

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS**

**RODRIGO BORGES NASCIMENTO GUEDES**

**DESEMPENHO TÉRMICO E ÓPTICO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS E  
IMPERMEÁVEIS DE CONCRETO COM COLORAÇÕES DIFERENTES.**

**CAMPINAS**

**2023**

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM SISTEMAS DE  
INFRAESTRUTURA URBANA  
RODRIGO BORGES NASCIMENTO GUEDES**

**DESEMPENHO TÉRMICO E ÓPTICO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS E  
IMPERMEÁVEIS DE CONCRETO COM COLORAÇÕES DIFERENTES.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação stricto sensu em sistemas de infraestrutura urbana, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como exigência para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientadora: Profa. Dra. Marina Lavorato de Oliveira

Coorientadora: Profa. Dra. Cláudia Cotrim Pezzuto

**CAMPINAS**

**2023**

Ficha catalográfica elaborada por Adriane Elane Borges de Carvalho CRB 8/9313  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

625.84 Guedes, Rodrigo Borges Nascimento.  
G924d Desempenho térmico e óptico de pavimentos permeáveis e impermeáveis de concreto com colorações diferentes / Rodrigo Borges Nascimento Guedes. - Campinas: PUC-Campinas, 2023  
68 f.: il.  
Orientador: Marina Lavorato de Oliveira; Coorientadora: Cláudia Cotrim Pezzuto.  
Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2023.  
Inclui bibliografia.

1. Pavimentos de concreto. 2. Resfriamento evaporativo. 3. Aquecimento. I. Oliveira, Marina Lavorato de. II. Pezzuto, Cláudia Cotrim. III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola Politécnica. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. IV. Título.

CDD - 22. ed. 625.84

**RODRIGO BORGES NASCIMENTO GUEDES**

**DESEMPENHO TÉRMICO E ÓPTICO DE PAVIMENTOS  
PERMEÁVEIS E IMPERMEÁVEIS DE CONCRETO COM  
COLORAÇÕES DIFERENTES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.  
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.  
Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Marina Lavorato de Oliveira.  
Co-orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Cláudia Cotrim Pezzuto.

Dissertação defendida e aprovada em 16 de fevereiro de 2023 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Marina Lavorato de Oliveira  
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Adriana Petito de Almeida Castro  
Universidade Paulista - UNIP

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001

## RESUMO

As cidades sofrem com a urbanização à medida que suas superfícies são impermeabilizadas, aumentando sua temperatura como também o escoamento de água superficial. Um pavimento reflexivo permeável pode ser uma opção para a mitigação desses efeitos negativos causados pela urbanização. Além disso, a estrutura dos pavimentos permeáveis junto à característica de sua aplicação, sobre brita ou em modo elevado, pode servir como reservatório de água durante as chuvas. A adoção desta estratégia permite minimizar o aumento da água de escoamento enquanto a água não infiltra no solo, e por consequência reduz a temperatura superficial do pavimento à medida que este tem potencial para resfriamento devido à evaporação. O objetivo deste trabalho é verificar o desempenho térmico e óptico e o efeito de resfriamento evaporativo de pavimentos permeáveis e impermeáveis de concreto com diferentes colorações. Para isso, amostras de pavimentos permeáveis (PP) e impermeáveis (PI) de diferentes cores foram expostas à radiação solar com o intuito de coletar dados sobre suas temperaturas superficiais e compará-las em estado seco e em estado molhado, simultaneamente. A coleta de dados ocorreu durante 4 dias consecutivos em dias estáveis e sem precipitação. As temperaturas superficiais foram coletadas a cada três horas utilizando uma câmera termográfica FlukeTi110. Também foram coletadas as refletâncias solares das amostras secas em ambiente controlado por meio do espectrômetro Alta II. Ao analisar pavimentos com comportamentos similares, verificou-se uma tendência de ordem crescente em relação à refletância solar e o agrupamento em 5 grupos representados pela refletância média das amostras. Observou-se, que o efeito de resfriamento evaporativo tem valores mais significativos para os pavimentos permeáveis, efetivamente, no primeiro dia. Se comparados ao longo dos quatro dias de experimento, sem manutenção da condição molhada, pavimentos permeáveis e impermeáveis com refletâncias próximas atingiram temperaturas médias máximas semelhantes. A escolha de superfícies com maiores refletâncias contribui para a redução dos picos de temperatura. Entre os pavimentos permeáveis, os grupos atingiram a diferença de temperatura máxima de 15,3°C e 15,7°C para o estado seco e molhado, entre valores extremos de refletância. Entre os PIs, a diferença de temperatura atingida foi de 14,5°C para o estado seco e de 15,8°C no estado molhado. Neste sentido, o efeito de resfriamento evaporativo também colabora para a redução da temperatura superficial. Devido ao resfriamento evaporativo, enquanto os grupos dos PPs atingiram picos de resfriamento entre 7,4-19,1°C no primeiro dia, os grupos dos PIs resfriaram entre 1,8-4,2°C, no primeiro dia de experimento. Os resultados deste estudo demonstraram que o resfriamento evaporativo é uma técnica eficiente para mitigar o efeito do aquecimento de superfícies urbanas pavimentadas.

**Palavras-chave:** Pavimentos de concreto, resfriamento evaporativo, aquecimento.

## ABSTRACT

Cities suffer from urbanization as their surfaces are waterproofed, increasing their temperature as well as surface water runoff. A pervious reflective pavement can be an option to mitigate these negative effects caused by urbanization. In addition, the structure of pervious pavements, together with the characteristics of their application, on gravel or in elevated mode, can serve as a water reservoir during the rains. The adoption of this strategy allows minimizing the increase in runoff water while the water does not infiltrate the soil, and consequently reduces the surface temperature of the pavement as it has the potential for cooling due to evaporation. The objective of this work is to verify the thermal and optical performance and the evaporative cooling effect of pervious and impervious concrete pavements with different colors. For this, samples of pervious (PP) and impervious (IP) pavements of different colors were exposed to solar radiation in order to collect data on their surface temperatures and compare them in the dry state and in the wet state, simultaneously. Data collection took place over 4 consecutive days on stable days with no precipitation. Surface temperatures were collected every three hours using a FlukeTi110 thermographic camera. Solar reflectances of dried samples were also collected in a controlled environment using the Alta II spectrometer. When analyzing pavements with similar behavior, a trend of increasing order was verified in relation to the solar reflectance and the grouping in 5 groups represented by the average reflectance of the samples. It was observed that the evaporative cooling effect has more significant values for pervious pavements, effectively, on the first day. If compared over the four days of the experiment, without maintaining the wet condition, pervious and impervious pavements with similar reflectances reached similar maximum average temperatures. The choice of surfaces with higher reflectance contributes to the reduction of temperature peaks. Among the pervious pavements, the groups reached the maximum temperature difference of 15.3°C and 15.7°C for the dry and wet state, between extreme reflectance values. Among the IPs, the temperature difference reached was 14.5°C for the dry state and 15.8°C for the wet state. In this sense, the evaporative cooling effect also contributes to the reduction of surface temperature. Due to evaporative cooling, while the PP groups reached cooling peaks between 7.4-19.1°C on the first day, the PI groups cooled between 1.8-4.2°C on the first day of the experiment. The results of this study demonstrate that evaporative cooling is an efficient technique to mitigate the heating effect of urban paved surfaces.

**Keywords:** solar Concrete pavements, evaporative cooling, heating.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVO	9
<b>2.1. Objetivo geral</b>	9
<b>2.2. Objetivos específicos</b>	9
<b>2.3. Estrutura da dissertação</b>	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
<b>3.1. Impacto da urbanização no clima urbano</b>	11
<b>3.2. Estratégias para mitigação das ilhas de calor</b>	13
<b>3.3. O potencial dos pavimentos permeáveis para a redução da temperatura urbana.</b>	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS	18
<b>4.1. Caracterização climática da área de estudo</b>	18
<b>4.2. Caracterização do período de coleta</b>	19
<b>4.3. Seleção das amostras</b>	22
<b>4.4. Caracterização do experimento externo</b>	24
<b>4.5. Instrumentação</b>	27
<b>4.6. Coleta de dados</b>	28
<b>4.7. Caracterização das análises estatísticas</b>	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
<b>5.1. Análise das amostras de estudo</b>	33
<b>5.2. Análise da taxa de evaporação</b>	49
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64



## 1. INTRODUÇÃO

A urbanização potencializa a diminuição da vegetação e o aumento de superfícies impermeáveis com menor albedo. Essas modificações trazem mudanças no microclima urbano e são uma das principais causas para o efeito de ilhas de calor. O aumento de temperatura causado pelas ilhas de calor tem alto impacto no consumo de energia elétrica utilizada para climatização, aumento no desconforto térmico humano e aumento dos problemas de saúde relacionados às altas temperaturas (MASTRAPOSTOLI et al., 2016; SANTAMOURIS et al., 2020; VUJOVIC et al., 2021).

Adicionalmente, o alto grau de impermeabilização do solo, proveniente da urbanização, também é responsável pelo aumento de água de escoamento e ocasionalmente enchentes resultantes da sobrecarga do sistema drenante das cidades (WANG et al., 2018; SAMOUEI; ÖZGER, 2020).

Santamouris et al. (2017) apontam diversos estudos que abordam a mitigação das ilhas de calor nos centros urbanos. Estas estratégias consideram o uso da vegetação urbana (BOWLER et al., 2010; SANTAMOURIS; OSMOND, 2020; BOUZOUIDJA et al., 2021), geometria dos cânions urbanos (MUNIZ-GÄAL et al., 2020), uso de materiais reflexivos (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011; ALCHAPAR et al., 2017; ZHANG et al., 2021) e resfriamento por evaporação (HENDEL et al., 2016; TIAN et al., 2021). Essas estratégias podem ser utilizadas isoladas ou combinadas, visando um maior efeito.

Experimentos sobre o aumento da refletância solar e redução da temperatura superficial vêm sendo desenvolvidos para compreender o comportamento de diversos materiais comumente utilizados em superfícies urbanas. Entre os objetos de pesquisa desses experimentos temos, por exemplo: tintas com alta refletância (CASTRO et al., 2003; UEMOTO; SATO; JOHN, 2010; GARG et al., 2016; ANDRADE; DORNELLES, 2022), telhados frios (SANTAMOURIS, 2014; GANGULY; CHOWDHURY; NEOGI, 2016) e pavimentos frios (LI et al., 2013; FERRARI et al., 2020; MARUYAMA; FRANCO, 2020).

Ainda na problemática da urbanização, a alta taxa de superfícies impermeáveis de baixo albedo também colabora para o aumento do escoamento de água superficial (WANG et al., 2018). Assim, um pavimento que combine alta refletância e que possua capacidade drenante poderia diminuir a temperatura

superficial do pavimento ao mesmo tempo que colabora para a infiltração da água das chuvas no solo (LI et al., 2013). Segundo Kowalski e Masiero (2021) pavimentos frios podem contribuir para o controle do microclima urbano, já que representam uma parcela importante na retenção de calor por superfícies urbanas.

Por outro lado, concretos drenantes costumam possuir menor refletância solar se comparados a concretos comuns. Como resultado, estes materiais possuem maior temperatura superficial, a menos que seu baixo albedo seja compensado pelo efeito de resfriamento da evaporação. Nestas condições é necessário conhecimento sobre as propriedades dos concretos permeáveis para utilizá-los com o intuito de reduzir os efeitos das ilhas de calor (ZHANG; JIANG; LIANG, 2015).

Neste contexto, a utilização de pavimentos permeáveis pode trazer resultados promissores quanto à redução do escoamento de águas superficiais provenientes das chuvas ao mesmo tempo em que age na mitigação dos efeitos das ilhas de calor dos grandes centros urbanos.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1. Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é verificar o desempenho térmico e óptico e o efeito de resfriamento evaporativo de pavimentos permeáveis (PP) e impermeáveis (PI) de concreto com diferentes colorações.

### **2.2. Objetivos específicos**

São objetivos específicos:

- Comprovar a correlação entre refletância solar e temperatura superficial;
- Quantificar a redução da temperatura superficial das amostras atingida através do aumento da refletância solar;
- Quantificar o efeito do resfriamento evaporativo, comparando a temperatura superficial de uma mesma amostra em estado seco e molhado;
- Entender qual a duração do efeito de resfriamento evaporativo;
- Levantar as principais diferenças entre o comportamento dos PPs e PIs.

### 2.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. No capítulo 1 foi apresentada a contextualização do trabalho. A problemática relacionada à modificação da superfície natural das cidades causada pela urbanização e estratégias que podem mitigar os efeitos das ilhas de calor nos grandes centros urbanos.

Neste segundo capítulo foram apresentados os objetivos, geral e específico e esta estrutura do trabalho.

No capítulo 3 são discutidos os impactos da urbanização no clima urbano, diversas estratégias para mitigação dos efeitos das ilhas de calor e, por fim, o potencial dos pavimentos permeáveis para a redução da temperatura urbana, devido ao resfriamento evaporativo.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada nesta dissertação. A seção está dividida em seleção das amostras, caracterização do experimento externo, coleta de dados e caracterização das análises estatísticas. As normais climatológicas e a caracterização do período de coleta também fazem parte deste capítulo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões obtidos através da metodologia apresentada no capítulo 4. Destaca-se a análise individual dos PPs e PIs em relação a temperatura superficial e também a análise dos grupos formados pelas amostras com comportamentos similares. Também é discutido o efeito de resfriamento evaporativo, comparando a temperatura superficial de uma mesma amostra em estado seco e molhado.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, mostrando o resfriamento atingido pela variação da refletância das amostras e também o efeito de resfriamento evaporativo devido a evaporação da água presente no pavimento.

As figuras apresentadas que não possuem a fonte das informações são de autoria própria.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Impacto da urbanização no clima urbano**

O efeito das ilhas de calor consiste no aumento da temperatura de centros urbanos em relação às áreas rurais em seu entorno, devido à característica dos materiais em absorver e reter mais calor do que as superfícies naturais, como solo e vegetação. Segundo Gartland (2010) esse aumento na temperatura se dá por dois motivos principais. Primeiramente, as superfícies construídas pelo homem possuem baixa refletância, conseqüentemente, alta absorção do calor solar. Adicionalmente, pontua que em sua grande maioria as superfícies urbanas são impermeáveis, fazendo com que a água da chuva escoe, não conseguindo dissipar o calor das superfícies através da evaporação.

À medida que as cidades se desenvolvem, a vegetação é substituída por edificações e pavimentos. Essa redução de vegetação, impermeabilização do solo, redução do albedo das superfícies, entre outros aspectos é causa para o efeito das ilhas de calor. Esse efeito consiste no aumento da temperatura urbana em relação às áreas rurais ao seu redor (EPA, 2008).

De modo que, existe uma forte correlação positiva entre temperatura superficial e a densidade de superfícies impermeáveis. Estoque, Murayama e Myint (2017) analisaram a composição da paisagem urbana de megacidades do sudeste asiático e indicaram o aumento em média de 3°C na temperatura de superfícies impermeáveis em relação aos espaços verdes. Isso comprova os efeitos de ilhas de calor ocasionados por áreas impermeáveis e também os efeitos de resfriamento em áreas verdes.

São inúmeros os problemas causados pelos efeitos das ilhas de calor. Por exemplo, o aumento no consumo de energia, aumento na emissão de gases poluentes, comprometimento da saúde, do conforto humano e redução na qualidade da água (EPA, 2008; SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011; FERRARI et al., 2016). Jandaghian e Akbari (2018) relatam que o aumento do albedo das cidades é eficaz como estratégia para redução da temperatura urbana e melhora da qualidade do ar.

Pavimentos e telhados correspondem a grande parte das superfícies urbanas. Rose, Akbari e Taha (2003) relatam que grandes cidades dos Estados Unidos como Salt Lake City, Sacramento, Chicago e Houston possuem grande parte de sua superfície impermeável com baixa refletância. O levantamento feito no estudo apontou que os pavimentos correspondem à 29-38,5% dessas superfícies urbanas impermeáveis, enquanto os telhados representam 19-24,8%. Assim, todas essas cidades têm grande potencial para minimizar os efeitos das ilhas de calor, já que da mesma forma que o aumento da vegetação, o aumento do albedo das superfícies também colabora para a redução da temperatura ambiente.

Como exemplo de materiais, o concreto e o asfalto são materiais comumente utilizados em superfícies urbanas e tem grande influência no aumento da temperatura ambiente das cidades. De acordo com Akpinar e Sedat (2017), na comparação dos valores de temperatura superficial e fluxo de calor destes dois tipos de pavimentos, foi concluído que a quantidade de energia emitida aumenta à medida que a temperatura superficial dos dois pavimentos também aumenta. Porém, a radiação emitida pelo asfalto, chega a ser de 10-15% maior que a do concreto convencional, devido a sua menor refletância. Este fato demonstra a importância da escolha dos materiais utilizados nas superfícies urbanas.

Conseqüentemente, o asfalto convencional é o pavimento menos propício em termos de mitigar os efeitos de ilha de calor. Bouzouidja et al. (2021) observaram o comportamento térmico de diferentes composições de pavimentos em áreas de estacionamento e concluíram que o asfalto atinge altas temperaturas, aquece de forma muito rápida e ainda transmite o calor para as camadas mais profundas.

Li et al. (2013) apontam que mais de 90% das áreas pavimentadas são compostas por asfalto ou revestimentos escuros, pavimentos com baixa refletância. As refletâncias dos pavimentos de concreto variam de 10–35%, enquanto as superfícies asfálticas variam de 5–20% (CALLEJAS et al., 2015). Um problema relacionado ao baixo valor de refletância das superfícies são as altas temperaturas atingidas.

Além disto, as áreas impermeáveis dificultam a infiltração da água no solo, aumentando o volume de escoamento superficial. Esse incremento de volume e velocidade da água de escoamento gera a sobrecarga dos sistemas de drenagem das cidades, eventualmente provocando inundações (HÖLTZ, 2011). Em áreas com rápido desenvolvimento urbano, eventos extremos de chuva, comuns no contexto

das mudanças climáticas, aumentam o risco de inundações devido à sobrecarga dos sistemas de drenagem (LI; KAYHANIAN; HARVEY, 2013).

Uma opção para substituir as superfícies impermeáveis são os pavimentos permeáveis de concreto. Além de resistirem aos esforços mecânicos, eles possuem vazios interligados que permitem a percolação da água da superfície para o subsolo. Quando considerado um intervalo de tempo para esse processo, obtêm-se o coeficiente de permeabilidade.

A expansão dos sistemas de drenagem, vista tradicionalmente como solução para a drenagem urbana, implica em custo muito alto e se torna inviável em áreas densamente urbanizadas. Por esse motivo, várias técnicas para reduzir o escoamento superficial de chuvas estão sendo desenvolvidas. O conjunto destas técnicas foi denominado Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development - LID). Telhados verdes e pavimentos permeáveis são exemplos dessas técnicas (QIN; LI; FU, 2013).

