, entre 470 e 940 nm (nanômetros), sendo sete pertencentes à região visível e quatro à região infravermelha do espectro solar”.

Além disso, o espectrômetro portátil possui onze lâmpadas dispostas em círculo, cada uma correspondendo a um comprimento de onda. Ao serem acionadas, essas lâmpadas emitem radiação no comprimento de onda correspondente e o sensor, presente no centro do círculo, capta a energia refletida pelo objeto e mostra o valor em milivolts (mV) no visor frontal (MUNIZ-GÄLL *et al.*, 2018, p.507).


Com esse valor, é calculada a refletância espectral de cada amostra de pavimento (pavimento de concreto nas colorações cinza, grafite, vermelho e pavimento asfáltico). Esse processo é repetido por três vezes, a fim de considerar as pequenas variações da voltagem. Assim, o valor médio é utilizado no cálculo da refletância solar. Esse experimento foi executado com um tecido de proteção, para evitar a infiltração de luz.

3.5.2. TERMO-HIGRÔMETRO

- *Especificações técnicas*

O Quadro 3.7 apresenta as principais especificações técnicas e características do termo-higrômetro.

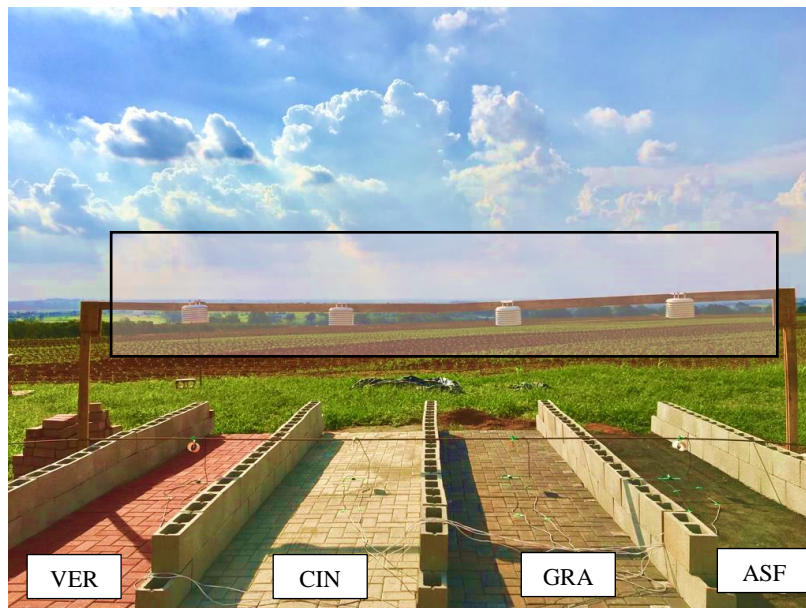
Quadro 3.7. Especificações técnicas – Termo-higrômetro.

	Marca / Modelo	HOBO/ Pro V2 U23-001
	Faixa de operação	-40 °C a 70 °C
	Precisão	0,2 °C acima de 0 °C até 50 °C
	Resolução	0,02 °C a 25 °C
	Tempo de resposta	40 min no ar em movimento de 1 m/s

Fonte: o Autor (2019).

▪ *Coleta de dados*

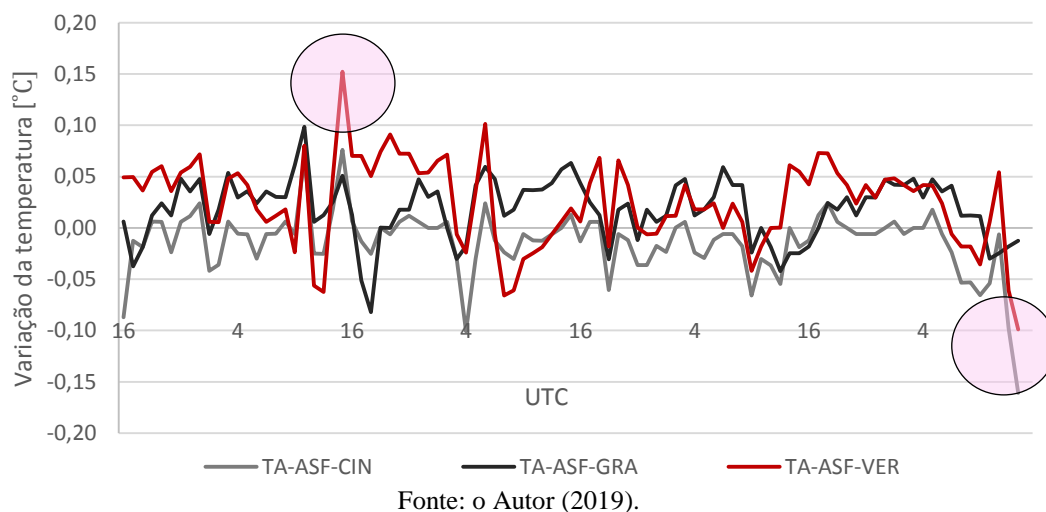
O sensor de temperatura HOBO U23-001, coleta dados de temperatura e umidade relativa do ar acima do dossel urbano. Por se tratar de um estudo em escala reduzida, foram posicionados inicialmente 4 sensores enfileirados sobre cada cânion da morfologia M2, conforme apresentado na Figura 3.16, a fim de determinar se haveria diferença significativa de temperatura do ar sobre cada pavimento em estudo a uma altura de 1,5m.

Figura 3.16. Sensores HOBO instalados sobre os pavimentos.

Fonte: o Autor (2019).

Os dados apresentados na Figura 3.17, demonstram que a máxima variação de temperatura registrada de cada pavimento em relação ao pavimento asfáltico foi de $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$, um valor abaixo da precisão do equipamento, o que não justificaria instalar um sensor HOBO sobre cada pavimento.

Figura 3.17. Gráfico da variação de temperatura do ar sobre cada pavimento em relação à temperatura sobre o asfalto.



Sendo assim, por não apresentar uma variabilidade significativa da temperatura do ar em função do tipo do pavimento, nesta pesquisa, foi instalado apenas 1 termo-higrômetro à 1,5 m do solo, conforme apresentado na Figura 3.18 e outro equipamento em campo aberto, distante de superfícies construídas, a fim de mapear as condições do clima durante o período da coleta. A coleta de dados, foi realizada de forma automática a cada 15 minutos durante todo o período da pesquisa.

Figura 3.18. Dispositivo de proteção do sensor de temperatura e umidade relativa do ar.

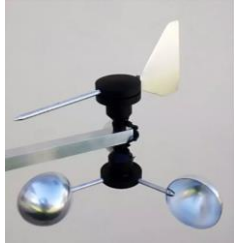


3.5.3. Anemômetro

- *Especificações técnicas*

O Quadro 3.8 apresenta as principais especificações técnicas e características do anemômetro de concha.

Quadro 3.8. Especificações técnicas – Anemômetro.

	Marca / Modelo	Anemômetro em Alumínio
	Velocímetro	Baterias CR2032
	Especificações	Diâmetro das conchas - 75mm
	Peso	245g
	Precisão	$\pm 0,2$ m/s

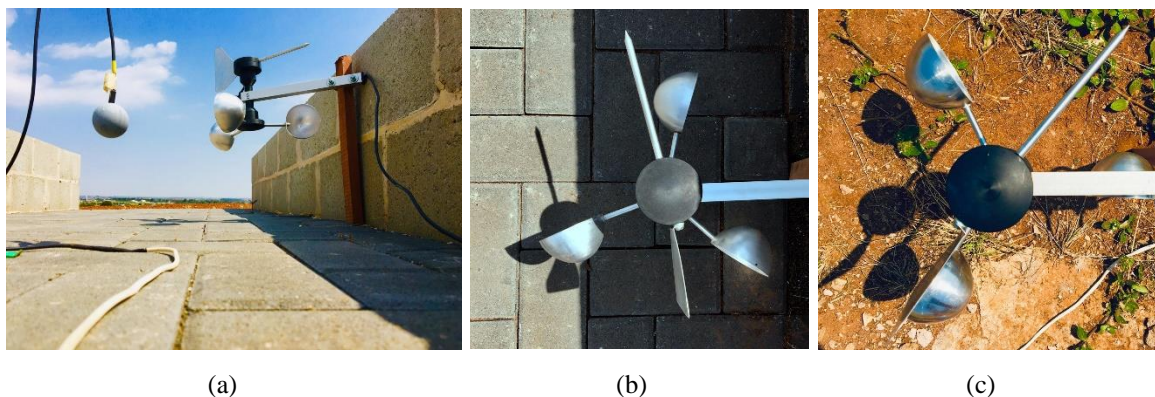
Fonte: o Autor (2019).

- *Coleta de dados*

O anemômetro faz a coleta de dados de direção e velocidade instantânea, média e máxima do vento. Através da série histórica coletada pelo anemômetro é possível identificar a direção do vento predominante que incide sobre o modelo de simulação térmica.

Inicialmente, o dispositivo deve ser orientado geograficamente e locado em um ponto estratégico de coleta. Na primeira coleta, ele foi posicionado simetricamente a uma distância de 3m dos cânions de simulação e a uma altura de 1,5 metros em relação ao piso, a fim de identificar a velocidade do vento logo acima do topo do cânion. Na segunda etapa da pesquisa, 3 anemômetros foram instalados a uma altura de 20 cm da superfície e com o eixo afastado a 20 cm da barreira, com intuito de avaliar o efeito da rugosidade da malha urbana na velocidade do vento, conforme apresentado na Figura 3.19 e no Anexo 1.

Figura 3.19. Posicionamento dos anemômetros no interior do cânion (A), vista em planta no interior do cânion (B) e anemômetro instalado fora da malha (C).



Fonte: o Autor (2019).

Para isso, foram instalados três anemômetros. Sendo um no interior dos cânions da morfologia M2, um na morfologia M4 e outro fixado em uma estação aberta, afastada da área construída. A coleta de dados é realizada de forma automática de minuto em minuto e processada por um microcontrolador Esp32 (WROOM).

3.5.4. Sensores de Temperatura

- *Especificações técnicas*

O Quadro 3.9 apresenta as principais especificações técnicas e características do termohigrômetro.

Quadro 3.9. Especificações técnicas – Sensores de temperatura.

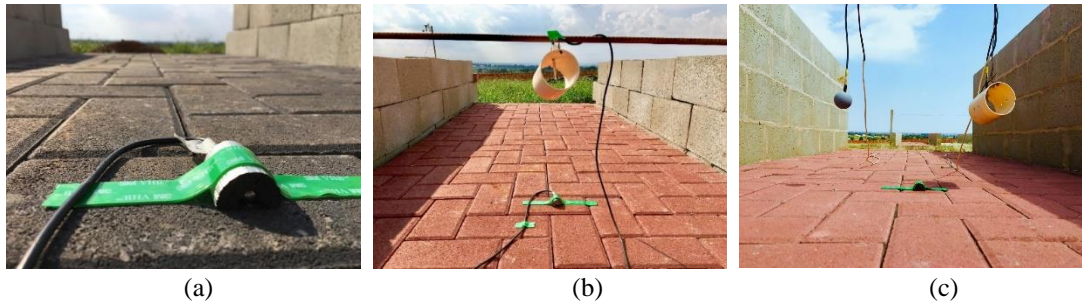
	Marca / Modelo	Dallas / DS18B20
	Descrição	1-Wire® Digital Thermometer
	Tipo	Sonda
	Amplitude de temperaturas	-55°C à +125°C.
	Precisão	±0,5°C (à 25°C)
	Microcontrolador	Esp32 (WROOM)

Fonte: o Autor (2019).

- *Coleta de dados*

Os sensores de temperatura fazem a coleta da temperatura do ar no topo do cânion urbano, a fim de considerar um cenário sem o efeito da rugosidade, acima do dossel; a temperatura do ar no interior do cânion, a uma altura de 20 cm da superfície, a fim de considerar a rugosidade da malha urbana e da temperatura superficial do pavimento. A primeira etapa da coleta de dados é proteger os sensores da irradiação solar direta. Nesta pesquisa, para a coleta de temperatura do ar, foi confeccionado um escudo em PVC, ventilado que permite a circulação do ar pelo sensor e o protege da irradiação direta, conforme apresentado na Figura 3.20b. Já para a coleta de temperatura superficial, os sensores foram protegidos com um dispositivo de cobre, o qual envolve a sonda e fica em contato com a superfície; e que no topo, apresenta material isolante com cobertura reflexiva, conforme apresentado na Figura 3.20a.

Figura 3.20. Dispositivo de proteção do sensor de temperatura superficial (A), temperatura do ar no topo do cânion (B) e temperatura no interior do cânion (C).



Fonte: o Autor (2019).


A coleta de dados é realizada de forma automática de minuto em minuto e processada por um microcontrolador Esp32 (WROOM). A coleta deve ser realizada apenas em dias com céu aberto (Índice da claridade atmosférica – $kt \geq 0,5$) e vento fraco ($v \leq 2$ m/s).

3.5.5. Sensores de Temperatura de Globo

- *Especificações técnicas*

O Quadro 3.10 apresenta as principais especificações técnicas e características do termômetro de globo.

Quadro 3.10. Especificações técnicas – Sensores de temperatura de globo.

	Marca / Modelo	Dallas / DS18B20
	Descrição	1-Wire® Digital Thermometer
	Tipo	Sonda com esfera de 40 mm na coloração cinza médio
	Amplitude de temperaturas	-55°C à +125°C.
	Precisão	±0,5°C (à 25°C)
	Microcontrolador	Esp32 (WROOM)

Fonte: o Autor (2019).

- *Coleta de dados*

Os sensores de temperatura fazem a coleta da temperatura de globo a uma altura de 20 cm da superfície pavimentada. Nesta pesquisa, para a coleta de temperatura de globo, os termômetros foram confeccionados com uma esfera de 40 mm na coloração cinza médio a qual envolvia completamente os sensores de temperatura.


A coleta de dados é realizada de forma automática de minuto em minuto e processada por um microcontrolador Esp32 (WROOM). A coleta deve ser realizada apenas em dias com céu aberto (Índice da claridade atmosférica – $kt \geq 0,5$) e vento fraco ($v \leq 2$ m/s).

3.5.6. Câmera Termográfica

- *Especificações técnicas*

O Quadro 3.11 apresenta as principais especificações técnicas e características da câmera termográfica.

Quadro 3.11. Especificações técnicas – Câmera termográfica.

	Marca / Modelo	Fluke / Thermal Imagers Ti400
	Resolução da imagem	5.0 megapixels
	Amplitude espectral	7,5µm - 14µm (onda longa)
	Amplitude de temperaturas	-20°C à +1200°C
	Precisão	±2°C (à 25°C) ou 2% da leitura (Demais Tª ambiente)
	Sensibilidade térmica	≤0,05°C à 30°C

Fonte: o Autor (2019).

- *Coleta de dados*

A câmera termográfica captura imagens da superfície, no espectro infravermelho, o que permite identificar graficamente os pontos de sombreamento, aquecimento e resfriamento do pavimento e do cânion urbano.

A primeira etapa da coleta de dados é a configuração da câmera com os dados de emissividade ($\epsilon \cong 0,9$) para superfícies como o asfalto e concreto. Além disso, a captura das imagens foi realizada a uma distância padronizada. As imagens da seção do cânion foram capturadas afastando-se a uma distância de 2m da extremidade do modelo e a uma altura de 50 cm do nível do solo, conforme apresentado no Anexo 1.

A coleta de imagens no período, foram realizadas de forma manual e a cada hora, em dias de céu aberto (Índice da claridade atmosférica – $kt \geq 0,5$) e vento fraco ($v \leq 2$ m/s).

A fim de ajustar os valores numéricos registrados pela câmera aos valores coletados pelos termopares, é sugerido realizar a correção dos dados através da equação 1.2, proposta por Kowalski e Masiero (2018).

$$TS_{TP} = 0,8452 \cdot TS_{IR} + 0,2422 \quad [2.19]$$

Sendo:

TS_{TP} : Temperatura superficial equivalente à coleta por termopares (°C);

TS_{IR} : Temperatura superficial registrada por termografia (°C);

O coeficiente de determinação (R^2) é de 0,9805, o que vislumbra uma relação de linearidade entre as variáveis de temperatura superficial, permite que seja feito um ajuste nos valores registrados pela câmera aos dados do termopar.

Capítulo 4

Análise dos Resultados

A análise dos resultados é realizada em função de duas coletas. Referente à coleta 1 foi realizada a análise das propriedades térmicas do pavimento, bem como os dados de variação de temperatura do ar do local de implantação do modelo. Além disso, dados de velocidade e direção do vento, temperatura do ar, umidade relativa do ar, temperatura das superfícies e do topo do cânion. Sendo assim, os dados da coleta 1 foram tomadas 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. Por fim, velocidade e direção do vento, no interior das duas morfologias e em um local livre de obstruções.

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.

Além disso, todos os dados coletados ao longo do período foram confrontados frente a dois cenários.

- *Cenário 1.* Os dados de temperatura foram comparados entre si de acordo com as três colorações de pavimento, vermelho (VER), grafite (GRA) e cinza (CIN).
- *Cenário 2.* Os dados de temperatura foram comparados de acordo com as duas configurações de cânion urbano.

4.1. PROPRIEDADES RADIANTES DO PAVIMENTO

Segundo o princípio físico, todo material acima do zero absoluto 0 K (Kelvin) emite radiação térmica, estudar as propriedades radiantes do pavimento e seu comportamento em determinados cenários urbanos, como a alteração da refletância em função do teor de umidade e do envelhecimento são propostas que permitem uma análise mais adequada.

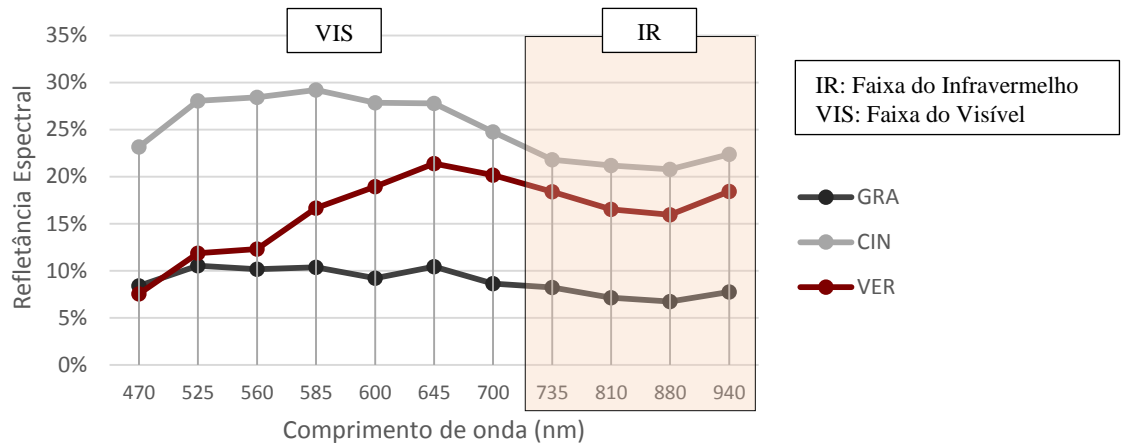
4.1.1. Refletância e teor de umidade

Neste trabalho, a análise da variação da refletância em função do teor de umidade foi realizada apenas com as amostras do mesmo material, a fim de considerar a alteração do albedo em função da pigmentação da superfície e não da composição de diferentes materiais, como o asfalto e o concreto.

— Refletância espectral

A refletância espectral de cada amostra de pavimento no estado seco está apresentada na Figura 4.1. A área destacada representa a faixa do espectro infravermelho-próximo, cujo comprimento de onda (λ) varia de $735 \text{ nm} \geq \lambda > 940 \text{ nm}$.

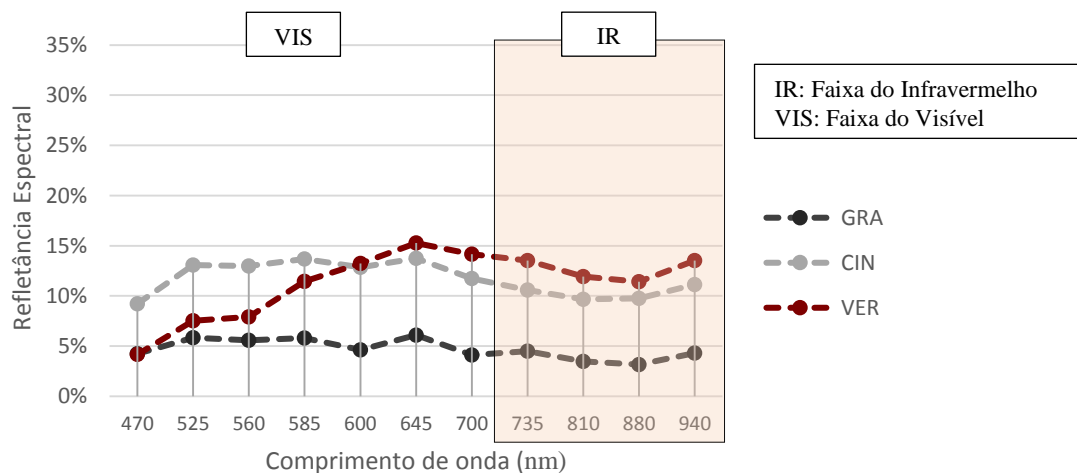
Figura 4.1. Refletância espectral das amostras secas.



Fonte: o Autor (2019).

Percebe-se que o pavimento cinza tanto na faixa do visível, quanto do infravermelho, é o que apresenta maior refletância espectral, seguido pelo pavimento vermelho e grafite. Além disso, no comprimento de onda 470 nm, que pertence ao espectro visível, a refletância do pavimento grafite e vermelho são semelhantes. Já os valores com maiores comprimentos de onda, a partir de 600 nm, demonstram um comportamento com uma certa proporcionalidade.

Figura 4.2. Refletância espectral das amostras saturadas.



Fonte: o Autor (2019).

Na Figura 4.2 está apresentada a refletância espectral das amostras saturadas. Amostras foram retiradas do modelo em escala e deixadas submersas durante um período de 48 horas, a fim de garantir o processo de saturação. Percebe-se que, para essa condição em que a refletância está na faixa do espectro visível a partir do $\lambda \geq 600$ nm e em toda a faixa do infravermelho, o pavimento na coloração vermelha apresenta valores superiores ao pavimento cinza. Além disso, no comprimento de onda 470 nm, assim como na amostra seca, a refletância do pavimento grafite e a do vermelho são semelhantes.

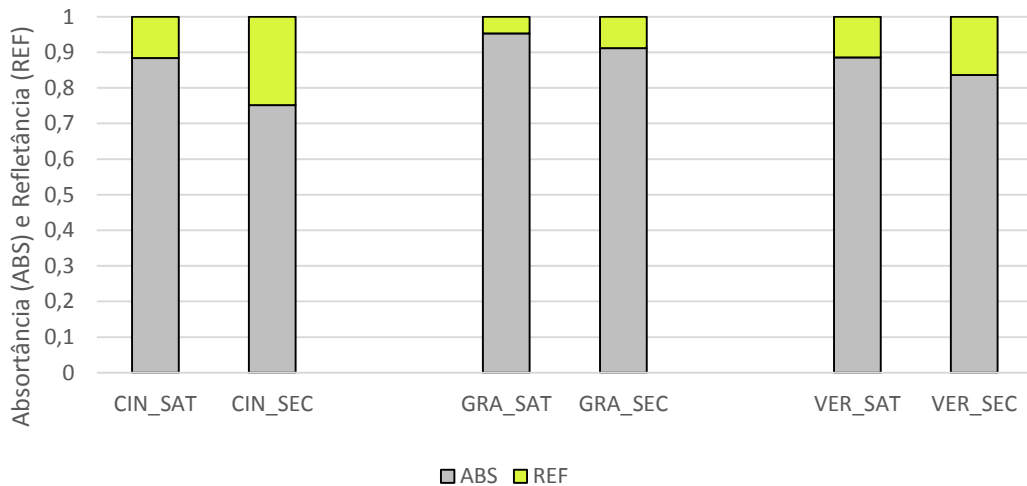
Por fim, observa-se, ao comparar as variações de refletância espectral das amostras no estado seco e saturado, que a superfície cinza apresenta a maior diferença entre os teores de umidade.

— Refletância solar

As propriedades térmicas, como absorvância (α) e refletância solar (a) das três colorações de pavimento intertravado, foram determinadas com amostras submetidas a dois cenários; saturado (SAT) e seco (SEC) em laboratório. Esta análise comparativa foi realizada apenas entre os pavimentos intertravados de concreto, pelo fato de sua composição e propriedades físicas serem semelhantes e apenas a pigmentação como o único fator que as diferencia.

Os resultados da influência do teor de umidade na refletância solar estão apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.3. Parcelas de refletância e absorvância das amostras de concreto, no estado seco e saturado.



Fonte: o Autor (2019).

Quando comparadas as três colorações no estado seco, o pavimento cinza é o que apresenta maior refletância (0,11) e o pavimento grafite a menor taxa (0,04). Esse fato pode ser explicado devido à tonalidade do pigmento superficial. Materiais mais claros tendem a refletir uma maior taxa de radiação de onda longa durante o dia.

Entretanto, a conclusão que se tem no estado úmido, é que o pavimento cinza apresenta uma refletância equivalente ao pavimento vermelho (11%), pelo fato das colorações mais claras sofrerem uma alteração na tonalidade quando submetidas à saturação. No estado seco a situação muda, a superfície cinza possui uma refletância solar maior (26%) em relação ao pavimento vermelho (16%).

Na Tabela 4.1 está apresentada uma síntese dos valores e albedo, tanto no estado seco, quanto saturado para cada amostra.

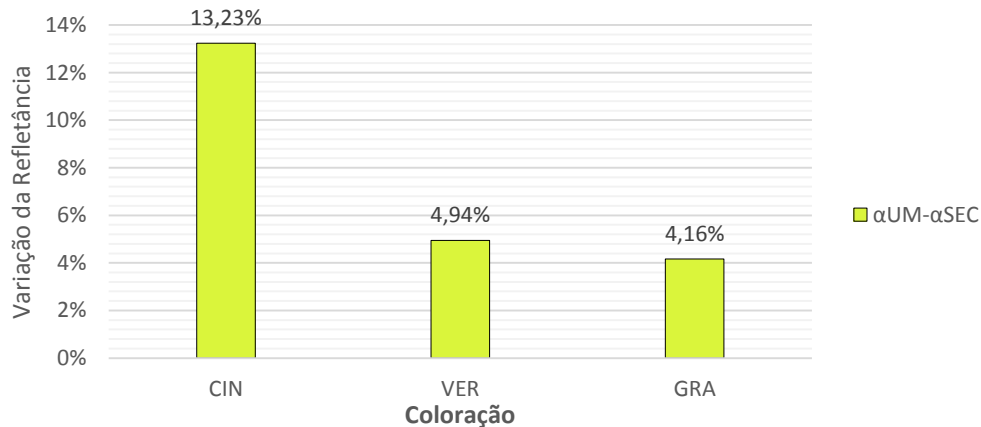
Tabela 4.1. Tabela síntese com os valores de albedo.

	CINZA	VERMELHO	GRAFITE
<i>Albedo_SECO</i>	0,2485	0,1641	0,0884
<i>Albedo_SATURADO</i>	0,1162	0,1147	0,0468

Fonte: o Autor (2019).

Na Figura 4.4 está apresentada a variação da refletância solar de uma amostra úmida em relação à amostra seca, classificada por cores.

Figura 4.4. Variação da refletância solar de uma amostra úmida (ρ_{UM}) em relação a uma amostra seca (ρ_{SEC}), classificada por cor.



Fonte: o Autor (2019).

Nesse cenário, observa-se que o pavimento cinza de concreto é o que apresenta maior variação de refletância solar, em relação às amostras seca e saturada, vermelha e grafite. Esse fato é explicado pelo fato da amostra cinza apresentar uma maior mudança na tonalidade da cor na condição saturada, quando comparada ao estado seco. Essa alteração na coloração implica em uma maior absorção do material.

4.2. ALTERAÇÕES DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DO PAVIMENTO E DO FLUXO DE AR NO TOPO DO CÂNION

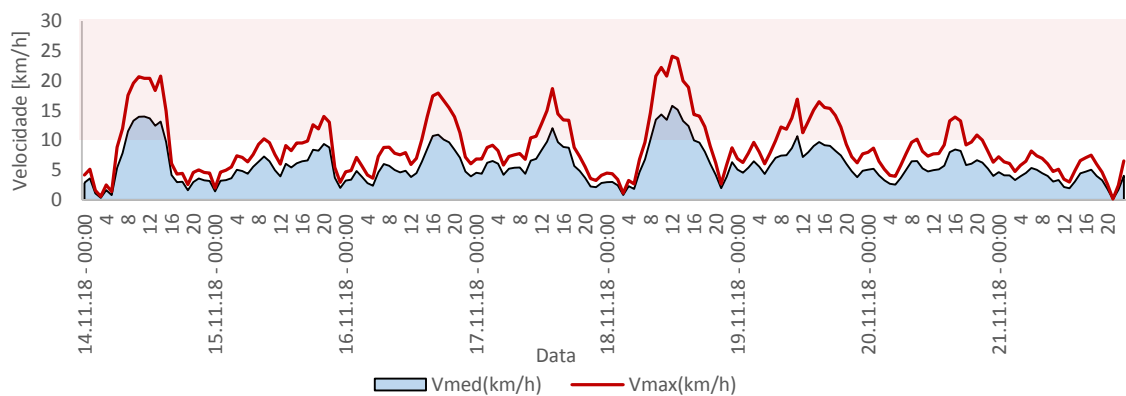
4.2.1. Caracterização do dia da coleta 1

A primeira coleta, denominada COL1 foi realizada na estação da primavera, no período de 14/11/2018 – 21/11/2018. Durante o período foram monitoradas as temperaturas de superfície (TS) de quatro pavimentos, na coloração grafite (GRA), cinza (CIN), vermelho (VER) e asfalto (ASF). Esses pavimentos estavam inseridos em duas morfologias urbanas, a primeira com uma relação H/W = 0,33 (M2) e a outra com H/W = 0,66 (M4). Em ambas as formas urbanas foram coletados dados de temperatura do ar (TA) no topo dos cânions.

No período da primeira coleta, o vento predominante era proveniente da orientação Sul, ou seja, o fluxo de ar estava oblíquo e quase paralelo ao sentido das vias. Além disso, durante a COL1, a velocidade média do vento estava dentro dos limites recomendados pela EPA (2008), o qual orienta realizar coletas em campo com a velocidade do vento inferior a 2 m/s ou 7 km/h.

Conforme apresentado na Figura 4.5, pontualmente, nos dias 14 e 18/11/2018, próximo ao horário do meio-dia, os valores de temperatura podem sofrer alterações, pois a velocidade do vento estava acima dos valores recomendados pela literatura.

Figura 4.5. Velocidade do vento no período da coleta COL1.



