A thermal map of a city area, likely São Paulo, showing temperature variations. The map uses a color scale from blue (cooler) to red (warmer). A dashed black rectangle highlights a specific urban area, and a green wavy line is drawn within it. A black crosshair is visible on the right side of the map.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

CINTIA MIUA MARUYAMA

Pavimentos brandos para a mitigação das Ilhas de Calor:

O caso do Jardim da Luz e seu entorno em São Paulo/SP

SÃO PAULO | 2020

CÍNTIA MIUA MARUYAMA

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 apresentada a **Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo** como requisito para obtenção do título de doutora em **Arquitetura e Urbanismo**.

Área de concentração: Paisagem e Ambiente.

Exemplar revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade do autor e anuência do orientador.
A versão original, em formato digital, ficará arquivada na Biblioteca da Faculdade.
São Paulo, 06 de julho de 2020.

Orientadora: Prof^a. Dr^a Maria de Assunção Ribeiro Franco

São Paulo | 2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

e-mail: cintiamay@gmail.com

Catálogo na Publicação
Serviço Técnico de Biblioteca
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

Maruyama, Cintia Miua

Pavimentos brandos para a mitigação das Ilhas de Calor: o caso do Jardim da Luz e seu entorno em São Paulo/SP /
Cintia Miua Maruyama; orientadora Maria de Assunção Ribeiro Franco. - São Paulo, 2020.
266f.

Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de concentração: Paisagem e Ambiente.

1. Pavimento Brando. 2. Infraestrutura Verde. 3. Ilha de Calor Urbana. 4. Envi-met. I. Franco, Maria de Assunção Ribeiro, orient. II. Título.

25/06/2020

Certificado de Defesa

Janus

**Universidade de São Paulo
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo**

CERTIFICADO DE DEFESA

CERTIFICO, para os devidos fins, que Sr(a). Cíntia Miua Maruyama, número USP 2212070, defendeu no dia 29 de maio de 2020, no Programa de Arquitetura e Urbanismo do(a) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, a Tese de Doutorado intitulada:

"Pavimentos brandos para a mitigação das Ilhas de Calor: o caso do Jardim da Luz e seu entorno em São Paulo/SP"

CERTIFICO, ainda, que o(a) aluno(a) faz jus ao título de Doutora em Ciências - Área: Paisagem e Ambiente, tendo sido a ata da Comissão Julgadora homologado pela Comissão de Pós-Graduação, em 22 de junho de 2020.

São Paulo, 25 de junho de 2020.

Assinatura manuscrita em tinta preta, com uma caligrafia fluida e estilizada, identificando o Prof. Dr. João Sette Whitaker Ferreira.

Prof. Dr. João Sette Whitaker Ferreira
Presidente da CPG

“Existem três tipos de pessoas: as que veem, as que veem quando alguém lhes mostra e as que não veem...”

Leonardo da Vinci

Agradecimentos

Agradeço inicialmente à Deus pela saúde e sabedoria para chegar até aqui e alcançar mais este conhecimento na minha caminhada.

Agradeço aos meus pais e à minha família, por sempre estarem comigo nesta trajetória e me apoiarem em todos os momentos, das mais diferentes maneiras. Agradeço à minha amiga, Maria Almeida, por ter sido a primeira a me incentivar a prosseguir nos estudos da pós-graduação e sempre me motivar a progredir. Agradeço ao meu companheiro, Marcelo Menyón, pelo carinho e apoio durante a caminhada no doutorado.

Agradeço à minha orientadora de doutorado, Maria de Assunção Ribeiro Franco, por acreditar no potencial da minha pesquisa, por me aceitar como orientanda e por me ajudar nas inúmeras reuniões a elaborar o desenvolvimento dos trabalhos da tese.

Agradecimentos à equipe do LabVerde, em especial à Laís Padilha Leite e Livia Duailibe, pela amizade e pelas inúmeras e valiosas colaborações nas pesquisas.