### **3.2. Estratégias para mitigação das ilhas de calor**

Existem inúmeras pesquisas sobre tecnologias de mitigação dos efeitos das ilhas de calor. Santamouris (2014) e Santamouris et al. (2017) trazem revisões da literatura sobre estas tecnologias de mitigação urbana e suas aplicações. Entre elas, podem ser citadas o aumento da refletância das superfícies através de telhados frios, telhados verdes e pavimentos frios; o aumento da arborização ou o uso de corpos d'água, como lagos e fontes, que resfriam o ambiente através da evaporação.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency - USEPA) definiu o termo pavimentos frios como pavimentos refletivos que possuem menor temperatura superficial e menor energia absorvida pelo pavimento, o termo ainda se estende a pavimentos drenantes, que apresentam água em seus vazios mantendo o material frio enquanto úmido ou qualquer outra tecnologia emergente que venha a reduzir os efeitos das ilhas de calor, mantendo o material mais frio (EPA, 2012).

A temperatura de superfícies expostas à radiação solar tende a ser maior que a temperatura ambiente ao seu redor. Porém, o aumento de sua refletância pode reduzir a temperatura dessas superfícies. Isto posto, o uso de superfícies com alta

refletância pode reduzir os efeitos das ilhas de calor nos grandes centros urbanos (LI et al., 2013).

Uma das técnicas para o aumento do albedo de superfícies é o uso de tintas claras ou fabricadas com pigmentos que aumentam a refletância. Uemoto, Sato e John (2010) demonstraram que tintas que utilizam pigmentos com propriedades reflexivas de raios infravermelhos apresentam menores temperaturas superficiais e por consequência menores taxas de fluxo de calor quando comparadas aos pigmentos comuns. Observando a pintura de superfícies de fibrocimento, a cor branca fria reduziu em 37% o fluxo de calor enquanto a tinta convencional reduziu 23%, ambas em comparação à superfície sem nenhuma camada de tinta. Já na cor marrom, a tinta fria foi responsável pela redução de 26% do fluxo de calor, porém a mesma superfície com tinta marrom convencional aumentou o fluxo de calor em 32%.

A radiação solar atinge a terra por raios de diferentes comprimentos, sendo composta por raios ultravioletas (5%), a luz visível (43%) e o infravermelho (52%). O infravermelho apesar de não ser perceptível pelo olho humano é grande responsável pelo aquecimento das superfícies (EPA, 2012). Castro et al. (2003) avaliaram a refletância solar de amostras pintadas com cores diferentes nas três regiões do espectro solar e posteriormente a refletância total. Foi observado que materiais com cores escuras podem apresentar bom desempenho térmico, pois apesar de possuir baixa refletância no comprimento de onda visível, podem possuir maiores valores de refletância no infravermelho próximo. Como foi o caso da cor Azul Bali, que possui refletância de 41% no visível e 75% no infravermelho, atingindo uma refletância total de 66%. Por este motivo, a coloração por si só, não pode ser tida como garantia de refletância.

Na aplicação de pavimentos, Kolokotsa et al. (2018) a partir de simulação computacional no programa ENVI-Met e coleta empírica analisaram a redução da temperatura superficial ao usar pavimentos com maior refletância. Os resultados avaliaram o pavimento feito de argamassa de mármore e cimento branco com refletância de 69% e emissividade de 90%. Tanto os resultados obtidos através da simulação computacional como os obtidos por coleta de dados, demonstraram que a utilização do pavimento frio resultou na redução de até 0,3°C na temperatura ambiente máxima na área do pavimento a uma altura de 1,80m e de 10°C na temperatura superficial.

Além da coloração das superfícies, a sua rugosidade também tem influência na refletância dos materiais. Em relação às telhas, por sua vez, Muniz-gaal et al. (2018) analisaram 31 amostras comumente utilizadas no mercado de construção brasileiro de 3 categorias: cerâmicas esmaltadas, cerâmicas rústicas e concreto rústico. Para cada grupo foi possível comprovar que a refletância é maior para as cores mais claras. Sendo as telhas de cerâmica esmaltada amarela (67%) e branca (66%) os maiores valores de refletância. Por outro lado, as menores refletâncias foram para a telha grafite em cerâmica esmaltada e para a telha grafite em concreto rústico, 11% e 10%, respectivamente. Além disso, as telhas de cerâmica esmaltadas apresentaram maiores valores de refletância em relação às telhas cerâmicas rústicas e de concreto. O pior desempenho das telhas de concreto rústico pode ser associado à rugosidade dos materiais, visto que a absorção de energia aumenta à medida que o material é mais rugoso e ocorrem mais Inter reflexões nas ondulações, conforme observado por Roriz; Dornelles; Roriz (2007) e Dornelles (2009). Em estudo realizado com diferentes tipologias de telhas Dornelles (2021) mostra a variabilidade de cores disponíveis no mercado e a importância do conhecimento das propriedades dos materiais para avaliação do desempenho térmico e consumo energético do edifício.

Outra técnica amplamente estudada para mitigação dos efeitos das ilhas de calor é o uso de telhados verdes, que são telhados totalmente ou parcialmente cobertos por vegetação. As folhagens das plantas absorvem a radiação solar para a fotossíntese, impedindo que essa radiação seja absorvida pelo solo e pela estrutura do telhado. Quanto maior a quantidade de água nas estruturas das folhas, maior a absorção da radiação solar (SANTAMOURIS, 2014).

Tian et al. (2021) relatam que áreas verdes nas cidades criam uma ilha de frescor no entorno imediato durante um dia quente de verão. Porém, seu efeito de resfriamento depende do tamanho, forma das áreas verdes e do tipo de vegetação. Zhu et al. (2021) também pontuaram sobre a redução da temperatura superficial pelo uso de telhados verdes e completam que a combinação de diferentes estratégias tem um maior efeito positivo do que quando utilizadas individualmente.



### **3.3. O potencial dos pavimentos permeáveis para a redução da temperatura urbana.**

A refletância é um fator determinante da temperatura da superfície de um material. Qin e Hiller (2014) desenvolveram um modelo matemático para entender o comportamento dos pavimentos em relação ao balanço de energia. Os autores verificaram que os coeficientes de regressão do modelo são controlados pela refletância das superfícies e a inércia térmica dos materiais. Observou-se que aumento da refletância e do fluxo evaporativo das superfícies contribui para uma melhor eficiência de resfriamento, tendo potencial para reduzir os efeitos causados pelas ilhas de calor.

Ferrari et al. (2019) apontam que a evaporação pode reduzir a temperatura das superfícies através do resfriamento evaporativo, porém a grande maioria dos pavimentos são compostos por materiais impermeáveis com baixa refletância, por exemplo, asfalto e concreto. Enquanto isso, os pavimentos permeáveis e pavimentos com juntas drenantes apresentam coeficientes de infiltração bem próximos de superfícies gramadas, o que auxilia na infiltração de água no solo, diminuindo o escoamento superficial (DE ASSUMPÇÃO SANTOS et al., 2018).

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015) o pavimento permeável é definido como:

“pavimento que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e cuja estrutura permite a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura”.

Um estudo com pavimentos permeáveis utilizando amostras com diferentes proporções de agregado miúdo para agregado graúdo mostrou que a redução de agregados finos na preparação de concretos permeáveis aumenta sua porosidade enquanto diminui sua refletância. O aumento de 10% na porosidade acarreta uma redução de 5% na refletância da amostra. Este evento pode ser explicado pela radiação difusa que ocorre em uma superfície rugosa, atingindo sua própria superfície, aumentando sua absortância (ZHANG; JIANG; LIANG, 2015).

Apesar dos pavimentos permeáveis possuírem menores refletâncias em relação aos pavimentos impermeáveis, eles apresentam menores valores de temperatura em estado úmido, devido ao efeito de resfriamento evaporativo.

Um estudo envolvendo dois tipos de pavimentos permeáveis mostrou que após a aspersão de água o pavimento de cerâmica porosa, com maior capilaridade, possuía uma temperatura superficial 10°C menor, enquanto o pavimento de concreto permeável marcava 5°C a menos em relação a mesma superfície seca. Desse modo, a aspersão de água sobre pavimentos permeáveis pode ser eficaz na mitigação dos efeitos das ilhas de calor (WANG et al., 2018).

Li et al. (2013) e Li, Harvey e Ge (2014) afirmam que esse efeito de resfriamento por evaporação ocorre devido à energia gasta na troca da água do estado líquido para o gasoso. Apesar disso, para que essa taxa de evaporação seja significativa é necessária a existência de água próxima à superfície do pavimento. Foi constatado que para diferentes superfícies de pavimentos permeáveis foi observada a alta redução na taxa de evaporação depois do nível de água estar abaixo dos 20 mm de sua superfície. Esta estreita relação entre o efeito do resfriamento e a disponibilidade de água na superfície de um pavimento permeável também foi observado por Nemirovsky; Welker; Lee (2013) e Wang et al. (2018).

Por fim, destaca-se que grande parte das pesquisas que estudam o efeito de resfriamento evaporativo de pavimentos demonstram a eficiência em diferentes materiais e granulometrias, entretanto, a influência da refletância solar, entre pavimentos com mesma fabricação, tem sido pouco estudada (WANG et al., 2018; SEIFEDDINE; AMZIANE; TOUSSAINT, 2022). Portanto, este trabalho visa avaliar o comportamento de um mesmo tipo de pavimento com diferentes colorações e analisar a relação da refletância com sua temperatura superficial e também o efeito de resfriamento através da evaporação. Adicionalmente, a aplicação dos pavimentos permeáveis, além de contribuir para a infiltração de água no solo, pode servir como reservatório para a água das chuvas, reduzindo a água de escoamento, intensificada pelas superfícies impermeáveis.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada para avaliar o desempenho térmico e óptico e o efeito evaporativo de pavimentos permeáveis e impermeáveis foi realizada em 3 etapas: seleção das amostras, caracterização do experimento externo e coleta de dados. Anteriormente, foi caracterizado o clima da região onde foi realizado o experimento e o período de coleta.

### 4.1. Caracterização climática da área de estudo

O monitoramento externo foi realizado na cidade de Araçatuba, altitude média de 390m e clima de savana com inverno seco (Aw – Classificação de Köppen, (KOTTEK et al., 2006)), com maior pluviosidade no verão que no inverno. A cidade apresenta temperatura média de 24,1°C, média mínima de 19,7°C e máxima de 29,2°C e pluviosidade média de 110,7mm, conforme Tabela 1.

**Tabela 1** – Normais climatológicas da cidade de Araçatuba entre os anos de 1991 e 2021.

	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média anual
Temp. média (°C)	25,6	25,7	25,2	24,4	21,5	20,7	20,8	22,8	24,8	25,9	25,5	25,8	24,1
Temp. mínima (°C)	22,4	22,3	21,9	20,3	17,0	16,1	15,7	17,0	19,2	21,0	21,5	22,3	19,7
Temp. máxima (°C)	29,5	29,8	29,4	29,0	26,7	26,4	26,9	29,5	31,1	31,4	30,2	30,0	29,2
Chuva (mm)	260,0	188,0	158,0	65,0	51,0	31,0	21,0	24,0	67,0	111,0	157,0	195,0	110,7
Umidade (%)	78%	78%	77%	70%	66%	65%	58%	48%	51%	60%	68%	74%	66%
Dias chuvosos (d)	16,00	14,00	14,00	6,00	4,00	2,00	2,00	2,00	5,00	9,00	12,00	15,00	8,42

Adaptado (CLIMATE-DATA, 2022).

Observa-se que janeiro é o mês mais chuvoso, atingindo um acumulado de 260mm de chuva, em contrapartida julho é o mês mais seco, com apenas 21mm de chuva, uma diferença de 239mm entre os meses extremos. Quanto a temperatura, tem-se valores de máxima que variam entre 26,4-31,4°C, sendo outubro o mês mais quente, com umidade relativa do ar média de 60%, 111mm de chuva e média de 9 dias chuvosos no mês. Esses dados fazem parte de bancos de dados entre os anos de 1991 e 2021.

#### 4.2. Caracterização do período de coleta

O experimento ocorreu no início da primavera, entre as 6h do dia 13 de outubro de 2022, até as 18h do dia 16 de outubro de 2022, em dias ensolarados e sem precipitação. A temperatura máxima ambiente foi de 32°C para o primeiro dia, 33,8°C para o segundo, 31,6°C para o terceiro e 34,6°C para o quarto dia de experimento. A umidade relativa do ar variou entre 39,8% e 99,3% durante os quatro dias de experimento. A Tabela 2 apresenta os dados de temperatura do ar e radiação solar global do período de coleta e da estação da primavera de 2022.

**Tabela 2** – Dados climáticos período de coleta e estação da primavera de 2022

Período	Temp. Min (°C)	Temp. Máx (°C)	Temp. Média (°C)	Umidade Min (%)	Umidade Máx (%)	Umidade Média (%)	Radiação máxima* (W/m <sup>2</sup> )
13-Oct	20.3	32.0	28.0	40.4	99.3	67.3	839.0
14-Oct	20.6	33.8	30.5	41.6	87.4	81.0	961.0
15-Oct	19.3	31.6	24.3	45.7	85.6	55.7	925.0
16-Oct	20.2	34.6	27.1	39.8	88.2	64.4	925.0
13-16/10	20.10	33.0	27.5	41.9	90.1	67.1	912.5
Primavera*	19.2	31.4	24.7	54.3	96.5	78.2	880.4

\*Fonte: Adaptado CETESB, 2022

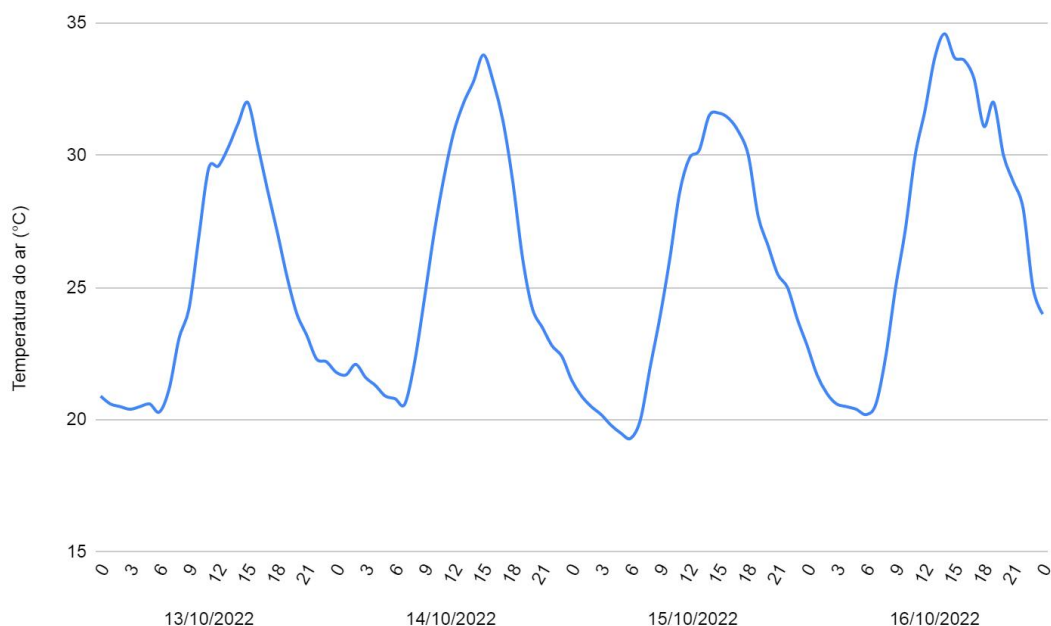
Os dados de temperatura e umidade relativa do ar durante o período de coleta (13 a 16 de outubro) foram obtidos por meio da coleta de dados no mesmo local do experimento. Já para os dados do período da primavera e radiação solar foram utilizados dados da estação meteorológica da CETESB localizada em Araçatuba, cidade do experimento (CETESB, 2022). Para o cálculo da média

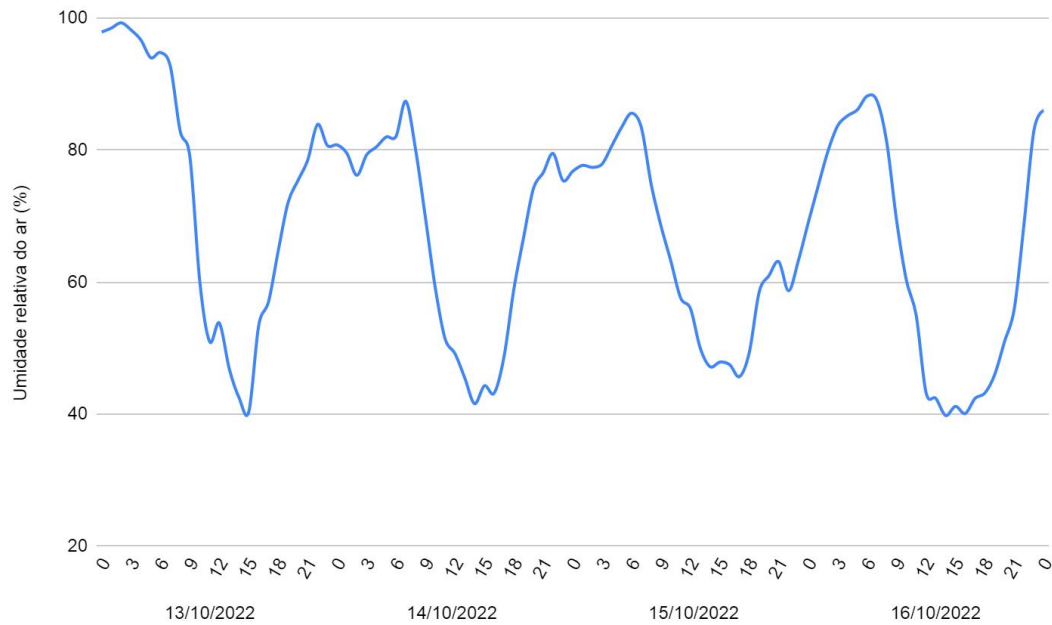
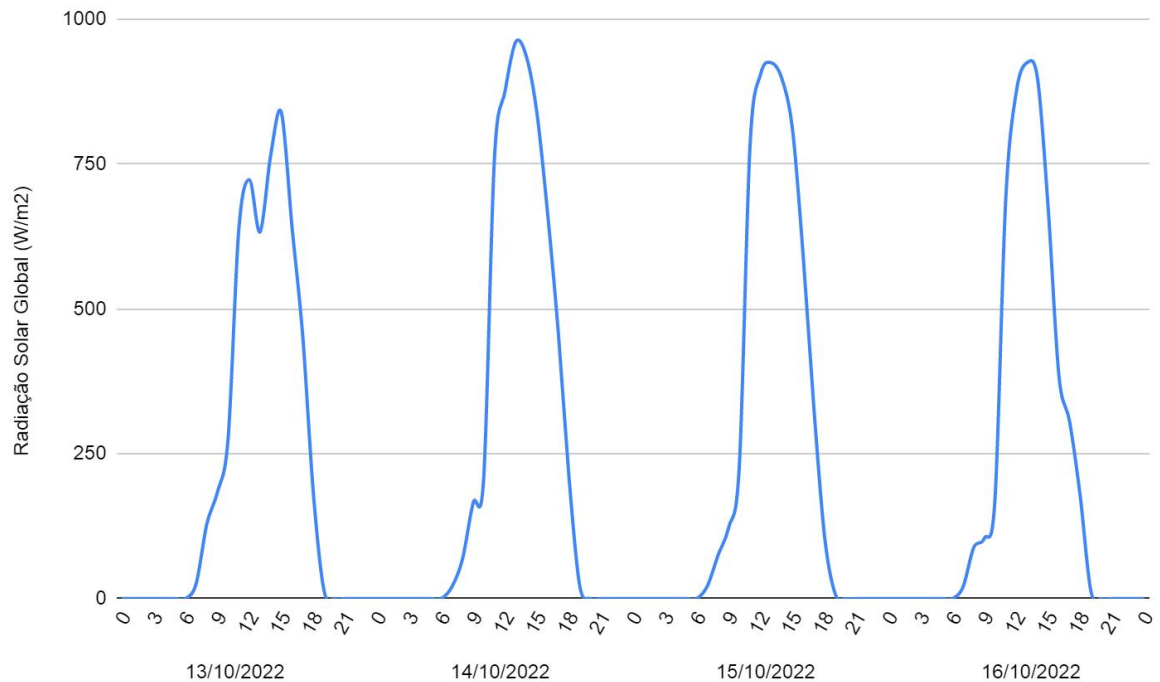
máxima de radiação solar foram utilizados os valores máximos de todos os dias da primavera.