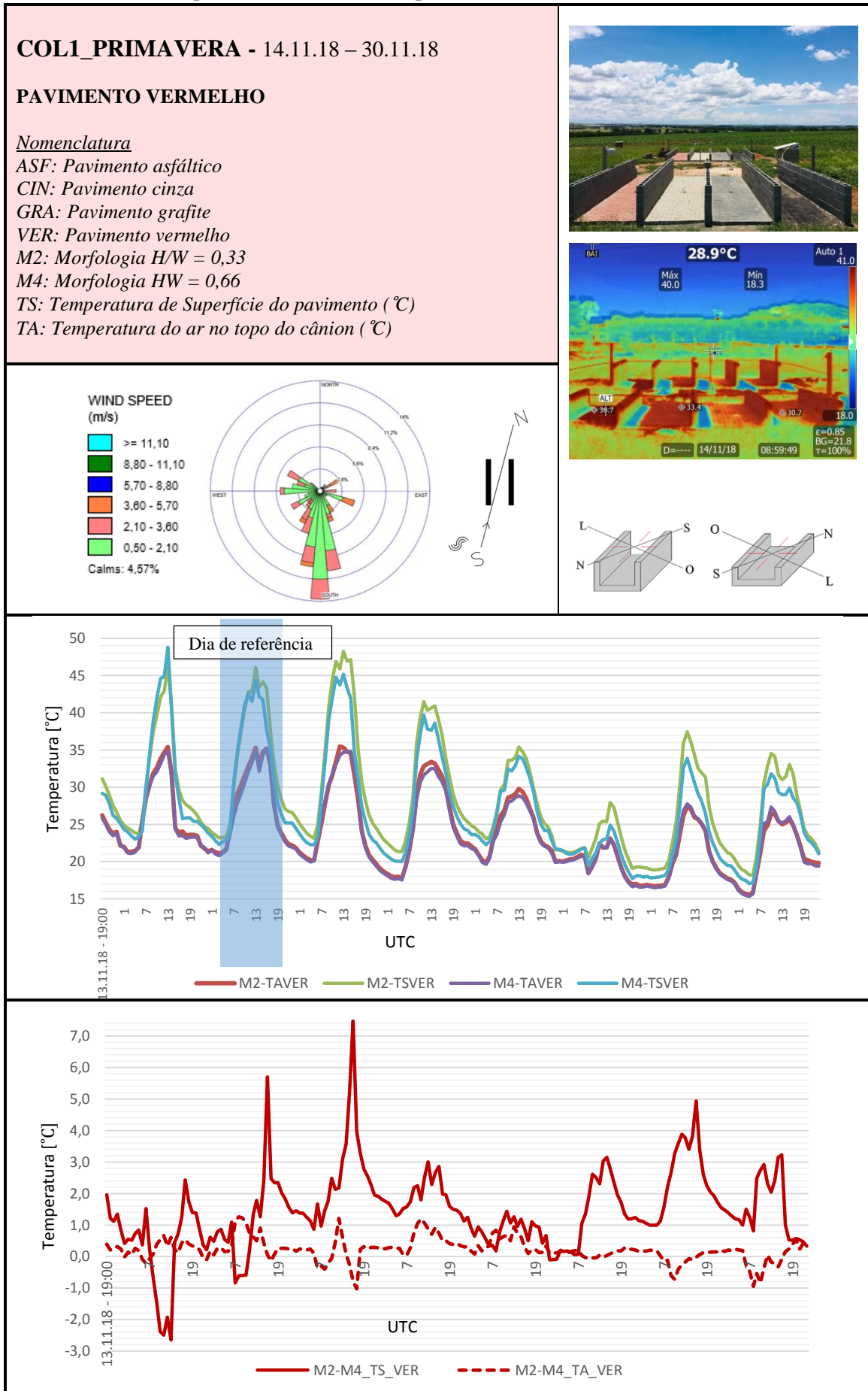
Fonte: o Autor (2019).

A seguir estão estruturados os dados da coleta COL1. Nas fichas estão separadas por tipo de pavimento (vermelho, cinza, grafite e asfalto) e apresentam a direção do vento predominante, uma foto com a abertura do céu para considerar o índice de claridade atmosférica (kt), imagens termográficas para análise considerando o sombreamento e um gráfico com a variação de temperatura em cada morfologia.

Na análise por termografia foi feito um ajuste numérico, conforme proposto por Kowalski e Masiero (2018), na temperatura superficial, a fim de se obter um valor equivalente (TS_{TP}) passível de comparação com os termopares.

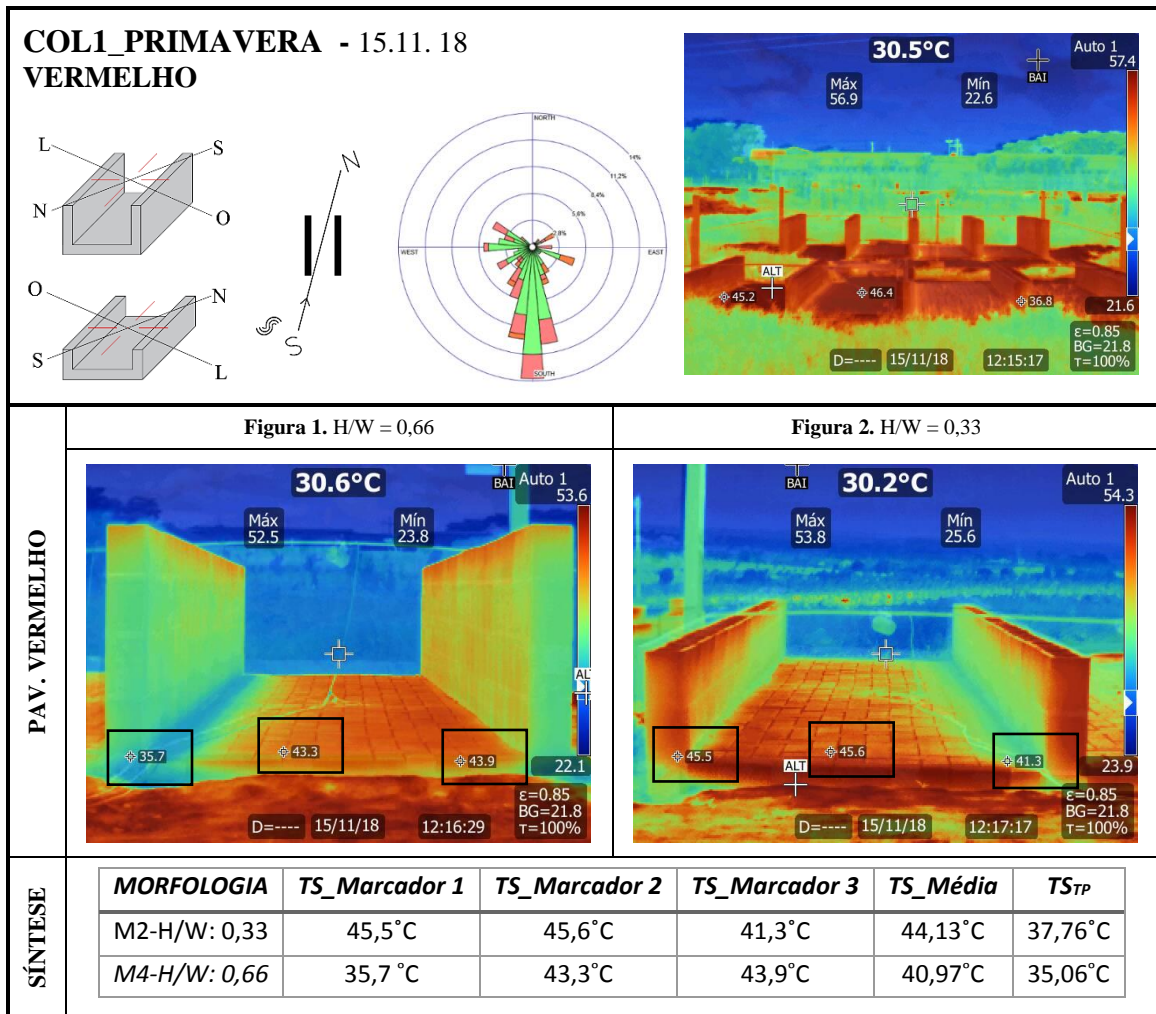
Por fim, são apresentadas análises preliminares de temperatura superficial e do ar e as máximas variações, a fim de sintetizar as informações apresentadas nos quadros.

Quadro 4.1. Dados de temperatura média horária – pavimento vermelho.



- *Temperatura Superficial:* A temperatura superficial do pavimento vermelho foi superior na morfologia **M2** em praticamente todos os dias da coleta.
- *Temperatura do ar:* A temperatura do ar acima do pavimento vermelho foi superior na morfologia **M2**.
- *Variações máximas de temperatura superficial:* A variação máxima na temperatura superficial entre as morfologias M2-M4 foi de aproximadamente **7°C**.
- *Variações máximas de temperatura do ar:* A variação máxima na temperatura do ar entre as morfologias M2-M4 foi de aproximadamente **1°C**.

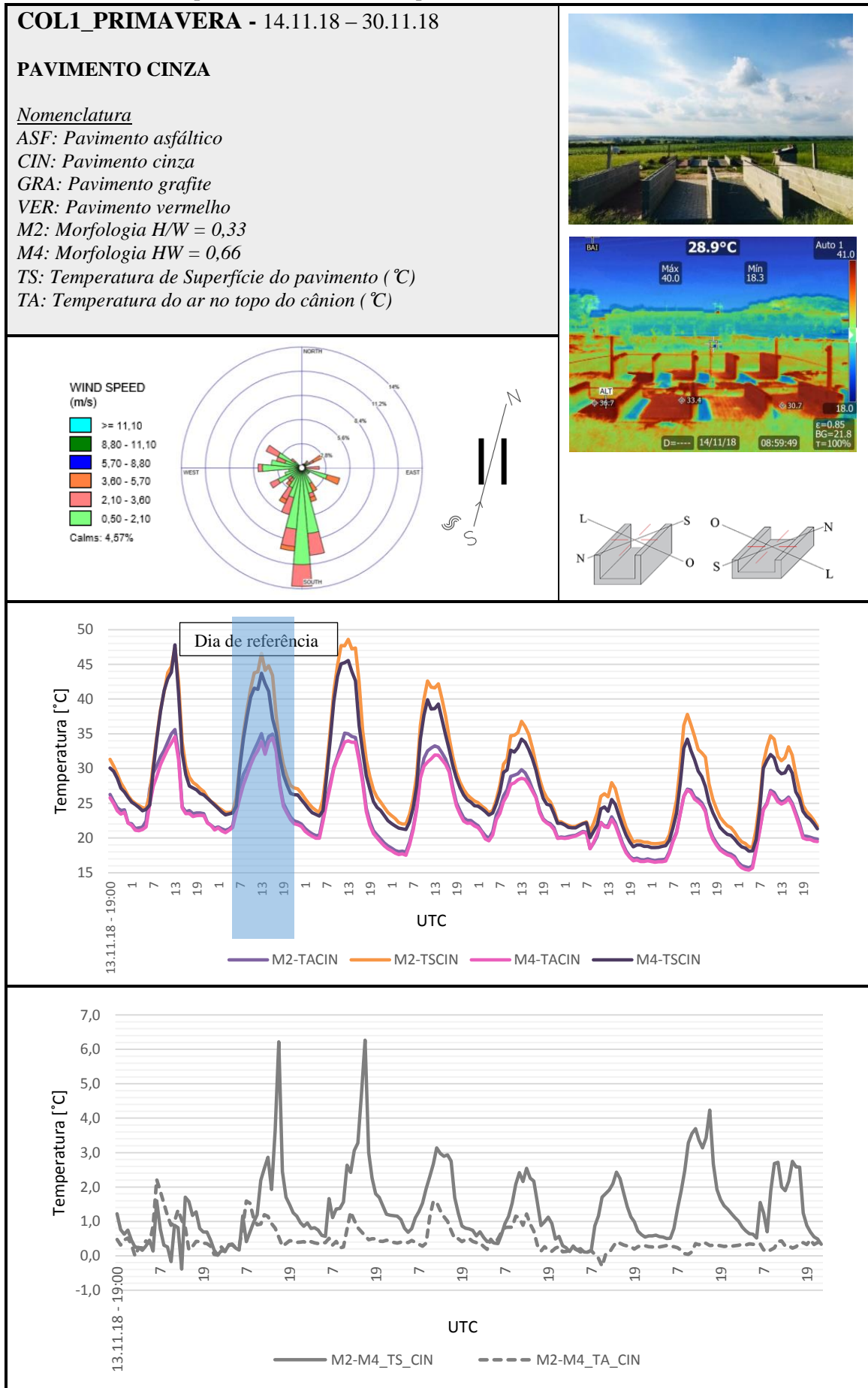
Quadro 4.2. Dados de termografia– pavimento vermelho.



Fonte: o Autor (2019).

Análise: Durante o horário **próximo ao meio-dia**, percebe-se que há um acúmulo de calor na fachada leste no pavimento **vermelho** da morfologia M2. Devido ao fenômeno da convecção provocado pelo vento, o qual incidiu perpendicularmente na lateral do cânion, houve uma dificuldade na dissipação de ondas longas emitidas pelas superfícies. Por fim, percebe-se que a temperatura superficial média da morfologia M2 é superior em relação à configuração M4.

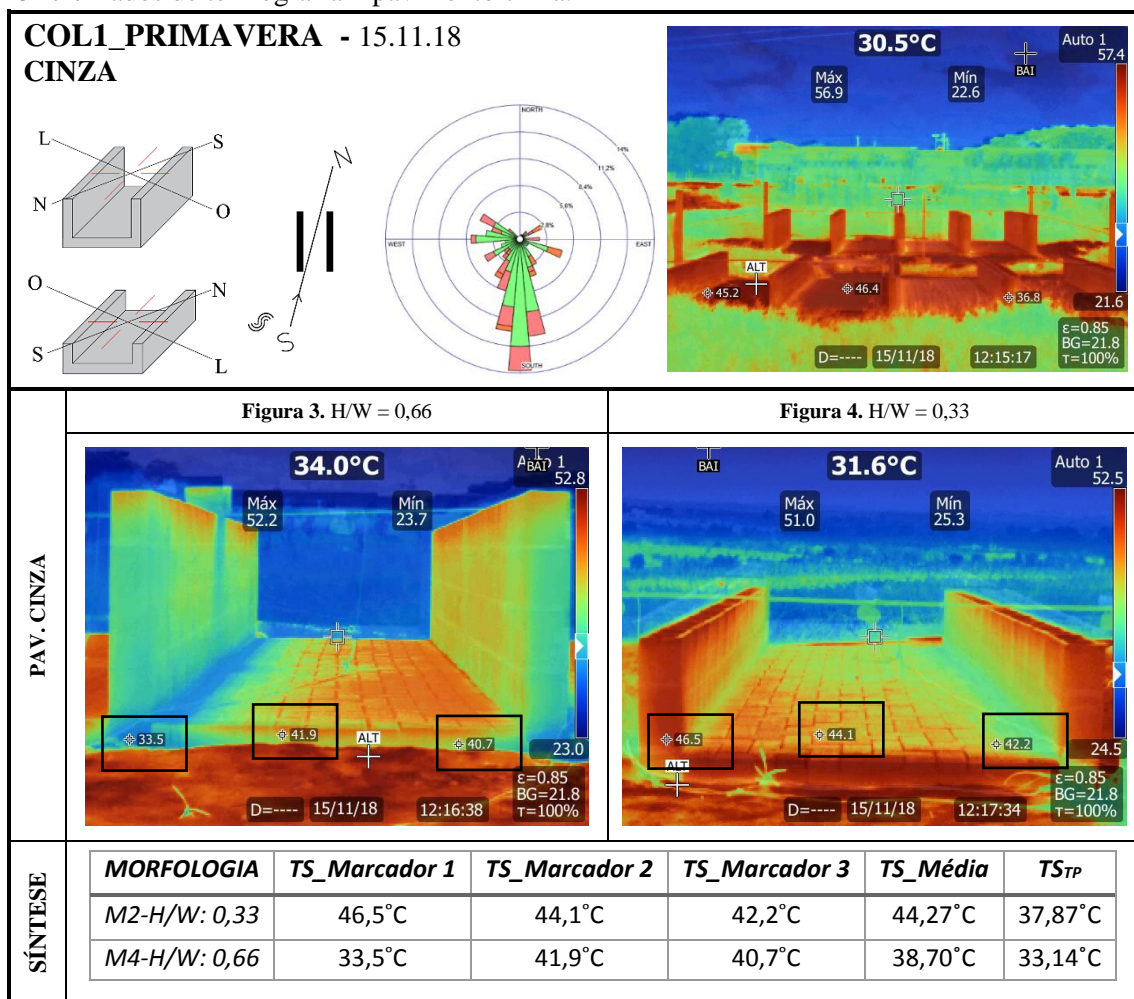
Quadro 4.3. Dados de temperatura média horária – pavimento cinza.



- *Temperatura Superficial*: A temperatura superficial do pavimento cinza foi superior na morfologia **M2** em praticamente todos os dias da coleta.
- *Temperatura do ar*: A temperatura do ar acima do pavimento cinza foi superior na morfologia **M2**.
- *Variações máximas de temperatura superficial*: A variação máxima na temperatura superficial entre as morfologias M2-M4 foi de aproximadamente **6°C**.
- *Variações máximas de temperatura do ar*: A variação máxima na temperatura do ar entre as morfologias M2-M4 foi de aproximadamente **2°C**.

No Quadro 4.4 estão apresentados os dados de termografia referentes ao pavimento cinza.

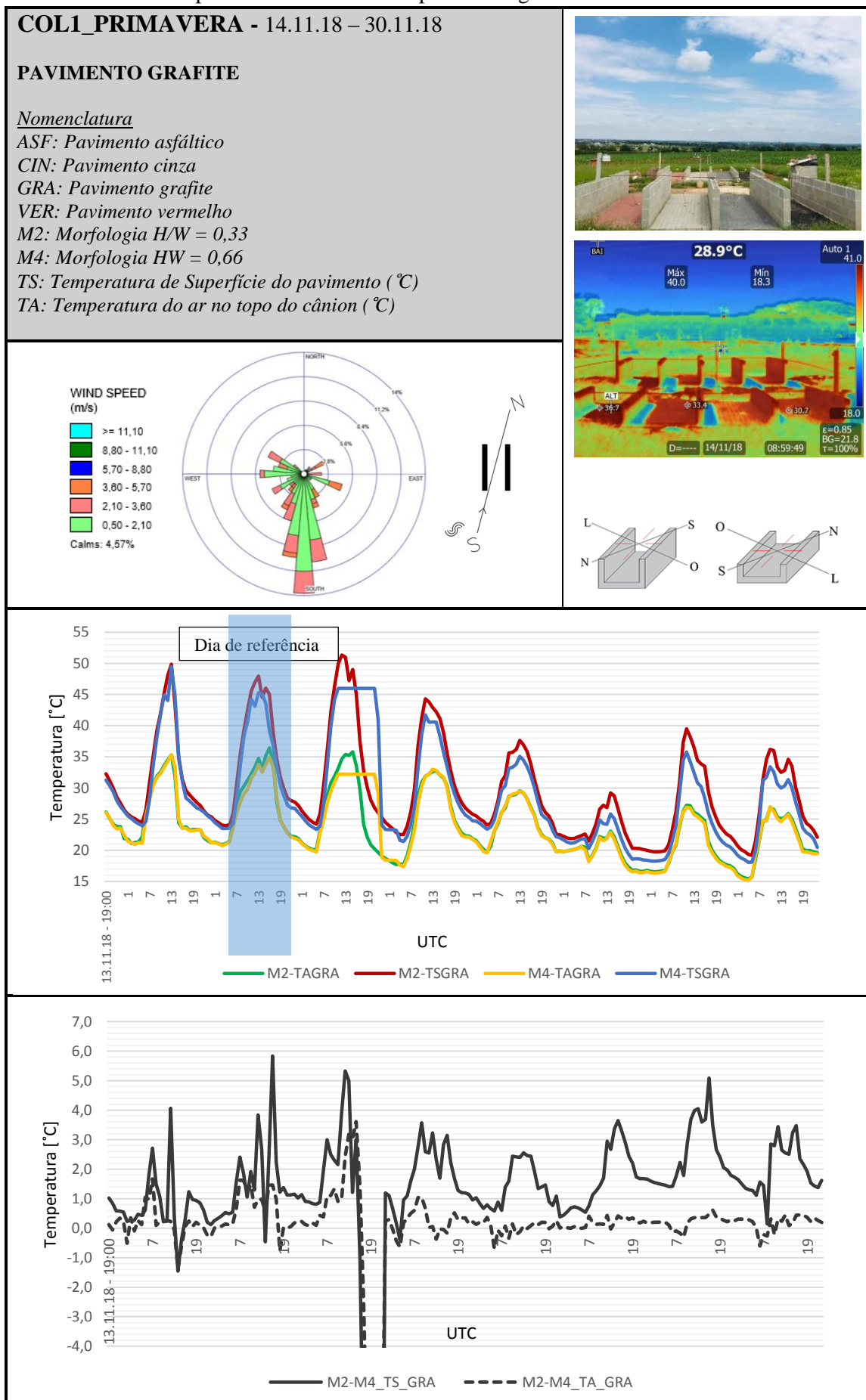
Quadro 4.4. Dados de termografia – pavimento cinza.



Fonte: o Autor (2019).

Análise: Durante o horário **próximo ao meio-dia**, percebe-se que o pavimento **cinza** ainda sofre uma influência mínima do sombreamento provocada pela fachada leste. Na região sombreada a temperatura do pavimento na morfologia M4 é de aproximadamente 33,5°C e na região sem sombreamento 41,9°C. Por fim, os valores médios de temperatura superficial da morfologia M2 são superiores à morfologia M4.

Quadro 4.5. Dados de temperatura média horária – pavimento grafite.

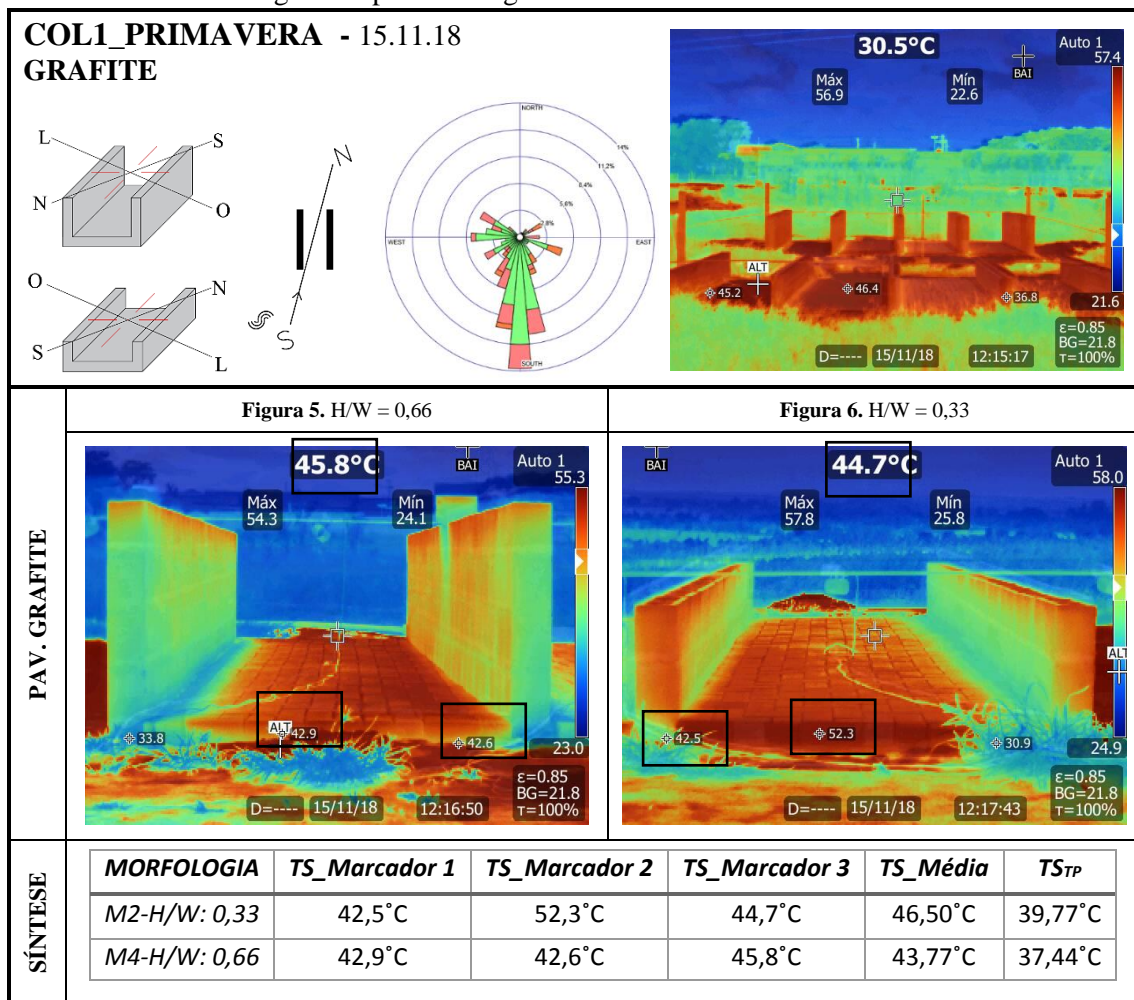


Fonte: o Autor (2019).

- *Temperatura Superficial*: A temperatura superficial do pavimento grafite foi superior na morfologia **M2** em praticamente todos os dias da coleta.
- *Temperatura do ar*: A temperatura do ar acima do pavimento grafite é muito semelhante entre as configurações. Entretanto, foi superior na morfologia **M2**.
- *Variações máximas de temperatura superficial*: A variação máxima na temperatura superficial entre as morfologias M2-M4 foi de aproximadamente **6°C**.
- *Variações máximas de temperatura do ar*: A variação máxima na temperatura do ar entre as morfologias M2-M4 foi de aproximadamente **3,5°C**.

No Quadro 4.6 estão apresentados os dados de termografia referentes ao pavimento grafite.

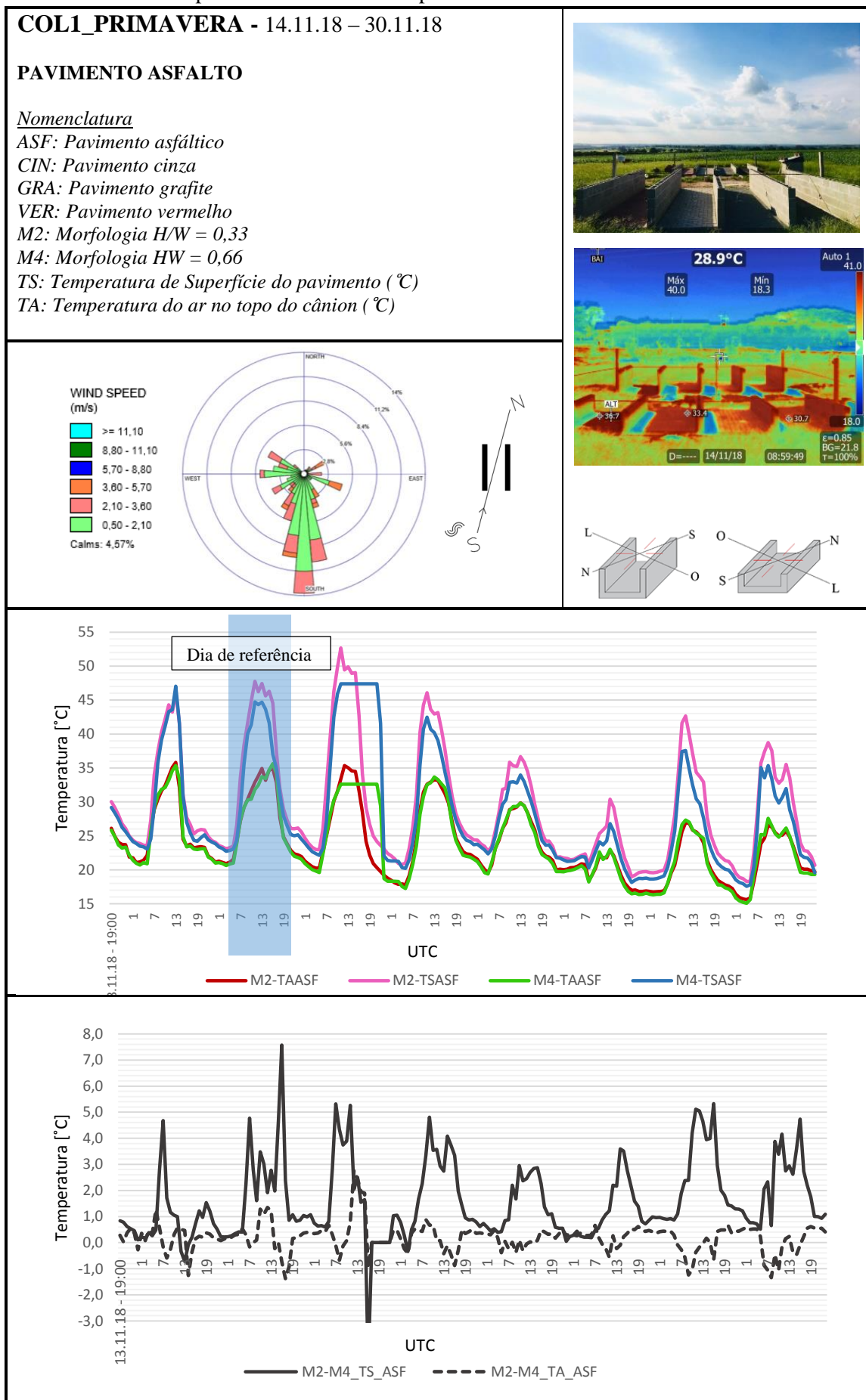
Quadro 4.6. Dados de termografia – pavimento grafite.



Fonte: o Autor (2019).

Análise: Ao **meio-dia**, observa-se que no pavimento **grafite** há um acúmulo de calor na fachada leste, devido ao fenômeno da convecção. Além disso, a morfologia M2 apresenta temperaturas superficiais mais altas em relação à configuração M4.

Quadro 4.7. Dados de temperatura média horária – pavimento asfalto.