Agradeço também imensamente ao Flávio Mendes, pela colaboração no aprendizado do ENVI-met e no desenvolvimento das simulações. Sem esta ajuda seria muito mais difícil a realização desta parte importante do trabalho.

Gratidão à equipe do CESAD da FAUD USP, em especial ao Ricardo, pela especial ajuda no aprendizado do programa QGIS e em outras colaborações com relação à produção de mapas entre outros. Agradeço aos funcionários do Programa de Pós-Graduação da FAU USP, por ter me acolhido como pesquisadora ao longo destes anos e, assim, ter sido possível ter a estrutura necessária para o desenvolvimento dos trabalhos do doutorado.

E sou grata ao CEM/UFPR por me conceder o afastamento do trabalho para o desenvolvimento dos estudos do doutorado.

RESUMO

Ilhas de Calor Urbanas – ICU – já eram detectadas há mais de um século em cidades inglesas. Estudos indicam que a magnitude deste fenômeno climático chega a diferenças de 10°C na Região Metropolitana de São Paulo, considerando o centro do município e a área rural. Existem três estratégias principais para combater as Ilhas de Calor Urbanas – ICU: o plantio em larga escala de arborização e a adoção dos tetos e das coberturas brandas. As ICU trazem efeitos urbanos danosos, como eventos climáticos extremos de chuvas, enchentes, alagamentos entre outros e agravam problemas de saúde pública como o aumento da incidência de mortes e doenças cardiorrespiratórias. O assunto dos pavimentos brandos ainda é pouco desenvolvido no país, os poucos trabalhos existentes limitam-se ao desenvolvimento de novos materiais de pavimentação. Desta forma, a pesquisa intencionou analisar as possibilidades de implantação do pavimento brando e de tipologias de Infraestrutura Verde - IV para a mitigação das ICU em São Paulo/SP. Assim, procurou-se vislumbrar a aplicação dos pavimentos brandos e das tipologias de IV e quantificar os benefícios de atenuação de temperatura que eles podem trazer à cidade, por meio de simulações computacionais no programa ENVI-met. A metodologia do estudo de caso da aplicação dos pavimentos brandos na Paisagem Urbana considerou a análise de proposições em diferentes hierarquias viárias, para via arterial, coletora e local, que depois seriam replicadas para as demais vias. Para as simulações computacionais, foram determinadas duas datas em épocas do ano distintas, uma para o inverno e outra para o verão. Estabeleceram-se cenários ambientais para comparação dos resultados. Como resultados, na Av. Tiradentes o cenário de pavimento brando reduziu às 12h00 em 0,45°C a temperatura do ar no verão e em 0,30°C no inverno. Quanto à temperatura de superfície na avenida às 14h00, houve redução de 10,27°C no verão e em 10,16°C no inverno (13h00). O cenário com plantio de árvores conseguiu reduzir a temperatura do ar no verão em 1,86°C às 12h00 na mesma avenida e o com árvores e pavimento brando 2,21°C no mesmo horário e estação do ano. A hipótese inicial deste trabalho foi comprovada positivamente nas simulações computacionais e observou-se que o pavimento brando pode auxiliar na mitigação das ICU e, se ele for associado ao aumento de arborização, os resultados podem ser ainda melhores. A recomendação seria a de utilizar o pavimento brando de Alta Reflexão - PAR de concreto, de alto albedo nas vias, pavimento permeável de cor clara nas calçadas e pavimento brando PAR de concreto permeável nas ciclovias.

Palavras-chave: pavimento brando; pavimento; arborização urbana; Infraestrutura Verde; Ilha de Calor Urbana; calçada; ENVI-met, simulações computacionais.