Verifica-se que o período foi representativo, porém os quatro dias de experimento apresentaram temperatura máxima maior que a média do período completo da estação. A radiação máxima também foi um pouco mais alta durante os quatro dias, em comparação a primavera.

Nas Figuras 1, 2, 3 e 4 observam-se as condições climáticas durante o experimento. Os dias de coleta apresentaram condições climáticas similares, com diferença máxima de 3,0°C e 1,3°C de temperatura do ar máxima e mínima, respectivamente. Verifica-se que foi um período ensolarado com temperatura do ar máxima de 31,6°C a 34,6°C. No período diurno, a umidade relativa máxima média foi 41,9% e durante a noite 90,1%. O pico de radiação solar apresentou um menor valor no primeiro dia, com os outros 3 dias praticamente constantes, com uma média máxima de 912,5W/m<sup>2</sup>. Neste sentido, Li; Harvey; Ge (2014) relatam que a taxa de evaporação está diretamente relacionada à disponibilidade de água, alta temperatura ambiente e baixa umidade relativa do ar. A velocidade do vento apresentou um pico máximo de 4 m/s, porém foi inferior a 2 m/s na maior parte do experimento.

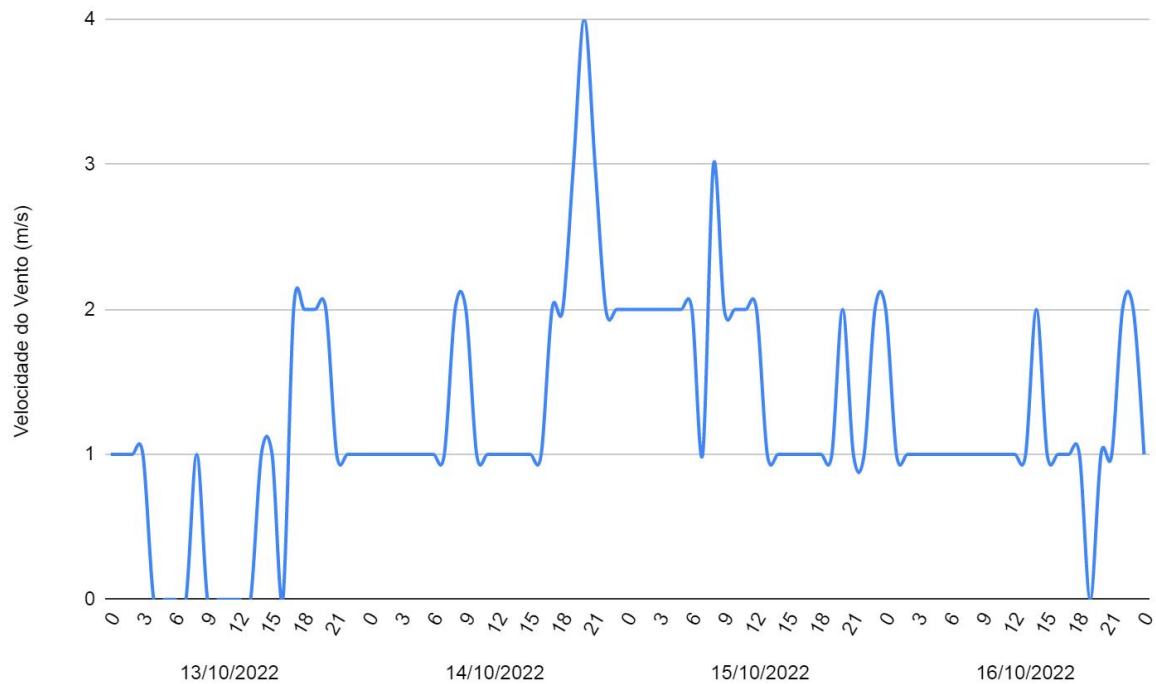
**Figura 1** – Valores de temperatura do ar. Período de coleta.



**Figura 2** – Valores de umidade relativa do ar. Período de coleta.**Figura 3** – Valores de radiação solar global. Período de coleta.

Fonte: Adaptado CETESB, 2022

**Figura 4** – Valores da velocidade do vento. Período de coleta.





















Fonte: Adaptado CETESB, 2022

#### 4.3. Seleção das amostras

Para este experimento foram selecionadas 18 amostras de pavimentos de concreto (9 amostras de pavimentos permeáveis e 9 amostras de pavimentos impermeáveis), com total de 9 cores diferentes. Os pavimentos permeáveis atendem a NBR 16416 (ABNT, 2015), segundo placas de concreto permeável, possuindo coeficiente de permeabilidade (m/s) maior que  $10^{-3}$ . Os pavimentos impermeáveis atendem a NBR 9781 (ABNT, 2013). A Tabela 3 mostra as diferentes colorações das amostras.

**Tabela 3** – Amostras de estudo, características e identificações.

Item	Modelo	Cor	Identificação	Imagem
1	Permeável	Areia	PP_AR	
2	Impermeável	Areia	PI_AR	
3	Permeável	Branco	PP_BR	
4	Impermeável	Branco	PI_BR	
5	Permeável	Canela	PP_CA	
6	Impermeável	Canela	PI_CA	
7	Permeável	Cerâmica	PP_CE	
8	Impermeável	Cerâmica	PI_CE	
9	Permeável	Crema	PP_CR	
10	Impermeável	Crema	PI_CR	
11	Permeável	Gergelim	PP_GE	
12	Impermeável	Gergelim	PI_GE	
13	Permeável	Grafite	PP_GR	
14	Impermeável	Grafite	PI_GR	
15	Permeável	Platina	PP_PL	
16	Impermeável	Platina	PI_PL	
17	Permeável	Terracota	PP_TE	
18	Impermeável	Terracota	PI_TE	



As amostras são compostas por cimento, areia e agregados de diferentes tipos, como por exemplo basalto, granito, mármore, sílica e quartzo. Diferentemente das amostras impermeáveis, as amostras permeáveis não possuem finos, o que garante sua capacidade drenante. As amostras impermeáveis possuem sua superfície polida. Apesar das amostras permeáveis possuírem a superfície lixada, sua superfície é rugosa devido às cavidades presentes no pavimento, como pode ser observado na Figura 5.

Todas as amostras possuem dimensão padrão de 09cm x 18cm e espessura de 2,5cm. As amostras foram doadas e fazem parte do catálogo de uma empresa especializada em pavimentos.

**Figura 5** – Superfície da amostra permeável e impermeável de cor Areia.

**Pavimento permeável areia (PP\_AR)**

**Pavimento impermeável areia (PI\_AR)**



#### **4.4. Caracterização do experimento externo**

Com o objetivo de verificar o efeito do resfriamento evaporativo foram selecionados mais 9 amostras permeáveis e 9 impermeáveis das mesmas cores iniciais (Tabela 3), totalizando 36 amostras. Assim, um grupo foi submetido à condição seca e o outro grupo, com as mesmas amostras, foi submetido à condição molhada, simultaneamente.

As amostras foram dispostas em recipientes plásticos individuais, de maneira que somente a superfície horizontal superior das amostras ficassem em contato com o ar ambiente. Assim, foi possível avaliar o impacto térmico e a troca de calor da

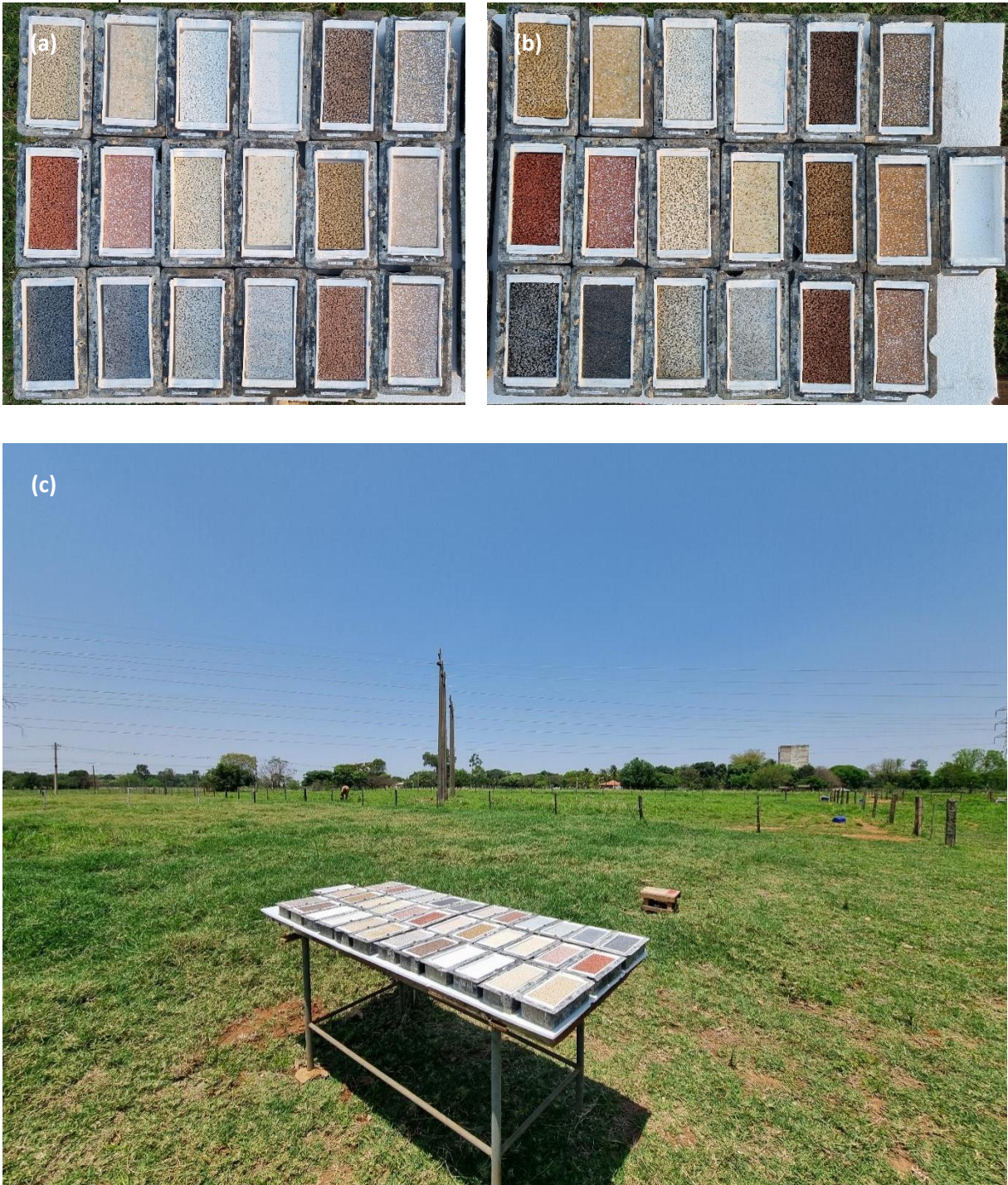
superfície próxima da camada de ar. O recipiente foi revestido internamente com poliestireno expandido de alta densidade, funcionando como limite adiabático no que diz respeito à condutividade, conforme Figura 6.

**Figura 6** – Recipientes com suas paredes revestidas de poliestireno expandido utilizados para acondicionar as amostras.



Todas as amostras foram dispostas sobre uma mesa em uma superfície retangular de poliestireno expandido. Amostras similares, com mesmo tipo e cor, foram submetidas à condição seca e úmida. Com a finalidade de avaliar o resfriamento evaporativo isolado, foi considerado um recipiente somente com água no cenário de condição úmida, posicionado ao lado direito das amostras. A disposição das amostras e a montagem do experimento pode ver visto na Figura 7.

**Figura 7** – Amostras expostas à radiação solar. (a) vista superior das 18 amostras em estado seco. (b) vista superior das 18 amostras em estado molhado + água. (c) Amostras em estado seco e molhado expostas simultaneamente.



#### 4.5. Instrumentação

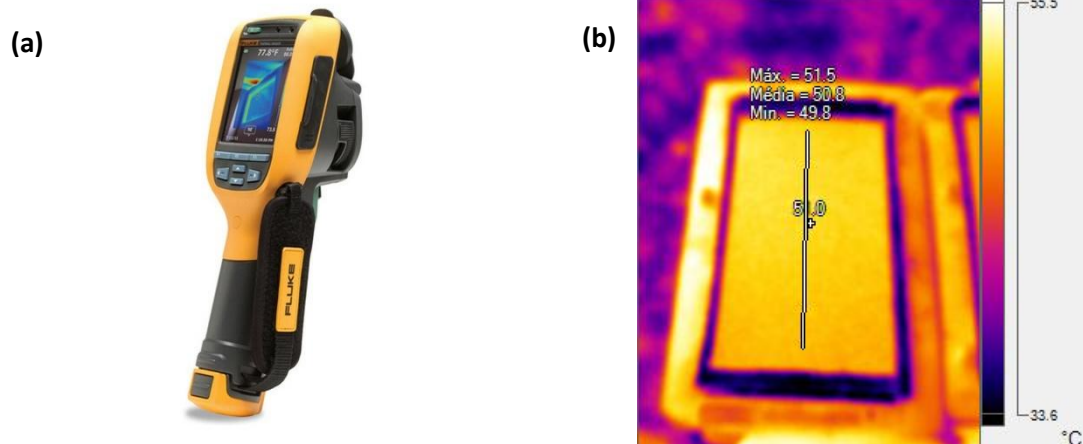
A temperatura ambiente e umidade relativa do ar durante o experimento foi coletada através do datalogger Testo 174h, conforme Figura 8. O instrumento apresenta faixa de medição da temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$  e uma precisão de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Para a umidade relativa do ar apresenta faixa de medição de 0 a 100%.

**Figura 8** – Data Logger 174H utilizado para coleta de dados climáticos.



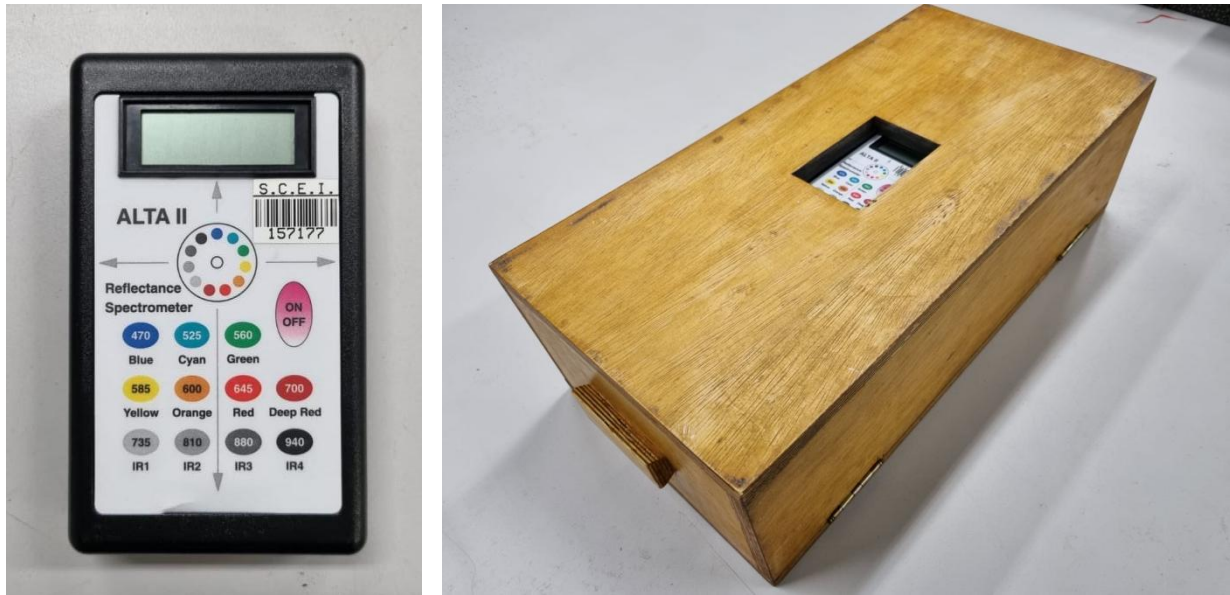
A temperatura superficial das amostras foi coletada através do termovisor Fluke Ti110. A faixa de medição de temperatura varia de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+250^{\circ}\text{C}$  e é exibida em visor com diferentes colorações. Através do software Fluke SmartView foi calculada a temperatura média das amostras, conforme figura 9.

**Figura 9** – (a) Câmera termográfica Fluke TI110 e (b) Exemplo de Foto termográfica das amostras de estudo.



Para o cálculo da refletância solar das amostras foi utilizado o espectrômetro portátil Alta II, conforme Figura 10.

**Figura 10** – (a) Espectrômetro Alta II e (b) equipamento acoplado à caixa de madeira para a coleta de refletância solar das amostras.



Este equipamento foi desenvolvido pela Lunar and Planetary Institute, de Houston, Texas e realiza medições abrangendo onze diferentes comprimentos de onda, entre 470 e 940nm. Entre os comprimentos, sete pertencem a região visível e quatro a região do infravermelho próximo.