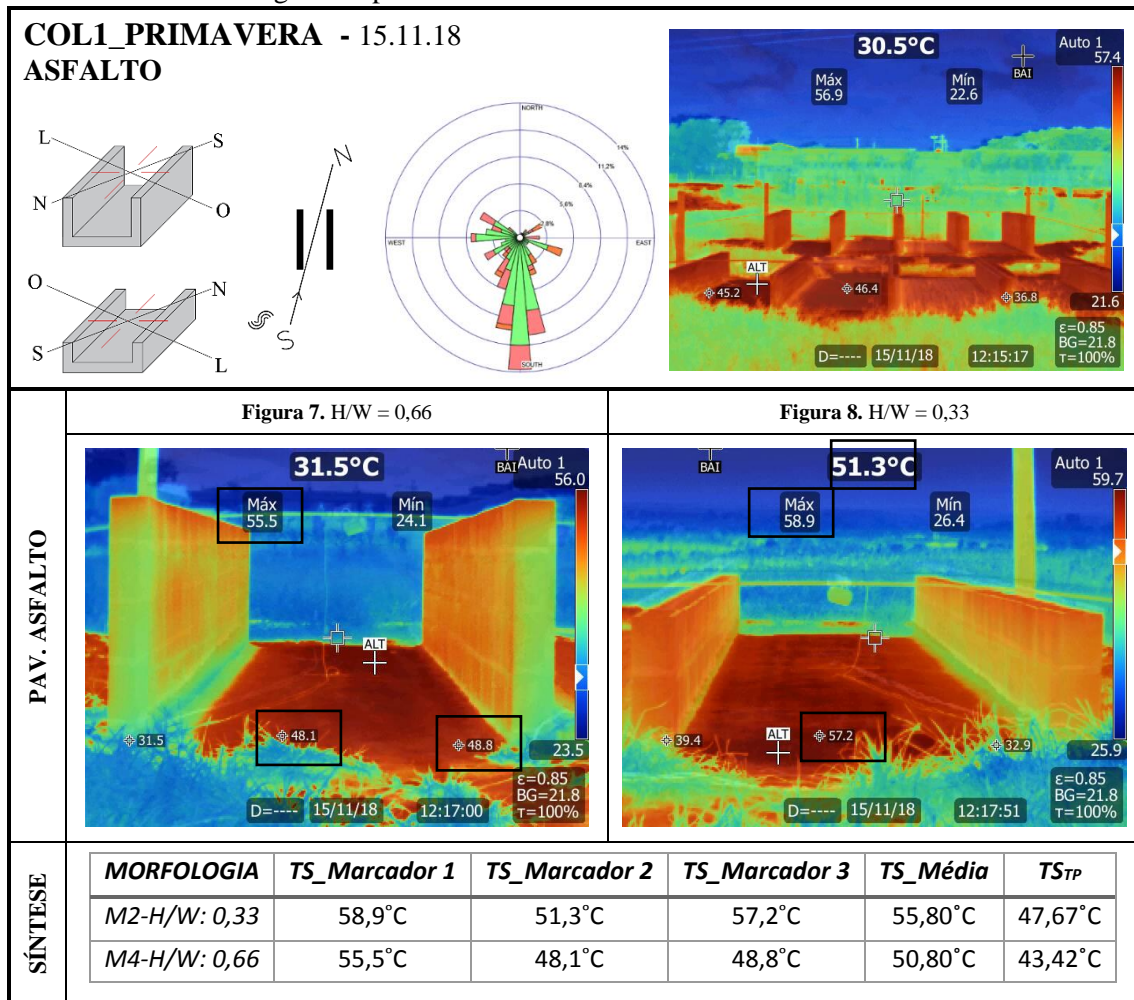


Fonte: o Autor (2019).

- *Temperatura Superficial*: A temperatura superficial do pavimento grafite foi superior na morfologia **M2** em praticamente todos os dias da coleta.
- *Temperatura do ar*: A temperatura do ar acima do pavimento grafite é muito semelhante entre as configurações. Entretanto, foi superior na morfologia **M2**.
- *Variações máximas de temperatura superficial*: A variação máxima na temperatura superficial entre as morfologias M2-M4 foi de aproximadamente **7,5°C**.
- *Variações máximas de temperatura do ar*: A variação máxima na temperatura do ar entre as morfologias M2-M4 foi de aproximadamente **2,5°C**.

No Quadro 4.8 são apresentados os dados de termografia referentes ao pavimento asfalto.

Quadro 4.8. Dados de termografia – pavimento asfalto.



Fonte: o Autor (2019).

Análise: Próximo ao horário do **meio-dia**, percebe-se que o pavimento **asfalto**, apresenta o maior registro de temperatura superficial, devido ao acúmulo de calor, causada pela sua elevada absorvância em consequência do material de coloração escura. Por fim, percebe-se que a temperatura superficial média da morfologia M2 é superior à configuração M4.

- *Considerações gerais sobre a morfologia e a variação de temperaturas*

A morfologia urbana com menor relação H/W (M2), apresenta uma temperatura superficial mais elevada. Devido ao fato dessa configuração ser constituída por edificações de pequeno porte, a faixa sombreada sobre o pavimento é menor ao longo do dia, o que provoca um super-aquecimento da superfície.

Além disso, percebe-se que a temperatura do ar é maior na configuração urbana com menor relação H/W. Por se tratar de um modelo em escala reduzida, o gradiente de temperatura apresenta pequenas variações ao longo da altura do cânion. Sendo assim, o topo do cânion na morfologia M2 é relativamente próximo à superfície, portanto o ponto de coleta recebe uma maior intensidade de onda longa emitida pelo pavimento aquecido quando comparado à morfologia M4.

No modelo (M4), a altura de coleta da temperatura do ar é mais distante do plano horizontal, portanto, devido à maior dissipação de calor em função da altura e da influência do fluxo de ar, os registros de temperatura são inferiores em relação ao modelo com menor H/W (M2).

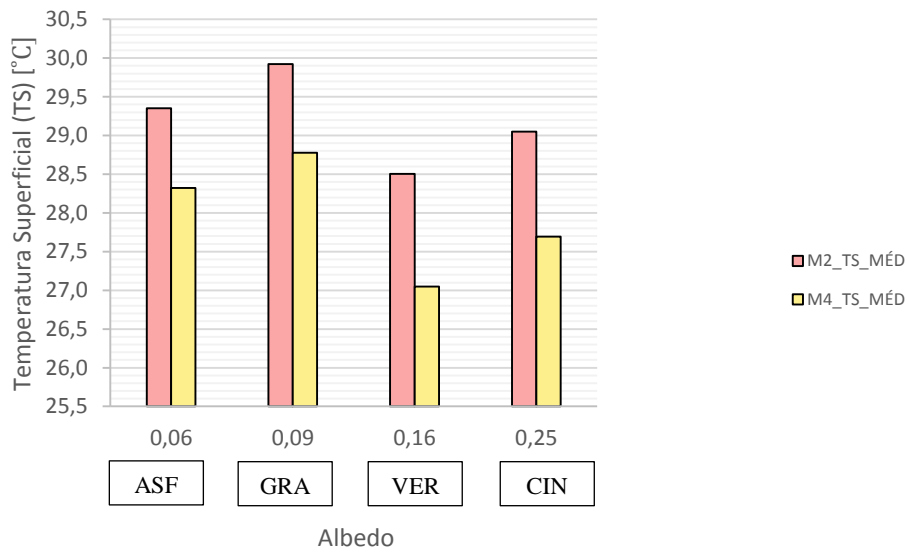
Percebe-se também que as diferenças de temperatura entre as morfologias são mais expressivas próximo ao horário do meio-dia. No período do entardecer, durante a madrugada até as horas iniciais do dia seguinte, as temperaturas não apresentam grandes variações nas duas configurações urbanas.

- *Considerações sobre a variação de temperatura entre diferentes morfologias em função da coloração*

O albedo, ou a refletância da superfície se relaciona com a temperatura superficial. Santamouris (2016) menciona que o principal objetivo dos pavimentos frios é reduzir o calor sensível liberado para a atmosfera. E que, portanto, isso pode ser alcançado principalmente através da redução da temperatura superficial do pavimento.

Alves e Vecchia (2012) mencionam que superfícies com composição heterogênea têm um alto calor específico, o que implica em uma menor variação de temperatura. O calor específico do concreto é de 0,18 kcal/kg.°C, e do asfalto aproximadamente 0,22 kcal/kg.°C, o que explica a menor temperatura superficial média diária do grafite em relação ao asfalto, conforme apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6. Relação entre albedo e temperatura média superficial (TS) para as configurações urbanas (M2, M4).



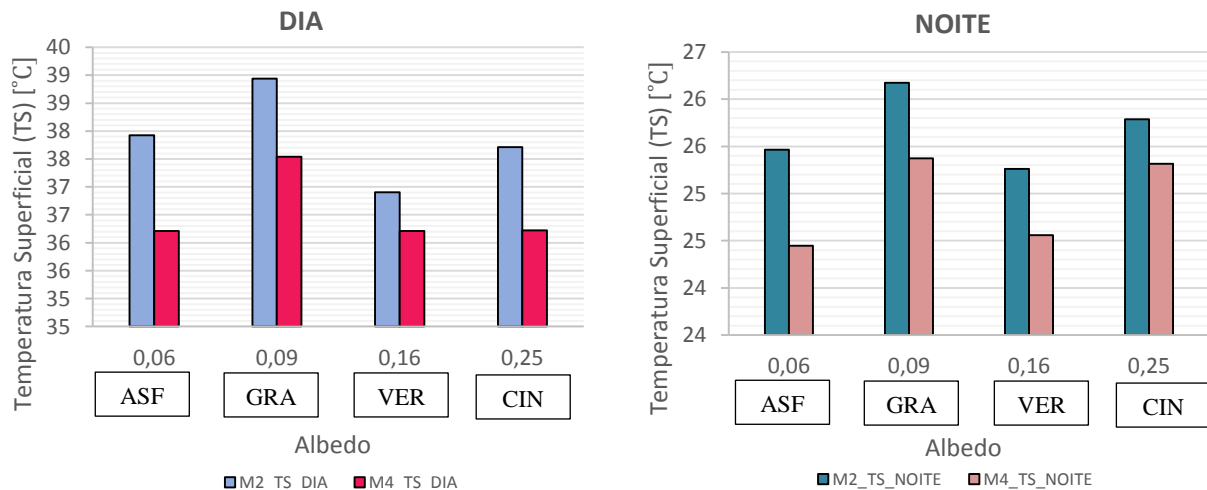
Fonte: o Autor (2019).

Percebe-se também que a temperatura superficial entre as morfologias é mais expressiva na configuração M2 em todas as cores de pavimento durante o dia e durante a noite. Entretanto, a maior média diária de temperatura superficial registrada é no pavimento grafite, com refletância de 0,09. Esse fato pode ser explicado devido à capacidade térmica do pavimento.

Santamouris (2016) menciona que a capacidade térmica define a habilidade do material em armazenar calor. Portanto, pavimentos com alta capacidade térmica apresentam, em geral, as maiores amplitudes térmicas. O que pode ser observado entre as duas superfícies mais escuras.

Na Figura 4.7 são apresentados os valores de temperatura superficial média durante o dia (08:00 – 20:00 h) e durante a noite (07:00 - 21:00 h).

Figura 4.7. Relação entre albedo e temperatura média superficial (TS) durante o dia e durante a noite.

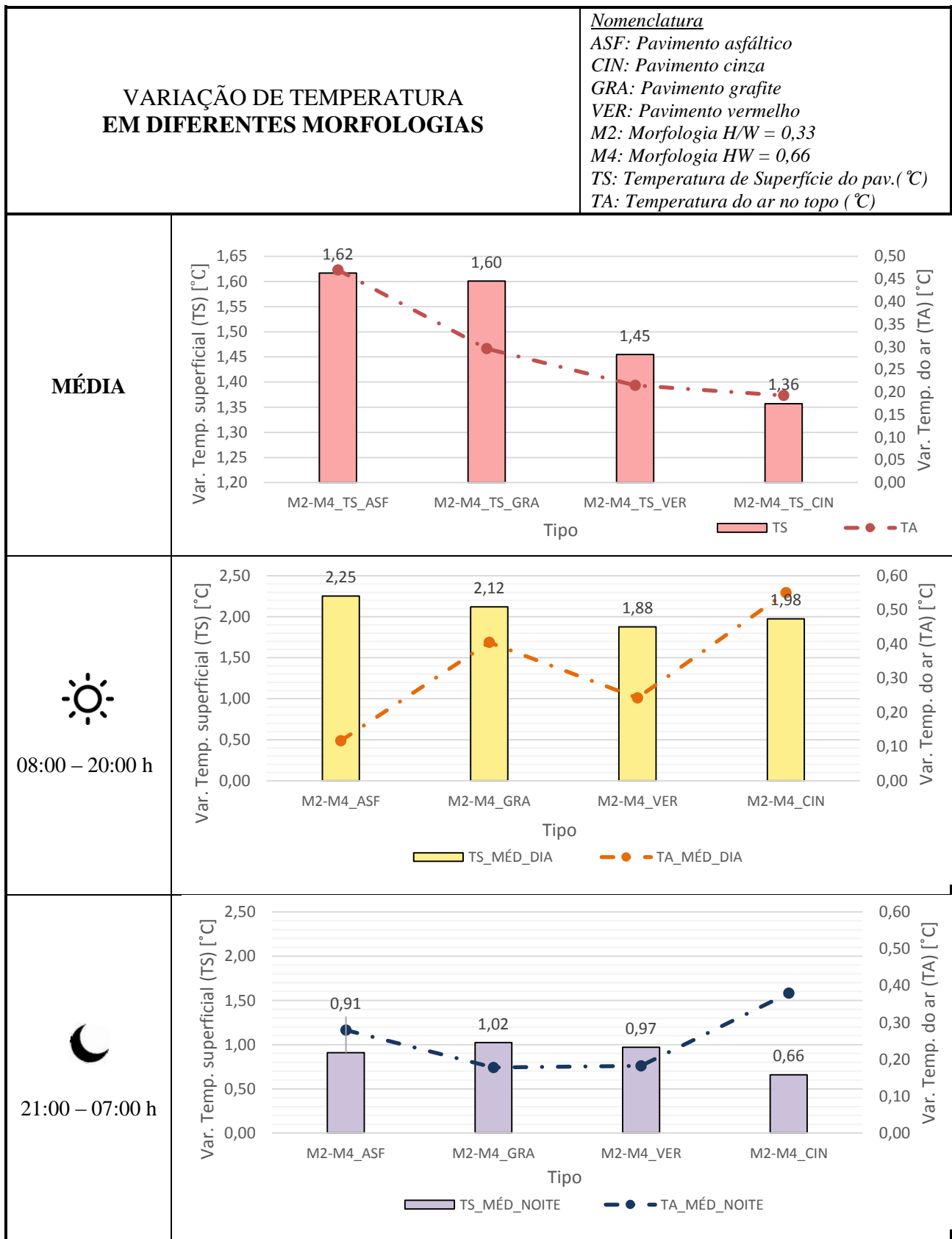


Fonte: o Autor (2019).

Além disso, nas Figura 4.6 e 4.7, percebe-se que, tanto durante o dia, quanto no período noturno, o material com albedo de 0,16 (pavimento vermelho) apresentou a menor temperatura superficial média em relação ao material com o maior albedo (0,25), no caso, o pavimento de concreto cinza.

A refletância dos materiais na faixa visível do espectro depende principalmente de sua cor e rugosidade. Entretanto, Santamouris (2016, p.95) destaca: “Deve ficar claro que a refletância na faixa infravermelho da radiação solar não depende da cor do material”. Portanto, a refletância solar não é um parâmetro conclusivo na análise do comportamento térmico da superfície. Por isso, foi avaliada a faixa do espectro infravermelho próximo para correlacionar a coloração e a transferência de calor.

A seguir estão apresentadas as variações de temperatura do ar no topo do cânion e a temperatura superficial entre as morfologias, durante o dia e à noite.



No modelo em escala reduzida, a diferença de temperatura superficial em duas morfologias urbanas é mais expressiva na cobertura com pavimento asfáltico, cerca de 1,62°C, conforme menciona Gartland (2010). Durante o dia, a variação da temperatura do ar entre as morfologias, no

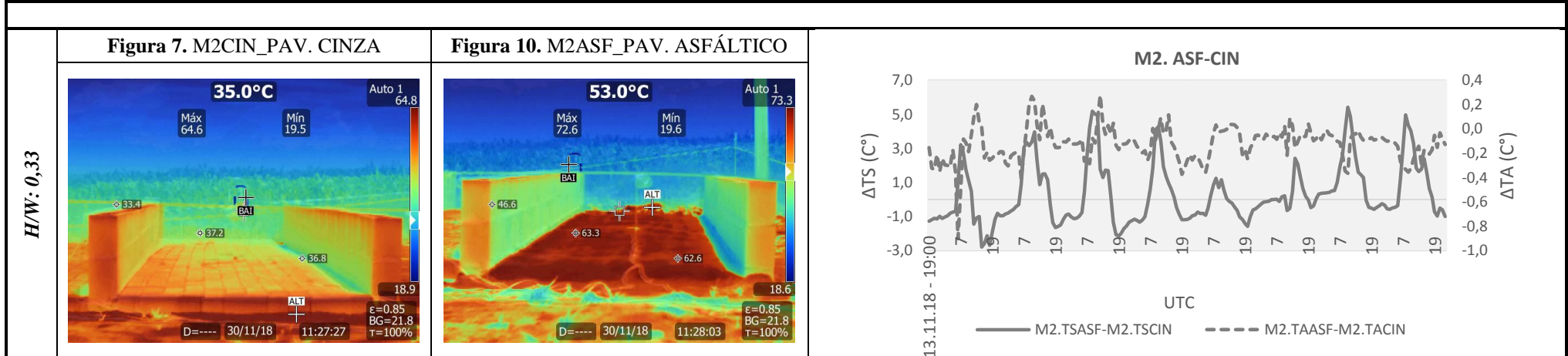
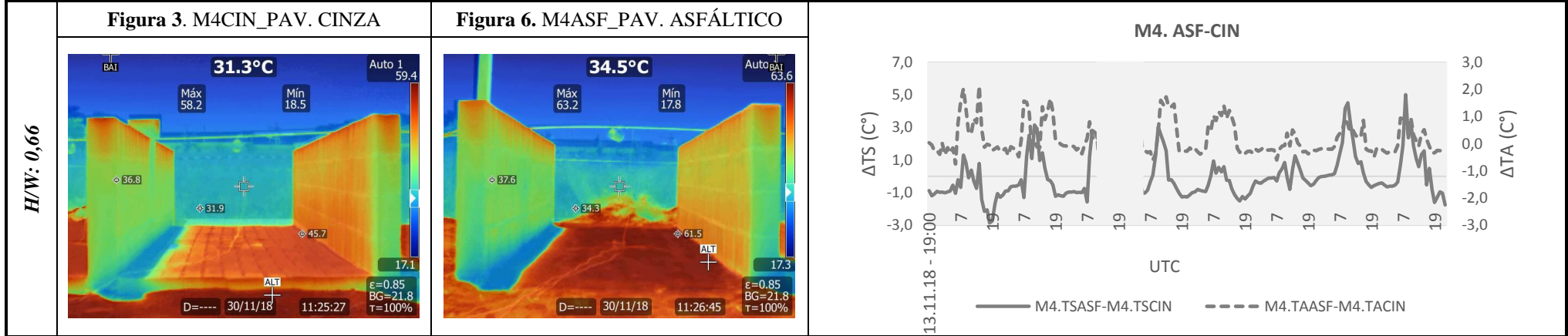
pavimento asfáltico demonstra ser a menor registrada, seguida pelo pavimento vermelho. Durante o período da noite, percebe-se que o pavimento cinza gerou a menor variação da temperatura superficial registrada.

4.3. TEMPERATURA E COLORAÇÃO

4.3.1. Variação de temperatura superficial e pavimento de referência

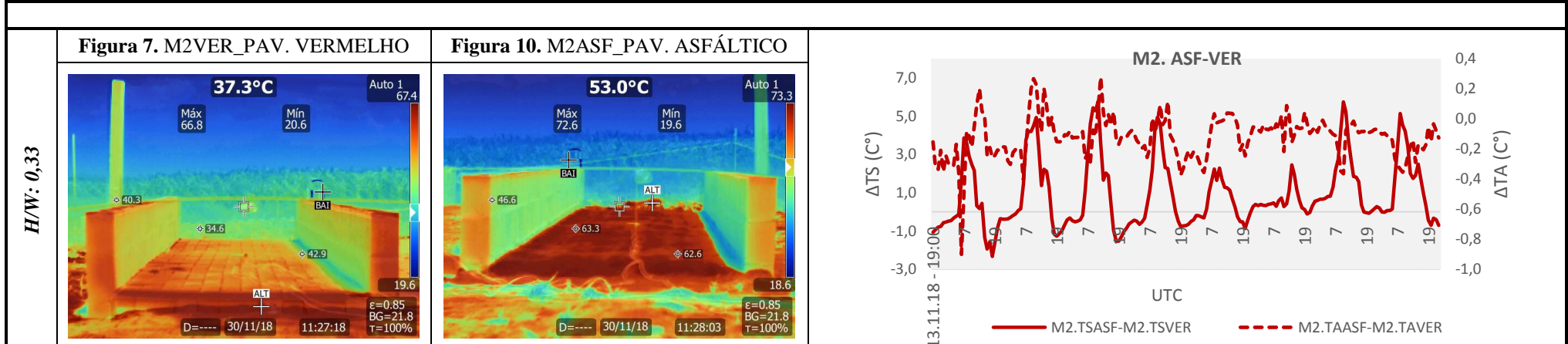
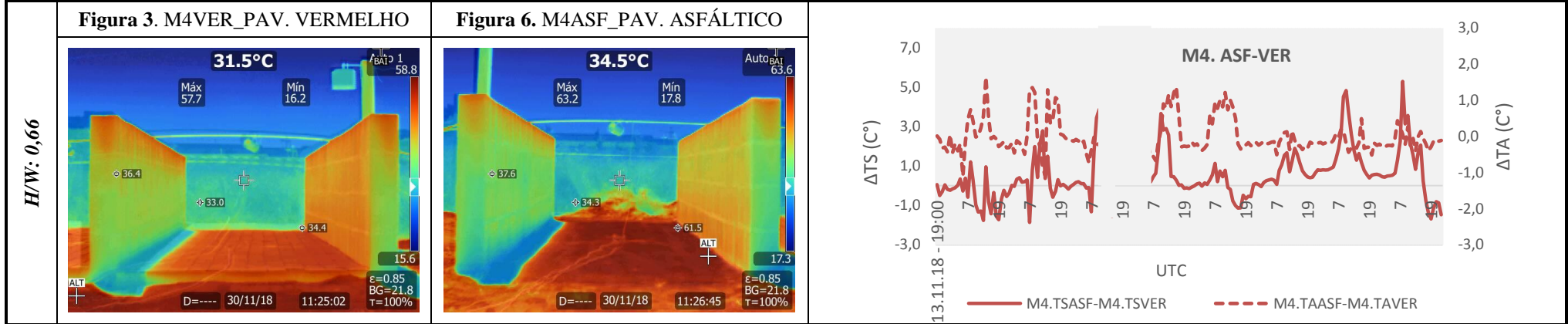
A seguir são apresentados os dados da coleta COL1. Nas fichas estão separadas por tipo de pavimento (vermelho, cinza, grafite e asfalto) e apresentam a direção do vento predominante e como ele incide no cânion. Além disso, imagens termográficas para análise considerando o sombreamento e um gráfico com a variação de temperatura superficial em cada morfologia e seu comportamento durante o dia a noite em relação ao pavimento de referência (asfalto).

	<p>COL1_PRIMAVERA 30.11.18 UTC 11</p> <p>VARIAÇÃO DE TEMPERATURA PAVIMENTO CINZA E ASFALTO</p>	<p><u>Nomenclatura</u> <i>ASF: Pavimento asfáltico</i> <i>CIN: Pavimento cinza</i> <i>M2: Morfologia H/W = 0,33</i> <i>M4: Morfologia HW = 0,66</i> <i>TS: Temperatura de Superfície do pav (°C)</i> <i>TA: Temperatura do ar no topo (°C)</i></p>
--	--	--



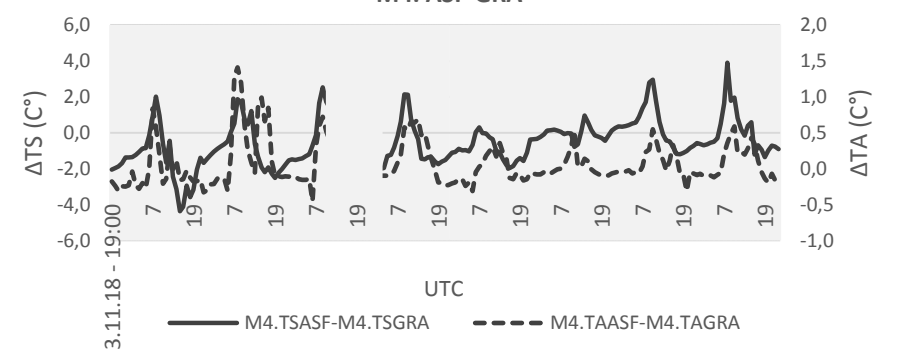
<p>Análise</p>	<p>Nota-se que a variação de temperatura entre o pavimento cinza e o pavimento de referência, é menor na morfologia M4. Na configuração M2 a variação é maior, e apresenta um registro superior a 3°C em quase todo o período de coleta.</p>
-----------------------	--

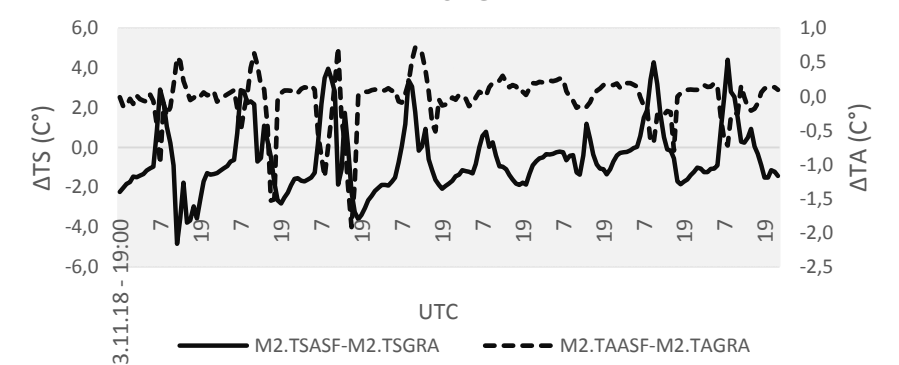
	<p>COL1_PRIMAVERA 30.11.18 UTC 11</p> <p>VARIAÇÃO DE TEMPERATURA PAVIMENTO VERMELHO E ASFALTO</p>	<p><u>Nomenclatura</u> <i>ASF: Pavimento asfáltico</i> <i>VER: Pavimento vermelho</i> <i>M2: Morfologia H/W = 0,33</i> <i>M4: Morfologia HW = 0,66</i> <i>TS: Temperatura de Superfície do pav (°C)</i> <i>TA: Temperatura do ar no topo (°C)</i></p>
---	---	---



<p>Análise</p>	<p>Percebe-se que a variação de temperatura entre o pavimento vermelho e o pavimento de referência, é menor na morfologia M4. Na configuração M2 a variação é maior, e apresenta um registro superior a 5°C em quase todo o período de coleta.</p>
-----------------------	--

	<p>COL1_PRIMAVERA 30.11.18 UTC 11</p> <p>VARIAÇÃO DE TEMPERATURA PAVIMENTO GRAFITE E ASFALTO</p>	<p><u>Nomenclatura</u> <i>ASF: Pavimento asfáltico</i> <i>GRA: Pavimento grafite</i> <i>M2: Morfologia H/W = 0,33</i> <i>M4: Morfologia HW = 0,66</i> <i>TS: Temperatura de Superfície do pav (°C)</i> <i>TA: Temperatura do ar no topo (°C)</i></p>
---	--	--

<p>Figura 3. M4GRA_PAV. GRAFITE</p> <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">H/W: 0,66</p>	<p>Figura 6. M4ASF_PAV. ASFÁLTICO</p>	<p>M4. ASF-GRA</p>  <p>UTC</p> <p>— M4.TSASF-M4.TSGRA - - - M4.TAASF-M4.TAGRA</p>
--	--	--

<p>Figura 7. M2GRA_PAV. GRAFITE</p> <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">H/W: 0,33</p>	<p>Figura 10. M2ASF_PAV. ASFÁLTICO</p>	<p>M2. ASF-GRA</p>  <p>UTC</p> <p>— M2.TSASF-M2.TSGRA - - - M2.TAASF-M2.TAGRA</p>
--	---	---

<p>Análise</p>	<p>Percebe-se que a variação de temperatura entre o pavimento grafite e o pavimento de referência, é menor na morfologia M4. Entretanto, no período da noite e no início do dia, as temperaturas do pavimento grafite são superiores ao pavimento asfáltico, apresentando uma diferença de até 4 °C a mais que o pavimento de referência.</p>
-----------------------	---

VARIAÇÃO MÉDIA DE TEMPERATURA – DIA E NOITE EM RELAÇÃO AO PAVIMENTO ASFÁLTICO

Nomenclatura

ASF: Pavimento asfáltico

GRA: Pavimento grafite

M2: Morfologia H/W = 0,33

M4: Morfologia HW = 0,66

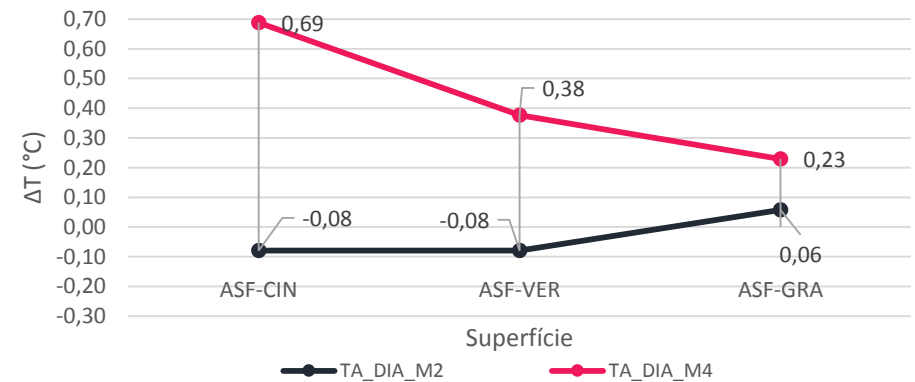
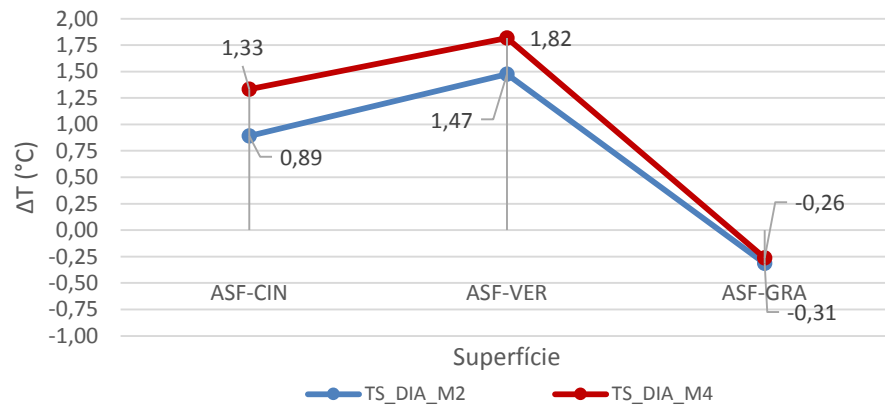
TS: Temperatura de Superfície do pavimento (°C)

TA: Temperatura do ar no topo (°C)

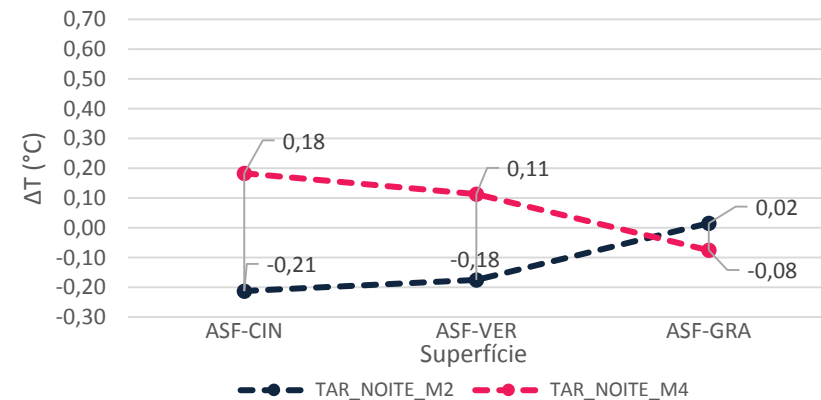
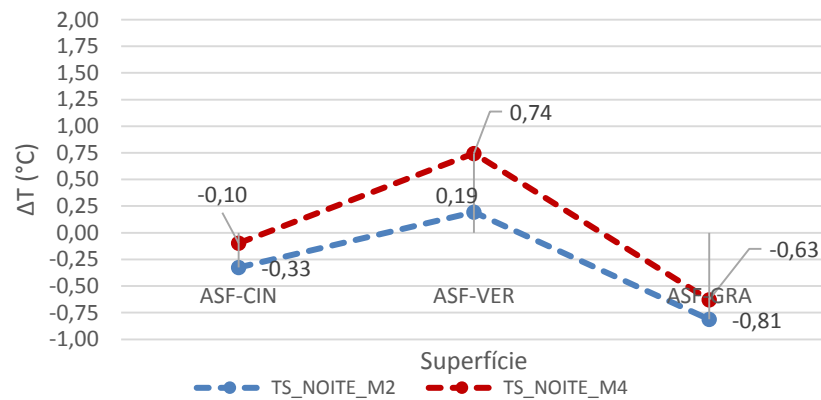
TEMPERATURA SUPERFICIAL (TS)

TEMPERATURA DO AR (TA)

Diurno – 08:00h – 20:00h



Noturno – 21:00h – 07:00h



Fonte: o Autor (2019).