Abstract

Urban Heat Islands - UHI have been detected for over a century in English cities. Studies indicate that the magnitude of this climatic phenomenon reaches differences of 10°C in São Paulo Metropolitan Region, considering the downtown and the rural area. There are three main strategies to combat the Urban Heat Islands - UHI, which are: large-scale afforestation, adoption of cool roofs and pavements. UHIs have damaging urban effects, such as extreme weather events such as rainfall, floods, flooding and others, and aggravate public health problems such as the increased incidence of deaths and cardiorespiratory diseases. The subject of cool pavements is still little developed in the country, the few existing works are limited to development of new paving materials. Thus, the research aimed to analyze the possibilities of implementation of cool pavement and green infrastructure typologies for mitigation of UHI in São Paulo / SP. Thus, we sought to analyse building cool pavements and Green Infrastructure typologies and to quantify the benefits of temperature attenuation that they can bring to the city through computer simulations in the ENVI-met program. The methodology of the case study of the application of cool pavements in the Urban Landscape considered the analysis of propositions of in different road hierarchies, for arterial, collecting and local that would later be replicated for other roads. For the computer simulations two dates were determined at different times of the year, one for winter and one for summer. Environmental scenarios were established for comparison of results. As results on Av. Tiradentes the cool pavement scenario reduced the air temperature in summer by 0,45°C and by 0,30°C in winter at noon. As for surface temperature, at 14 pm there was a reduction of 10,27°C in summer and 10,16°C in winter (13 pm). The tree planting scenario has reduced the summer air temperature by 1,86°C at noon and with cool pavement and afforestation 2,21°C at same time and season in the same avenue. The initial hypothesis of this work was positively proven in the computer simulations and it was observed that cool pavement can help in the mitigation of the UHI and if it is associated with the increase of afforestation the results may be even better. The recommendation would be to use cool pavement with high-albedo on the roads, light colored permeable pavement on sidewalks and cool high albedo permeable concrete pavement on bike lanes.

Keywords: cool pavement; pavement; urban afforestation; Green Infrastructure; Urban Heat Island; sidewalk; ENVI-met, computer simulations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Passeio delimitado por elementos físicos.....	47
Figura 2 - Ocupação irregular da calçada região central de São Paulo.....	48
Figura 3 - As três faixas da calçada.....	49
Figura 4 - Exemplo de calçada com as três faixas.....	50
Figura 5 - Dimensões para deslocamento de PCR e PCR e pedestre.....	52
Figura 6 - Cartilha da Prefeitura de São Paulo	53
Figura 7 - Árvore com raiz impermeabilizada.....	55
Figura 8 - Árvore com espaço permeável.....	55
Figura 9 - Vista superior de rua com árvore na via com calçada mínima	58
Figura 10 - Detalhe da vista superior com árvore na via	59
Figura 11 - Seção com árvore na via	59
Figura 12 - Proposta com árvore na calçada - vista superior.....	60
Figura 13 - Seção com árvore na calçada	61
Figura 14 - Gráfico ilustrando as ICU	67
Figura 15 - Superfícies impermeáveis e diminuição da evapotranspiração	68
Figura 16 - Mapa de temperatura de superfície - 2011.	75
Figura 17 - Mapa de temperatura de superfície (2018)	76

Figura 18 - Composição do pavimento semirrígido.	81
Figura 19 - Camadas do pavimento flexível.....	82
Figura 20 - Seção típica de PCS	83
Figura 21 - Pavimento convencional.....	88
Figura 22 - Temperatura do pavimento no verão	88
Figura 23 - Cores testadas com pintura sobre o asfalto	101
Figura 24 - Figura esquemática de corte de pavimento permeável com infiltração total	104
Figura 25 - Seção de pavimento modular	108
Figura 26 - Seção típica de pavimento poroso	108
Figura 27 - Temperatura do piso de concreto e da vegetação	116
Figura 28 - Corte de jardim de chuva	124
Figura 29 - Jardim de chuva	124
Figura 30 - Esquema de biovaleta	125
Figura 31 - Biovaleta em Portland.....	126
Figura 32 - Esquema de canteiro pluvial com infiltração	126
Figura 33 - Canteiro pluvial.....	127
Figura 34 - Trincheira de infiltração em canteiro central.....	129
Figura 35 - Formatos de trincheiras	130
Figura 36 - Área de estudo	133
Figura 41 - Localização da área de estudo	135