O aparelho possui na sua parte superior 11 botões que acionam 11 lâmpadas, dispostas em círculo, em sua parte inferior. Cada lâmpada emite a energia correspondente a um comprimento de onda. Um sensor, localizado no centro das lâmpadas, detecta a energia refletida. Assim, o equipamento exibe um valor em milivolts (mV), a partir do qual é calculada a refletância espectral.

#### 4.6. Coleta de dados

O experimento foi montado em local sem interferência de obstruções, ficando as amostras expostas à radiação solar direta durante quatro dias de medições. Os dados de temperatura e umidade ambiente foram coletados com o Datalogger Testo 174H. O instrumento foi instalado com protetores de radiação e intempéries e posicionado próximo das amostras.

A coleta de dados ocorreu a cada 20 minutos nos dias 13,14,15 e 16 de outubro de 2022, período estável e sem precipitação. Com o objetivo de aclimação, as amostras foram expostas 12h antes ao início da coleta de dados. A água foi adicionada aos recipientes 1 hora antes. Os dados horários de radiação solar foram obtidos através da estação meteorológica da CETESB, em Araçatuba, cidade do experimento (CETESB, 2022).

Os dados de temperatura superficial foram coletados a cada 3 horas, durante o período das 6h às 21h, totalizando 6 coletas em cada dia. No último dia de experimento, a última coleta ocorreu às 18h. Para a medição da temperatura superficial das amostras foi utilizada uma câmera termográfica FLUKE TI110. Fotos termográficas foram tiradas individualmente de cada amostra e por meio do software SmartView foi calculada a temperatura média superficial da região central da amostra.

O cálculo da taxa de evaporação das amostras foi baseado na metodologia de Li, Harvey e Ge (2014). Segundo Li, Harvey e Ge (2014) o efeito de resfriamento por evaporação dos pavimentos permeáveis é fortemente influenciado pela taxa de evaporação. Para tanto, inicialmente as amostras no estado seco, juntamente com o recipiente plástico, foram pesadas. Posteriormente, para as amostras em condições úmidas foi adicionado água nos recipientes até o nível da superfície da amostra, utilizando uma jarra graduada. O excesso de água foi eliminado com uma toalha seca. Assim, todas as amostras no estado molhado foram pesadas a cada três horas, também em conjunto com o recipiente. A massa de água evaporada no momento  $t$  foi dada pela Equação 1.

$$\Delta M_{ae} = M_{20} - M_{2t} \quad (1)$$

Em que:

- $\Delta M_{ae}$  é a massa de água evaporada entre o momento  $t$  e o momento 0;
- $M_{20}$  é a massa da amostra mais caixa mais água no momento 0; e
- $M_{2t}$  é a massa da amostra mais caixa mais água remanescente no momento  $t$ .

Posteriormente, ainda seguindo a metodologia de Li, Harvey e Ge (2014), com os dados da massa de água evaporada ao longo dos quatro dias, foi calculada

a taxa de evaporação de cada amostra. A taxa de evaporação entre o momento  $t_1$  e  $t_2$  pode ser calculada pela equação 2:

$$T_e = \frac{M_{2t1} - M_{2t2}}{A \times (t_2 - t_1)} \quad (2)$$

Em que:

- $T_e$  é a taxa de evaporação (em kg/m<sup>2</sup>/h ou mm/h);
- $M_{2t1}$  é a massa da amostra mais caixa e mais água remanescente no momento  $t_1$ ;
- $M_{2t2}$  é a massa da amostra mais caixa e mais água remanescente no momento  $t_2$ ; e
- $A$  é a área da superfície da amostra em m<sup>2</sup>.

Ainda seguindo a metodologia de Li, Harvey e Ge (2014), foi calculado o calor latente perdido através da evaporação. Quanto maior esse valor, maior o resfriamento evaporativo. O calor latente foi calculado pela equação 3:

$$Q_e = \frac{L \times T_e}{3,6} \quad (3)$$

Em que:

- $Q_e$  é o Calor latente teórico (em W/m<sup>2</sup>);
- $L = 2260$  KJ/Kg é o calor latente de vaporização da água; e
- $T_e$  é a taxa de evaporação.

A absorção ( $A$ ) das amostras corresponde ao incremento de massa devido a água que tende a preencher seus poros permeáveis em relação a sua massa seca. O valor foi calculado seguindo a metodologia apresentada pela norma NBR 9778 (ABNT, 2005), através da seguinte equação.

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \quad (4)$$

Em que:

- $M_{sat}$  é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

- $M_s$  é a massa da amostra seca em estufa.

Para o cálculo da massa seca, a amostra foi levada à estufa a uma temperatura de  $(105^\circ \pm 5)^\circ\text{C}$  por 72h, após a secagem, sua massa foi registrada.

Para a massa saturada, as amostras foram colocadas em um recipiente cheio de água a temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , por 72h. Após o período de saturação, as amostras foram colocadas em um recipiente cheio de água e levadas à fervura. A ebulição foi atingida entre o intervalo de 15 e 30 minutos e mantida por 5h. O nível de água do recipiente foi mantido, adicionando água conforme ocorria a evaporação. Posteriormente, as amostras resfriaram naturalmente até a temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Por fim, determinou-se a massa utilizando uma balança, Figura 11.

**Figura 11** – Balança utilizada no procedimento apresentado pela NBR 9778.



A coleta da refletância foi realizada em condições controladas. Para tanto, foi utilizado o espectrômetro portátil ALTA II. Os cálculos da refletância solar foram baseados nos métodos propostos por (SANTOS; MARINOSKI; LAMBERTS, 2009; PEREIRA et al., 2015; ASTM, 2020a, 2020b). A coleta foi realizada em uma câmara escura feita de madeira para evitar infiltração de luz. Santos, Marinoski e Lamberts (2009) e Pereira et al. (2015) relatam a importância de evitar frestas e luminosidade na coleta de dados com o espectrômetro portátil ALTA II.

#### **4.7. Caracterização das análises estatísticas**

As análises estatísticas utilizadas neste experimento foram:



- Correlação de Pearson: Índice adimensional entre -1 e 1 que mede o grau de correlação linear entre dois conjuntos de dados. Neste experimento foi comprovada através da correlação de Pearson a correlação entre refletância e temperatura máxima superficial.
  - Agrupamento: análise estatística que une amostras com características semelhantes, utilizando o método de ligação de Ward e distância Euclidiana. Para este experimento as variáveis utilizadas foram refletância solar (%) das amostras e a temperatura média máxima (°C) em estado seco e molhado atingido pelas amostras de pavimentos permeáveis e impermeáveis durante os quatro dias de experimento. A análise também apresenta dendograma, que exhibe os níveis de similaridade e os agrupamentos gerados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados do experimento realizado com os pavimentos permeáveis e impermeáveis com diferentes colorações. A refletância solar e temperatura superficial das amostras foram analisadas com o objetivo de determinar o desempenho térmico das amostras ao longo do experimento. Em adição, as amostras com comportamentos semelhantes foram agrupadas e avaliadas as taxas de evaporação e o resfriamento evaporativo dos grupos de amostras.

### 5.1. Análise das amostras de estudo

Nesta seção são analisadas as refletâncias das amostras permeáveis e impermeáveis com diversas colorações e a temperatura superficial horária atingida pelas amostras durante o experimento. Foi analisada a correlação entre essas duas variáveis através de um gráfico de dispersão. Adicionalmente, através da análise de agrupamento, amostras semelhantes foram agrupadas com o intuito de serem estudadas em conjunto.

O valor da refletância total de todas as amostras, obtido através do espectrômetro ALTA II, pode ser observado em ordem crescente na Tabela 4.

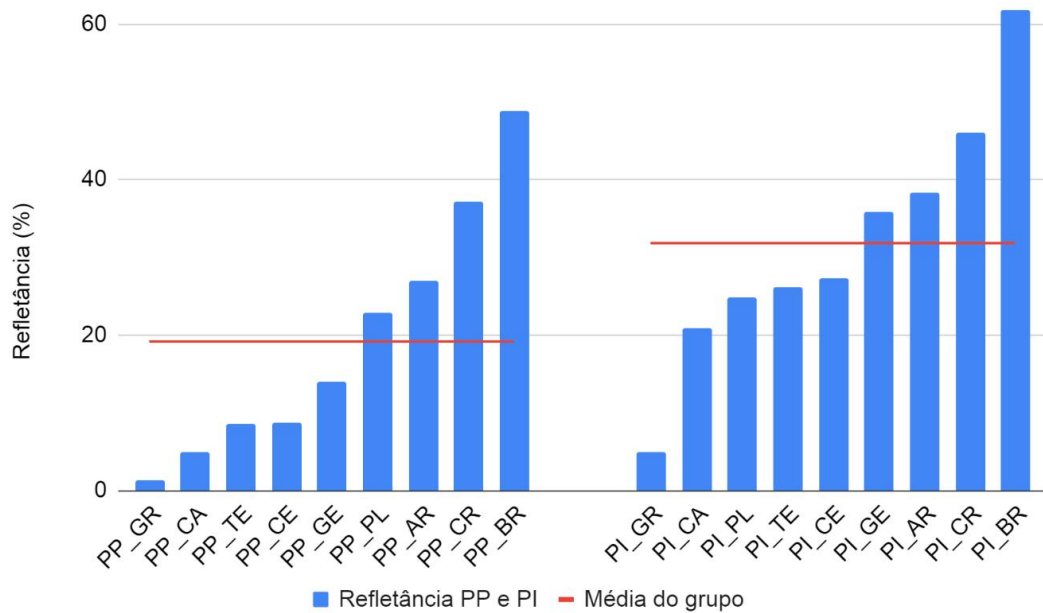
**Tabela 4** – Refletância solar dos pavimentos permeáveis e impermeáveis

Pavimentos Permeáveis				Pavimentos impermeáveis			
Referência	Imagem	Cor	Refletância Solar (%)	Referência	Imagem	Cor	Refletância Solar (%)
PP_GR		Grafite	1,30	PI_GR		Grafite	5,01
PP_CA		Canela	4,94	PI_CA		Canela	20,92
PP_TE		Terracota	8,54	PI_PL		Platina	24,78
PP_CE		Cerâmica	8,65	PI_TE		Terracota	26,12
PP_GE		Gergelim	13,91	PI_CE		Cerâmica	27,28
PP_PL		Platina	22,79	PI_GE		Gergelim	35,85
PP_AR		Areia	26,99	PI_AR		Areia	38,39
PP_CR		Crema	37,13	PI_CR		Crema	46,11
PP_BR		Branco	48,75	PI_BR		Branco	61,87

Verifica-se que os menores valores de refletância solar das amostras permeáveis são da cor grafite (PP\_GR: 1,30%), seguido pela cor canela (PP\_CA: 4,94%). Por outro lado, a cor branca apresenta a maior refletância (PP\_BR: 48,75%) seguida pela cor crema (PP\_CR: 37,13%). Para as amostras impermeáveis tem-se a mesma tendência, com as menores refletâncias sendo da cor grafite (PI\_GR: 5,01%) e canela (PI\_CA: 20,92%). Enquanto os maiores valores são da cor branca (PI\_BR: 61,87%) e crema (PI\_CR: 46,11%). Os valores intermediários variam em relação a cada conjunto. Isso pode ser explicado pela coloração das amostras impermeáveis, que apesar de utilizarem o mesmo pigmento que as peças permeáveis, apresentam granilhas em sua composição que acabam por modificar sua coloração final, influenciando em sua refletância. Adicionalmente, pode ser observado que as amostras permeáveis sempre apresentam valores inferiores de refletância quando comparadas a sua cor equivalente nas amostras impermeáveis. Neste sentido, Zhang; Jiang; Liang (2015), Muniz-gaal et al. (2018) e Seifeddine; Amziane; Toussaint (2022) relatam que superfícies mais rugosas tendem a apresentar refletâncias menores. A tendência de que amostras com cores mais claras apresentaram maiores refletâncias, também foi observado por Muniz-gaal et al. (2018) e Castro et al. (2003). Wang et al. (2018) sugerem que pavimentos permeáveis podem aumentar o efeito das ilhas de calor em estado seco devido aos menores valores de refletância.

A Figura 12 mostra os valores de refletância solar em ordem crescente para os PPs e PIs.

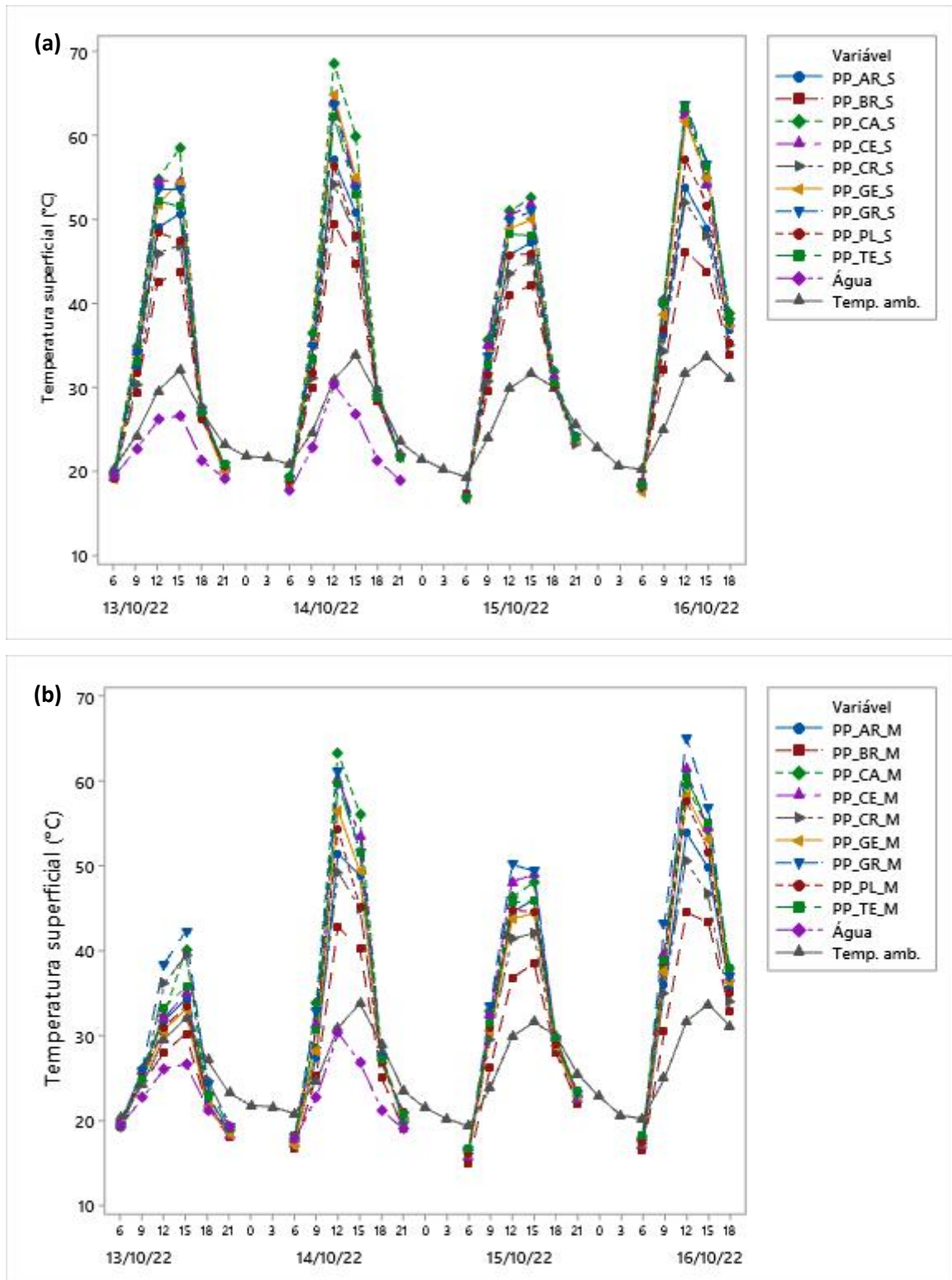
**Figura 12** – Refletância Solar. dos pavimentos permeáveis (PP) e impermeáveis (PI) e média das refletâncias de cada grupo.



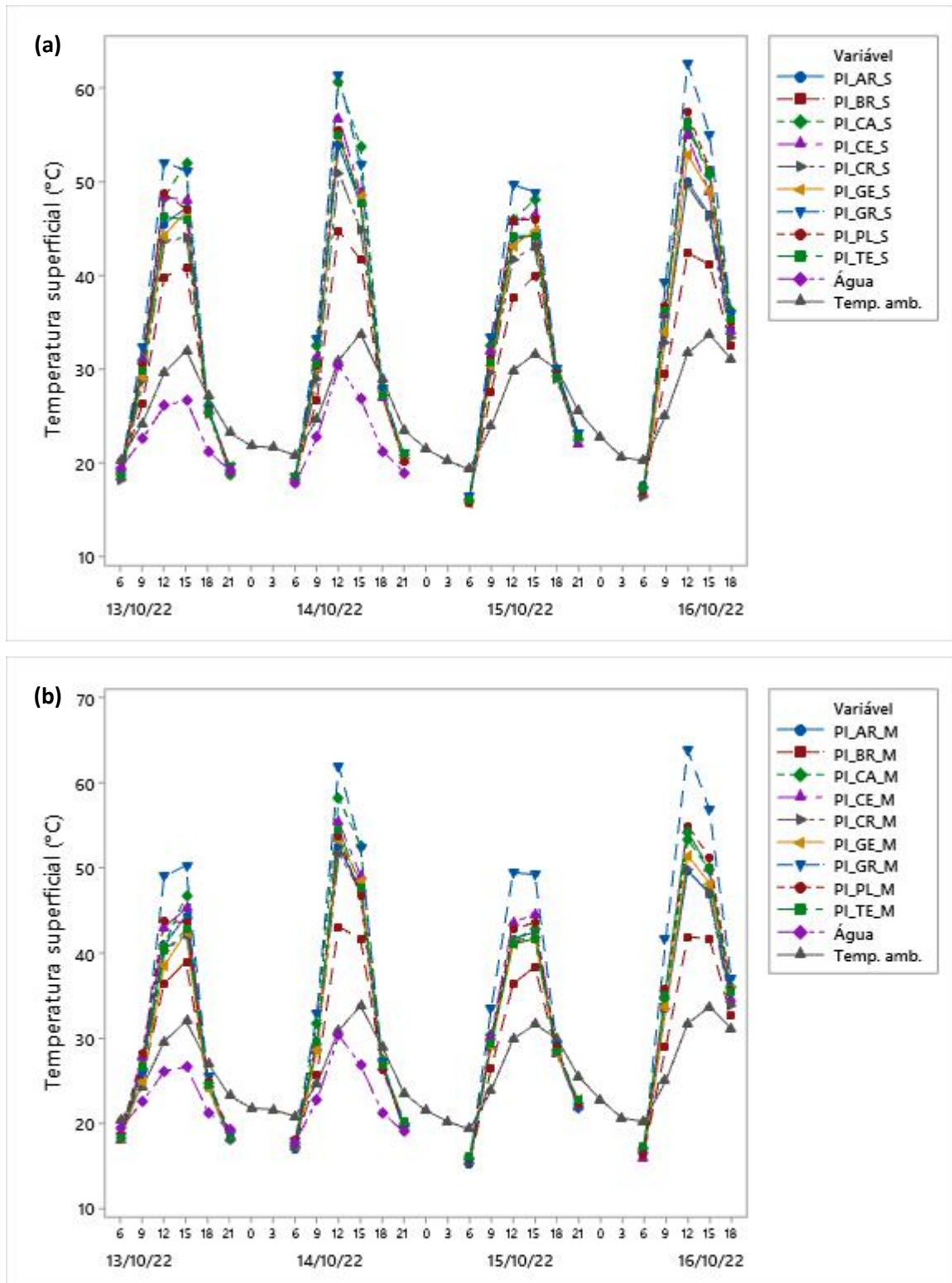
O valor médio de refletância é de 19,16% para as 9 amostras permeáveis de concreto, enquanto a média da refletância para as amostras impermeáveis é de 31,81%. Enquanto 5 das amostras permeáveis possuem refletância abaixo de 20% (PP\_GR, PP\_CA, PP\_TE, PP\_CE, PP\_GE), apenas 1 amostra impermeável (PP\_GR) possui valor inferior a 20% de refletância. Ainda, a única amostra que ultrapassa a refletância de 50% é a amostra branca de pavimento impermeável (PI\_BR), com 61,87%.