VARIAÇÃO DE TEMPERATURA MÉDIA EM RELAÇÃO AO PAVIMENTO ASFÁLTICO

Nomenclatura

ASF: Pavimento asfáltico

GRA: Pavimento grafite

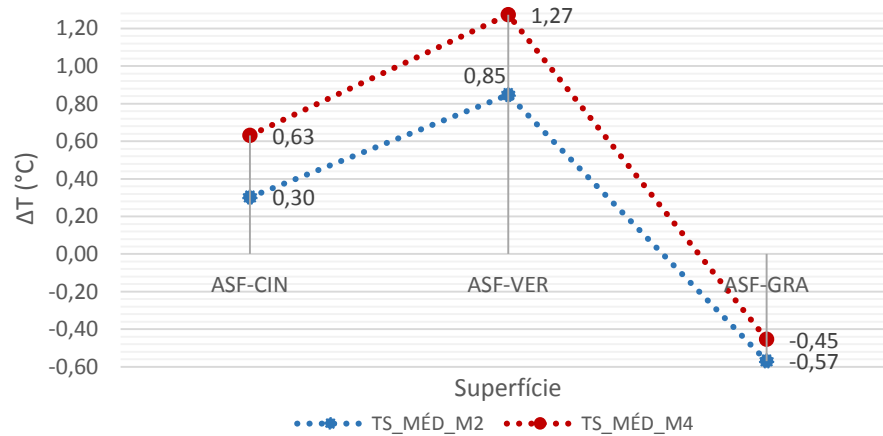
M2: Morfologia $H/W = 0,33$

M4: Morfologia $HW = 0,66$

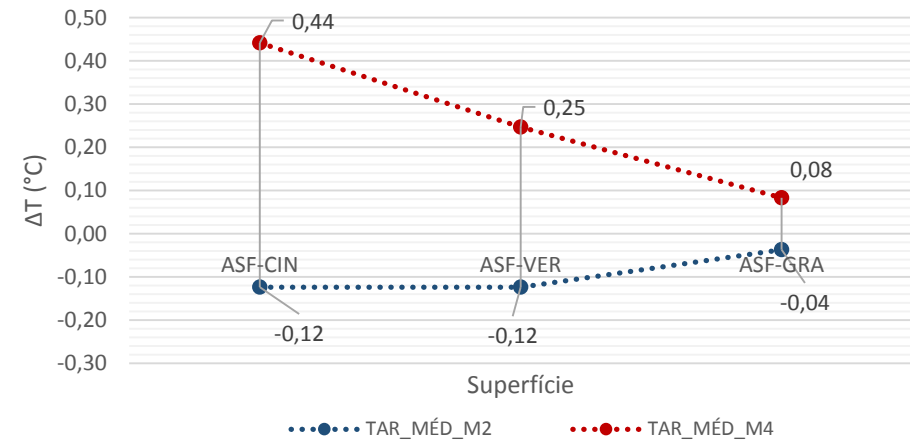
TS: Temperatura de Superfície do pavimento (°C)

TA: Temperatura do ar no topo (°C)

TEMPERATURA SUPERFICIAL (TS)



TEMPERATURA DO AR (TA)



Fonte: o Autor (2019).

Tabela 4.2. Tabela síntese com a variação de temperatura média [°C].

TIPO	TS_MÉD_M2	TS_MÉD_M4	TA_MÉD_M2	TA_MÉD_M4
ASF-CIN	0,30	0,63	-0,12	0,44
ASF-VER	0,85	1,27	-0,12	0,25
ASF-GRA	-0,57	-0,45	-0,04	0,08

Fonte: o Autor (2019).

Tabela 4.3. Tabela síntese com a variação de temperatura durante o dia e à noite em [°C].

TIPO	DIA				NOITE			
	TS_M2	TS_M4	TA_M2	TA_M4	TS_M2	TS_M4	TA_M2	TA_M4
ASF-CIN	0,89	1,33	-0,08	0,69	-0,33	-0,10	-0,21	0,18
ASF-VER	1,47	1,82	-0,08	0,38	0,19	0,74	-0,18	0,11
ASF-GRA	-0,31	-0,26	0,06	0,23	-0,81	-0,63	0,02	-0,08

Fonte: o Autor (2019).

Temperatura superficial

- Em ambas as morfologias, tanto durante o dia, quanto à noite, a maior variação da temperatura média foi registrada entre o pavimento vermelho e o pavimento de referência.
- Percebe-se também que a variação de temperatura superficial do pavimento grafite, em relação ao asfalto, foi mais expressiva à noite. Além disso, o pavimento grafite apresentou as maiores temperaturas em relação ao pavimento de referência.

Temperatura do ar

- Na morfologia M4, percebe-se que tanto durante o dia, quanto à noite, há um tendência em reduzir a variação de temperatura do ar, quando há uma menor diferença no valor do albedo da superfície pavimentada.
- Na morfologia M2, nota-se que a temperatura do ar dos pavimentos de concreto é superior em relação ao pavimento asfáltico. Entretanto, essa diferença é mais expressiva durante a noite.

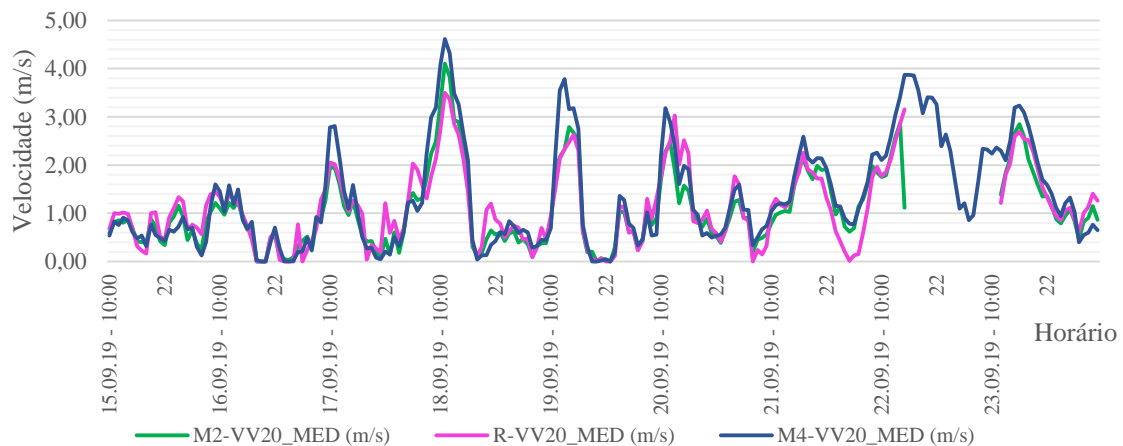
4.4. ALTERAÇÕES DO FLUXO DE AR E TEMPERATURA NO INTERIOR DO CÂNION

4.4.1. Caracterização do dia da coleta 2

A segunda fase da pesquisa ocorreu durante a estação da primavera, entre os dias 15/09/2019 e 24/09/2019. Nesta etapa, foram coletadas a temperatura do ar e umidade relativa, velocidade e direção vento no interior do cânion e temperatura do ar e de globo, também no interior do arranjo urbano.

Conforme apresentado na Figura 4.8, a velocidade média do vento nos três pontos de coleta, no interior do cânion foi de 2 m/s, estando dentro dos limites recomendados pela EPA (2008), a qual orienta realizar coletas em campo com a velocidade do vento inferior a 2 m/s ou 7 km/h.

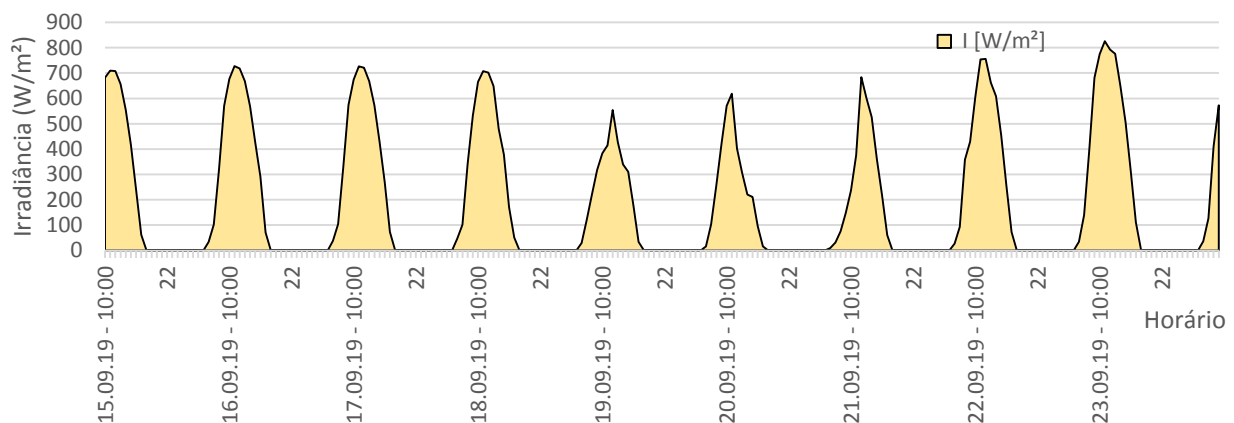
Figura 4.8. Velocidade do vento no período da coleta COL2.



Fonte: o Autor (2019).

Percebe-se que a maior irradiância do período ocorreu no dia 25/09, próximo ao equinócio da primavera. Os dados estão apresentados na Figura 4.9.

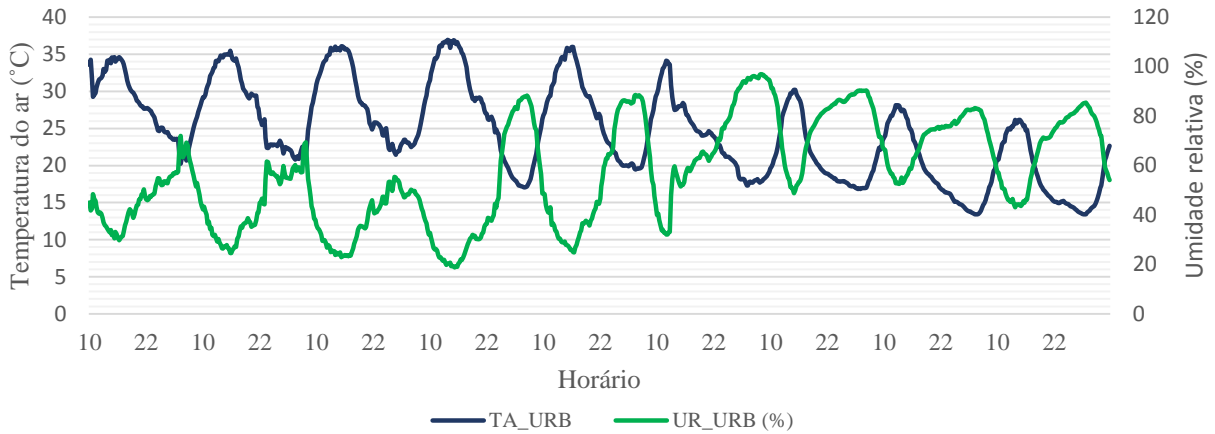
Figura 4.9. Radiação solar no período.



Fonte: o Autor (2019).

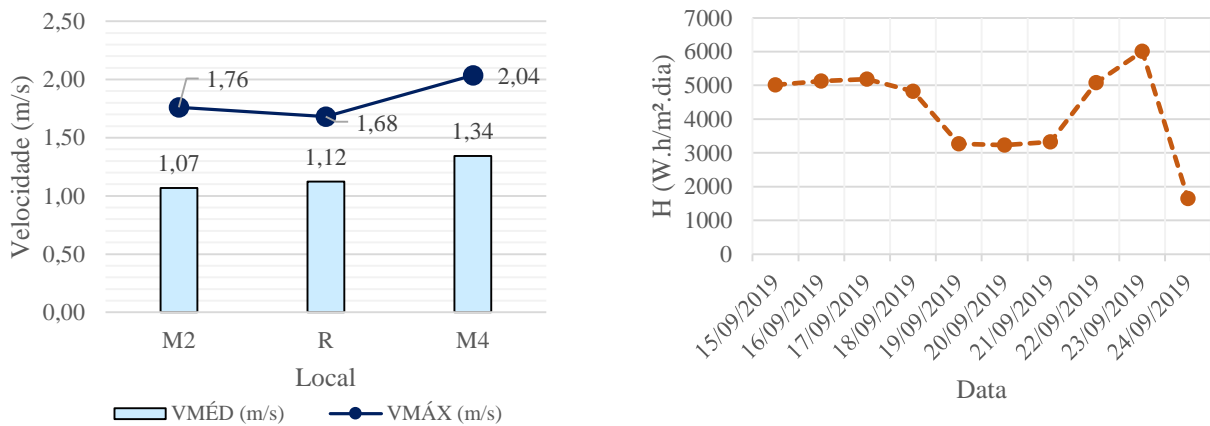
Nos 4 primeiros dias da coleta, a máxima umidade relativa do ar era de aproximadamente 60% durante a madrugada até o início do dia. A partir do dia 19/09, a umidade se eleva para 90%, devido à instabilidade do tempo provocada pela entrada da primavera, conforme apresentado na Figura 4.10.

Figura 4.10. Temperatura do ar no topo do cânion e umidade relativa.



Por fim, os valores médios da velocidade do vento e da radiação solar no período estão apresentados na Figura 4.11.

Figura 4.11. Valores médios de velocidade do vento e Radiação global no período.

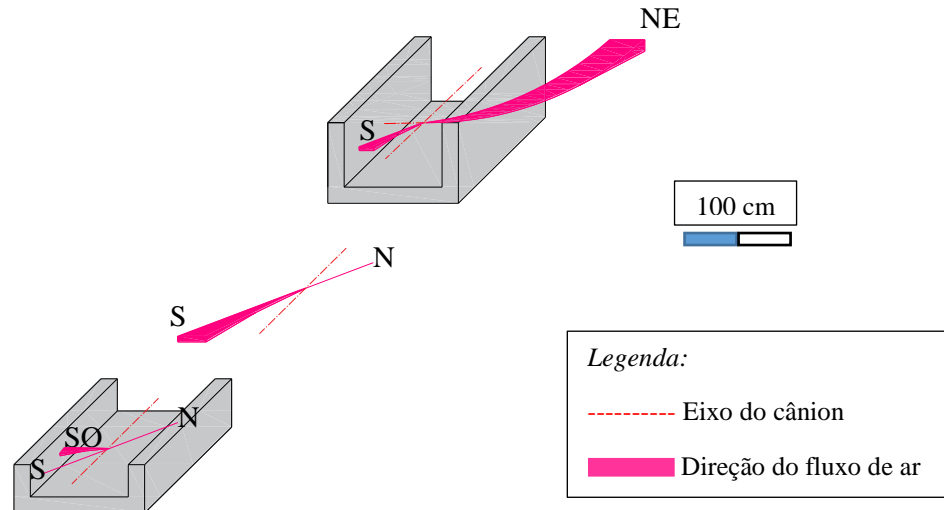


Fonte: o Autor (2019).

4.4.2. Variação do vento no interior de cada morfologia

No período da segunda fase da pesquisa, o vento predominante era proveniente da orientação Sul na condição em campo aberto a 20 cm do solo (R). Entretanto, no interior do cânion houve uma variação na direção do fluxo de ar, conforme apresentado na Figura 4.12.

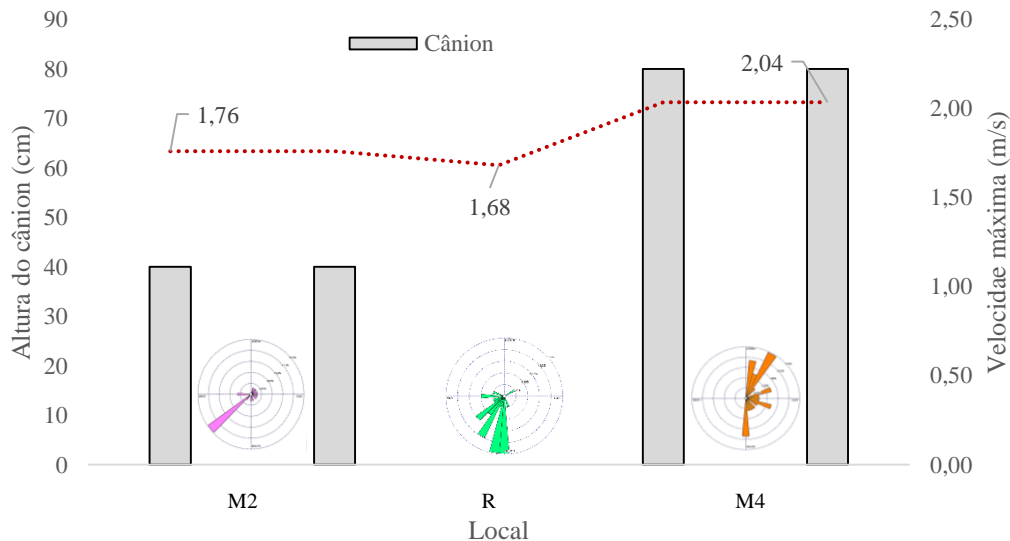
Figura 4.12. Representação da direção do fluxo de ar em cada configuração urbana.



Fonte: o Autor (2019).

Devido à turbulência no interior da configuração com maior relação H/W (M4), o fluxo de ar estava direcionado tanto na direção noroeste, quanto sul. Em contrapartida, no interior da configuração M2, o vento predominante era de origem sudeste, conforme apresentado na Figura 4.13.

Figura 4.32. Velocidade máxima e direção do vento no interior do cânion em cada configuração urbana.

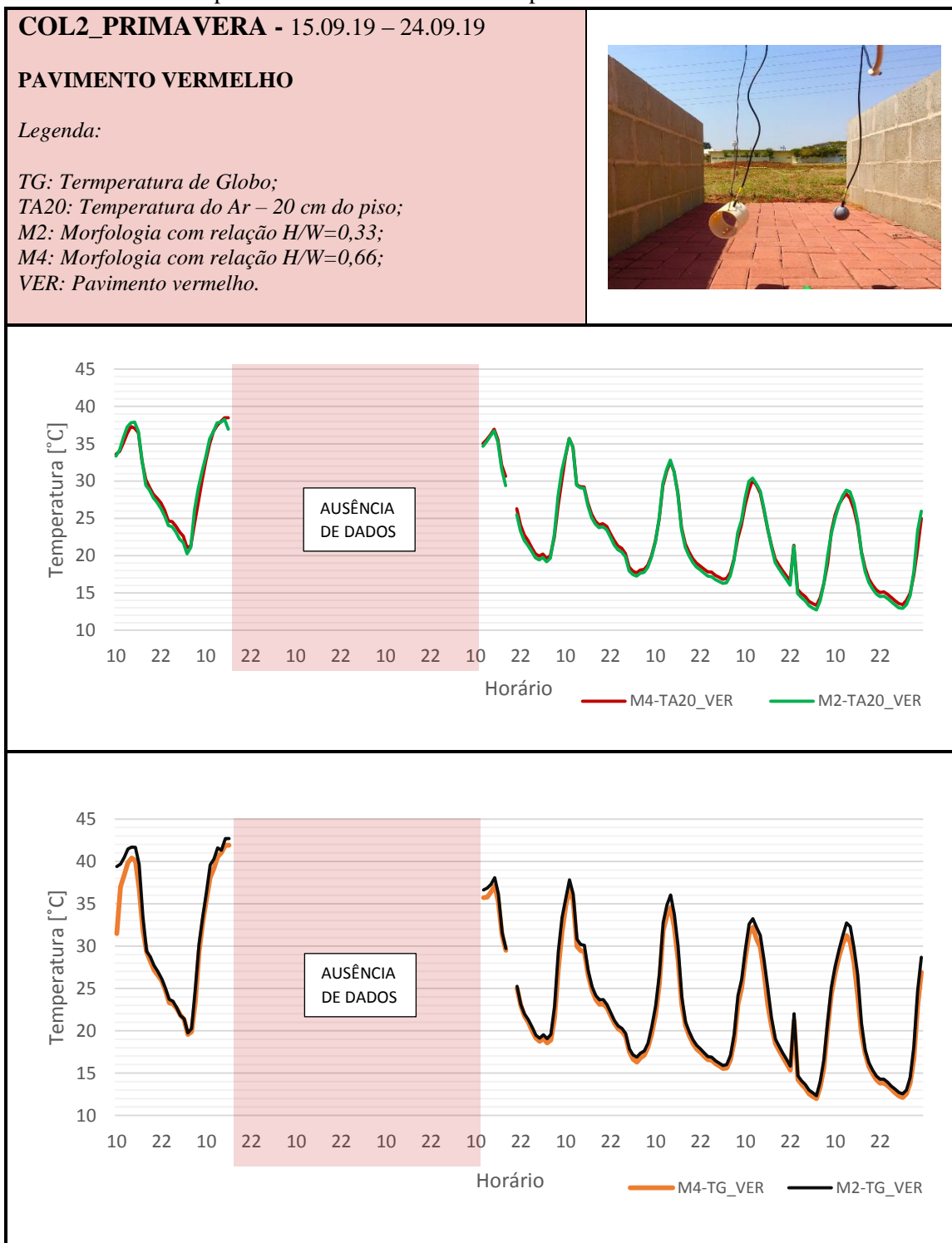


Fonte: o Autor (2019).

Percebe-se também que a velocidade máxima foi registrada no interior do arranjo com maior relação H/W (M4), devido à canalização do vento dentro do cânion. Além disso, a menor média de velocidade registrada no período foi de 1,68 m/s, na estação de referência, no interior da malha, sem obstruções laterais.

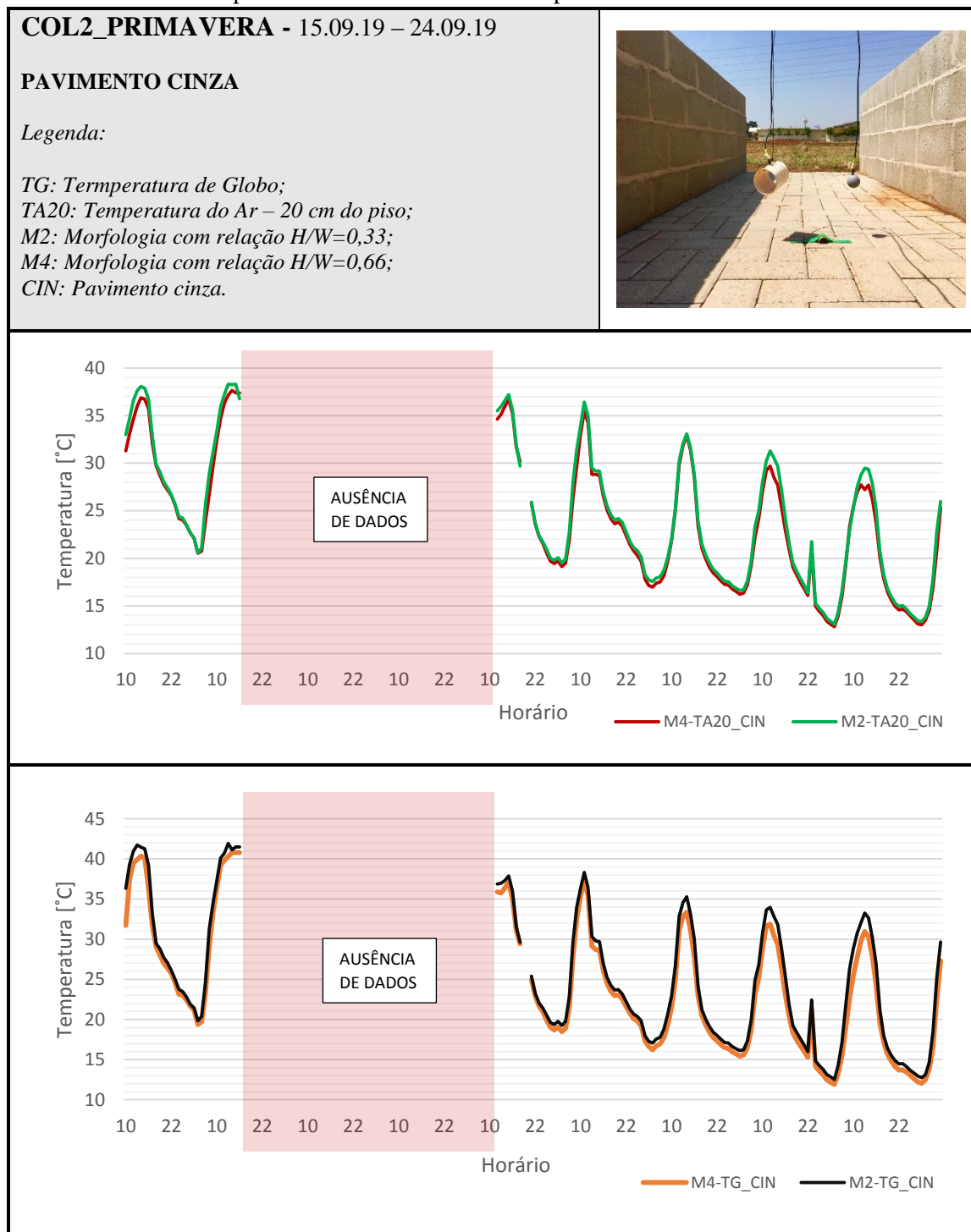
4.4.3. Temperatura do Ar e de Globo no Nível do Pedestre

A seguir são apresentados os dados da fase 2 do projeto. Esta etapa tem por objetivo analisar a temperatura do ar e a temperatura de globo no interior do cânion. Essas variáveis são relevantes para se avaliar o efeito da rugosidade na temperatura do ar e fornecer dados para o cálculo da temperatura radiante média (TRM) no interior da malha, que está associada às condições de conforto do cânion. As fichas estão separadas por tipo de pavimento (vermelho, cinza, grafite e asfalto) e apresentam a posição dos termômetros no interior do modelo. Por fim, são apresentadas a média horária da temperatura do ar próximo à superfície (TA20) e a temperatura de globo (TG).

Quadro 4.9. Dados de temperatura no interior do cânion – pavimento vermelho.

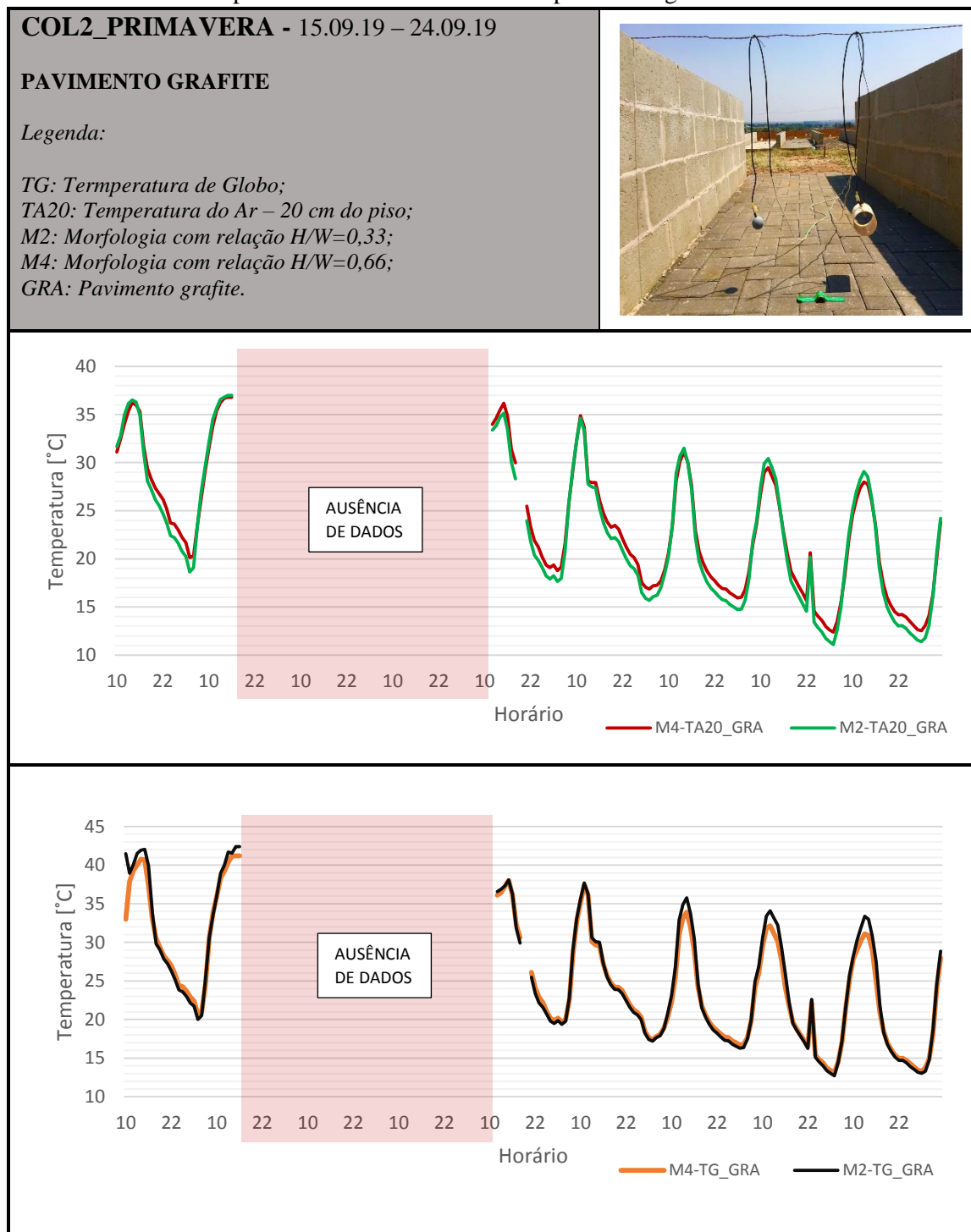
Fonte: o Autor (2019).