Figura 42 - Pinacoteca do Estado	136
Figura 43 - Estação de trem da Luz	136
Figura 44 - Parque Jardim da Luz em 1908	137
Figura 45 - Parque Jardim da Luz atualmente.....	138
Figura 46 - Av. Tiradentes em 1905.....	139
Figura 47 - Av. Tiradentes atualmente	140
Figura 48 - Ampliação da localização da área de estudo.....	141
Figura 49 - Localização da seção da Av. Tiradentes	145
Figura 50 - Av. Tiradentes seção atual.....	146
Figura 51 - Av. Tiradentes seção proposta	146
Figura 52 - Rua São Caetano e suas faixas de estacionamento	147
Figura 53 - Calçadas da Rua São Caetano.....	147
Figura 54 - Rua São Caetano seção existente	151
Figura 55 - Seção proposta R. São Caetano.....	151
Figura 56 - Vista superior proposta R. São Caetano	152
Figura 57 - Vista superior de esquema da relação dos bueiros e da arborização proposta	153
Figura 58 - Grelha em árvore em Paris	154
Figura 59 - Rua Dr. Pedro Arbues.....	155
Figura 60 - Seção existente na Rua Dr. Pedro Arbues	157
Figura 61 - Seção da Rua Dr. Pedro Arbues proposta	157

Figura 62 - Vista superior proposta R. Dr. Pedro Arbues	158
Figura 63 - Ampliação da proposta da R. Dr. Pedro Arbues	158
Figura 64 - Mapa de temperatura de superfície com indicação de Ilhas de Calor em São Paulo/SP	161
Figura 65 - Localização da área de pesquisa no mapa de temperatura do município de São Paulo	164
Figura 66 - Área de estudo no mapa de temperatura e os bairros de entorno	164
Figura 67 - Caracterização da área de estudo	167
Figura 68 - Área de estudos para uso no ENVI-met	177
Figura 69 - Tela do arquivo de modelagem do cenário inicial no ENVI-met	178
Figura 70 - Ampliação da tela de modelagem do cenário inicial ENVI-met	178
Figura 71 - Tela de configuração do ENVI-met	179
Figura 72 - Tela do ENVI-met de simulação	181
Figura 73 - Curva de regressão exponencial para determinar a umidade específica a 2500m para o Verão	183
Figura 74 - Curva de regressão exponencial para determinar a umidade específica a 2500m para o Inverno	183
Figura 75 - cenário atual	188
Figura 76 - cenário com aumento de arborização	190
Figura 77 - Refletância típica do asfalto e concreto convencional ao longo do tempo	192
Figura 78 - Gráfico das simulações de verão no ponto dentro do Parque da Luz	202
Figura 79 - Gráfico das simulações de verão no ponto da Av. Tiradentes	202
Figura 80 - Temperatura atual cenário atual de verão	205
Figura 81 - Temperatura do ar cenário de pavimento brando	205

Figura 82 - Temperatura do ar cenário com mais árvores.....	206
Figura 83 - Temperatura do ar no cenário com mais árvores e pavimento brando - verão	206
Figura 84 - Gráfico com temperaturas de superfície dos cenários de verão no Parque da Luz	213
Figura 85 - Gráfico com temperaturas de superfície do cenário de verão na Av. Tiradentes	213
Figura 86 - Mapas de temperatura de superfície cenário de verão	214
Figura 87 - Gráficos com temperatura do ar dos cenários de inverno no Parque da Luz	221
Figura 88 - Gráficos com temperatura do ar dos cenários de inverno na Av. Tiradentes	221
Figura 89 - Temperatura do ar de cenário atual.....	222
Figura 90 - Temperatura do ar do cenário com pavimento brando.....	222
Figura 91 - Temperatura do ar do cenário com mais árvores.....	223
Figura 92 - Temperatura do ar do cenário com mais árvores e pavimento brando	223
Figura 93 - Gráfico com temperaturas de superfície no cenário de inverno do ponto no Parque da Luz	229
Figura 94 - Gráfico de temperatura de superfície das simulações de inverno no ponto na Av. Tiradentes	230
Figura 95 - Temperatura de superfície de inverno	232