As Figuras 13 e 14 mostram os valores de temperatura superficial horária obtidos pelas 36 amostras com diferentes cores, em condições secas e molhadas, durante os quatro dias de experimento.

**Figura 13** – Temperatura superficial das amostras (a) permeáveis secas e (b) permeáveis molhadas.



**Figura 14** – Temperatura superficial das amostras (a) impermeáveis secas e (b) impermeáveis molhadas.



A Figura 13 mostra o grupo dos pavimentos permeáveis, em condição seca (a) e molhada (b). Durante os quatro dias, as nove amostras apresentaram valores máximos entre 12:00 e 15:00. É possível observar grande variação de temperatura

superficial entre as amostras em um mesmo horário, devido a diferença da refletância solar, principalmente nos horários de máxima. Durante o primeiro dia observa-se a maior diferença entre os valores de temperatura das amostras secas e molhadas. Enquanto a amostra canela (PP\_CA) atingiu a maior temperatura dos PPs em estado seco, chegando a 58,5°C no primeiro dia, entre as amostras molhadas a grafite (PP\_GR) atingiu 42,3°C.

A Figura 14 refere-se aos pavimentos impermeáveis em estado seco (a) e molhado (b). Estes também apresentam valores de temperatura superficial que variam conforme a refletância das amostras. Entretanto, a diferença de temperatura entre o estado seco e molhado é menor. No primeiro dia, entre as amostras secas o pavimento grafite (PI\_GR) obteve o maior valor de temperatura superficial, 52,1°C, enquanto entre as amostras molhadas o pico de temperatura no primeiro dia também foi atingido pela amostra grafite chegando a 50,3°C. A partir do terceiro dia o recipiente apenas com água já havia evaporado por completo, assim tem-se valores de temperatura apenas para os dois primeiros dias.

Segundo Li et al. (2013), em experimento realizado na Califórnia, os pavimentos drenantes em condições úmidas alcançaram picos de resfriamento entre 15°C e 35°C em relação aos pavimentos impermeáveis. Esse efeito de resfriamento ocorre devido à absorção de energia pela água, durante sua evaporação.

A Tabela 5 mostra os valores máximos de temperatura para os quatro dias de experimento e sua média, para as amostras permeáveis e impermeáveis em estado seco e molhado. O objetivo é quantificar a redução de temperatura superficial atingida através do aumento de refletância das superfícies e também o efeito de resfriamento evaporativo, comparando a temperatura de uma mesma amostra em estado seco e molhado. A temperatura superficial de todos os pavimentos, como da água, apresenta comportamento similar em relação a variação da temperatura ambiente. A partir do terceiro dia, o recipiente com água evaporou por completo, por esse motivo só existem valores de temperatura da água para os dois primeiros dias de experimento.

**Tabela 5** – Temperatura máximas das amostras permeáveis (PP) e impermeáveis (PI) em estado seco (S) e molhado (M).

Referência	Temperatura máxima				Média
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	
PP_AR_S	50,7	57,1	47,3	53,8	52,2
PP_BR_S	43,8	49,5	42,2	46,2	45,4
PP_CA_S	58,5	68,7	52,6	63,0	60,7
PP_CE_S	54,7	64,1	51,8	62,6	58,3
PP_CR_S	47,0	54,2	45,1	52,1	49,6
PP_GE_S	54,4	65,0	50,0	61,7	57,8
PP_GR_S	53,6	63,8	51,0	63,7	58,0
PP_PL_S	48,4	56,5	45,9	57,1	52,0
PP_TE_S	52,2	62,3	48,3	63,5	56,6
PP_S média	51,5	60,1	48,2	58,2	54,5
PP_AR_M	34,3	51,5	46,0	53,9	46,4
PP_BR_M	30,2	42,8	38,5	44,5	39,0
PP_CA_M	40,0	63,4	48,1	59,6	52,8
PP_CE_M	35,0	60,2	49,0	61,6	51,5
PP_CR_M	39,6	49,3	42,1	50,6	45,4
PP_GE_M	33,1	56,6	44,4	58,3	48,1
PP_GR_M	42,3	61,2	50,2	65,2	54,7
PP_PL_M	33,4	54,4	44,8	57,7	47,6
PP_TE_M	35,8	59,8	45,9	60,7	50,6
PP_M média	36,0	55,5	45,4	56,9	48,4
PI_AR_S	47,2	53,9	44,4	50,0	48,9
PI_BR_S	40,9	44,8	40,0	42,4	42,0
PI_CA_S	52,0	60,7	48,1	55,8	54,2
PI_CE_S	48,4	56,9	46,6	55,1	51,8
PI_CR_S	44,1	51,0	43,1	49,7	47,0
PI_GE_S	46,8	54,8	44,8	52,9	49,8
PI_GR_S	52,1	61,5	49,7	62,7	56,5
PI_PL_S	48,8	55,5	46,0	57,5	52,0
PI_TE_S	46,3	55,1	44,3	56,4	50,5
PI_S Média	47,4	54,9	45,2	53,6	50,3
PI_AR_M	44,4	52,6	42,5	49,7	47,3
PI_BR_M	39,0	43,1	38,4	41,9	40,6
PI_CA_M	46,8	58,2	42,9	53,4	50,3
PI_CE_M	45,3	55,5	44,5	54,5	50,0
PI_CR_M	42,3	51,7	41,9	49,9	46,5
PI_GE_M	42,4	53,3	41,7	51,5	47,2
PI_GR_M	50,3	62,0	49,5	63,9	56,4
PI_PL_M	43,8	53,7	43,6	55,0	49,0
PI_TE_M	42,8	54,6	41,7	54,4	48,4
PI_M Média	44,1	53,9	43,0	52,7	48,4
Água	26,6	30,3	-	-	28,5



Considerando as amostras em estado seco, verifica-se que as amostras permeáveis na cor canela (PP\_CA) e cerâmica (PP\_CE), que estão entre as menores refletâncias, são as que possuem os maiores valores de temperatura superficial, atingindo durante os quatro dias de experimento a temperatura média máxima de 60,7°C e 58,3°C, respectivamente. Já as menores temperaturas superficiais são das amostras que apresentaram as maiores refletâncias, amostra na cor branca (PP\_BR) e crema (PP\_CR), atingindo a temperatura média máxima de 45,4°C e 49,6°C, respectivamente. Em adição, a diferença térmica máxima entre as amostras foi de 15,3°C, entre a amostra canela (PP\_CA) e branca (PP\_BR).

Para as amostras impermeáveis nas mesmas condições, a maior média máxima de temperatura foi obtido pela amostra grafite (PI\_GR), que atingiu 56,5°C. Enquanto a amostra branca (PI\_BR) apresentou a menor temperatura média máxima, atingindo 42,0°C. Uma diferença de 14,5°C entre os valores extremos. Infere-se que o aumento da refletância do pavimento é responsável pela redução da temperatura superficial. Li; Harvey; Ge (2014) encontraram os maiores valores de temperatura superficial máxima para sua amostra de menor refletância (8%), o pavimento asfáltico com coloração escura atingiu o pico de 50°C e 60°C, no primeiro e segundo dia de experimento, respectivamente.

Já no estado úmido, as amostras permeáveis apresentaram valores menores de temperatura se comparadas às amostras secas. No primeiro dia as amostras apresentaram a maior diferença entre o estado seco e úmido, devido ao efeito de resfriamento evaporativo causado pela evaporação da água. Durante os quatro dias de experimento a amostra com cor grafite atinge a temperatura média máxima de 54,7°C e 56,4°C, para a amostra permeável (PP\_GR) e impermeável (PI\_GR), respectivamente. A amostra branca atinge o menor valor de temperatura superficial entre as amostras, com média máxima de 39,0°C para amostra permeável (PP\_BR) e 40,6°C para a amostra impermeável (PI\_BR). A variação decorrente da diferença de refletância foi de 15,7°C para os PPs e de 15,8°C para os PIs. Seifeddine; Amziane; Toussaint (2022) encontraram a variação de 15,6-28,1°C entre as máximas molhadas das amostras de pavimento permeável em relação a amostra de pavimento asfalto impermeável, com menor refletância (8%).

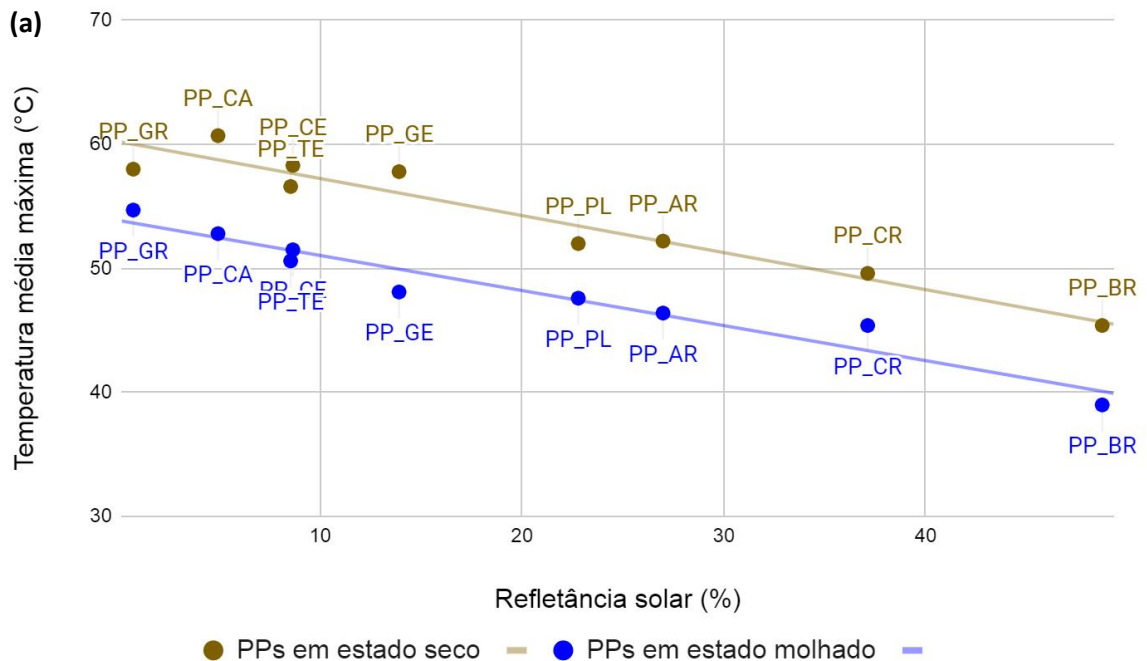
Ao compararmos a mesma amostra em estado seco e molhado, entre as amostras permeáveis, observa-se a diferença de 3,3°C entre a média de temperatura máximas para as amostras PP\_GR e a diferença de 6,4°C para a

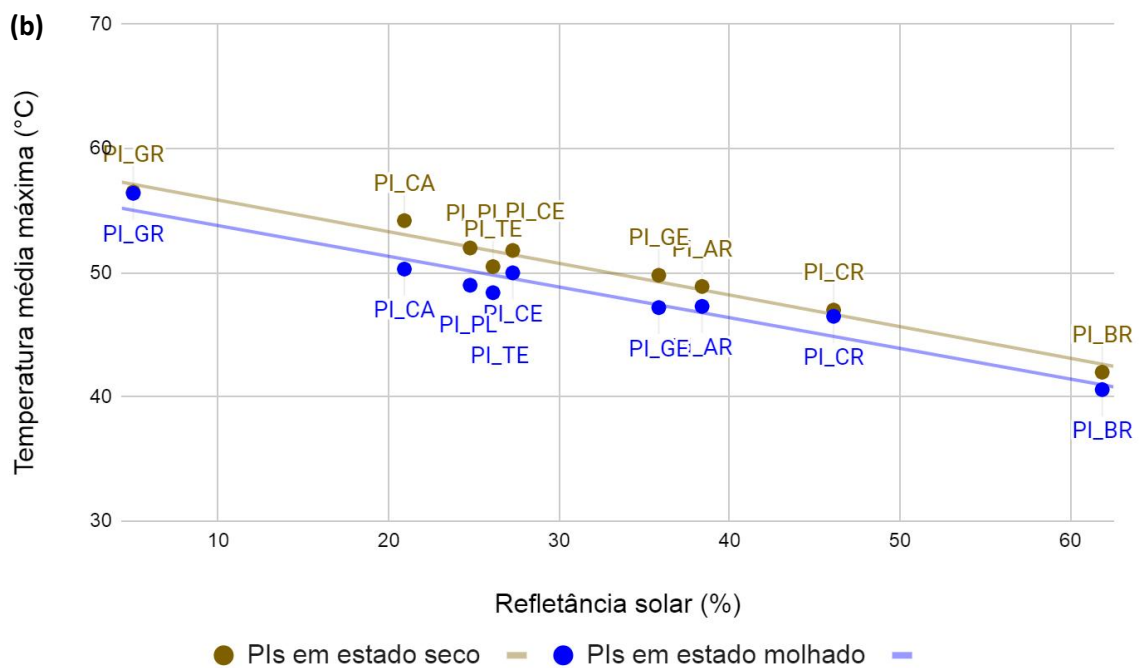
amostra PP\_BR. Para os pavimentos impermeáveis a diferença entre a média máxima de temperatura para a amostra PI\_GR chegou a 0,1°C e a amostra PI\_BR obteve a diferença de 1,4°C. A análise mais aprofundada sobre o efeito de resfriamento evaporativo será tratada posteriormente neste trabalho.

Neste caso, a água (AG) com superfície livre apresenta a menor temperatura média máxima, alcançando a temperatura máxima de 28,5°C. A média máxima da temperatura da água foi calculada apenas nos dois primeiros dias, visto que a partir do terceiro dia o conteúdo total do recipiente já havia evaporado.

Com o objetivo de verificar a correlação entre as variáveis, refletância solar e temperatura média máxima das amostras, foi calculado o coeficiente de Pearson (Figura 15).

**Figura 15** – Dispersão entre refletância solar e temperatura média máxima das amostras (a) permeáveis e (b) impermeáveis, em estado seco e molhado.

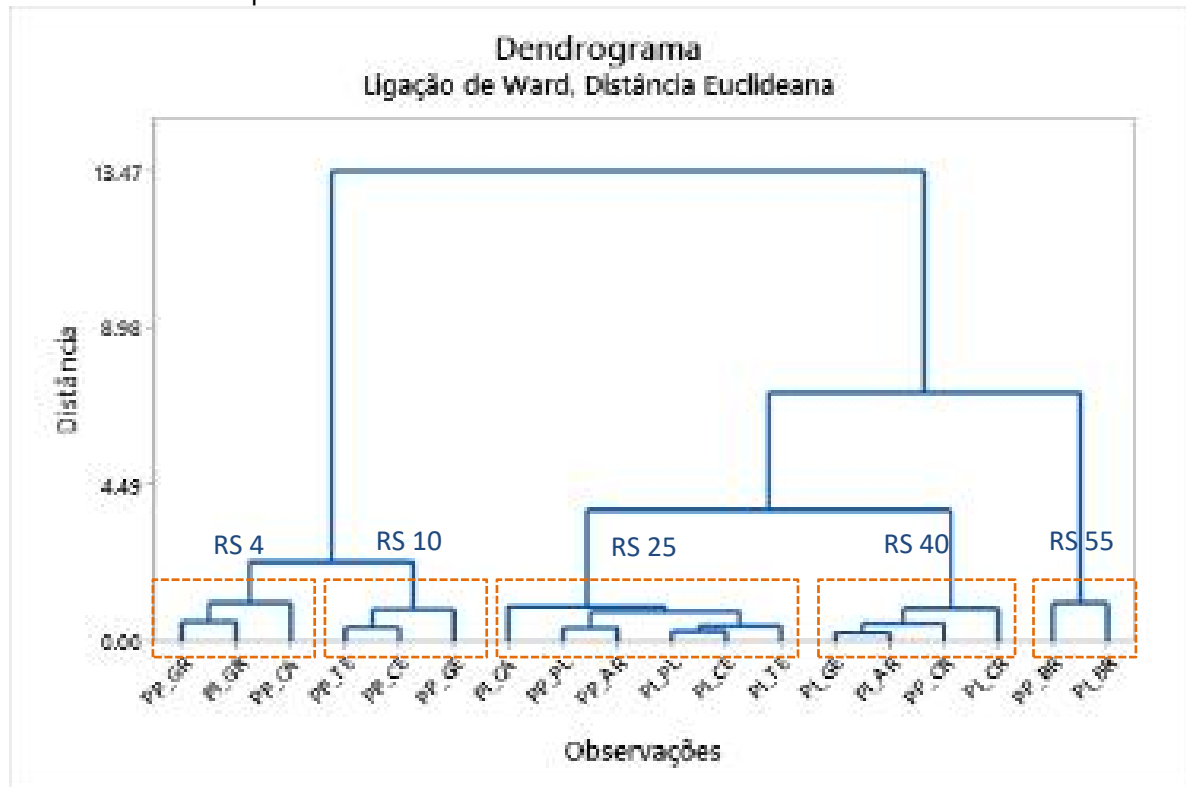




Para os pavimentos permeáveis, o resultado demonstrou um coeficiente de -0,962 e -0,969 para as amostras em estado seco e molhado, respectivamente, demonstrando uma forte correlação. Para os pavimentos impermeáveis o coeficiente de Pearson encontrado foi de -0,984 para os Pls em estado seco e -0,966 para os Pls em estado molhado. O valor negativo indica uma correlação inversa, ou seja, uma vez que a refletância solar aumenta, a temperatura média máxima diminui. Este resultado também é evidenciado no trabalho de Li; Harvey; Ge (2014).