- *Temperatura do ar próximo à superfície (TA20):* No pavimento vermelho, a temperatura do ar próxima à superfície é ligeiramente superior na morfologia M2 em relação à configuração M4.
- *Temperatura de globo (TG):* A temperatura de globo sobre o pavimento vermelho é ligeiramente superior na morfologia M2, quando comparada à configuração M4.

Quadro 4.10. Dados de temperatura no interior do cânion – pavimento cinza.

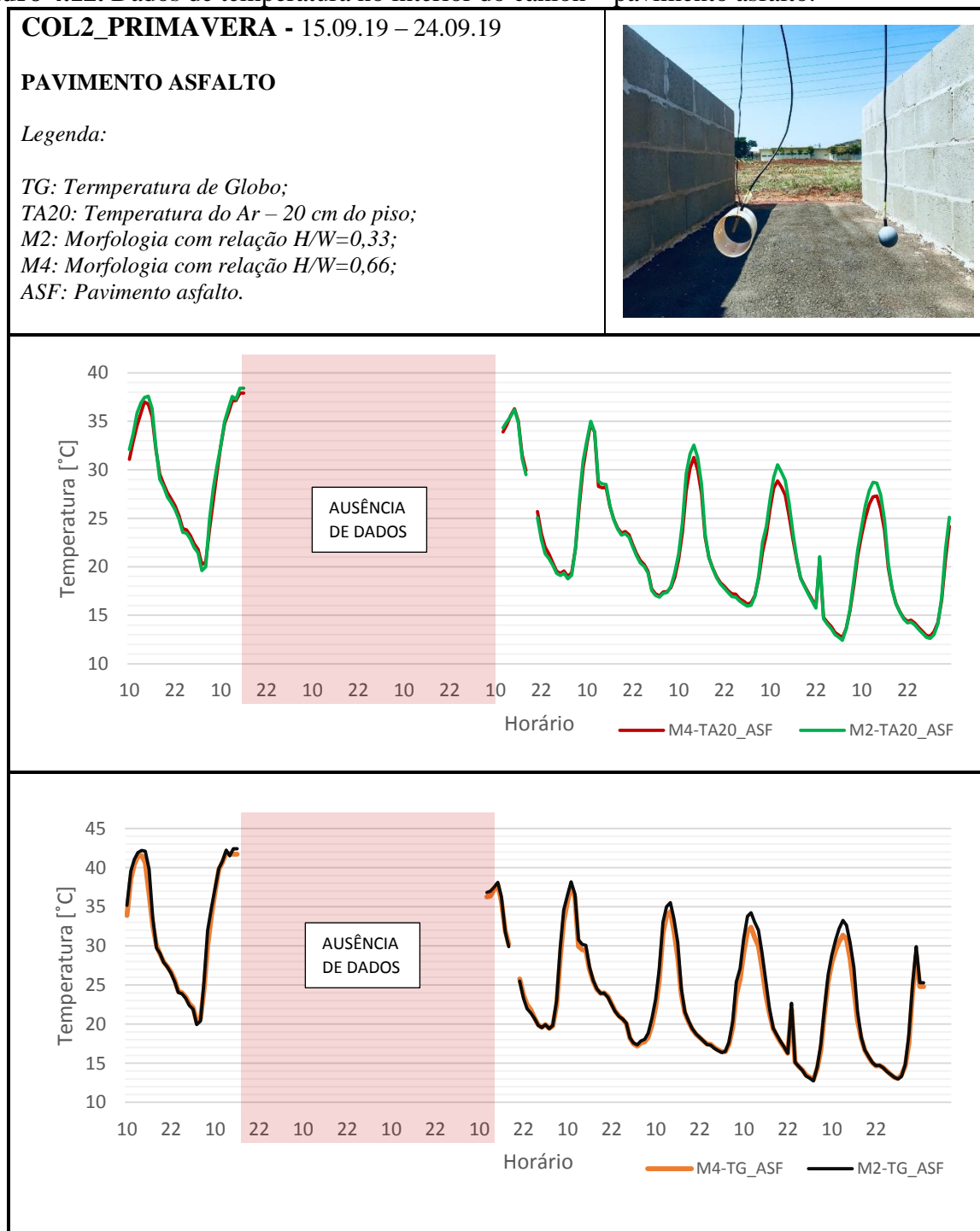
Fonte: o Autor (2019).

- *Temperatura do ar próxima à superfície (TA20):* No pavimento cinza, a temperatura do ar próxima à superfície é superior na configuração M2.
- *Temperatura de globo (TG):* A temperatura de globo sobre o pavimento cinza é ligeiramente superior na morfologia M2, quando comparada à configuração M4.

Quadro 4.11. Dados de temperatura no interior do cânion – pavimento grafite.

Fonte: o Autor (2019).

- *Temperatura do ar próximo à superfície (TA20):* Sobre o pavimento grafite, a temperatura do ar próxima à superfície é mais elevada na morfologia M2. Entretanto, no período da noite há uma inversão.
- *Temperatura de globo (TG):* A temperatura de globo sobre o pavimento grafite é ligeiramente superior na morfologia M2.

Quadro 4.12. Dados de temperatura no interior do cânion – pavimento asfalto.

- *Temperatura do ar próxima à superfície (TA20):* Sobre o pavimento asfáltico, a temperatura do ar próxima à superfície é mais elevada na morfologia M2.
- *Temperatura de globo (TG):* A temperatura de globo sobre o pavimento grafite é ligeiramente superior na morfologia M2.

4.4.4. Albedo e temperaturas no interior dos cânions

Nesta seção são analisadas as variações de temperatura no interior do cânion em relação ao pavimento de referência (ASF), a fim de considerar a influência da rugosidade da malha urbana na temperatura do ar próximo à superfície. Para isso, são avaliadas a temperatura de globo (TG) e a temperatura do ar próximo à superfície (TA20) e a temperatura radiante média (TRM) por hora em duas morfologias urbanas (M2 e M4). Em seguida, será analisada a diferença de temperatura entre os pavimentos coloridos em relação ao pavimento asfáltico. Por fim, o objetivo é verificar como o albedo interfere na temperatura no interior de cânions com geometrias distintas.

COL2_PRIMAVERA

15.09.19 - 24.09.19

**VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO INTERIOR DO CÂNION EM
RELAÇÃO AO PAVIMENTO ASF.****MORFOLOGIA 2**Nomenclatura

ASF: Pavimento asfáltico

CIN: Pavimento cinza

VER: Pavimento vermelho

GRA: Pavimento grafite

M2: Morfologia H/W = 0,33

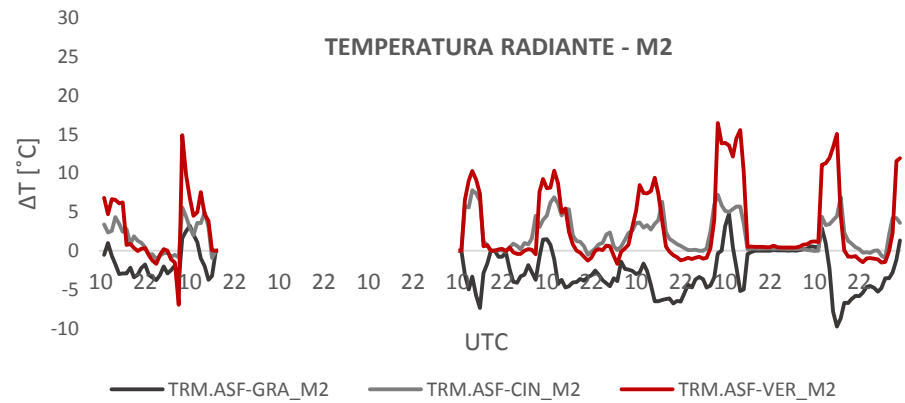
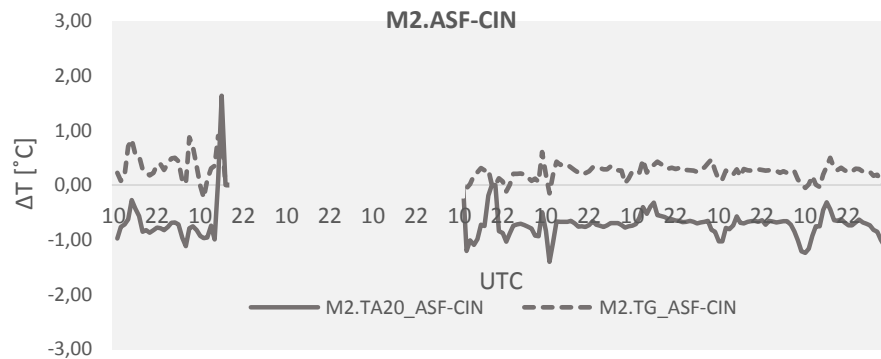
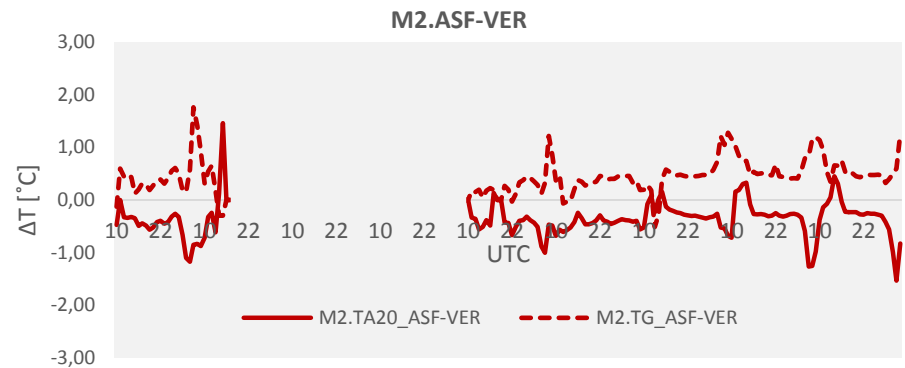
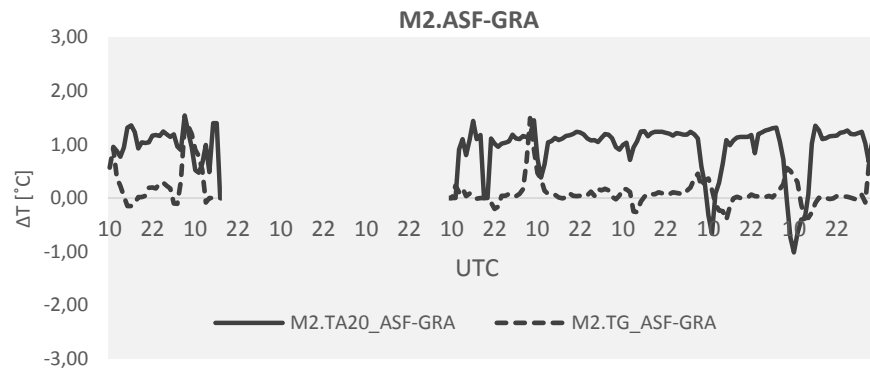
M4: Morfologia HW = 0,66

TS: Temperatura de Superfície do pavimento (°C)

TA: Temperatura do ar no topo do cânion (°C)

TRM: Temperatura Radiante Média no interior do cânion (°C)

TG: Temperatura de Globo no interior do cânion (°C)



COL2_PRIMAVERA

15.09.19 - 24.09.19

**VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO INTERIOR DO CÂNION EM
RELAÇÃO AO PAVIMENTO ASF.****MORFOLOGIA 4**Nomenclatura

ASF: Pavimento asfáltico

CIN: Pavimento cinza

VER: Pavimento vermelho

GRA: Pavimento grafite

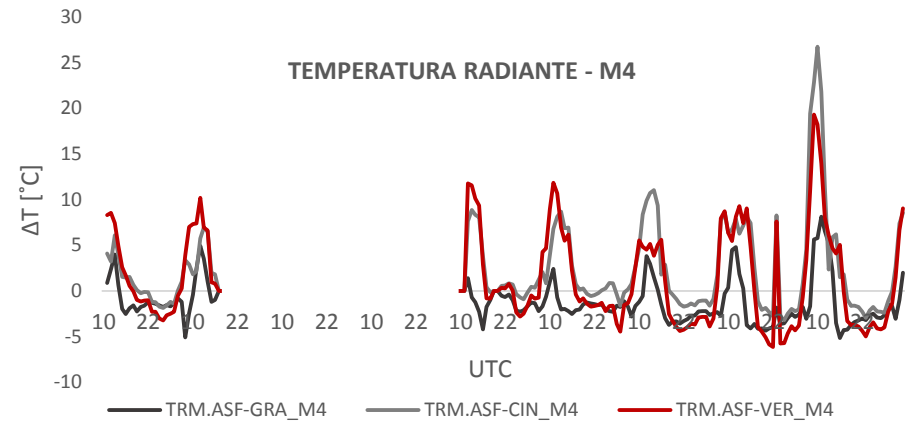
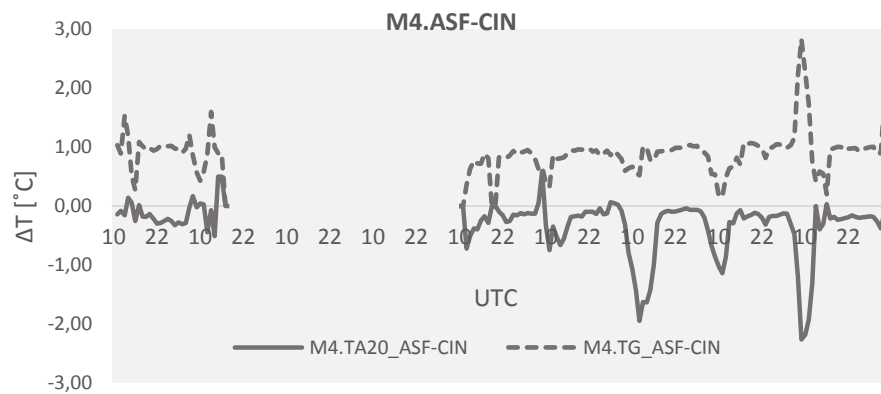
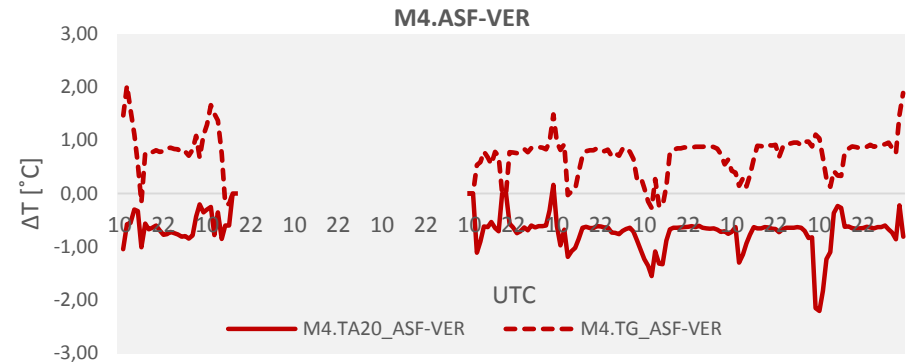
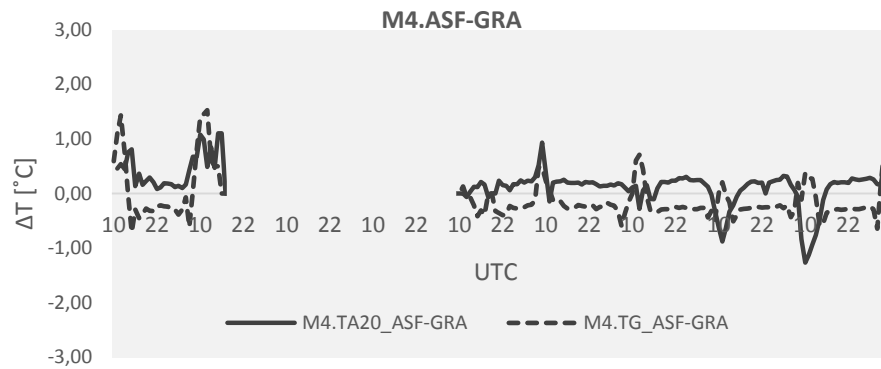
M2: Morfologia $H/W = 0,33$ M4: Morfologia $HW = 0,66$

TS: Temperatura de Superfície do pavimento (°C)

TA: Temperatura do ar no topo do cânion (°C)

TRM: Temperatura Radiante Média no interior do cânion (°C)

TG: Temperatura de Globo no interior do cânion (°C)



Ao analisar a diferença da temperatura do ar no interior do cânion entre os pavimentos de concreto em relação ao asfalto, percebe-se que na morfologia M2 a maior diferença ocorre entre o pavimento vermelho e o asfalto. Em contrapartida, na morfologia M4, essa diferença é mais expressiva entre o pavimento asfáltico e o pavimento cinza.

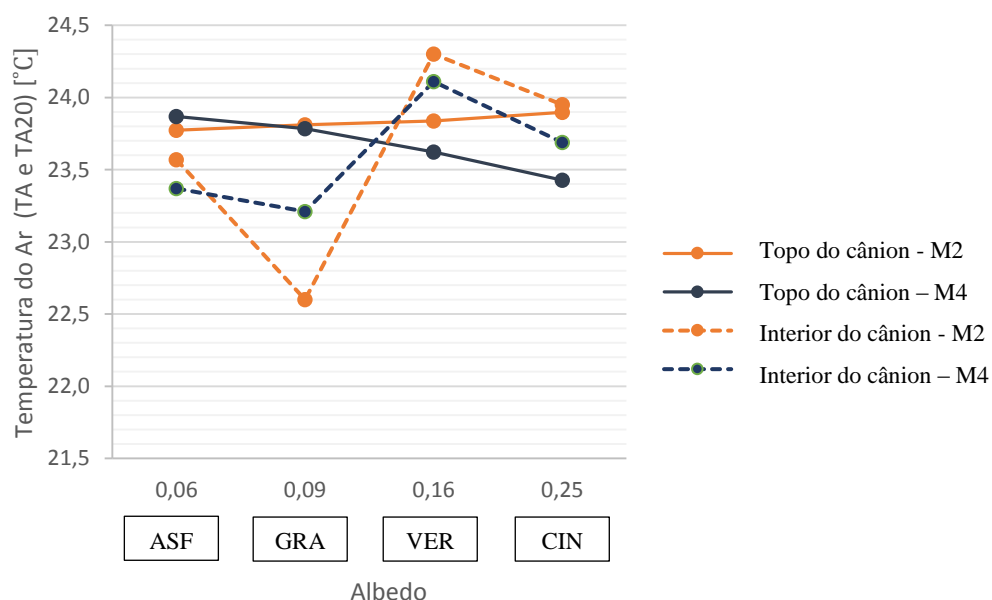
Além disso, em ambas as configurações, percebe-se uma maior diferença entre a temperatura de globo do que a temperatura do ar, sobre os pavimentos de concreto em relação ao de referência, com exceção do pavimento grafite.

Krüger e Gonzalez (2016) estudaram o impacto de diferentes albedos no conforto térmico através da substituição dos materiais de superfície em cânions urbanos e concluíram que, apesar da diminuição da temperatura do ar, o aumento do valor do albedo das superfícies tende a piorar as condições de conforto térmico.

Pode-se observar também que, após o horário do meio-dia, a temperatura radiante média aumenta em função do albedo, o que implica em uma menor diferença entre os pavimentos de concreto e o asfalto. Tanto na morfologia M2, quanto na morfologia M4, as maiores diferenças de TRM ocorreram entre o pavimento vermelho e o pavimento asfáltico.

Na Figura 4.14 está apresentada a relação entre o albedo e a temperatura média do ar no topo e no interior do cânion.

Figura 4.14. Relação entre albedo e Temperatura média do ar no interior do cânion (TA20), no topo (TA) e superficial (TS).



Fonte: o Autor (2019).

A Tabela 4.4 apresenta uma síntese dos valores de temperatura do ar no interior do cânion e da temperatura do ar próximo à superfície.

Tabela 4.4. Tabela síntese da temperatura média do ar no topo do cânion (TA) e temperatura do ar no interior do cânion (TA20).

	ALBEDO	M2_TA [°C]	M4_TA [°C]	M2_TA20 [°C]	M4_TA20 [°C]
ASF	0,06	23,77	23,87	23,57	23,37
GRA	0,09	23,81	23,79	22,60	23,21
VER	0,16	23,84	23,62	24,30	24,11
CIN	0,25	23,90	23,43	23,95	23,69

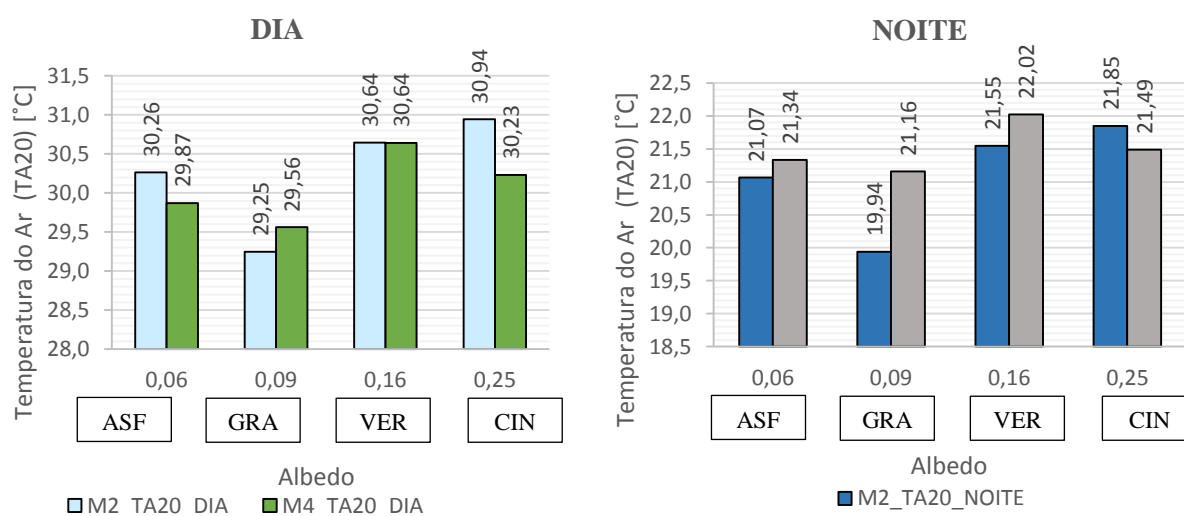
Fonte: o Autor (2019).

Ao avaliar a temperatura do ar média no topo do cânion, não parece haver uma relação coerente ao relacioná-la com o albedo, pelo fato de estar suscetível ao vento que incide acima do arranjo. Entretanto ao avaliar a condição de coleta no interior do cânion, percebe-se que tanto na morfologia M2, quanto na M4 há uma proporcionalidade entre as curvas.

Pode-se constatar que as mais baixas temperaturas do ar no interior do cânion ocorrem sobre o pavimento de concreto na coloração grafite e que as mais elevadas ocorrem sobre o pavimento vermelho. Esse fato está associado à capacidade de absorção e de reflexão do pavimento. A superfície com menor calor específico e albedo (GRA), tende a reter o calor, o que implica em uma redução da temperatura do ar.

Ao comparar a temperatura do ar no nível do pedestre durante o dia (quando há o predomínio de radiação de ondas curtas) e durante a noite (quando há a incidência de radiação de ondas longas), percebe-se que o pavimento grafite é o que possui a mais baixa temperatura do ar tanto durante o dia, quanto durante a noite. Ao avaliar as temperaturas mais elevadas, observa-se que durante o dia o pavimento cinza é o que possui os maiores registros, e à noite, o pavimento vermelho é o que libera mais calor, conforme apresentado na Figura 4.15.

Figura 4.15. Temperatura média do ar no nível do pedestre, durante o dia e noite.



Fonte: o Autor (2019).

Quanto à forma urbana, durante o dia as temperaturas do ar mais baixas são registradas na configuração M4, com exceção do pavimento grafite. Krüger, Pearlmutter e Rasia (2010) demonstraram que o sombreamento mútuo nas paredes leste e oeste é a principal razão da redução da temperatura do ar durante o dia em cânions orientados a N-S. Apesar do modelo desta pesquisa estar orientado com um desvio de 15° em relação eixo N-S, percebe-se que a parede com a maior área sombreada (M4), a temperatura do ar é inferior quando comparada à morfologia M2.

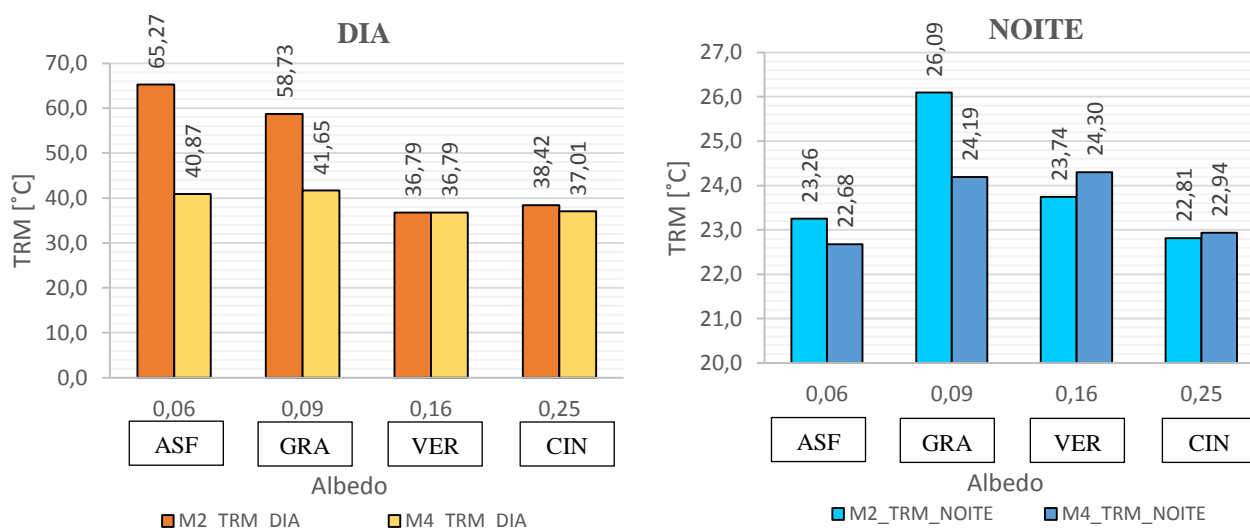
Ao considerar o período da noite, observa-se que a configuração M4 possui os mais elevados registros de temperatura do ar, devido ao desprendimento do calor das fachadas que compõem o cânion, cuja radiação de onda converge no nível do pedestre.

4.4.5. Temperatura Radiante Média e Albedo

A temperatura radiante média (TRM) foi calculada de acordo com o procedimento previsto pela norma ISO 7726/1998 nas condições de convecção forçada, emissividade do globo de 0,9 para a coloração cinza médio e diâmetro de 40 mm.

Devido ao comportamento térmico do ambiente urbano construído ser diferenciado entre o dia e a noite, na Figura 4.16 está apresentada a TRM média no nível do pedestre, sobre cada pavimento em sua respectiva morfologia.

Figura 4.16. Temperatura radiante média no nível do pedestre, durante o dia e noite.



Fonte: o Autor (2019).

Ao avaliar os dados da Figura 2, nota-se que durante o dia os registros mais elevados da temperatura radiante média ocorre na morfologia M2. Além disso, durante o dia, pode-se observar que os menores valores de TRM são registrados sobre o pavimento vermelho (36,8°C). E durante a

noite, os valores mais baixos de TRM são identificados sobre o pavimento cinza (M4) e no pavimento asfáltico (M2).

Na Tabela 4.5 estão apresentados os valores de TRM média e máxima registrada, em função do albedo de cada pavimento e da morfologia (M2 e M4).

Tabela 4.5. Tabela síntese da TRM média e albedo.

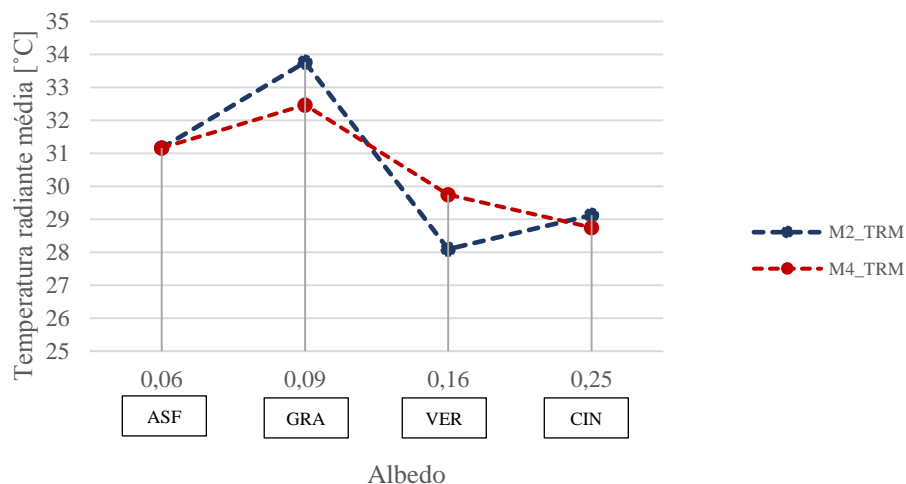
	ALBEDO	M2_TRM [°C]	M4_TRM [°C]	M2_TRM_MÁX [°C]	M4_TRM_MÁX [°C]
ASF	0,06	31,16	31,17	57,76	60,31
GRA	0,09	33,76	32,47	58,73	58,97
VER	0,16	28,09	29,75	52,26	53,36
CIN	0,25	29,13	28,75	54,17	54,59

Fonte: o Autor (2019).