Com a finalidade de identificar comportamentos similares entre os diferentes pavimentos permeáveis e impermeáveis, em estado seco ou molhado, foi realizada a análise de agrupamento, conforme dendograma apresentado na Figura 16.

**Figura 16** – Clusterização dos pavimentos permeáveis e impermeáveis, considerando os valores de refletância solar e temperatura média máxima em estado seco e molhado.



Esta técnica de análise multivariada tem o objetivo de reunir amostras que compartilham características comuns e é medida através da distância Euclidiana. Nessa aplicação, as variáveis utilizadas no agrupamento de observações foram a refletância solar das amostras e a temperatura média máxima em estado seco e molhado atingido pelas amostras de pavimentos permeáveis e impermeáveis, durante os quatro dias de experimento. Verifica-se que as amostras, seguiram uma tendência de ordem crescente em relação a refletância solar, independentemente do tipo de pavimento, permeável ou impermeável. Verificou-se que as amostras se agruparam por similaridade em cinco grupos (RS 4, RS 10, RS 25, RS 40 e RS 55). O nome dos grupos equivale a refletância média entre as amostras que o compõem.

A Tabela 6 indica a refletância e temperatura média máxima individual de cada amostra e média correspondente de cada grupo, em estado seco e molhado. Enquanto a Figura 16 mostra a representação gráfica do agrupamento através do dendrograma, na Tabela 6 observa-se a temperatura máxima e refletância solar de cada amostra.

**Tabela 6** – Valores de refletância solar e temperatura média máxima em estado seco e molhado para os pavimentos e média dos grupos.

Grupo	Referência	Refletância (%)	Refletância média (%)	Temperatura média máx. estado seco (°C)	Média grupo (°C)	Temperatura média máx. estado molhado (°C)	Média grupo (°C)
RS4	PP_GR	1,30		58,0		54,7	
	PP_CA	4,94	3,8	60,7	58,4	52,8	54,6
	PI_GR	5,01		56,5		56,4	
RS10	PP_TE	8,54		56,6		50,6	
	PP_CE	8,65	10,4	58,3	57,6	51,5	50,1
	PP_GE	13,91		57,8		48,1	
RS25	PI_CA	20,92		54,2		50,3	
	PP_PL	22,79		52,0		47,6	
	PI_PL	24,78	24,8	52,0	52,1	49,0	48,6
	PI_TE	26,12		50,5		48,4	
	PP_AR	26,99		52,2		46,4	
	PI_CE	27,28		51,8		50,0	
RS40	PI_GE	35,85		49,8		47,2	
	PP_CR	37,13	39,4	49,6	48,8	45,4	46,6
	PI_AR	38,39		48,9		47,3	
	PI_CR	46,11		47,0		46,5	
RS55	PP_BR	48,75	55,3	45,4	43,7	39,0	39,8
	PI_BR	61,87		42,0		40,6	

Verifica-se que Grupo RS 4 apresenta uma refletância média de 3,8%, o Grupo RS 10 uma refletância de 10,4%, o Grupo RS 25 uma refletância de 24,8%, o Grupo RS 40 a refletância média de 39,4% e por fim o Grupo RS 55, como maior refletância, 55,3%.

O grupo RS 4 é o que apresenta a maior temperatura média máxima, 58,4°C em estado seco e 54,6°C em estado molhado. Em estado seco, esse valor diminui em 1,4%, 10,8%, 16,4% e 25,2%, em relação aos grupos RS 10, RS 25, RS 40, RS 55, respectivamente. Já para os pavimentos molhados, o valor de temperatura média máxima apresentado por RS 4 reduz em 8,2% em relação ao RS 10, 11% para RS 25, 14, 6% para RS 40 e 27,1% para RS 55.

As Tabela 7 e 8 mostram os valores médios do resfriamento evaporativo diário separados por grupos (R4, R10, R25, R40 e R55), para as amostras permeáveis e impermeáveis, respectivamente.

**Tabela 7** – Variação entre temperatura máxima de uma mesma amostra em estado seco e molhado (resfriamento evaporativo) para pavimentos permeáveis de cada grupo,

Grupo	Referência	Variação da temp, (°C) Dia 1	Variação da temp, (°C) Dia 2	Variação da temp, (°C) Dia 3	Variação da temp, (°C) Dia 4
RS 4	PP_GR	14,9	4,0	2,7	0,9
	PP_CA				
RS 10	PP_TE	19,1	4,9	3,6	2,4
	PP_CE				
	PP_GE				
RS 25	PP_PL	15,7	3,9	1,2	-0,4
	PP_AR				
RS 40	PP_CR	7,4	4,9	3,0	1,5
RS 55	PP_BR	13,6	6,7	3,7	1,7

**Tabela 8** – Variação entre temperatura máxima de uma mesma amostra em estado seco e molhado (resfriamento evaporativo) para pavimentos impermeáveis de cada grupo.

Grupo	Referência	Variação da temp, (°C) Dia 1	Variação da temp, (°C) Dia 2	Variação da temp, (°C) Dia 3	Variação da temp, (°C) Dia 4
RS 4	PI_GR	1,8	-0,5	0,2	-1,2
	PI_CA				
RS 25	PI_PL	4,2	1,6	3,1	1,9
	PI_TE				
	PI_CE				
RS 40	PI_GE	3,0	0,7	2,1	0,5
	PI_AR				
RS 55	PI_CR	1,9	1,7	1,6	0,5
	PI_BR				

Na Tabela 7, entre pavimentos permeáveis, o grupo RS 10 apresentou o maior efeito no resfriamento evaporativo entre o estado seco e molhado, com diferença de 19,1°C de temperatura superficial. Os grupos RS 4, RS 10 e RS 25 apresentam os maiores valores de variação no primeiro dia (14,9°C, 19,1°C e 15,7°C) mas também as maiores reduções nesse efeito de resfriamento evaporativo, apresentando uma redução de 78,84%, 76,08% e 74,14% entre o primeiro e segundo dia, respectivamente. De uma maneira geral, menores refletâncias possuem os maiores valores de resfriamento evaporativo no primeiro dia, entretanto também são os pavimentos que obtêm a maior redução desse efeito do primeiro para o segundo dia. Por exemplo, o Grupo RS 55, com maior refletância, apresentou um resfriamento evaporativo de 13,6°C e redução desse valor em 53,8% do primeiro dia para o segundo.

Na Tabela 8, os pavimentos impermeáveis apresentam valores menores em relação a variação de temperatura entre os pavimentos secos e molhados, uma vez que sua superfície é impermeável e diferentemente dos pavimentos permeáveis, sua estrutura não colabora para a evaporação da água. A maior variação de temperatura é do grupo RS 25, que chega a 4,2°C no primeiro dia. Esse valor passa para 1,6°C no segundo dia, uma redução de 61,9%. O Grupo RS 55, com maior refletância, atinge um efeito de resfriamento evaporativo de 1,9°C e redução de 10,5% desse valor no segundo dia em relação ao primeiro. Nenhum pavimento impermeável compõe o grupo RS 10, por esse motivo, não existem valores para esse grupo.

No estudo apresentado por Li et al. (2013) as amostras de asfalto apresentaram refletância de 8-9%, as amostras de concreto faixa de 18-26% e os pavimentos de concreto intertravado com refletâncias que variavam de 25-28%. Através da irrigação desses pavimentos foram atingidos picos de resfriamento evaporativo entre 15-35°C.

Resultados semelhantes foram encontrados por Wang et al. (2018), onde após a irrigação das amostras de pavimento, o pavimento de concreto permeável com refletância de 28% reduziu sua temperatura superficial em 10°C, inferindo que a irrigação pode ajudar a reduzir a temperatura de pavimentos permeáveis e contribuir para a redução dos efeitos das ilhas de calor. O pavimento de material cerâmico (refletância de 14%), devido a sua maior capilaridade, conseguiu prolongar o efeito de resfriamento evaporativo por três dias enquanto o concreto permeável manteve o resfriamento por apenas um dia. Entretanto, em relação ao concreto denso, que possuía maior refletância (40%), o pavimento cerâmico atingiu temperaturas inferiores por apenas um dia após a irrigação e o concreto permeável apenas por algumas horas. Portanto, o efeito de resfriamento evaporativo colabora para a redução da temperatura superficial, em adição, a escolha de superfícies com maiores refletâncias também contribui para a redução dos picos de temperatura.

Conclui-se, que ao serem observados durante os quatro dias de experimento, os pavimentos permeáveis e impermeáveis em estado seco e molhado em um mesmo grupo atingiram temperaturas médias máximas semelhantes, como observado na Tabela 6. Entretanto, a variação de temperatura média máxima diária atingida pelos pavimentos permeáveis e impermeáveis em estado seco e molhado demonstra o efeito de resfriamento evaporativo, principalmente, durante o primeiro dia (Tabela 7 e Tabela 8). À medida que o experimento avança, o efeito de

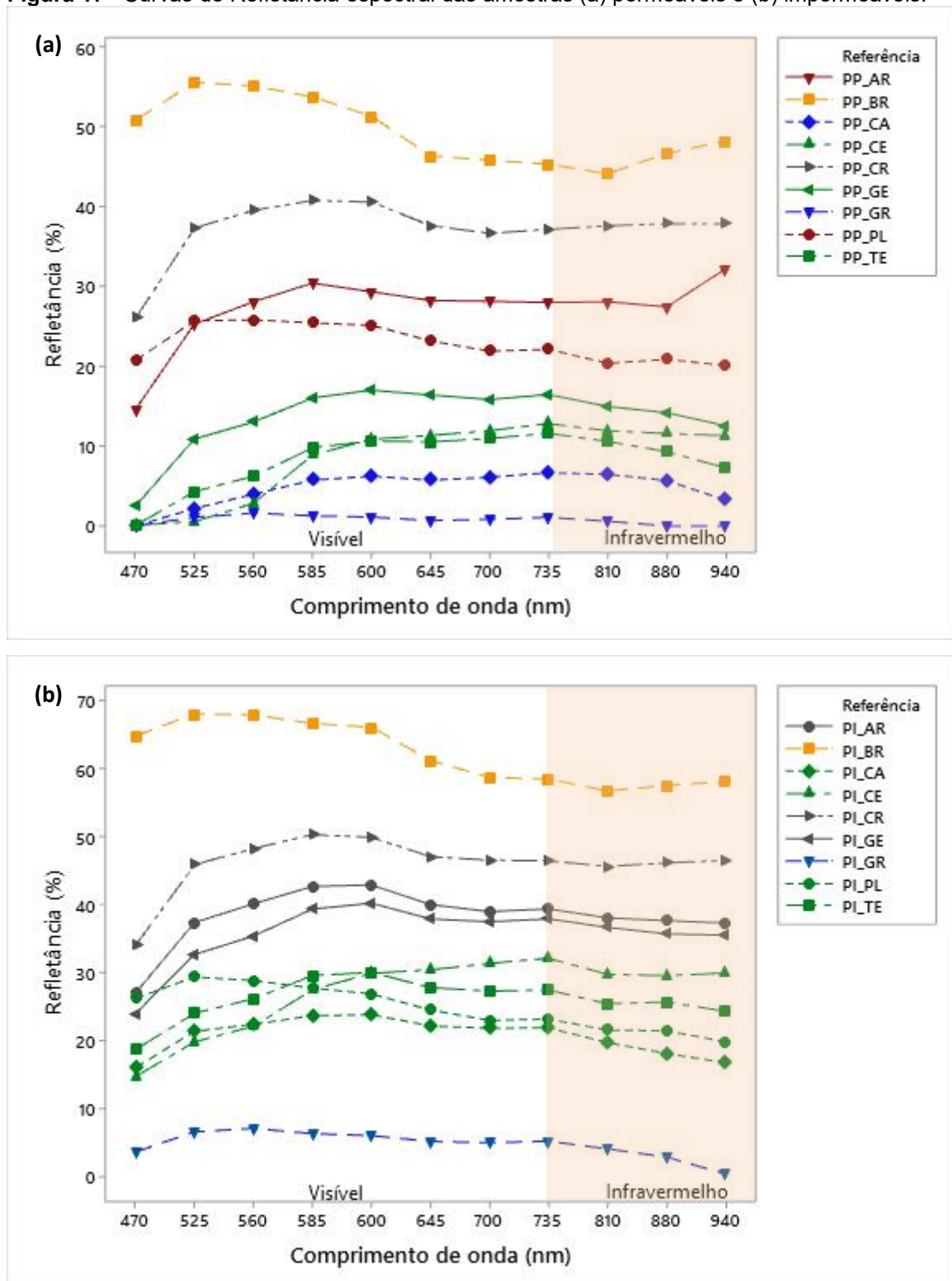
resfriamento diminui, até que se assemelham as temperaturas máximas atingidas pelas amostras em estado seco e molhado, diminuindo esse efeito de resfriamento evaporativo, que tem valor significativo no primeiro dia. Adicionalmente, os pavimentos permeáveis, devido a estrutura que colabora para a evaporação da água, atingem os maiores valores de resfriamento evaporativo quando comparados aos pavimentos impermeáveis.

A refletância dos materiais é de extrema importância quando se trata sobre a absorção de radiação solar pelas superfícies urbanas. A cor e a rugosidade são características que influenciam nesses valores. Para tanto, foram feitas as análises da refletância espectral das amostras pertencentes aos grupos RS 4, RS 10, RS 25, RS 40 e RS 55 separadas em pavimentos permeáveis e impermeáveis. Observa-se na Figura 17, a refletância espectral das amostras permeáveis e impermeáveis, sendo o comprimento de onda 470nm até 700nm correspondente a luz visível e a área destacada em vermelho as ondas que correspondem a região do infravermelho, com comprimento de onda variando de 735nm a 940nm. Segundo Kowalski et al (2019), a refletância solar das amostras corresponde a integral da área abaixo da curva de refletância espectral.

Separadas por grupos, as amostras do Grupo RS 4 possuem a cor azul, o grupo RS 10 a cor verde, RS 25 são representadas pela cor vermelha, o grupo RS 40 a cor cinza e o grupo RS 55 possui a cor amarela. A maioria das amostras apresentam os menores valores de refletância no comprimento de onda 470nm e certa constância nos valores de refletância nos comprimentos de onda pertencentes ao visível e ao infravermelho próximo. Destaca-se o comportamento semelhante das amostras que fazem parte de um mesmo grupo.



**Figura 17** –Curvas de Refletância espectral das amostras (a) permeáveis e (b) impermeáveis.



## 5.2. Análise da taxa de evaporação

A taxa de evaporação foi calculada sobre a massa de água evaporada do recipiente (amostras em estado molhado) a cada 3 horas, conforme metodologia apresentada por Li; Harvey; Ge (2014). A Tabela 9 e Tabela 10 mostram os valores máximos de taxa de evaporação diária das amostras e a média dos grupos de pavimentos permeáveis e impermeáveis, respectivamente.

**Tabela 9** – Taxa de evaporação máxima diária das amostras permeáveis (PP) e a média dos grupos.

Grupo	Referência	Tx evap, máx, (mm/h) Dia 1	Média grupo Dia 1	Tx evap, máx, (mm/h) Dia 2	Média grupo Dia 2	Tx evap, máx, (mm/h) Dia 3	Média grupo Dia 3	Tx evap, máx, (mm/h) Dia 4	Média grupo Dia 4	Redução Dia1/Dia2
RS 4	PP_GR	0,97	1,01	0,29	0,25	0,12	0,13	0,12	0,12	75,5%
	PP_CA	1,05		0,21		0,14		0,12		
RS 10	PP_TE	1,07	1,06	0,27	0,31	0,14	0,17	0,10	0,10	71,0%
	PP_CE	1,07		0,29		0,14		0,08		
	PP_GE	1,05		0,37		0,23		0,10		
RS 25	PP_PL	1,01	1,01	0,23	0,30	0,14	0,13	0,06	0,08	70,4%
	PP_AR	1,01		0,37		0,12		0,10		
RS 40	PP_CR	0,72	0,72	0,35	0,35	0,23	0,23	0,19	0,19	51,4%
RS 55	PP_BR	0,78	0,78	0,41	0,41	0,25	0,25	0,10	0,10	47,4%
-	Água	0,70		0,74		-		-		-

**Tabela 10** – Taxa de evaporação máxima diária das amostras impermeáveis (PI) e a média dos grupos.

Grupo	Referência	Tx evap, máx, (mm/h) Dia 1	Média grupo Dia 1	Tx evap, máx, (mm/h) Dia 2	Média grupo Dia 2	Tx evap, máx, (mm/h) Dia 3	Média grupo Dia 3	Tx evap, máx, (mm/h) Dia 4	Média grupo Dia 4	Redução Dia1/Dia2
RS 4	PI_GR	0,31	0,31	0,12	0,12	0,08	0,08	0,08	0,08	60,0%
	PI_CA	0,41		0,19		0,14		0,10		
RS 25	PI_PL	0,19	0,32	0,23	0,21	0,12	0,13	0,10	0,10	34,9%
	PI_TE	0,45		0,27		0,16		0,10		
	PI_CE	0,25		0,16		0,10		0,10		
RS 40	PI_GE	0,43	0,37	0,27	0,24	0,19	0,16	0,08	0,09	35,2%
	PI_AR	0,35		0,25		0,12		0,10		
	PI_CR	0,33		0,21		0,19		0,08		
RS 55	PI_BR	0,14	0,14	0,12	0,12	0,06	0,06	0,12	0,12	14,3%
-	Água	0,70		0,74		-		-		-

Observa-se que, entre os pavimentos permeáveis, os grupos RS 4, RS 10 e RS 25 apresentaram os maiores valores de taxa de evaporação no primeiro dia, possuindo valores acima de 1,00mm/h (Tabela 8). Entretanto, são os grupos que possuem as maiores reduções na taxa de evaporação máxima do primeiro dia em relação ao segundo, 75,5%, 71,0% e 70,4%, respectivamente. Entre os pavimentos impermeáveis, a maior taxa de evaporação no primeiro dia pertence ao Grupo RS 40, com 0,37mm/h (Tabela 9). Porém, a maior redução na taxa de evaporação foi do Grupo RS 4, que apresentou uma redução de 60,0%, com taxa de evaporação de 0,31mm/h no primeiro dia e de 0,12mm/h no segundo. Devido à redução na disponibilidade de água, o quarto dia apresentou os menores valores de máxima para taxa de evaporação para todas as amostras, permeáveis e impermeáveis.

Os resultados encontrados nesse experimento, também foram encontrados por Seifeddine; Amziane; Toussaint (2022). Em seu experimento, os pavimentos permeáveis obtiveram os maiores valores de taxa de evaporação no primeiro dia às 14h, atingindo 0,48-1,02mm/h. A redução na taxa de evaporação dos PPs entre o primeiro e segundo dia foi de 52-77%, e de 70-87% no terceiro dia em relação ao primeiro. Com isso, concluíram que o efeito de resfriamento evaporativo só é significativo durante o primeiro dia e que a baixa taxa de evaporação do segundo dia é insuficiente para contribuir para a dissipação do calor das amostras.

Verifica-se que a água atingiu picos de 0,70-0,74mm/h, valores inferiores ao pico de taxa de evaporação de 2,0-2,5mm/h encontrados por Li; Harvey; Ge (2014). Esse valor inferior pode ser explicado pelas condições climáticas de cada experimento, uma vez que a umidade relativa do ar durante o experimento de Li; Harvey; Ge (2014) foi de aproximadamente 20% e a temperatura ambiente atingiu picos de 36-39°C, enquanto durante este experimento a umidade atingiu seu valor mínimo de 39,8% e picos de temperatura entre 32-34,6 °C.

No primeiro dia do experimento, todos os grupos de pavimentos permeáveis atingiram picos de taxa de evaporação maiores (0,72 – 1,06mm/h) que o recipiente com água com superfície livre (0,70mm/h). Em contrapartida, a partir do segundo dia, a água com superfície livre apresentou taxa de evaporação maior em relação a todos os pavimentos. Destaca-se que para os pavimentos impermeáveis, a água também apresentou valores maiores de evaporação em todos os grupos e períodos.

Entre os pavimentos permeáveis, os grupos R4, R10 e R25 possuem os maiores valores de taxa de evaporação máxima no primeiro dia, 1,01-1,06mm/h, e

uma redução de 70,4-75,5% em relação ao segundo dia. Esse comportamento explica o comportamento observado na Tabela 7, onde os grupos R4, R10 e R25 também possuíam os maiores efeitos de resfriamento evaporativo com as maiores reduções dos valores em relação ao primeiro e segundo dia.

A redução da taxa de evaporação também foi observado no experimento de Wang et al. (2018), onde pavimentos permeáveis de material cerâmico, concreto permeável e concreto denso foram irrigados no intuito de investigar a influência do efeito do resfriamento evaporativo. Os pavimentos permeáveis atingiram seu pico de evaporação de 0,7mm/h durante o primeiro dia. No segundo dia, o concreto permeável já possuía pico de 0,1mm/h, enquanto o material cerâmico atingiu 0,6mm/h, reduzindo seu pico de evaporação para 0,1mm/h apenas no quarto dia. Assim, Wang et al. (2018) sugeriu que a propriedade de absorção do pavimento pode ser melhorada para prolongar o efeito de resfriamento evaporativo.

Seifeddine; Amziane; Toussaint (2022) concluíram, que para reduzir os efeitos das ilhas de calor é necessário que a taxa de evaporação se mantenha com valores altos por um período mais longo. Em países com verão seco, onde não é viável técnicas de irrigação, pavimentos permeáveis devem ser evitados. Este problema pode ser reduzido, aumentando a refletância dos pavimentos.

Na Tabela 11, observa-se a absorção das amostras permeáveis e impermeáveis calculadas através do procedimento apresentado pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Entre o grupo das amostras permeáveis, a absorção média é de 6,7%, enquanto as amostras impermeáveis apresentam a absorção média de 7,2%. Apesar das amostras impermeáveis possuírem um valor maior de absorção, sua superfície polida e impermeável dificulta a infiltração de água no pavimento. Dentro de um mesmo grupo, todas as amostras apresentam valores similares de absorção.

**Tabela 11** – Valor de absorção das amostras permeáveis e impermeáveis conforme NBR 9778.

Referência	Absorção
PP_AR	6,7%
PP_BR	8,1%
PP_CA	5,6%
PP_CE	6,0%
PP_CR	7,3%
PP_GE	6,4%
PP_GR	6,9%
PP_PL	6,8%
PP_TE	6,9%
PP Média	6,7%
PI_AR	9,1%
PI_BR	6,7%
PI_CA	8,0%
PI_CE	6,9%
PI_CR	7,2%
PI_GE	8,0%
PI_GR	8,5%
PI_PL	5,8%
PI_TE	8,9%
PI média	7,2%

Na Tabela 12 observa-se a quantidade inicial de água presente nas amostras permeáveis e impermeáveis, a quantidade de água remanescente após os quatro dias de experimento e também a quantidade de água evaporada por cada amostra ao fim dos 4 dias.

**Tabela 12** – Massa total de água evaporada ao fim do experimento (dia 4).

Referência	M20* (g)	Massa inicial da água (g)	Água remanescente depois de 4 dias (g)	Massa de água evaporada depois de 4 dias (g)
PP_AR_M	1289	205	0	205
PP_BR_M	1211	207	0	207
PP_CA_M	1212	194	13	181
PP_CE_M	1204	201	0	201
PP_CR_M	1376	202	25	177
PP_GE_M	1188	238	0	238
PP_GR_M	1222	191	5	186
PP_PL_M	1144	186	0	186
PP_TE_M	1286	181	0	181
PI_AR_M	1241	121	24	97
PI_BR_M	1356	88	46	42
PI_CA_M	1275	120	17	103
PI_CE_M	1230	89	21	68
PI_CR_M	1251	118	28	90
PI_GE_M	1297	137	22	115
PI_GR_M	1283	100	38	62
PI_PL_M	1330	91	23	68
PI_TE_M	1277	130	14	116
Água	474	241	0	241

\*M20 é a massa da amostra mais caixa mais água no momento t=0.

Nota-se, que para os pavimentos permeáveis, ao fim do quarto dia, a massa de água é menor que os pavimentos impermeáveis, entre 0g – 25g e 14g – 46g, respectivamente. Destaca-se que, entre os pavimentos permeáveis, somente 3 amostras apresentaram água em seu recipiente ao fim do quarto dia, PP\_CR com 25g (12,4%), PP\_CA com 13g (6,7%), e PP\_GR com 5g (2,6%). Já para os pavimentos impermeáveis, mesmo ao fim do quarto dia de experimento, todas as amostras possuíam entre 14g – 46g (10,8% - 52,3%), sendo a amostra branca (PI\_BR), a amostra impermeável com maior porcentagem de água restante ao fim do quarto dia. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de os pavimentos impermeáveis possuírem baixa permeabilidade, bloqueando a evaporação da água e conseqüentemente, retendo a água dentro do pavimento (LI; HARVEY; GE, 2014; VUJOVIC et al., 2021). Neste experimento as amostras de pavimento permeável e impermeável foram condicionadas em recipientes plásticos, e as amostras molhadas tiveram seus recipientes cheios de água com o intuito de analisar o comportamento entre os pavimentos permeáveis e impermeáveis. No caso dos pavimentos impermeáveis em uma aplicação real, a água não infiltraria no pavimento, e a

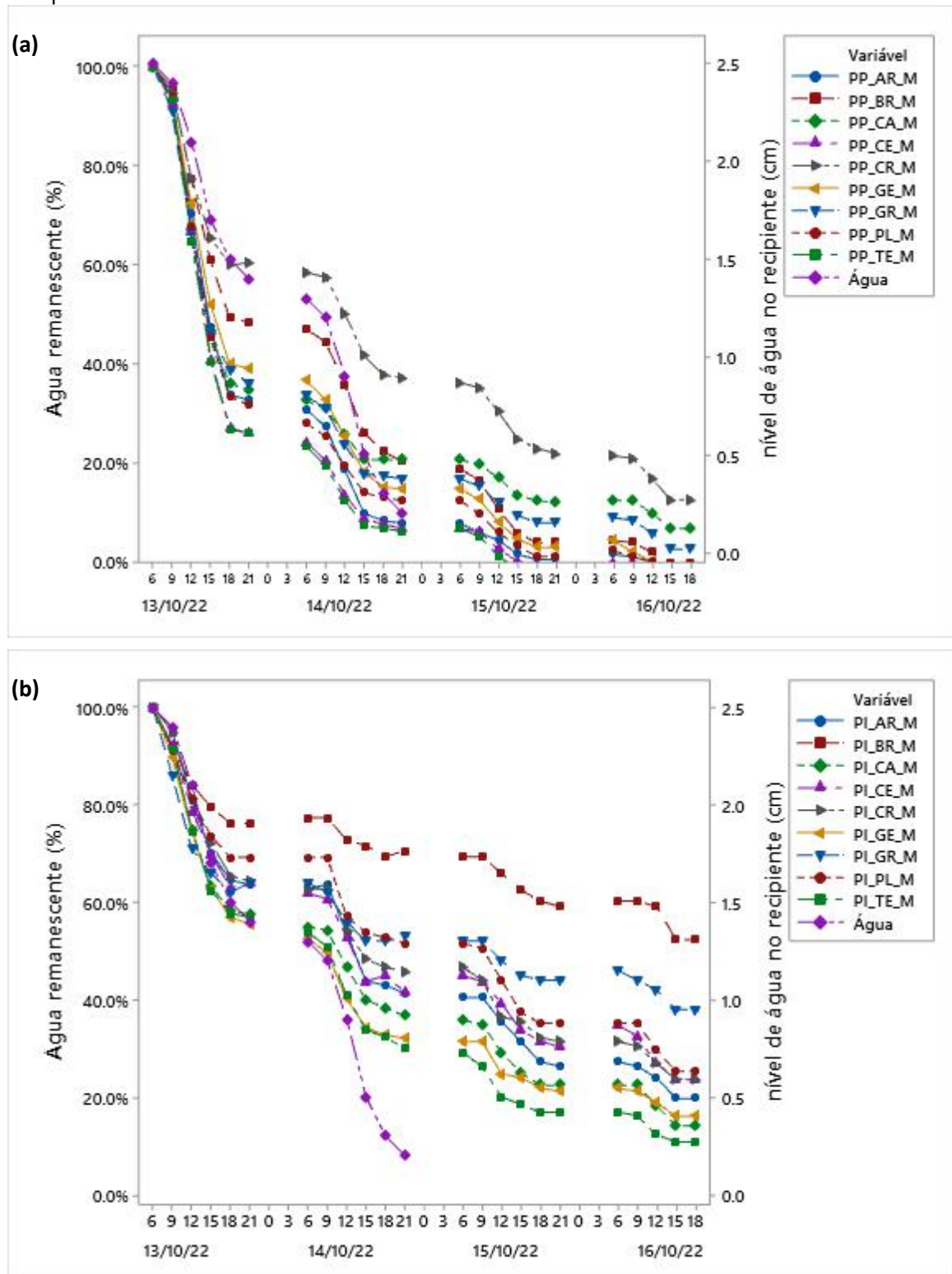
evaporação ocorreria de forma rápida apenas para secar a superfície molhada. Assim, o remanescente de água nos recipientes dos pavimentos impermeáveis neste experimento não pode ser considerado como um ponto positivo para a manutenção do resfriamento evaporativo.

No início do terceiro dia, o recipiente apenas com água já se encontrava seco, portanto, não existem valores de evaporação para a água a partir do terceiro dia de experimento.

Na Figura 18 tem-se a variação de água nas amostras em relação ao tempo. O nível de água foi estimado considerando a porcentagem de água remanescente em cada amostra. Quanto maior a inclinação das retas, maior a taxa de evaporação. Seifeddine; Amziane; Toussaint (2022) também analisaram a água remanescente nas amostras ao longo do tempo e concluíram que as amostras de pavimentos permeáveis reduziram significativamente sua evaporação com o passar do tempo. A inclinação da curva reduziu progressivamente, principalmente a partir do terceiro dia.

Em síntese, o potencial de resfriamento reduz à medida que a disponibilidade de água diminui, reduzindo a taxa de evaporação. A manutenção do estado molhado dos pavimentos pode ser a solução para o prolongamento desse efeito de resfriamento. Pavimentos irrigados ou com maior retenção de água podem ser opções para o melhor aproveitamento do efeito de resfriamento evaporativo dos pavimentos permeáveis (LI; HARVEY; GE, 2014; QIN et al., 2018; WANG et al., 2018; BAO et al., 2019; SEIFEDDINE; AMZIANE; TOUSSAINT, 2022).

**Figura 18** – Variação da massa de água nas amostras (a) permeáveis e (b) impermeáveis, em função do tempo.





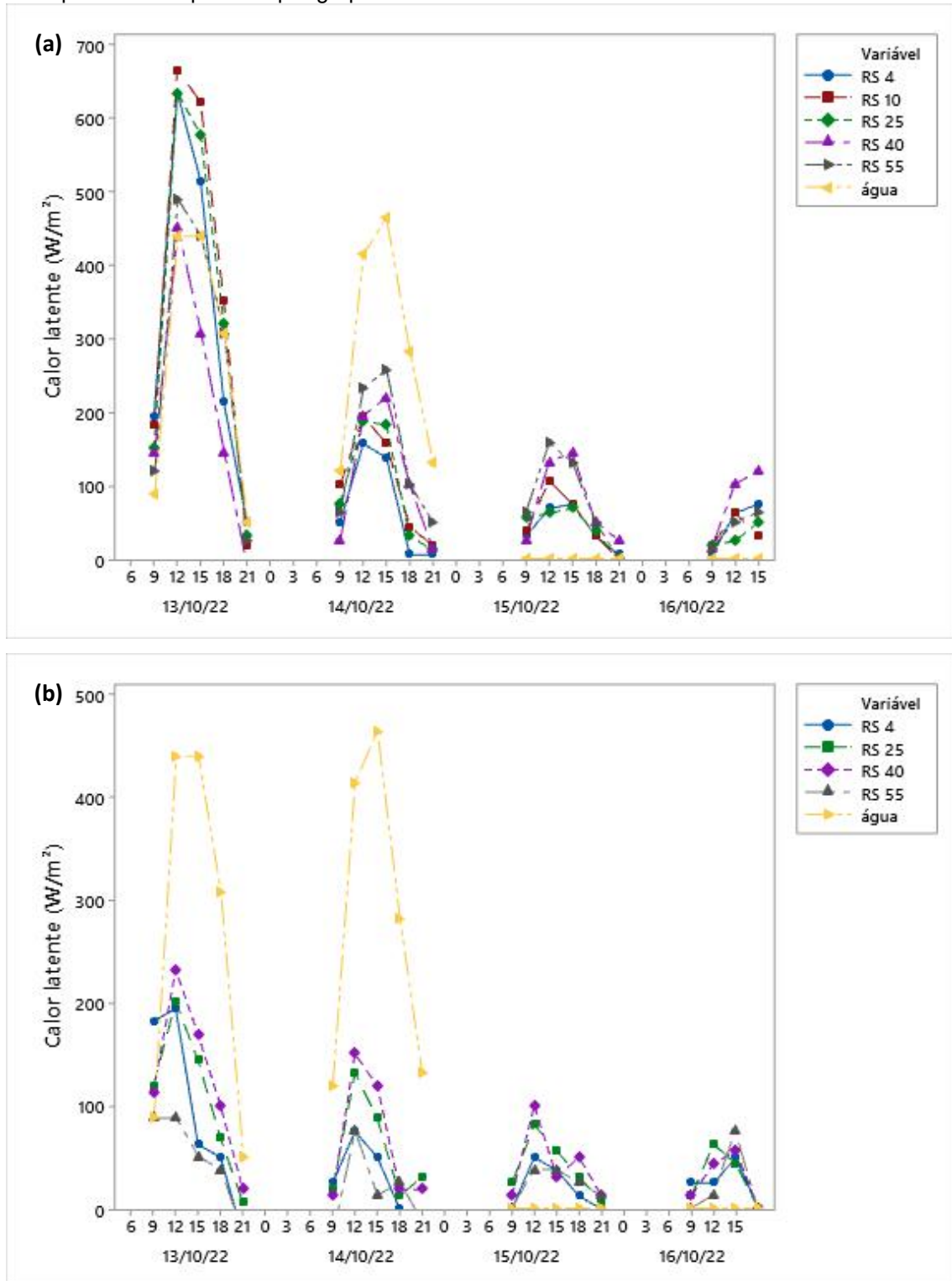


É possível verificar que os maiores valores para taxa de evaporação ocorrem entre as 12:00 e às 15:00. O que já era esperado uma vez que a alta temperatura ambiente e baixa umidade aumentam a taxa de evaporação, como observado por Li; Harvey; Ge (2014). Infere-se que os valores negativos de taxa de evaporação podem ser explicados pelo sereno, que aumenta a quantidade de água, mesmo que minimamente, das amostras em certos períodos noturnos.

As amostras permeáveis apresentaram redução significativa na taxa de evaporação no segundo dia em relação ao primeiro. Isso se deve pela redução da disponibilidade de água próxima a superfície das amostras. As amostras impermeáveis também apresentam redução, entretanto desde o primeiro dia apresentam menores valores de taxa de evaporação máxima. Com relação ao período de irrigação, LI et al. (2013) relatam que este procedimento é benéfico e pode reduzir as temperaturas superficiais durante fortes ondas de calor. O autor relata que a irrigação pode ser realizada durante a noite anterior. Adicionalmente, destaca que o uso de pavimentos com maior retenção de água pode contribuir para prolongar esse efeito do resfriamento evaporativo.