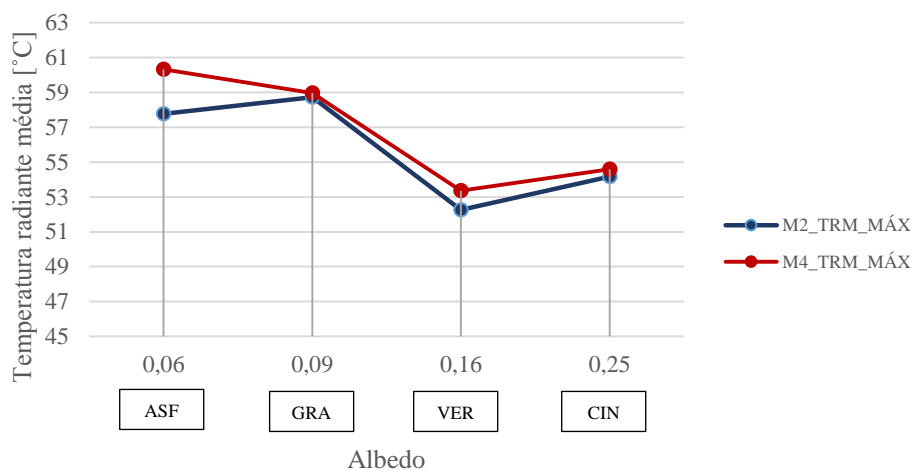
TEMPERATURA RADIANTE MÉDIA E ALBEDO EM DIFERENTES MORFOLOGIAS

Nomenclatura
 ASF: Pavimento asfáltico
 CIN: Pavimento cinza
 M2: Morfologia H/W = 0,33
 M4: Morfologia HW = 0,66
 TS: Temperatura de Superfície (°C)
 TA: Temperatura do ar (°C)
 TRM: Temperatura Radiante Média (°C)
 TG: Temperatura de Globo (°C)

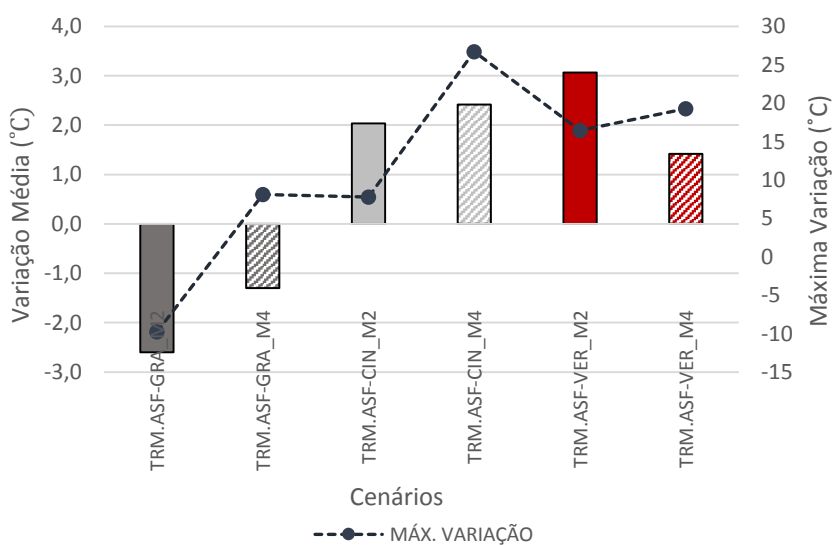
MÉDIA



MÁXIMAS



VARIAÇÃO TRM EM REL. REFERÊNCIA



Achour-Younsi e Kharrat (2016), analisaram a influência da geometria, através da relação H/W, FVC e orientação das vias, no conforto térmico. Na percepção dos autores, as maiores relações H/W resultavam em melhores condições de conforto térmico em condições de clima subtropical mediterrâneo. No contexto de clima tropical, percebe-se que esse comportamento é válido, com exceção ao pavimento vermelho.

Ao tomar como referência a TRM no período da coleta, nesta pesquisa, percebe-se que os valores são ligeiramente inferiores na morfologia com maior relação H/W. Entretanto, essa variação está em função do albedo de cada pavimento. Ao avaliar o pavimento vermelho, percebe-se que a TRM na morfologia M4 é mais desfavorável para as condições de conforto, provavelmente pela dificuldade na dissipação do calor retido na malha urbana em função do vento predominante.

Além disso, Johansson (2006) e Bourbia e Boucheriba (2010) afirmaram que no clima semi-árido, o aumento da relação H/W do cânion influencia na diminuição da temperatura do ar e da temperatura superficial, além de melhorar o conforto térmico na escala do pedestre. No contexto de climas tropicais, percebe-se que esse comportamento é válido, com exceção ao pavimento vermelho, em que a temperatura radiante média é inferior na morfologia com menor relação H/W.

Por fim, os resultados desta pesquisa, em escala reduzida, na configuração com menor relação H/W, demonstram que há uma redução média da TRM de até 3°C entre o pavimento vermelho e asfáltico. Além disso, percebe-se que o pavimento de concreto na coloração grafite apresenta uma temperatura radiante de aproximadamente 2,5°C superior ao pavimento asfáltico.

Na Tabela 4.6 está apresentada uma síntese dos dados de temperatura. Eles estão separados entre dia e noite, pois devido ao balanço energético nesses dois períodos, pode haver um comportamento térmico diferenciado no interior do cânion urbano.

Tabela 4.6. Tabela síntese da estabilidade térmica dos pavimentos.

DIA						
Tipo	Registro	TS Média – Termopares	TS 12:00 h – Termografia	TA20 – Nível do pedestre	TRM – Nível do Pedestre	Velocidade do Vento
M2 – H/W:0,33	↓	36,90 °C	44,13 °C	29,25 °C	36,79 °C	1,76 m.s ⁻²
	↑	38,94 °C	55,80 °C	30,94 °C	65,27 °C	
M4 – H/W:0,66	↓	36,21 °C	38,70 °C	29,56 °C	36,79 °C	2,04 m.s ⁻²
	↑	37,54 °C	50,80 °C	30,64 °C	41,65 °C	

NOITE				
Tipo	Registro	TS Média – Termopares	TA20 – Nível do pedestre	TRM – Nível do Pedestre
M2 – H/W:0,33	↓	25,26 °C	19,94 °C	22,81 °C
	↑	26,17 °C	21,85 °C	26,09 °C
M4 – H/W:0,66	↓	24,45 °C	21,16 °C	22,68 °C
	↑	25,37 °C	22,02 °C	24,30 °C

Legenda:

↑: Maior registro de temperatura
↓: Menor registro de temperatura
TRM: Temperatura radiante média
TS: Temperatura superficial
TA20: Temp. ar ao nível do pedestre
Pavimento: **ASF** **GRA** **VER** **CIN**

Fonte: o Autor (2019).

Este trabalho propôs avaliar quatro pavimentos com diferentes albedos inseridos em duas configurações urbanas distintas. Com base dos dados da Tabela 4.2, percebe-se que na morfologia M2, durante a noite, os menores registros de TRM foram identificados sobre os pavimentos de maior albedo (cinza). Além disso, ao se avaliar os dados do dia, os menores registros de TRM, ocorrem sobre o pavimento vermelho, em ambas as morfologias.

Entretanto, na configuração M4, durante o período noturno, os menores registros, tanto de temperatura superficial, quanto de TRM, ocorrem sobre o pavimento asfáltico. Esse fato pode ser explicado devido à maior facilidade de dissipação do calor do asfalto em relação ao concreto, aliado à canalização do fluxo de ar no interior dos cânions com maior relação H/W.

Capítulo 5

Considerações Finais

Este trabalho se propõe investigar, através de um modelo em escala reduzida, o comportamento térmico de diferentes colorações de pavimento intertravado de concreto em diferentes morfologias urbanas. Através da coleta de dados de temperatura superficial e temperatura do ar no topo do cânion, relacionando com as propriedades radiantes do pavimento.

A análise parcial de resultados da primeira fase é referente à estação da primavera, com um vento predominante a 90°, direção sul, incidindo de forma oblíqua, tendendo ao paralelismo às laterais do cânion. Dentre as principais contribuições preliminares da pesquisa, vale destacar:

- *Considerações para Refletância*

- O pavimento cinza apresenta a maior refletância solar em relação ao pavimento vermelho, grafite e asfalto. Entretanto, no estado saturado, na faixa infravermelho-próximo do espectro eletromagnético, o pavimento vermelho apresenta maior capacidade de reflexão em relação aos demais.

Este fato, inicialmente poderia justificar o uso do pavimento cinza para cidades com clima quente e seco; e o pavimento de concreto vermelho, para cidades com clima quente e exposto à condições de umidade.

- Na morfologia M2 a temperatura do ar aumenta, em função do aumento da refletância do pavimento. Em contrapartida, a temperatura do ar da configuração M4, cai em função da refletância da superfície. Essa queda da temperatura do ar é dada principalmente porque o vento que incide no topo do cânion é mais expressivo do que no interior da malha urbana.

- *Considerações para Temperaturas e Morfologia*

- Percebe-se que a temperatura média superficial e do ar são superiores na configuração urbana com menor relação H/W.

Por se tratar de um modelo em escala reduzida, o gradiente de temperatura apresenta pequenas variações ao longo da altura do cânion. Sendo assim, o topo do cânion na morfologia M2 é relativamente próximo à superfície. Portanto, o ponto de coleta recebe uma maior intensidade de onda longa emitida pelo pavimento aquecido quando comparado à morfologia M4.

- Em ambas as morfologias, tanto durante o dia, quanto à noite, a maior variação da temperatura média foi registrada entre o pavimento vermelho e o pavimento de referência.

- *Considerações para Temperatura Superficial*

- Nota-se que a temperatura superficial média do pavimento de concreto grafite, o qual apresenta uma refletância solar de 0,10 foi superior ao pavimento asfáltico, cuja refletância era de 0,06.

Nesta situação, foram registradas as mais altas temperaturas no material com maior refletância solar. Este fato pode ser explicado, devido à capacidade térmica dos materiais. Materiais com menor capacidade térmica, portanto maiores variações de temperatura.

- No período da noite e no início do dia, as temperaturas do pavimento grafite são superiores às do pavimento asfáltico, apresentando uma diferença de até 4 °C a mais que o pavimento de referência.
 - Percebe-se também que a variação de temperatura superficial do pavimento grafite em relação à do asfalto foi mais expressiva à noite. Além disso, o pavimento grafite apresentou as mais altas temperaturas em relação ao pavimento de referência.
 - A mais baixa temperatura superficial é registrada na morfologia com maior relação H/W.
- *Consideração para Temperatura do Ar*
- Na morfologia M2, nota-se que a temperatura do ar dos pavimentos de concreto é superior em relação ao pavimento asfáltico. Entretanto, essa diferença é mais expressiva durante à noite.
 - Há uma diferença no comportamento da temperatura do ar entre o interior e o topo do cânion, devido à rugosidade da malha.
 - As mais baixas temperaturas do ar no interior do cânion, ocorrem sobre o pavimento de concreto na coloração grafite;
 - A temperatura do ar próximo à superfície mais elevada, ocorre sobre o pavimento vermelho;
 - Quanto à forma urbana, a configuração M4 apresenta, durante o dia, os mais baixos registros na temperatura do ar ao nível do pedestre, e as mais elevadas temperaturas durante o noite.
- *Consideração para Temperatura Radiante Média*
- A TRM sobre os pavimentos é inferior na morfologia com maior relação H/W, com exceção ao pavimento vermelho.
 - A TRM sobre o pavimento vermelho é mais favorável para as condições de conforto na morfologia M2, provavelmente pela facilidade na dissipação do calor retido na malha urbana originados a partir do processo de reflexão.
 - O pavimento grafite possui a mais elevada TRM entre os 4 pavimentos, 2,5 °C superior ao pavimento construído em asfalto. Esse comportamento é mais crítico na morfologia M2.
 - Na morfologia M4, durante o período noturno, os menores registros, tanto de temperatura superficial, quanto de TRM, ocorrem sobre o pavimento asfáltico. Esse fato pode ser explicado devido à maior facilidade de dissipação do calor do asfalto em relação ao concreto, aliado à canalização do fluxo de ar no interior dos cânions com maior relação H/W.

Ambos os resultados levam à conclusão de que as morfologias com maior relação H/W, no contexto tropical, normalmente, associadas a pavimentos com menor calor específico e maiores refletâncias na faixa do infravermelho-próximo (NIR), possuem a TRM mais favorável às condições de conforto.

Como sugestão para trabalhos futuros, é recomendada a alteração da relação H/W do cânion, do albedo dos pavimentos, da escala e orientação geográfica do modelo. Além disso, o monitoramento

ou simulação da energia absorvida pelas fachadas em função da alteração do albedo do pavimento. Analisar o efeito de fachadas envidraçadas na temperatura do cânion, associado ao albedo da superfície. Por fim, avaliar a influência do albedo do pavimento nas condições de conforto térmico em espaços abertos.

Referências Bibliográficas

- ACHOUR-YOUNSI, S.; KHARRAT, F. Outdoor Thermal Comfort: impact of the geometry of an urban street canyon in a Mediterranean Subtropical Climate: case study Tunis, Tunisia. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, v. 216, p. 689-700, jan. 2016.
- AKBARI, H.; POMERANTZ, M.; TAHA, H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban áreas. *Solar Energy*, v.1, n. 70, p.295-310, 2001.
- ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Influência de diferentes superfícies na temperatura e no fluxo de energia: um ensaio experimental. *Ambiência Guarapuava (PR)*. v.8 n.1 p. 101 - 111 Jan./Abr. 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *E1980: Standard practice for calculating solar reflectance index of horizontal and low-sloped opaque surfaces*. West Conshohocken, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *G173-03: standard tables for reference solar spectral irradiances - direct normal and hemispherical on 37° tilted surface*. ASTM International, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- AYOADE, J. O. *Introdução à climatologia para os trópicos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1988.
- BADESCU, V. *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface Recent Advances*. Romania: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- BALARAS, C. A.; ARGIRIOU, A. A. Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings* 34, p.171-183. 2002.
- BARBUGLI, R. A. *Influência do ambiente construído na distribuição da temperatura do ar em Araraquara/SP*. 2004. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, 2004.
- BARREIRA, E.; FREITAS, V. P. Evaluation of buildings materials using infrared thermography. *Construction and Building Materials* 21, p.218-224. 2007.
- BOURBIA, F.; BOUCHERIBA, F. Impact of Street Design on Urban Microclimate for Semi-Arid Climate (Constantine). *Renewable Energy*, v. 35, p. 343-347, 2010.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. *Manual de Pavimentação*. 3.ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.
- BRITTO, J. F. B. Considerações sobre psicrometria. *Revista SBCC*. v.45, abr/2010, p.35-41, 2010.
- BROWN, G. Z.; DEKAY, M. *Sol, vento e luz: estratégias para o projeto de arquitetura*. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

- CALLISTER, W. D. Jr. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Michigan: John Wiley & Sons, 1997.
- Cambridge Systematics, Inc. *Cool Pavement Report*. Maryland: [s.n.], 2005.
- 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.
- CARVALHO, D. B. A. *Considerações sobre a utilização de pavimentos intertravados e betuminosos em áreas urbanas*. 2010. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.
- CEPAGRI. *Clima dos municípios paulistas*. Disponível em: https://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_172.html. Acesso em 09 mai.2018.
- CHANDLER, T. J. *The climate of London*. Hutchinson: London, 1965.
- CLIMATEMPO. *Climatologia de Engenheiro Coelho*. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/2290/engenheirocoelho-sp>. Acesso em 02 abr. 2019.
- COX, E. P. *Interação entre clima e superfície urbanizada: o caso da cidade de Várzea Grande/MT*. Cuiabá, 2008. 141p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Departamento de Física, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso.
- DAEE. *Banco de dados hidrológicos*. Disponível em: <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>. Acesso em 02 abr. 2019.
- DEBORTOLLI, M. A. *Estudo da utilização das células de Peltier com rastreamento de máxima potência para geração de energia elétrica*. 2016. 75p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado). Departamento de Engenharia Elétrica. Centro de Ciências Tecnológicas. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2016.
- DOULOS, L., SANTAMOURIS, M., AND LIVADA, I. Passive Cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*. v.77, n.2, p.231–249, 2004.
- DORNELLES, K. A. *Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA*. 2008. 160p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1984.
- EPA. *Reducing urban heat islands: compendium of strategies – cool pavement*. Washington, DC: US EPA, 2008.
- _____. *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems - Volume IV: Meteorological Measurements*. Washington, DC: US EPA, 2008.

- ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. *Urban Microclimate: Designing the Spaces between Buildings*. London: Earthscan, 2010.
- FERREIRA, F. L.; PRADO, R. T. A. *Medição do albedo e análise da sua influência na temperatura superficial dos materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo 351 – Serie BT-PCC. São Paulo, 2003.
- FERRUZZI, Y.; GNOATTO, E.; RICIERI, R. P.; *et al.* The instrument of measuring the speed of the wind. *In: Encontro de Energia do Meio Rural, 5.*, 2004, Campinas.
- GAGGE, A. P.; FOBELETS, A. P.; BERGLUND, L. G. I. A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans*, v.92, n.2B, p.709-731.
- GAITANI, N., SPANOU, A., SALIARI, M., SYNNEFA, A., VASSILAKOPOULOU, K., PAPADOPOULOU, K., ... LAGOUDAKI, A. Improving the microclimate in urban areas: a case study in the centre of Athens. *Building Services Engineering Research and Technology*, v.32, n.1, p.53–71, 2011.
- GARTLAND, L. *Heat island.: understanding and mitigating heat in urban áreas*. Londres: Earthscan Press, 2008.
- GARTLAND, L. *Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas*. Tradução: 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010.
- GOLDEN, J.S.; KALOUSH, K.E. Mesoscale and microscale evaluation of surface pavement impacts on the urban heat island effects. *International Journal of Pavement Engineering*, v.7, n.1, p.37-52, 2006.
- 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.
- HILBERSEIMER, L. *The New City: Principles of planning*. Chicago: P. Theobald, 1944.
- IBGE. *Área territorial oficial*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/engenheiro-coelho/panorama>. Acesso em 02 abr.2019.
- INCROPERA, F. P. E DEWITT, D. P. *Fundamentos da transferência de calor e massa*. 5° edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Thermal environments instruments and methods for measuring physical quantities*. ISO 7726:1998. Genebre: International Organization for Standardization, 1985.
- JOHANSSON, E. Influence of Urban Geometry on Outdoor Thermal Comfort in a Hot Dry Climate: a study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, v. 41, n. 10, p. 1326-1338, 2006.

- 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.
- KOLOKOTRONI, M.; GIRIDHARAN, R. Urban heat island. Intensity in London: Na investigation of the impact. *Solar Energy*, v.82, p.989-998, 2008.
- KOWALSKI, L. F.; MASIERO, E. Análise termográfica e por termopares da temperatura superficial de pavimentos urbanos. In: *14ª Jornada Urbanere e 2ª Jornada Cires, Congresso Internacional Sustentabilidade Urbana*, v. 2, pp. 1145-1157, 2018
- KRATZER, P. A. *Das Stadtklima*. Braunschweig: Vieweg, 1956.
- KRISTENSEN, L. *Cups, props and vanes, Technical Report R-766(EN)*. Denmark: Risø National Laboratory, 1994.
- KRÜGER, E. L.; GONZALEZ, D. E. G. Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 89-106, jul./set.2016.
- KRÜGER, E.L.; PEARLMUTTER, D. Estudo realizado em Israel: Uso de modelo físico na análise do efeito da evapotranspiração em arranjo urbano sob condições desérticas. *Fórum Patrimônio*, Belo Horizonte, v.4, n.1, p.53-68, 2011.
- 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.
- LANDSBERG, H. E. *The urban climate*. Academic press: New York, 1981.
- LEMOS, J. S. Espacialização da ilha de calor do aglomerado urbano da região metropolitana de Curitiba (AU-RMC) em agosto de 2006 a partir de termografia de superfície. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, XV, 2011. **Anais**. Curitiba: INPE, 2011. P. 4271-4278.
- LEVINSON, R.; AKBARI, H. *Effects of composition and exposure on the solar reflectance of Portland cement concrete*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory; 2001. p. 61.
- LI, H. *Pavement materials for heat island mitigation: design and management strategies*. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2016.
- LI, H. HARVEY, J. T, HOLLAND, T. J AND KAYHANINAN, M. The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management. *Environmental Research Letters*, v.1, n.08, p.1-14, 2013.
- LOSS, C. F. *Aplicação do método de apoio multicritério à decisão na escolha de pavimentos urbanos: estudo de caso em São Carlos/SP*. São Carlos, 2018. 131 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal de São Carlos.

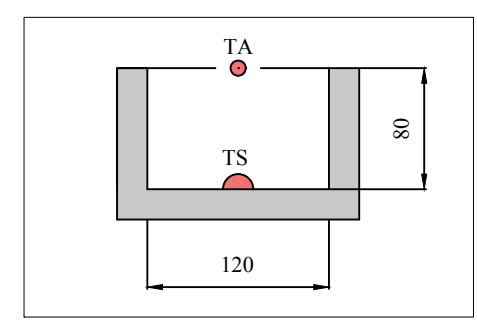
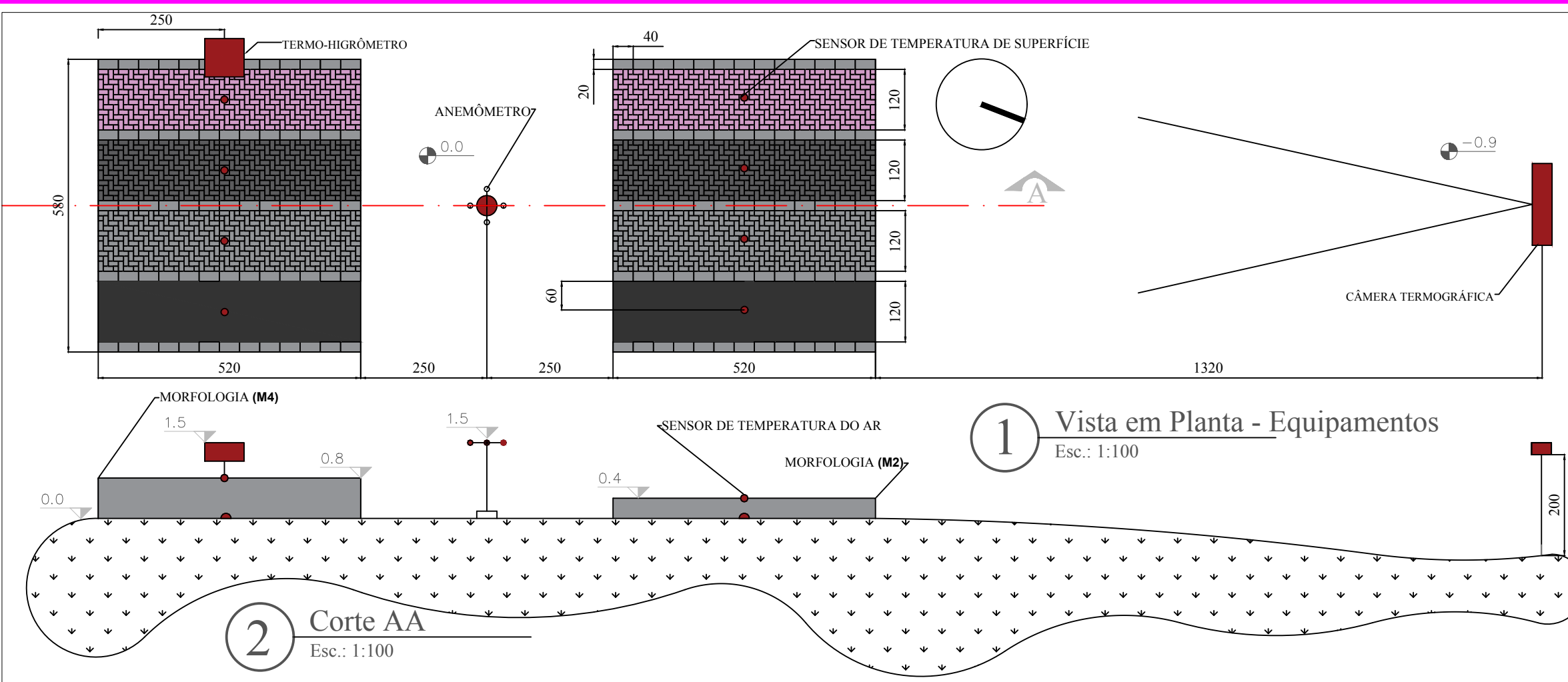
- MARINOSKI, D. L.; DE SOUZA, G. T.; SANGOI, J. M.; LAMBERTS, R. Utilização de imagens em infravermelho para análise térmica de componentes construtivos. In: XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2010, Canela. *Anais do XIII ENTAC*. Canela: ANTAC, 2010. p.1-10.
- MASIERO, E. *Análise da influência de corpos d'água em microclimas urbanos: estudo de caso em São José do Rio Preto, SP*. 2014. 143 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.
- MINELLA, F.C.O.; ROSSI, F. A.; KRÜGER, E.L. Análise do efeito diurno do fator de visão do céu no microclima e nos níveis de conforto térmico em ruas de pedestres em Curitiba. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v.11, n.1, p. 123-143, jan/mar.2011.
- Ministry to promote water-retentive pavement for heat island control*. Disponível em: <http://www.japanfs.org/en/pages/025750.html>. Acesso em 10 mai. 2018..
- MONTEIRO, C.A. F. (org) *et al. Clima urbano*. São Paulo: Contexto, 2003.
- MONTEIRO, J. R. V.; LEDER, S. M. A aplicação da termografia como ferramenta de investigação térmica no espaço urbano. In: VI Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2011, Vitória. *Anais do VI ELECS*. Vitória: ANTAC, 2011. p. 01-10.
- MUNIZ-GÄAL, L. P.; PEZZUTO, C.C.; CARVALHO, M. F. H. de; MOTA, L. T. M. Eficiência térmica de materiais de cobertura. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v.18, n.1, p.503-518, jan./mar.2018.
- NAKATA-OSAKI, C. M. *Adaptação de um modelo simplificado para verificação da influência da geometria urbana na formação de ilha de calor noturna*. 2016. 132p. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana). Departamento de Engenharia Civil. Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.
- OCAÑA, S. M.; GUERREO, I. C.; REQUENA, I. G. Thermographic survey of two rural buildings in Spain. *Energy and Buildings* 36, p.515-523. 2004.
- OKE, T. R. *Boundary layer climates*. Londres: Methuen & Co, 1978.
- OKE, T. R. *Boundary layer climates*. 2.ed. Londres: Taylor and Francis, 1987.
- OKE, T. R. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, v. 1, n. 1/4, p. 237-254, 1981.
- OKE, T. R. The urban energy balance. *Progress in Physical geography*, v. 12, n. 4, p. 471-508, 1988.
- OKE, T. R.; *et al. Urban climates*. Cambridge University Press, 2017.
- OLGYAY, V. *Arquitectura y Clima – Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas*. Editorial Gustavo Gili: Barcelona, 1963.
- ONU. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. New York, 2014.

- 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.
- PEREIRA, C. D.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. *et al.* *Guia de medição e cálculo para refletância e absorvância solar em superfícies opacas (v.1)*. Florianópolis: UFSC, 2015.
- POMERANTZ, M.; *et.al.* *Examples of cooler reflective streets for urban heat island mitigation: Portland cement concrete and chip seals*. Berkley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- POMERANTZ, M. *et al.* *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.
- PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, v. 37, n. 4, 2005. p. 295–300, 2005.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE ENGENHEIRO COELHO. *Lei complementar 015/2016*. Engenheiro Coelho: PMEC, 2016.
- QIN, Y. Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements. *Energy and Buildings*. n.96, p.86–94, 2015.
- 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.
- ROMEO, C.; ZINZI, M. Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study. *Energy and Buildings*, v.67, 2013, p.647-657, 2013.
- ROSSI, F. A.; KRÜGER, E. L. Análise da variação de temperaturas locais em função das características de ocupação do solo em Curitiba. *RA'E GA*, v.1, n.10, p.93-105, 2015.
- SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban build environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, v. 1, n. 85, p.3085-3102, 2011.
- SANTAMOURIS, M.; GAITANI, N.; SPANOU, A.; SALIARI, M.; GIANNOPOULOU, K.; VASILAKOPOULOU, K.; KARDOMATEAS, T. Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the flisvos project. *Building and Environment*, n.53, p.128–136, 2012.
- SANTAMOURIS, M.; ASSIMAKOPOULOS, D.N (Eds.). *Passive cooling of buildings*. London: James and James Science Publishers, 1997.
- SANTAMOURIS, M.; PAPANIKOLAOU, N.; GEORGAKIS, C. *Study on the ambient and surface temperature in Omonoia Square, Athens, Greece. International Report, Group Building Environmental Studeis, Physics Department*. Athens, Greece: University of Athens, 1998.

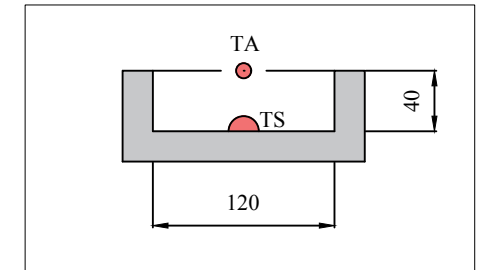
- SANTAMOURIS, M.; XIRA, F.; GAITANI, N.; SPANOU, A.; SALIARI, M.; VASSILAKOPOULOU, K. Improving the Microclimate in a Dense Urban Area Using Experimental and Theoretical Techniques. – The case of Marousi, Athens. *Int. Journal of Ventilation*, v.11, n.1, p.1–16, 2012b.
- SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTSA, D (Eds.) *Urban climate mitigation techniques*. New York: Routledge, 2016.
- SEIXAS, G. T. C. *Climatologia aplicada à arquitetura: investigação experimental sobre a distribuição de temperaturas internas em duas células de teste*. 2015. 126p. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- SENÇO, W. de. *Manual de técnicas de pavimentação – volume 1*. 2.ed. São Paulo: Pini, 2007.
- SOUZA, L. C. L. DE; TENTE, C. M.; GIUNTA, M. B.; NAKATA, C. M. Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 155-167, out./dez. 2010.
- STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.1, n.93, p.1879-1900, 2012.
- SYNNEFA, A. *et al.* Measurement of optical properties and thermal performance of coloured thin layer asphalt samples and evaluation of their impact on the urban environment. *In: The second international conference on countermeasures to urban heat islands*. California, US: Berkeley; 2009.
- USGBC - U.S. Green Building Council. *Glossary*. Disponível em: <https://www.usgbc.org/glossary/term/5590>. Acesso em: 24. Mai. 2018.
- WONG, C. W. *et al.* A study on the effectiveness of heat mitigating pavement coatings in Singapore. *In: The second international conference on countermeasures to urban heat islands*. California, U.S: Berkeley; 2009.