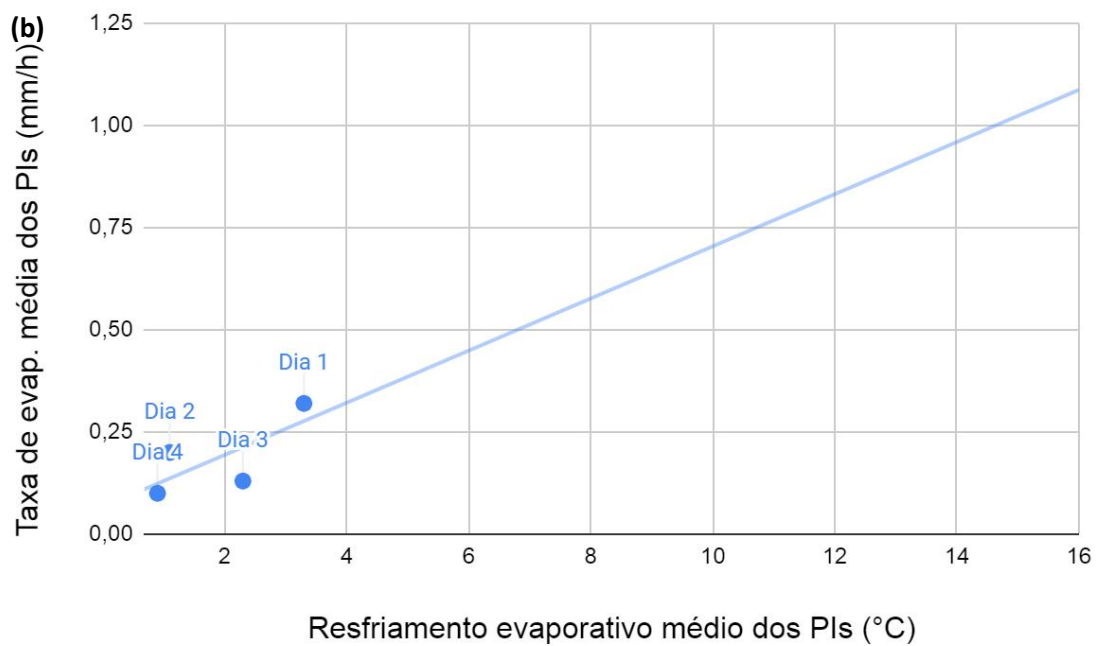
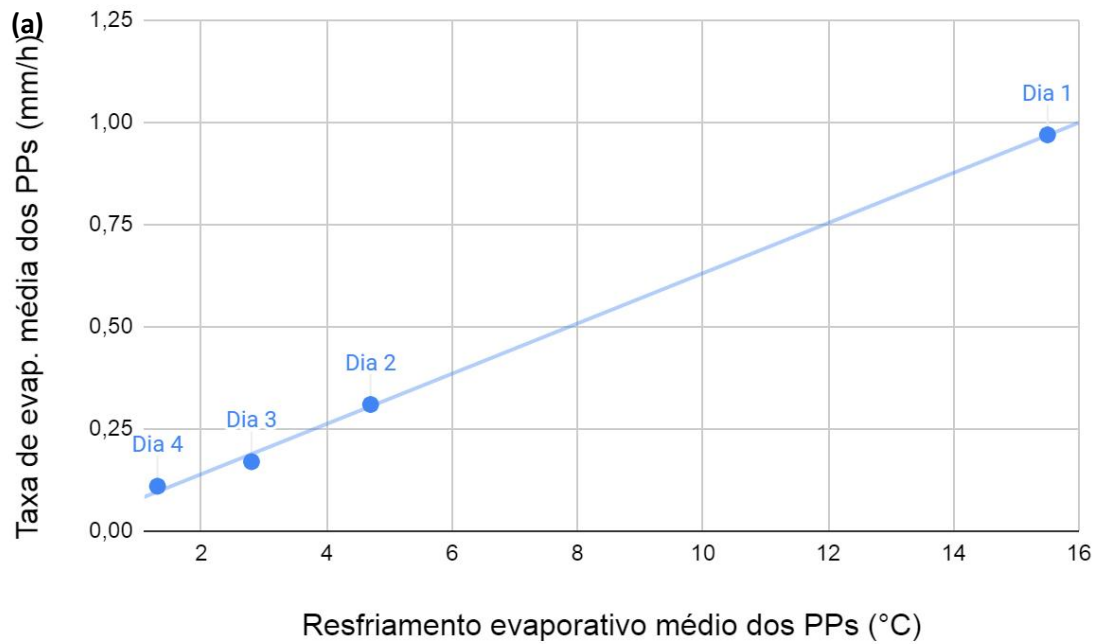
Na Figura 20, observa-se o calor latente teórico calculado para os grupos de pavimentos permeáveis e impermeáveis. Esse valor representa a energia liberada pelo pavimento devido a passagem da água do estado líquido para o estado gasoso. Por ser calculado multiplicando-se a taxa de evaporação por uma constante, o gráfico apresenta o mesmo comportamento.

**Figura 20** – Calor latente ( $\text{W/m}^2$ ) horário para amostras (a) permeáveis e (b) impermeáveis, ao longo do experimento separadas por grupos.



A Figura 21 mostra a dispersão entre os valores médios de resfriamento evaporativo e taxa de evaporação para os pavimentos permeáveis e impermeáveis ao longo dos quatro dias de experimento.

**Figura 21** – Dispersão entre os valores médios de resfriamento evaporativo e taxa de evaporação para as 9 amostras de (a) pavimentos permeáveis e (b) pavimentos impermeáveis.



Entre os pavimentos permeáveis é clara a correlação entre a taxa de evaporação e o resfriamento evaporativo das amostras. Para o primeiro dia, tanto a taxa de evaporação como o resfriamento evaporativo apresentam os maiores

valores. À medida que a taxa de evaporação diminui o potencial de resfriamento dos pavimentos permeáveis também reduz.

Os pavimentos impermeáveis apresentam menores valores de taxa de evaporação, mesmo no primeiro dia. O segundo dia apresenta um valor médio de resfriamento maior do que do terceiro dia, mesmo com menor valor de taxa de evaporação. Observa-se que o resfriamento evaporativo dos pavimentos impermeáveis é inferior aos valores obtidos pelos pavimentos permeáveis.

Infere-se que o calor latente tem o mesmo comportamento da taxa de evaporação, adicionalmente, para os pavimentos permeáveis quanto maior a taxa de evaporação, maior a redução da temperatura superficial devido ao resfriamento evaporativo.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa demonstrou o desempenho térmico e óptico dos pavimentos permeáveis e impermeáveis em diferentes colorações e a influência do efeito evaporativo. Entre os resultados destacam-se os seguintes aspectos:

- O efeito de resfriamento evaporativo colabora para a redução da temperatura superficial, em adição, a escolha de superfícies com maiores refletâncias também contribui para a redução dos picos de temperatura.
- O grupo dos PPs possui refletância média de 19,16% enquanto o grupo dos PIs apresenta a média de 31,81%. De acordo com a literatura especializada, conforme pontuado na revisão bibliográfica, os menores valores de refletância solar encontrados para as amostras permeáveis são explicados por sua superfície rugosa, que acaba por aumentar a absorção da superfície.
- É clara a tendência de que cores mais claras possuem maiores refletâncias. Neste caso, a amostra branca (PP\_BR) apresentou a maior refletância entre os PPs, 48,75%. Enquanto a maior refletância dos PIs também foi para a amostra branca (PI\_BR) com 61,87%. Por outro lado, a amostra grafite permeável (PP\_GR) apresentou a refletância de 1,3% enquanto a amostra grafite impermeável (PI\_GR) obteve a refletância de 5,01%.
- À medida que a refletância solar aumenta, a temperatura máxima superficial diminui. Entre os PPs, a diferença de temperatura máxima atingida pelas amostras com a maior e menor refletância foi de 15,3°C em estado seco e de 15,7°C para o estado molhado. Entre os PIs, a diferença de temperatura entre os valores extremos de refletância foi de 14,5°C para o estado seco e de 15,8°C no estado molhado.
- Na análise de agrupamento as amostras seguiram uma tendência em ordem crescente em relação a refletância, independentemente do tipo de pavimento, permeável ou impermeável e formaram 5 grupos, RS 4, RS 10, RS 25, RS 40 e RS 55. O grupo RS 4, com refletância média de 3,8%, apresenta a maior temperatura média máxima, 58,4°C em

estado seco e 54,6°C em estado molhado. À medida que a refletância média do grupo aumenta, sua temperatura diminui. O valor de temperatura do grupo RS 55, com refletância de 55,3%, apresenta temperatura média máxima de 43,7°C em estado seco e 39,8°C em estado molhado. Uma redução de 25,2% e 27,1%, respectivamente.

- Ao serem observados durante os quatro dias de experimento, os PPs e PIs em estado seco e molhado dentro de um mesmo grupo, atingem temperaturas médias máximas semelhantes. Entretanto, ao se observarem os valores diários, nota-se o efeito de resfriamento evaporativo que ocorre, principalmente, durante o primeiro dia.
- Quanto maior a taxa de evaporação, maior o efeito de resfriamento evaporativo. Os grupos RS 4, RS 10 e RS 25 entre os PPs apresentaram os maiores valores de taxa de evaporação no primeiro dia, atingindo valores acima de 1,00mm/h, sendo maior até que a taxa de evaporação da água com superfície livre (0,70mm/h). Adicionalmente, foram os grupos que apresentaram as maiores reduções nessa taxa, do segundo dia em relação ao primeiro, 75,5%, 71,0% e 70,4%, respectivamente. Assim, apesar do efeito de resfriamento evaporativo contribuir enquanto o pavimento apresentar disponibilidade de água no recipiente, seu valor é efetivo no primeiro dia.
- Os pavimentos permeáveis, devido a estrutura que colabora para a evaporação da água, atingem os maiores valores de resfriamento evaporativo. Enquanto os grupos dos PPs atingiram picos de resfriamento entre 7,4-19,1°C no primeiro dia, os grupos dos PIs resfriaram entre 1,8-4,2°C, no primeiro dia de experimento. Evidenciando que a temperatura superficial atingida pelos pavimentos permeáveis, junto a sua estrutura (permeável) e disponibilidade de água próxima a superfície, colaboram para a evaporação da água.
- No fim do quarto dia apenas as amostras permeáveis PP\_CR, PP\_CA e PP\_GR possuíam água remanescente em seus recipientes, 2,6-12,4%. Já para os pavimentos impermeáveis, mesmo ao fim do quarto dia, todas as amostras possuíam entre 10,8-52,3% de água em seus recipientes, devido a sua estrutura que bloqueia a evaporação da água.

- As amostras que compõem os mesmos grupos apresentam comportamento semelhante em relação às suas curvas de refletância espectral.

O potencial de resfriamento reduz à medida que a disponibilidade de água diminui, reduzindo a taxa de evaporação. Com isso, a manutenção do estado molhado dos pavimentos pode ser uma opção para prolongar o efeito do resfriamento evaporativo dos pavimentos permeáveis. Adicionalmente, o uso de pavimentos permeáveis com maior retenção de água também pode contribuir para prolongar a evaporação, além de servir como reservatório de água para reduzir o escoamento superficial provocado pelas chuvas. Um futuro estudo sobre pavimentos permeáveis com diferentes valores de absorção e manutenção da condição molhada poderia colaborar para entender qual seria o estado ótimo destas aplicações.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2005.
- ABNT. NBR 9781: Peças de Concreto para Pavimentação - Especificação e Métodos de Ensaio. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 21, 2013.
- ABNT. NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - requisitos e procedimentos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, n. Rio de Janeiro, 2015.
- AKPINAR, M. V.; SEDAT, S. Urban heat island effects of concrete road and asphalt pavement roads. **9th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEES-9)**, n. April, 2017.
- ALCHAPAR, N. L. et al. The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: the cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, n. 1–2, p. 35–50, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00704-016-1851-5>>.
- ANDRADE, M. M. De; DORNELLES, K. A. Refletância solar e o desempenho térmico de tintas frias nacionais para o envelope construtivo. **ENTAC2022 - Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável**, p. 1–12, 2022.
- ASTM. ASTM E903-20: Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS**, 2020a.
- ASTM. ASTM G173-20: Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS**, 2020b.
- BAO, T. et al. A drainable water-retaining paver block for runoff reduction and evaporation cooling. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 418–424, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.142>>.
- BOUZOUIDJA, R. et al. Experimental comparative study between conventional and green parking lots: Analysis of subsurface thermal behavior under warm and dry summer conditions. **Atmosphere**, v. 12, n. 8, 2021.
- BOWLER, D. E. et al. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. **Landscape and Urban Planning**, v. 97, n. 3, p. 147–155, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>>.
- CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; ROSSETI, K. de A. C. Pavimentação Asfáltica : Contribuição no Aquecimento de Áreas Urbanas Asphalt Paving : Contribution for Urban Heating Areas. **E&S - Engineering and Science**, v. 1, p. 64–72, 2015.

CASTRO, A. et al. Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral. **Ambiente Construído**, v. 3, n. 2, p. 69–76, 2003.

CETESB. CETESB, 2022. QUALAR - SISTEMA DE INFORMAÇÕES DA QUALIDADE DO AR, CETESB. [online] Available at: <https://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/home.do> [Accessed: November 1, 2022]. 2022.

CLIMATE-DATA. Climate data, 2022. Dados climáticos para cidades mundiais. [online] Climate-date.org. Available at: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/aracatuba-4222/#climate-graph/>> [Accessed 1 Nov 2022]. 2022.

DE ASSUMPTÃO SANTOS, C. et al. Impact of pervious pavement in urban areas on catchment basin recovery. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 1, p. 39–50, 2018.

DORNELLES, K. A. Absortância solar de superfícies opacas: base de dados de tintas látex acrílica e PVA e a influência da rugosidade superficial. **X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**, p. 612–621, 2009.

DORNELLES, K. A. **Biblioteca de absortância de telhas: base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios**. [s.l.] IAU-USP, 2021.

EPA, U. S. E. P. A. Urban Heat Island Basics. **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies**, 2008.

EPA, U. S. E. P. A. Cool pavements. **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies**, 2012.

ESTOQUE, R. C.; MURAYAMA, Y.; MYINT, S. W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. **Science of the Total Environment**, v. 577, p. 349–359, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.195>>.

FERRARI, A. et al. The use of pervious and reflective pavements as a potential strategy for urban heat island mitigation. **Urban Climate**, v. 31, n. October, 2020.

FERRARI, C. et al. A composite cool colored tile for sloped roofs with high “equivalent” solar reflectance. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 221–226, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.062>>.

GANGULY, A.; CHOWDHURY, D.; NEOGI, S. Performance of Building Roofs on Energy Efficiency - A Review. **Energy Procedia**, v. 90, n. December 2015, p. 200–208, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.186>>.

GARG, V. et al. Assessment of the impact of cool roofs in rural buildings in India. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 156–163, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.043>>.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor : como mitigar zonas de calor em áreas urbanas / Lisa Gartland ; tradução Silvia Helena Gonçalves**. [s.l.] Oficina de textos, 2010.

HENDEL, M. et al. Measuring the effects of urban heat island mitigation techniques

in the field: Application to the case of pavement-watering in Paris. **Urban Climate**, v. 16, p. 43–58, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2016.02.003>>.

HÖLTZ, F. D. . Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental (Mestrado em Engenharia). **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre**, 2011.

JANDAGHIAN, Z.; AKBARI, H. The effect of increasing surface albedo on urban climate and air quality: A detailed study for Sacramento, Houston, and Chicago. **Climate**, v. 6, n. 2, 2018.

KOLOKOTSA, D. D. et al. Cool roofs and cool pavements application in Acharnes, Greece. **Sustainable Cities and Society**, v. 37, n. July 2017, p. 466–474, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.035>>.

KOTTEK, M. et al. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 3, n. 3, p. 259–263, 2006.

KOWALSKI, L. F.; MASIERO, É. Envelhecimento de pavimentos de concreto pigmentado e consequências sobre o albedo. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 10, n. 1, p. 126, 2021.

LI, H. et al. Erratum: The use of reflective and pervious pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management (Environ. Res. Lett. (2013) 8 (015023)). **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 4, 2013.

LI, H.; HARVEY, J.; GE, Z. Experimental investigation on evaporation rate for enhancing evaporative cooling effect of pervious pavement materials. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 367–375, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.004>>.

LI, H.; KAYHANIAN, M.; HARVEY, J. T. Comparative field permeability measurement of pervious pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. **Journal of Environmental Management**, v. 118, p. 144–152, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.016>>.

MARUYAMA, C. M.; FRANCO, M. de A. R. Pavimentos brandos para a mitigação das Ilhas de Calor: o caso do Jardim da Luz e seu entorno em São Paulo/SP. **Tese de Doutorado - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo**, 2020.

MASTRAPOSTOLI, E. et al. On the ageing of cool roofs : Measure of the optical degradation , chemical and biological analysis and assessment of the energy impact. **Energy & Buildings**, v. 114, p. 191–199, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.030>>.

MUNIZ-GÄAL, L. P. et al. Eficiência térmica de materiais de cobertura. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 503–518, 2018.

MUNIZ-GÄAL, L. P. et al. Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate. **Building and Environment**, v. 169, n. November 2019, 2020.

NEMIROVSKY, E. M.; WELKER, A. L.; LEE, R. Quantifying Evaporation from Pervious Concrete Systems: Methodology and Hydrologic Perspective. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 4, p. 271–277, 2013.

PEREIRA, C. et al. Relatório de avaliação do espectrômetro portátil ALTA II. **X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**, p. 660–669, 2015.

QIN, H. peng; LI, Z. xi; FU, G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 577–585, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026>>.

QIN, Y. et al. A new water-retaining paver block for reducing runoff and cooling pavement. **Journal of Cleaner Production**, v. 199, p. 948–956, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.250>>.

QIN, Y.; HILLER, J. E. Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. **Energy and Buildings**, v. 85, p. 389–399, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.076>>.

RORIZ, V. F.; DORNELLES, K.; RORIZ, M. Fatores Determinantes da Absortância Solar de Superfícies Opacas. **Anais Do Ix Encac E V Elacac**, v. 3, n. 1, p. 1629–1638, 2007.

ROSE, L. S.; AKBARI, H.; TAHA, H. Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Salt Lake City, Utah. n. July 2015, p. 1–51, 2003.

SAMOUEI, S.; ÖZGER, M. Evaluating the performance of low impact development practices in urban runoff mitigation through distributed and combined implementation. **Journal of Hydroinformatics**, v. 22, n. 6, p. 1506–1520, 2020.

SANTAMOURIS, M. Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, v. 103, p. 682–703, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>>.

SANTAMOURIS, M. et al. Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. **Solar Energy**, v. 154, p. 14–33, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>>.

SANTAMOURIS, M. et al. Heat mitigation technologies can improve sustainability in cities. An holistic experimental and numerical impact assessment of urban overheating and related heat mitigation strategies on energy consumption, indoor comfort, vulnerability and heat-related m. **Energy and Buildings**, v. 217, p. 110002, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110002>>.

SANTAMOURIS, M.; OSMOND, P. Increasing green infrastructure in cities: Impact on ambient temperature, air quality and heat-related mortality and morbidity. **Buildings**, v. 10, n. 12, p. 1–34, 2020.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar Energy**, v. 85, n. 12, p. 3085–3102, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>>.

SANTOS, E. I.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Influência do ambiente de medição sobre a verificação da absorvância de superfícies opacas utilizando um espectrômetro portátil. **X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**, p. 660–669, 2009.

SEIFEDDINE, K.; AMZIANE, S.; TOUSSAINT, E. Experimental investigation of physical characteristics to improve the cooling effect of pervious pavements. **Construction and Building Materials**, v. 345, n. March, p. 128342, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128342>>.

TIAN, L. et al. Review on urban heat island in china: Methods, its impact on buildings energy demand and mitigation strategies. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 2, p. 1–31, 2021.

UEMOTO, K. L.; SATO, N. M. N.; JOHN, V. M. Estimating thermal performance of cool colored paints. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 1, p. 17–22, 2010.

VUJOVIC, S. et al. Urban Heat Island: Causes, Consequences, and Mitigation Measures with Emphasis on Reflective and pervious Pavements. **CivilEng**, v. 2, n. 2, p. 459–484, 2021.

WANG, J. et al. Experimental investigation on the influence of evaporative cooling of pervious pavements on outdoor thermal environment. **Building and Environment**, v. 140, n. January, p. 184–193, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.033>>.

ZHANG, R.; JIANG, G.; LIANG, J. The Albedo of Pervious Cement Concrete Linearly Decreases with Porosity. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2015/746592>>.

ZHANG, Y. et al. Temperature of Paved Streets in Urban Mockups and Its Implication of Reflective Cool Pavements. **Atmosphere**, v. 12, n. 5, p. 560, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/atmos12050560>>.

ZHU, Z. et al. Assessment of urban surface and canopy cooling strategies in high-rise residential communities. **Journal of Cleaner Production**, v. 288, p. 125599, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125599>>.