Anexos

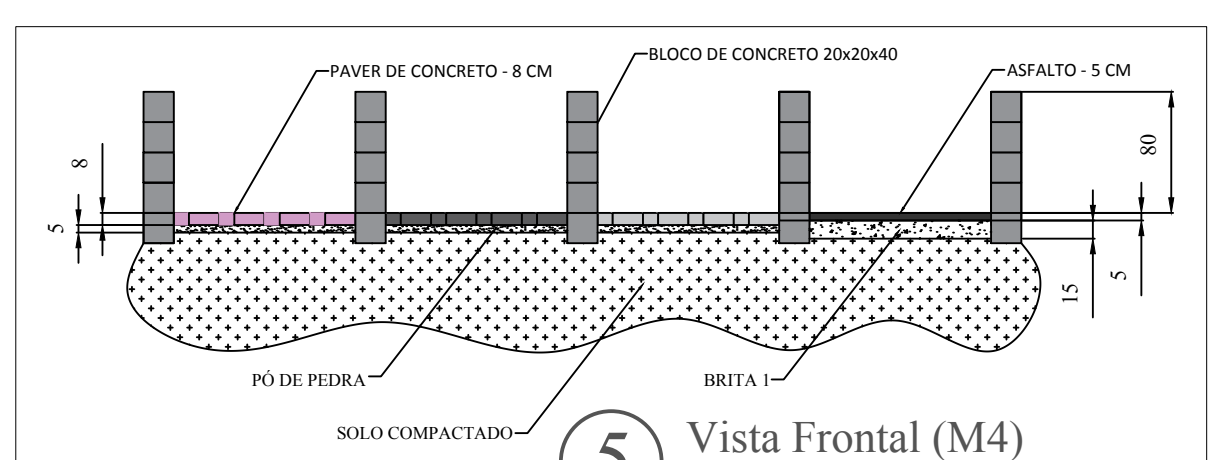
- Anexo 1 – Plantas do campo experimental.
- Anexo 2 – Ficha de controle de compactação.
- Anexo 3 – Ficha de calibração dos equipamentos.
- Anexo 4 – Sombreamento dos cânions através da termografia.
- Anexo 5 – Aspectos metodológicos e instrumentais da pesquisa



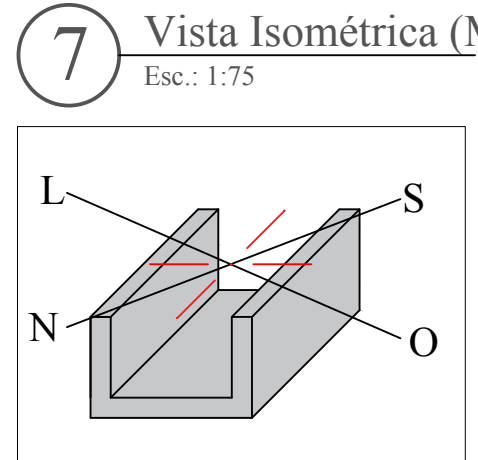
3 Cânion (M4)
Esc.: 1:50



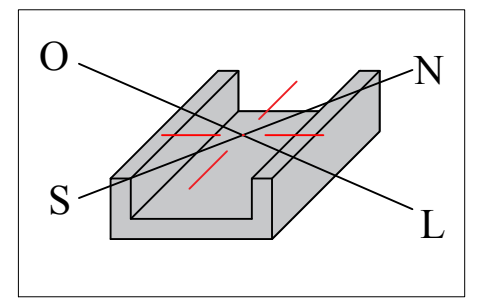
4 Cânion (M2)
Esc.: 1:50



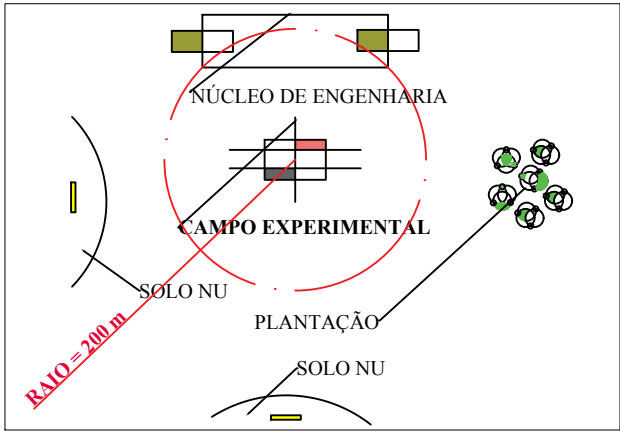
5 Vista Frontal (M4)
Esc.: 1:50



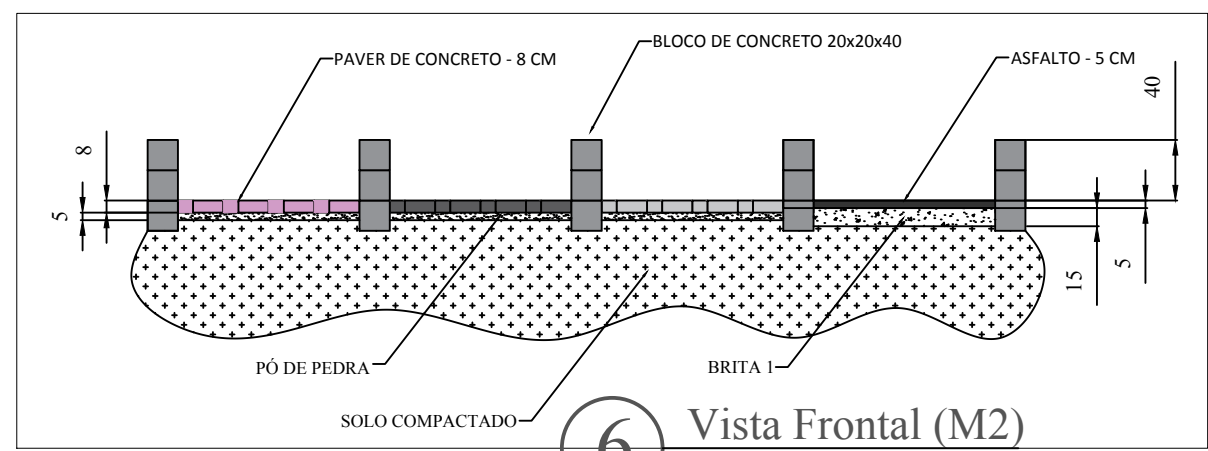
7 Vista Isométrica (M4)
Esc.: 1:75



8 Vista Isométrica (M2)
Esc.: 1:75



9 Planta de Situação
Esc.: Sem escala



6 Vista Frontal (M2)
Esc.: 1:50

Legenda

- M2 - Morfologia (H/W=0,33)
- M4 - Morfologia (H/W=0,66)
- TA - Temperatura do Ar
- TS - Temperatura de Superfície

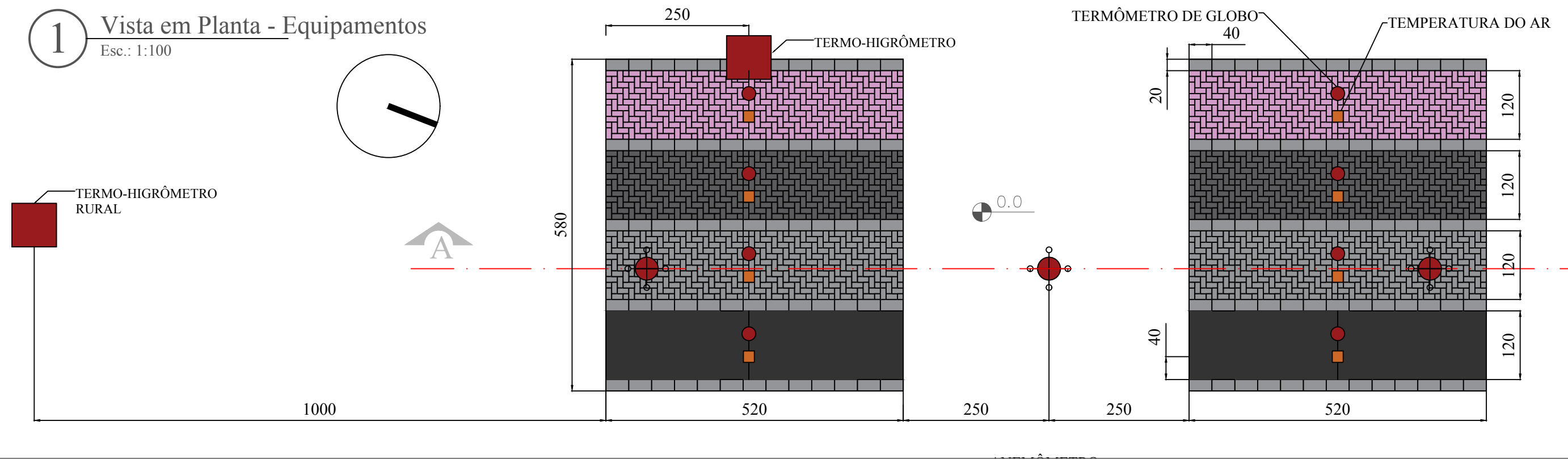
CAMPO EXPERIMENTAL PARA ESTUDOS EM TÉRMICA (CEET)			
	Descrição: Modelo em escala para simulação térmica de pavimentos urbanos		
	Área do terreno: 900 m ²	Escalas: Indicadas	Folha: 01 / 01
	Arquivo Digital: 01-CEET-000-05-19	Unidades: cm	
	Data: 02/05/2019	Tipo de Projeto: Arquitetônico	

Este projeto é propriedade intelectual de seus idealizadores, sendo utilizado para fins didáticos. Portanto, é vetada sua utilização, em parte ou como um todo, para outros fins sem a devida autorização de seus autores e/ou orientadora.

Projeto elaborado em ACAD - Educacional

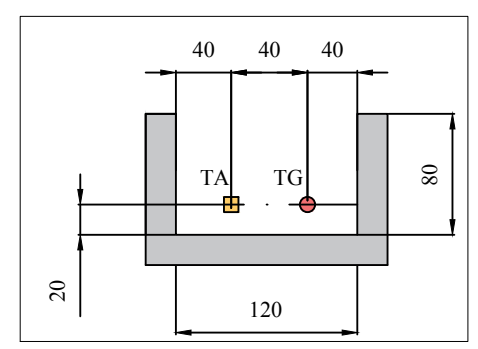
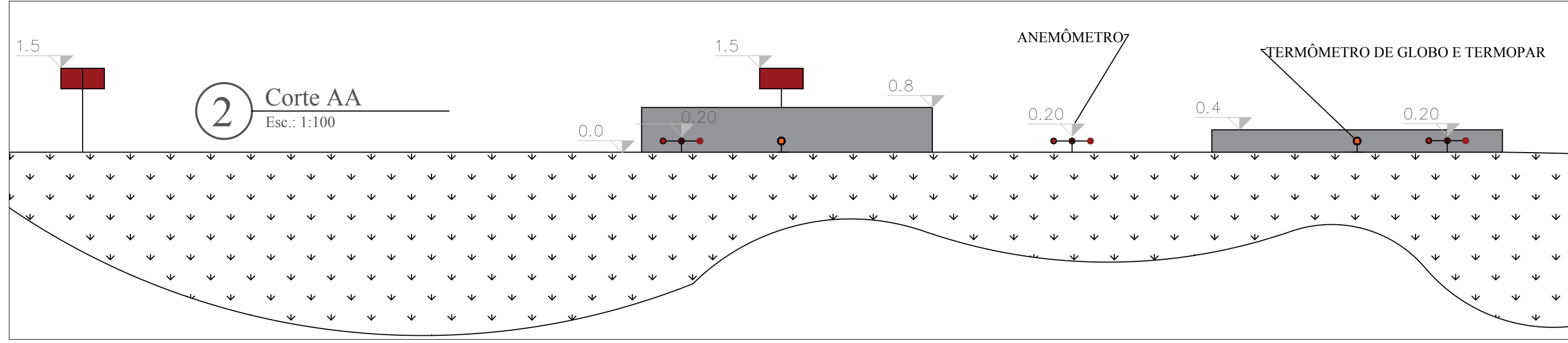
1 Vista em Planta - Equipamentos

Esc.: 1:100

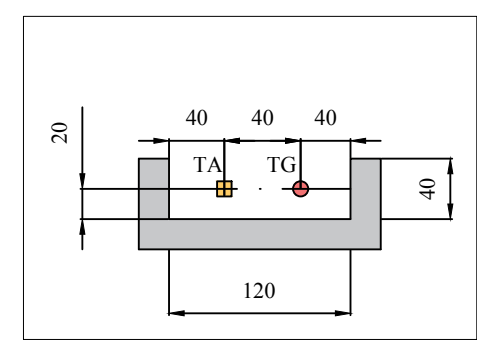


2 Corte AA

Esc.: 1:100



3 Cânion (M4)
Esc.: 1:50



4 Cânion (M2)
Esc.: 1:50

Legenda

- M2 - Morfologia (H/W=0,33)
- M4 - Morfologia (H/W=0,66)
- TA - Temperatura do Ar
- TG - Temperatura de Globo

CAMPO EXPERIMENTAL PARA ESTUDOS EM TÉRMICA (CEET)

	Descrição: Modelo em escala para simulação térmica de pavimentos urbanos		
	Área do terreno: 900 m ²	Escalas: Indicadas	Folha: 01 / 01
	Arquivo Digital: 01-CEET-000-05-19	Unidades: cm	
	Data: 02/05/2019	Tipo de Projeto: Arquitetônico	

Este projeto é propriedade intelectual de seus idealizadores, sendo utilizado para fins didáticos. Portanto, é vetada sua utilização, em parte ou como um todo, para outros fins sem a devida autorização de seus autores e/ou orientadora.

Projeto elaborado em ACAD - Educacional

ENSAIO DE PROCTOR

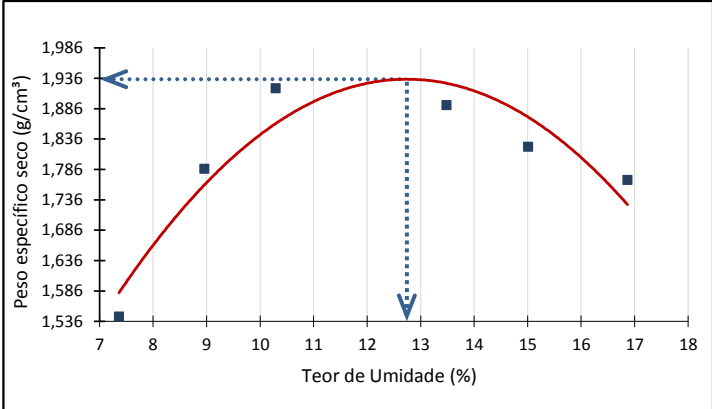
RUA / CIDADE			MATERIAL		
Campo Experimental					
FURO	CAMADA	PROFUNDIDADE	LABORATORISTA	OPERADOR	
1	1,00	70 cm	Kowalski	-	
VOLUME DO CP (cm ³)		MASSA DO CP (g)	DATA		
1001,38		2360	11 de setembro de 2018		

TEOR DE UMIDADE ÓTIMO

NBR 7182/2016

CÁPSULA No.	Peso da capsula e solo úmido	Peso da capsula e solo seco	Peso da capsula	Peso da água	Peso do solo seco	Porcentagem de água	Massa do CP e Solo(g)	Peso específico seco
32	15,87	15,44	9,60	0,43	5,84	7,36	4020,00	1,54
27	15,65	15,15	9,57	0,50	5,58	8,96	4310,00	1,79
19	17,55	16,77	9,19	0,78	7,58	10,29	4480,00	1,92
38	29,07	26,74	9,46	2,33	17,28	13,48	4510,00	1,89
22	19,00	17,73	9,27	1,27	8,46	15,01	4460,00	1,82
05	22,49	20,66	9,81	1,83	10,85	16,87	4430,00	1,77

γ_d máx	1,9348
ω ótimo	12,7431



Obs.	Umidade do solo	10%
	Umidade ótima	12,70%
	γ	1,78 g/cm ³
	γ_d	1,62 g/cm ³
	GC	85%

A2. CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

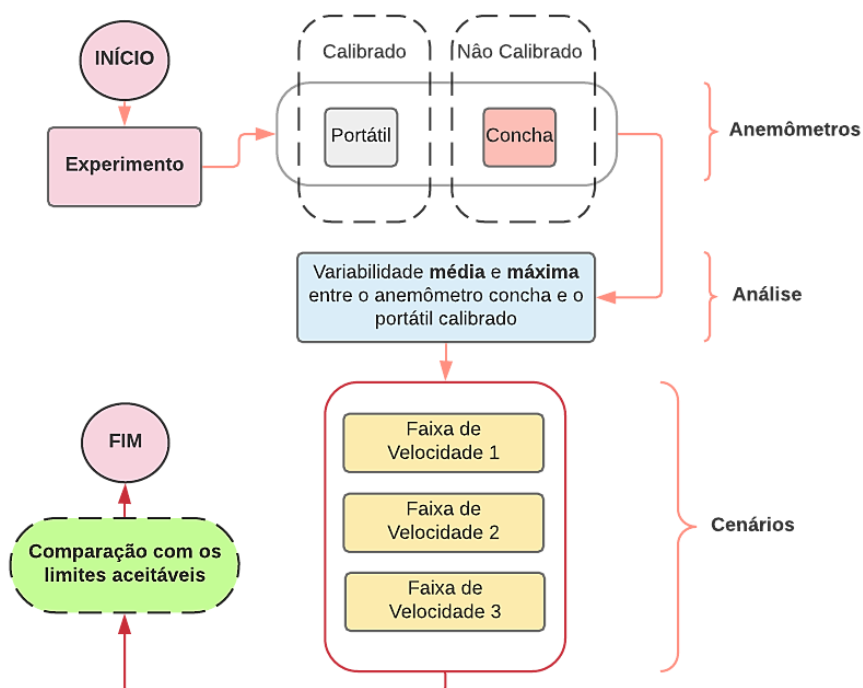
A calibração dos equipamentos da pesquisa foi realizada com o anemômetro e os sensores de temperatura. A relação e as especificações técnicas dos equipamentos de referência os quais já estavam calibrados está apresentada no Quadro 1.

Quadro 1. Equipamentos calibrados

VARIÁVEL	EQUIPAMENTO	MARCA E MODELO	PRECISÃO
<i>Velocidade do vento</i>	Anemômetro	Instrutherm/ AD-250	$< 20 \text{ m/s} \rightarrow \pm 3\%$
<i>Temperatura</i>	Termopar tipo Sonda	Instrutherm/ THDL-400	$\pm 3,5\%$
	Termopar tipo T	Minipa / ET1110-A	$\pm 1,0\%$
	Termômetro clínico	Incoterm/Mercúrio	-

Fonte: Autor (2019).

A2.1. Anemômetro



Para a calibração do anemômetro foram simuladas três faixas de velocidade de vento, utilizando um ventilador industrial com 3 velocidades e o túnel de vento, conforme apresentado na Figura 1.

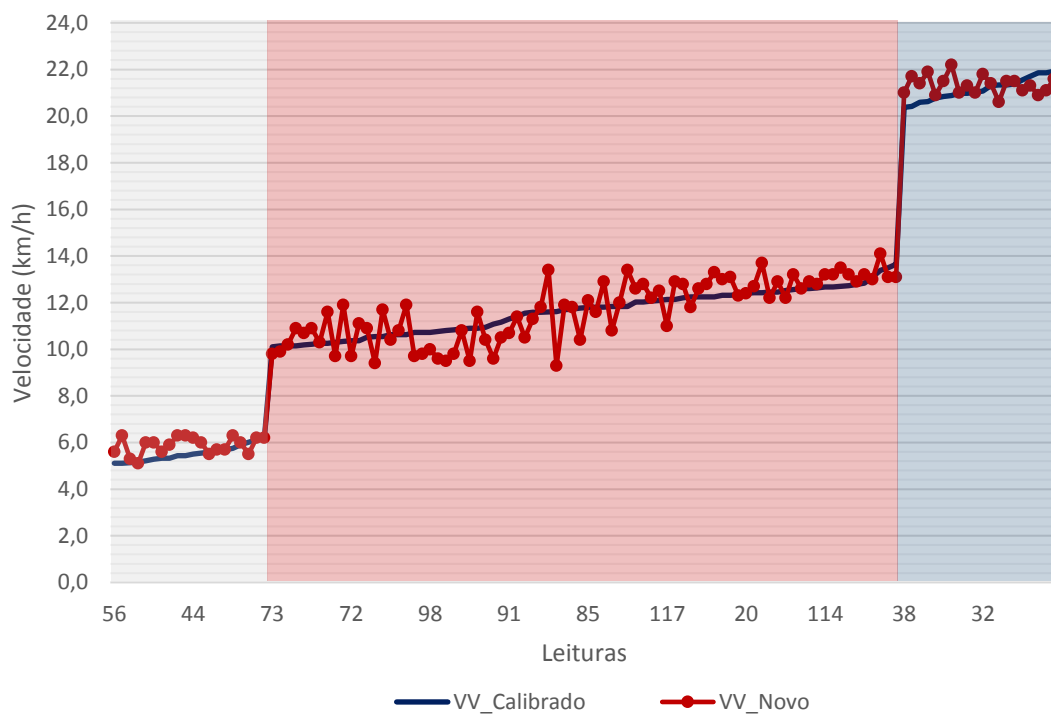
Figura 1. Equipamentos utilizados para simulação de vento.



Fonte: Autor (2019).

Os registros de velocidade tanto do equipamento novo, quando do anemômetro certificado estão apresentadas nas Figura 2.

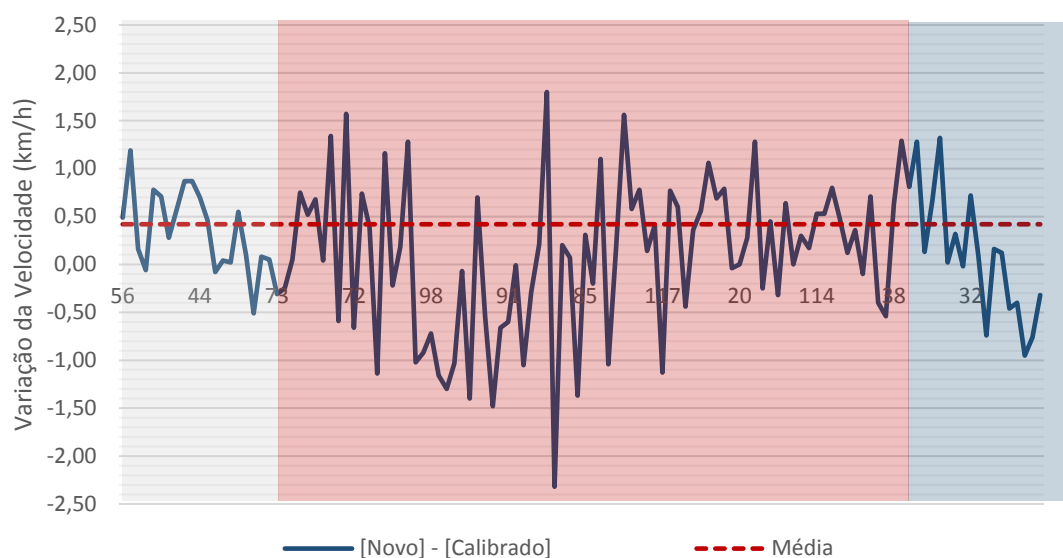
Figura 2. Velocidade registrada pelo anemômetro novo e pelo anemômetro calibrado



Fonte: Autor (2019).

A representação gráfica com a variação da velocidade do anemômetro novo em relação ao calibrado está apresentado na Figura 3.

Figura 3. Variação da velocidade do anemômetro novo em relação ao calibrado.



Fonte: Autor (2019).

As faixas de velocidade utilizadas no ensaio e as variações de velocidade entre o anemômetro novo e o equipamento calibrado estão apresentados na Tabela 1.

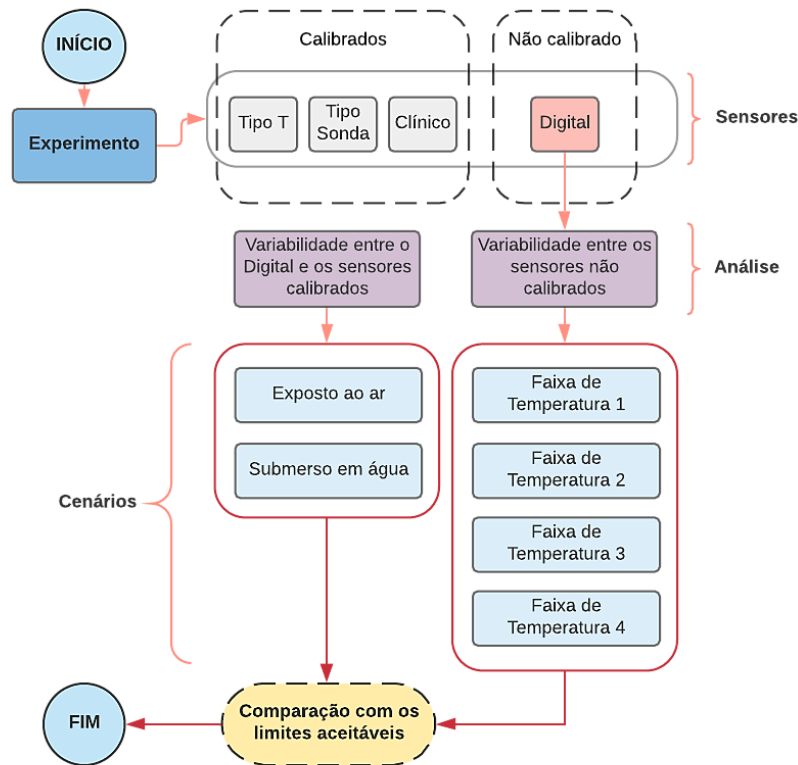
Tabela 1. Variação da velocidade entre o anemômetro novo e o calibrado

FAIXA DE VELOCIDADE	MÁXIMA VARIAÇÃO	MÉDIA DE VARIAÇÃO	CRITÉRIO ACEITAÇÃO
Faixa 1 - (5 -7 km/h)	1,19 km/h – 0,36 m/s	0,36 km/h – 0,10 m/s	± 0,2 m/s + 5%
Faixa 2- (10 -14 km/h)	2,32 km/h – 0,06 m/s	0,06 km/h – 0,02 m/s	± 0,2 m/s + 5%
Faixa 3- (20 -22 km/h)	1,32 km/h – 0,20 m/s	0,20 km/h – 0,05 m/s	± 0,2 m/s + 5%

Fonte: Autor (2019).

Percebe-se que todas as faixas de velocidade apresentam variações de velocidade dentro dos critérios de aceitação da *Environmental Protection Agency (EPA)*.

A2.1. Sensores de Temperatura



Para o processo de calibração dos sensores de temperatura foram utilizados os seguintes materiais: termopar do tipo sonda, termopar do tipo T e termômetro clínico. Todos foram submetidos à temperatura ambiente e submersos em água com temperatura controlada em 4 faixas, variando de 10 a 50°C, conforme na Figura 4.

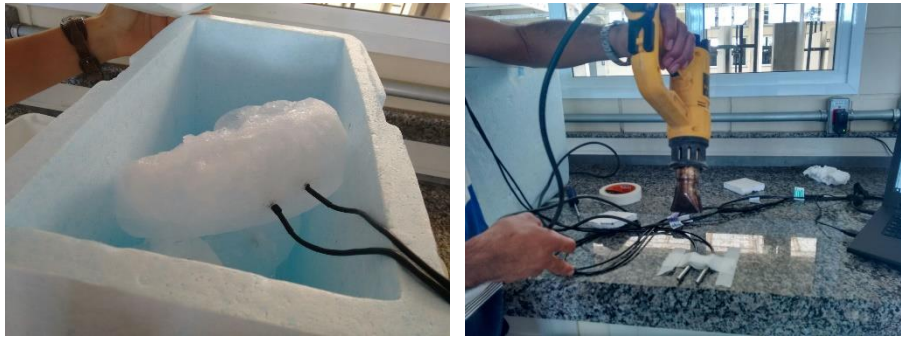
Figura 4. Equipamentos submetidos ao banho maria – Sonda, T e Digital.



Fonte: Autor (2019).

Também foi verificada a variabilidade dos sensores quando submetidos aos extremos de temperatura, no gelo e sob o calor de um soprador mecânico, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5. Equipamentos submetidos aos extremos de temperatura

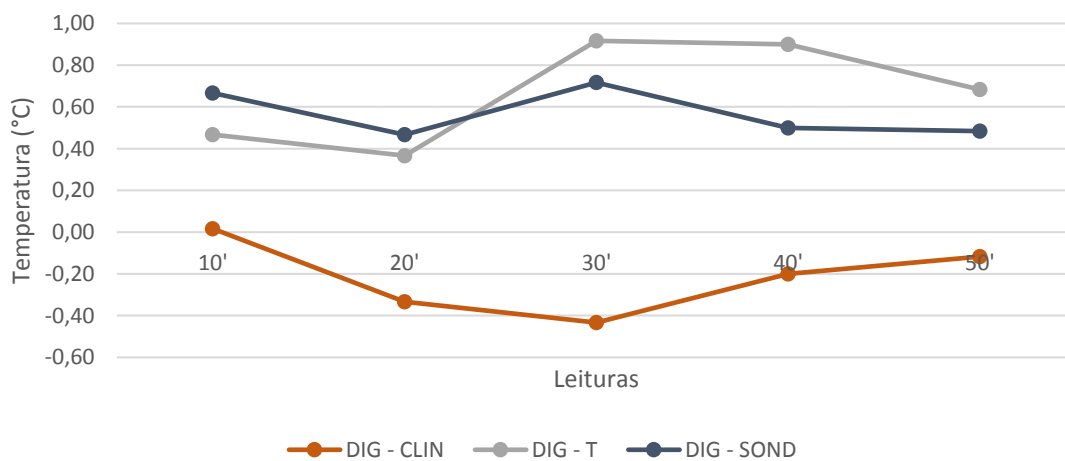


Fonte: Autor (2019).

- *Temperatura do Ar (25°C)*

Inicialmente os sensores de temperatura sem calibração (DIG) foram instalados juntamente com os termopares do tipo T e tipo sonda, previamente calibrados em um cenário com temperatura ambiente à 25°C. Os resultados com a diferença entre o termômetro sem calibração e os demais estão apresentados na Figura 6.

Figura 6. Diferença de temperatura do ar entre o termômetro digital (DIG) e equipamentos calibrados na Faixa de 25°C.



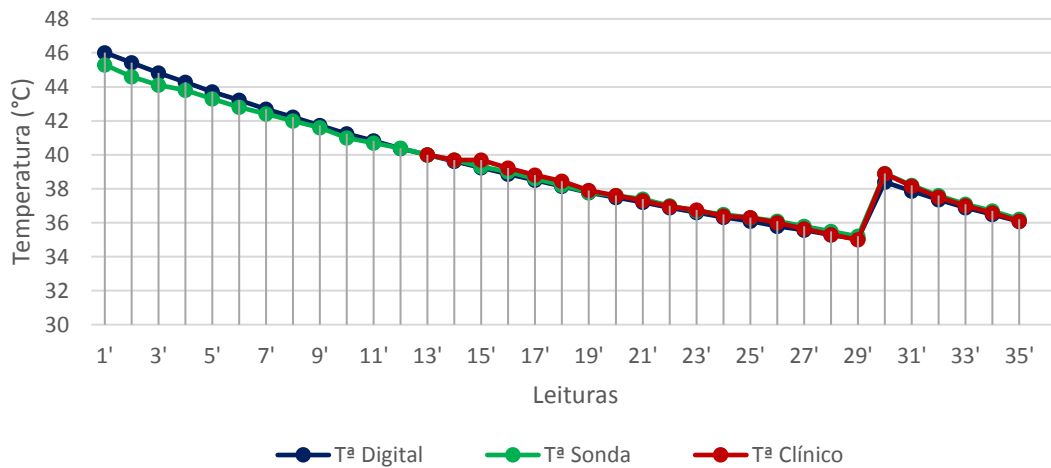
Fonte: Autor (2019).

Durante o procedimento para calibração, os sensores que coletaram a temperatura do ar estavam expostos ao vento, o que explica as variações de até 0,90 °C entre o termopar digital e termopar do tipo T calibrado previamente.

- *Temperatura da Água (37-45 °C)*

A fim de não sofrer influência do fluxo de ar, os sensores foram colocados submersos em água com temperatura controlada por um termostato do banho-maria, conforme aprestado na Figura 7.

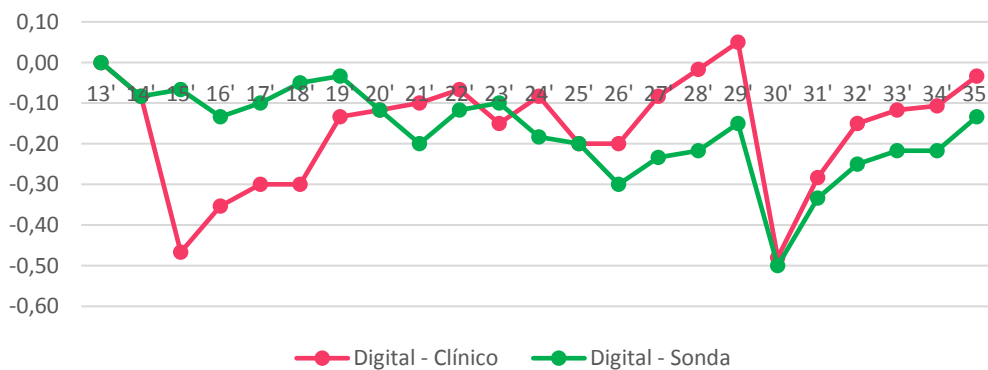
Figura 7. Temperatura da água utilizando o termômetro digital (DIG) e os sensores calibrados na Faixa de 35 - 47°C.



Fonte: Autor (2019).

Percebe-se que durante toda a faixa, a variação de temperatura entre o termômetro digital e os termômetros calibrados não excederam 0,5°C, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8. Diferença de temperatura da água entre o termômetro digital (DIG) e equipamentos calibrados na Faixa de 35 - 47°C.



Fonte: Autor (2019).

- *Temperatura da Água entre os Sensores Não Calibrados (37-45 °C)*

A fim de analisar a variabilidade entre a temperatura da água registrada por 12 sensores não calibrados, o experimento foi dividido em 5 faixas e temperatura, conforme apresentado na Tabela 2.

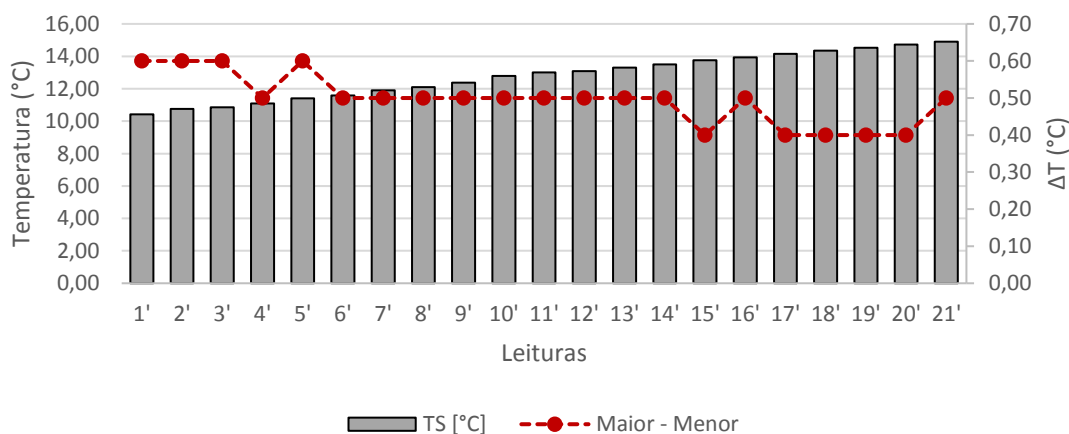
Tabela 2. Variação de temperatura entre os termopares não calibrados

FAIXA DE TEMPERATURA	MÁXIMA VARIAÇÃO	MÉDIA DE VARIAÇÃO	CRITÉRIO ACEITAÇÃO
Faixa 1 - (10 -15 °C)	0,60 °C	0,50 °C	± 0,50 °C
Faixa 2- (25 °C)	0,40 °C	0,31 °C	± 0,50 °C
Faixa 3- (35 -40 °C)	0,70 °C	0,54 °C	± 0,50 °C
Faixa 4- (25 -50 °C)	0,40 °C	0,31 °C	± 0,50 °C

Fonte: Autor (2019).

Percebe-se que para cada faixa de temperatura as máximas variações registradas e a média atendem os critérios de aceitação. A Figura 9 apresenta a variação da temperatura entre os sensores submersos em água dentro de uma faixa variando de 10-15°C.

Figura 9. Faixa 1 (10-15° C) – Variação da temperatura entre os sensores submersos não calibrados.



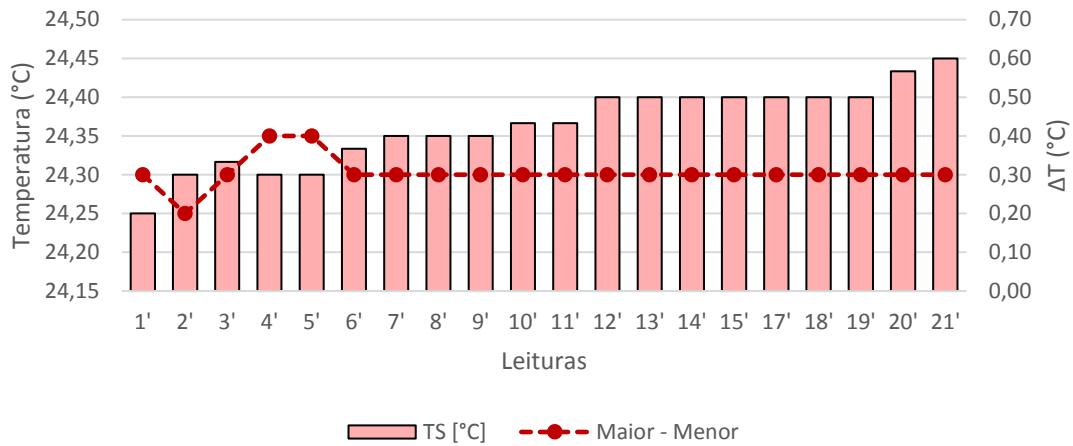
Fonte: Autor (2019).

Ao analisar a Figura 9, percebe-se que a variabilidade entre os sensores em um primeiro estágio é de 0,6°C. Em seguida, há uma tendência em decrescer este valor,

pulando para um patamar de $0,5^{\circ}\text{C}$. Após uma constância, ao atingir as maiores temperaturas da faixa, a variação reduz para $0,4^{\circ}\text{C}$ aproximadamente.

A Figura 10 apresenta a variação da temperatura entre os sensores submersos em água à temperatura ambiente 25°C .

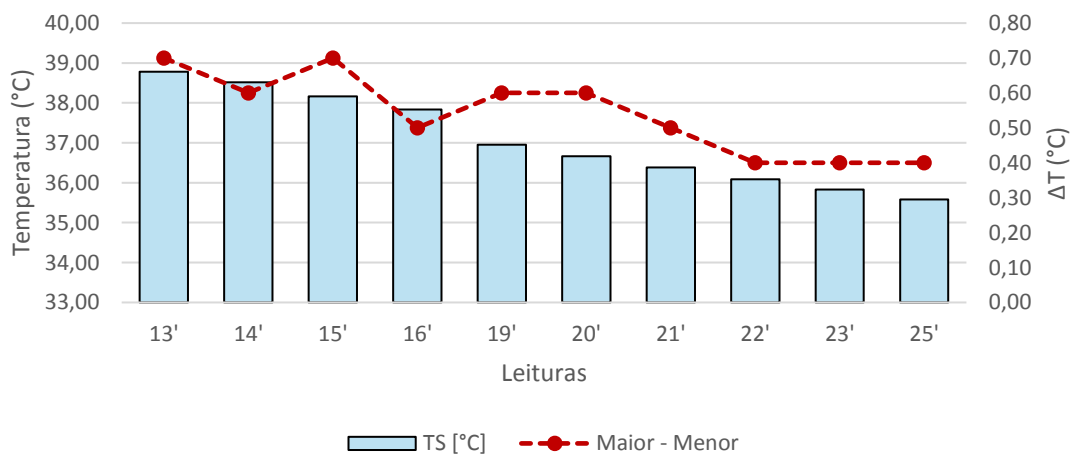
Figura 10. Faixa 2 (25°C) – Variação da temperatura entre os sensores submersos não calibrados.



Fonte: Autor (2019).

Percebe-se que há uma variabilidade de $0,4^{\circ}\text{C}$ nas temperaturas iniciais da faixa analisada. Entretanto, próximo à $24,3^{\circ}\text{C}$ nota-se uma estabilização da variação de temperatura em $0,3^{\circ}\text{C}$.

Figura 11. Faixa 3 ($35-40^{\circ}\text{C}$) – Variação da temperatura entre os sensores submersos não calibrados.

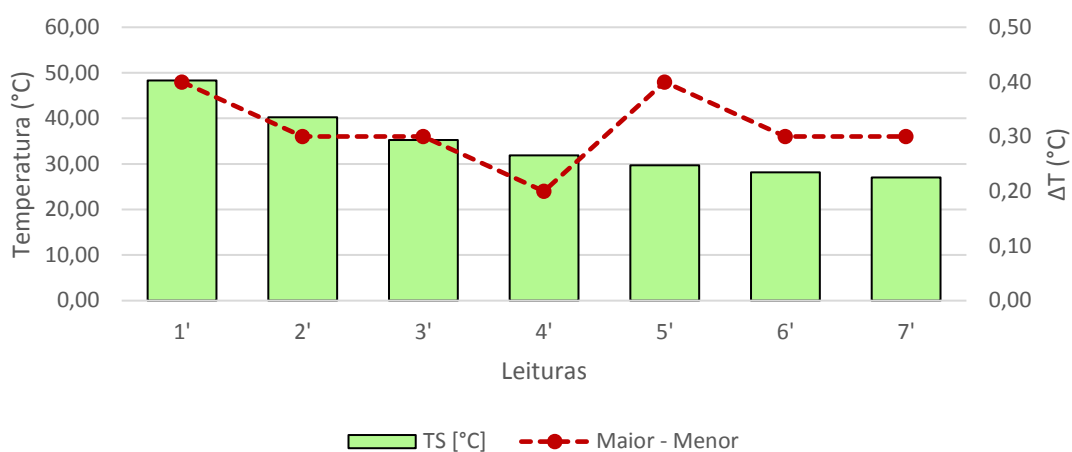


Fonte: Autor (2019).

Na Figura 11, a qual contempla a faixa de 35 a 40°C, percebe-se que a variabilidade dos sensores cai proporcionalmente à queda da temperatura. Podendo variar instantaneamente de 0,7°C à 0,4°C.

Por fim, em um teste contemplando a faixa de 25 a 50°C, a máxima variação entre os sensores registrada foi de 0,4°C, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12. Faixa 4 (25-50° C) – Variação da temperatura entre os sensores submersos não calibrados.



Fonte: Autor (2019).

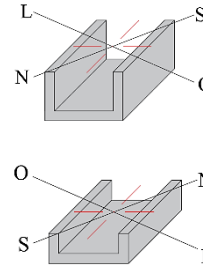
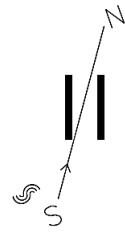
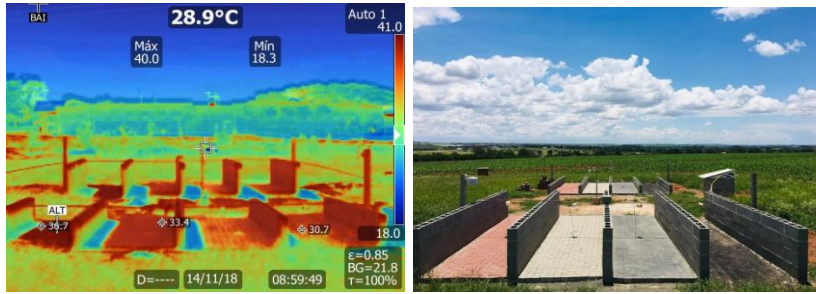
▪ *Resumo da Calibração*

Por fim, pode-se perceber que ambos os equipamentos, tanto o anemômetro quanto os termopares apresentam uma variação aceitável quando comparados aos valores registrados por equipamentos calibrados. Na Tabela 3 estão apresentados os valores com a máxima e a média variação entre os sensores.

Tabela 3. Resumo da calibração

EQUIPAMENTO	MÁXIMA VARIACÃO	MÉDIA DE VARIACÃO	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO - PAMS
<i>Anemômetro</i>	2,32 km/h – 0,64 m/s	0,21 km/h – 0,06 m/s	± 0,2 m/s + 5%
<i>Sensor de temperatura</i>	0,50 °C	0,25 °C	± 0,50 °C

Fonte: Autor (2019).



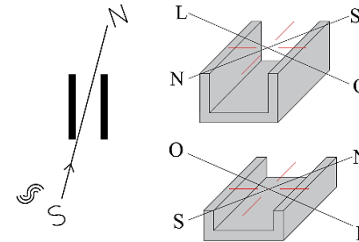
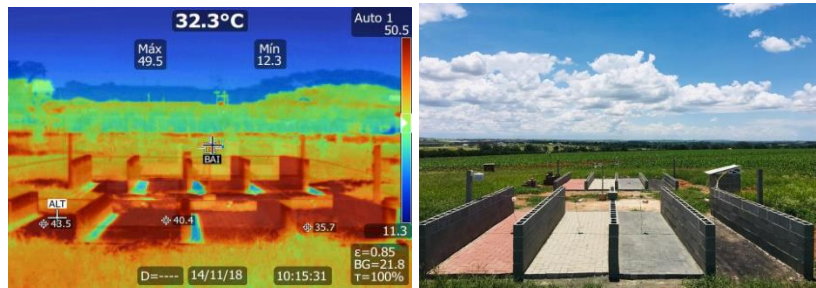
COL1_PRIMAVERA
14.11.18
UTC 09

SOMBREAMENTO DOS CÂNIONS

	M4VER_PAV. VERMELHO	M4CIN_PAV. CINZA	M4GRA_PAV. GRAFITE	M4ASF_PAV. BETUMINOSO
H/W: 0,66				
H/W: 0,33				

Análise

Nas horas iniciais do dia, percebe-se que a temperatura superficial sofre uma variação muito pequena na área sombreada. Além disso logo antes das 10 horas, na morfologia com relação $H/W = 0,66$ (M4) o sensor estará totalmente envolvido pela sombra, diferente da morfologia M2 que estará exposta à radiação. Esse fato explica parcialmente a influência do sombreamento nas elevadas temperaturas superficiais da morfologia M2.



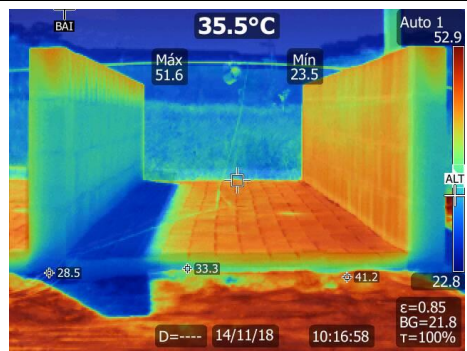
COL1_PRIMAVERA

14.11.18

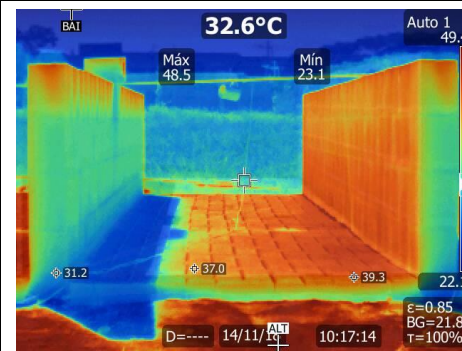
UTC 10

SOMBREAMENTO DOS CÂNIONS

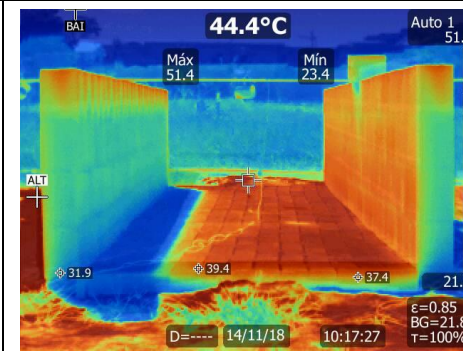
M4VER_PAV. VERMELHO



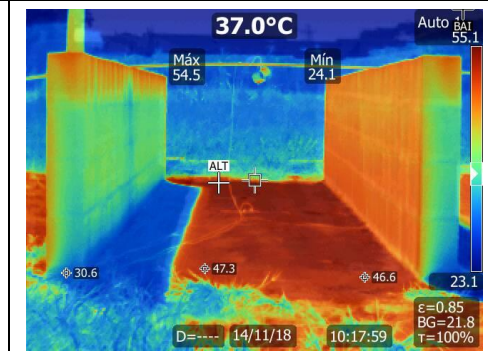
M4CIN_PAV. CINZA



M4GRA_PAV. GRAFITE

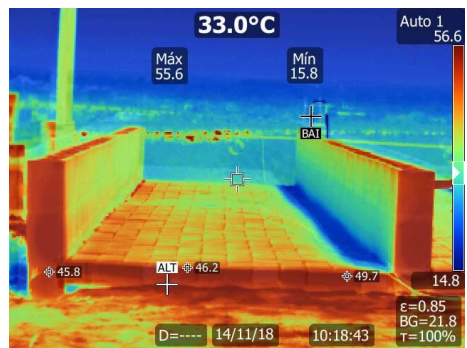


M4ASF_PAV. BETUMINOSO



H/W: 0,66

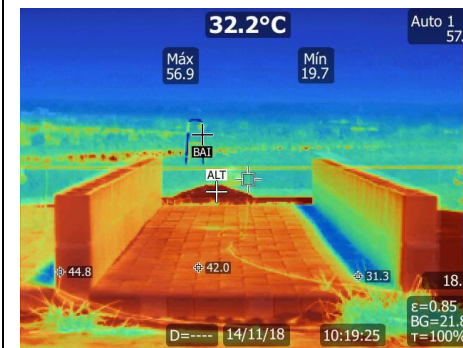
M2VER_PAV. VERMELHO



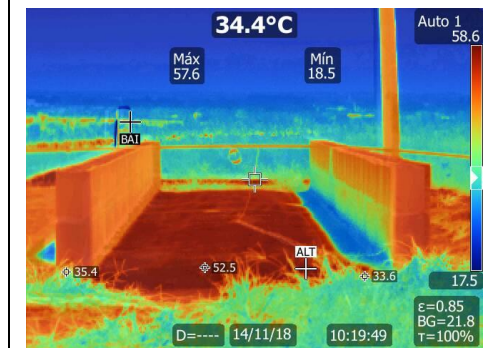
M2CIN_PAV. CINZA



M2GRA_PAV. GRAFITE



M2ASF_PAV. BETUMINOSO



H/W: 0,33

Análise

Percebe-se que durante a manhã, enquanto o pavimento recebe a radiação de onda curta, a redução da temperatura na zona de transição é desprezível entre a faixa sombreada e exposta do pavimento. Além disso, a área sombreada do pavimento na morfologia M4 é maior do que a M2. Esse fato pode estar relacionado com a alta temperatura do ar registrada pelos sensores no topo do cânion da morfologia com edificações de pequeno porte.

A5. ASPECTOS INSTRUMENTAIS PARA PESQUISAS EM CLIMA URBANO

Os aspectos instrumentais da pesquisa correspondem a uma exploração dos recursos tecnológicos dos equipamentos e de conceitos relacionados aos procedimentos empregados em outros estudos sobre clima urbano.

5.1 Espectrômetro Portátil

O espectrômetro portátil ALTA II foi idealizado pela *Lunar and Planetary Institute*, localizado em Houston, Texas (EUA) como uma ferramenta didática para ensino sobre cor, luz e espectroscopia. Ele mede refletâncias correspondentes a radiações em 11 diferentes comprimentos de onda, entre 470 e 940 nm, sendo sete na região visível e quatro na região do infravermelho-próximo.

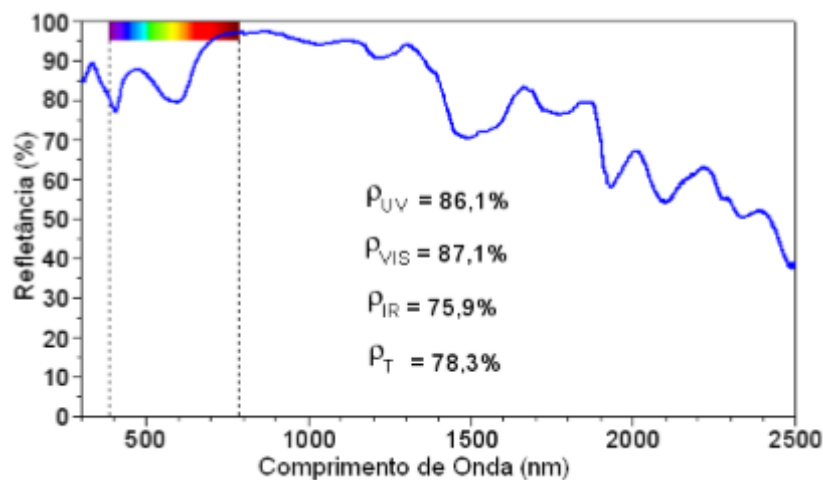
A aplicação mais comum deste equipamento é direcionada à determinação da absortância e refletância solar de superfícies opacas. O espectrômetro portátil ALTA II pode ser uma substituição do espectrofotômetro por apresentar um baixo custo e por apresentar resultados mais confiáveis e precisos em relação a valores tabelados.

Para o processo para determinação da refletância solar, “A amostra fica posicionada sobre a abertura do equipamento e deve cobrir totalmente o orifício, de tal forma que não se perca parte da energia que é emitida pelas lâmpadas e que não haja interferência da iluminação do ambiente externo”. (DORNELLES, 2008, p.78)

Pereira, Marinowski, Lamberts, et al (2015) ressaltam a importância de evitar a interferência da iluminação do ambiente na medição. Para medições realizadas durante o dia, especialmente aquelas expostas à radiação solar direta, deve-se tomar o cuidado de proteger as laterais do equipamento, evitando a infiltração de luz do ambiente entre a amostra e o aparelho.

Ao pressionar cada um desses botões, o equipamento emite certa quantidade de energia (voltagem) e mede o quanto dessa energia é refletida de volta. A partir de equacionamento matemático pode-se determinar o percentual que cada amostra reflete. Dornelles (2008) utiliza como referência os dados obtidos em um espectrofotômetro para uma superfície que apresente elevada refletância, no caso papel branco comum (Marca Ripax, 75 g/m²), cuja reflexão espectral é apresentada na Figura 5.1

Figura 5.1. Curva de refletância espectral do papel branco.



Fonte: Dornelles (2008).

Ao divulgar resultados de sua pesquisa sobre a determinação da absorptância solar de superfícies opacas, Dornelles (2008) afirma que o espectrômetro portátil Alta II é um equipamento de baixo custo e fácil de manipular. Além disso, os resultados “indicaram a grande precisão do equipamento e do método proposto, com diferença máxima de 7% entre dados medidos e estimados. Pois os valores obtidos neste método já são ajustados ao espectro solar padrão”. (DORNELLES, 2008, p.150)

Segundo a autora, de três procedimentos propostos em sua pesquisa (espectrofotômetro de refletância, scanner comum e espectrômetro portátil Alta II), a estimativa de absorptância solar a partir de medições com o espectrômetro ALTA II se mostrou a mais precisa e confiável.

5.2 Anemômetro

O anemômetro de concha foi inventado em 1846 pelo astrônomo irlandês Thomas R. Robinson. Também conhecido como anemômetro rotativo, geralmente consiste em três copos semiesféricos de alumínio montados em torno de um eixo vertical de rotação (FERRUZI, et al, 2004).

Kristensen (1994) menciona que a taxa de rotação do conjunto é geralmente linear e que o anemômetro de concha tem sido o melhor modelo para medir a rajada, a velocidade média e a intensidade de turbulência.

O princípio de funcionamento do anemômetro do tipo concha ou hélice é baseado em um sensor magnético interno, o qual emite um pulso elétrico quando acionado, toda vez em que o equipamento completa uma volta em torno de seu eixo. Assim, através do intervalo de tempo entre os pulsos, o microcontrolador calcula a velocidade instantânea, média e máxima do vento incidido (FERRUZZI, *et al.* 2004).




5.3 Sensores de Temperatura

Os sensores de temperatura ou termopares tem objetivo a coleta de dados de temperatura através da diferença de potencial entre filamentos metálicos. Segundo Fernandes (2012) *apud* Debortolli (2016), Thomas J. Seebeck notou que ao unir dois materiais condutores sujeitos a uma diferença de temperatura e conectados aos terminais de um galvanômetro, poderia ser observado o surgimento de uma diferença de potencial. A esse arranjo de elementos e sujeitos a uma diferença de temperatura foi dado o nome de termopar.

O funcionamento de um termopar se baseia no fenômeno conhecido com *Efeito Termoelétrico* de acordo com Antunes, 1966 *apud* Seixas, 2015. Tal efeito ocorre quando dois metais distintos em contato em uma das extremidades, mantida a uma determinada temperatura (T_a), diferente da temperatura da outra extremidade (T_b), registra o potencial elétrico entre os dois metais.

Alguns modelos mais usuais de termopares empregados em algumas pesquisas estão relacionados no Quadro 5.1

Quadro 5.1. Modelos de termopares mais usuais.

	INFORMAÇÕES TÉCNICAS	PESQUISA
	<i>Termopares do Tipo T</i> Campbell - CR10X Faixa de temperatura: -270°C - 400°C Precisão: $\pm 1^\circ\text{C}$	Perussi (2016)
	<i>Termopares do Tipo Sonda</i> Instrutherm/ THDL-400 Faixa de temperatura: -20°C - 750°C Precisão: $\pm 3,5\%$	Laranjeira (2010) Barros (2014)
	<i>Termopares do Tipo Digital</i> Dallas Semicondutor - DS18B20 Faixa de temperatura: -55°C - 125°C Precisão: $\pm 0,5^\circ\text{C}$	Grivennaya, Bazhenov, Bondareva, Malygin, Knyaginina (2019)

Fonte: o Autor (2019).

2.4.4. Termografia

Segundo Barreira (2007) a termografia infravermelha é um procedimento de teste não-destrutivo aplicado na aferição da temperatura superficial de materiais. Os sensores coletam radiação infravermelha e criam uma imagem com o gradiente superficial da temperatura. Os materiais possuem capacidade de absorver a radiação infravermelha, provocando o aumento de temperatura da superfície.

Segundo Monteiro e Leder (2011), todos os materiais acima do zero absoluto emitem radiação. Esta radiação é denominada infravermelha e está compreendida entre a região visível e as micro-ondas do espectro magnético, com comprimento de onda de 0,75 μm a 10 μm . O autor acrescenta que a técnica da termografia infravermelha transforma a emissão padrão do objeto em imagem visível, medido a radiação infravermelha emitida pelos objetos, sendo detectada pela câmera três componentes de radiação nos objetos, a emissão, transmissão e reflexão (OCAÑA, 2004, *apud* MONTEIRO, LEDER, 2011, p.02). Os autores mencionam que todos os materiais apresentam capacidade de absorver a radiação infravermelha, o que por consequência provocam um aumento na temperatura superficial.

Os fatores que intervêm preponderantemente nas medições em infravermelho são: o valor de emissividade, a condição ambiental, o tipo de cor da superfície e a refletividade

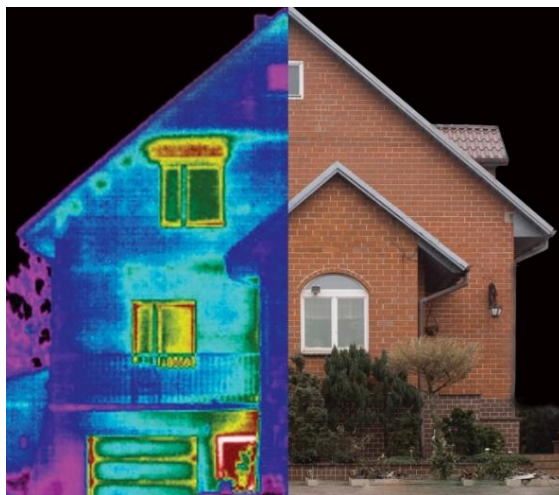
da superfície (MONTEIRO; LEDER, 2011), por isso devem ser considerados para assegurar confiabilidade na obtenção de dados.

Segundo Marinowski, *et. al* (2010), nos últimos anos há várias pesquisas na área de construção civil, as quais vêm aplicando a técnica de termografia para estudos de temperatura no ambiente construído. (BALARAS *et al.*, 2002; OCAÑA *et al.*, 2004).

Todo material com temperatura acima de zero Kelvin (zero absoluto) emite radiação eletromagnética, esta emissão depende de uma propriedade denominada emissividade. Com valores na faixa $0 < \epsilon < 1$, essa propriedade fornece uma medida da capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação a um corpo negro. Ela depende fortemente da superfície do material e de seu acabamento (INCROPERA E DEWITT, 2003).

Sendo assim, todo material emite radiação com diferentes comprimentos de onda. Cada intervalo de comprimento de onda pertence a uma região do espectro eletromagnético. A termografia é uma representação da radiação infravermelha emitida pela superfície, com a sobreposição de uma imagem gerada com ondas da faixa visível do espectro. A Figura 5.2 apresenta essa comparação entre as duas regiões do espectro eletromagnético e como ele se manifesta graficamente.

Figura 5.2. Imagem com câmera na faixa do infravermelho e na região visível.



Fonte: Adaptado de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Termowizja.jpg> (2019).