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Autores e trabalhos de referência	38
Tabela 2 - Porte das árvores	62
Tabela 3 - Tipo de plantio recomendado em função da largura da rua e da situação da ocupação dos lotes	63
Tabela 4 - Faixas de divisão de Ilha de Calor	74
Tabela 5 - Tabela de albedos	87
Tabela 6 - Albedos dos materiais que compõem o concreto	92
Tabela 7 - Albedo de superfícies de concreto usando agregados claros	94
Tabela 8 - Custos e benefícios dos pavimentos	96
Tabela 9 - Coeficiente de escoamento superficial por material	109
Tabela 10 - Aplicação de tipologias de acordo com o zoneamento ambiental	123
Tabela 11 - Estudos no ENVI-met	171
Tabela 12 - Dados de configuração de entrada no ENVI-met no cenário existente	184
Tabela 13 - Quantificação de árvores do cenário atual e com o aumento de arborização	189
Tabela 14 - Albedo dos pavimentos	191
Tabela 15 - Reduções de temperatura do ar observadas na literatura	195
Tabela 16 - Cenário atual - temperatura do ar na simulação de verão (°C)	196
Tabela 17- Resumo das diferenças da temperatura do ar cenário de verão	197

Tabela 18 – Temperatura do ar dos cenários de verão no Parque da Luz (°C)	200
Tabela 19 – Temperatura do ar dos cenários de verão na Av. Tiradentes	201
Tabela 20 – Temperatura de superfície cenário atual (°C)	209
Tabela 21 – Diferenças de temperatura de superfície de verão às 14h00	209
Tabela 22 – Temperaturas de superfície do cenário de verão do ponto no Parque da Luz (°C)	211
Tabela 23 – Temperaturas de superfície dos cenários de verão do ponto na Av. Tiradentes (°C)	212
Tabela 24 – Temperatura do ar do cenário atual de inverno °C	216
Tabela 25 – Diferenças de temperatura do ar no cenário de inverno	217
Tabela 26 – Temperatura do ar dos cenários nas simulações de inverno no Parque da Luz (°C)	219
Tabela 27 – Temperatura do ar dos cenários nas simulações de inverno na Av. Tiradentes (°C)	220
Tabela 28 – Reduções na temperatura de superfície de inverno às 13h00	224
Tabela 29 – Temperatura de superfície do cenário atual de inverno (°C)	226
Tabela 30 – Temperaturas de superfície cenários de inverno no Parque da Luz (°C)	227
Tabela 31 – Temperatura de superfície de inverno na Av. Tiradentes (°C)	228

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASV – Votos de Sensação Real (*Actual Sensation Vote*)

ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

ICU – Ilha de Calor Urbana

IV – Infraestrutura Verde

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

LID – *Low Impact Development*,

MPM – Melhores Práticas de Manejo das Águas da Chuva

NOAA – *National Environmental Satellite Service*

PAR – Pavimentos com alta refletância

PB – Pavimentos brandos

PCS – Pavimento de concreto simples

PCR – Pessoa em cadeira de rodas

PET – Índice Preditivo de Conforto de Temperatura Fisiológica Aparente (*Physiological Equivalent Temperature*)

PP – Pavimento permeável

PMSP – Prefeitura do Município de São Paulo

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

Sumário

Introdução.....	25
Parte 1: Abordagem teórica – fundamentos da pesquisa, calçadas, ilha de calor, pavimento brando, Infraestrutura Verde	29
Seção 1 Fundamentos da Pesquisa	30
1.1 Antecedentes da pesquisa	30
1.2 Hipótese, objetivo e justificativa	32
1.3 Fundamentos metodológicos	35
1.3.1 Dados primários.....	36
1.3.2 Dados secundários.....	37
1.4 Autores principais	38
Seção 2 Uso e qualidade dos ambientes externos	44

2.1 Calçada – conceitos e definições.....	45
2.2 A calçada ideal	50
2.3 Arborização.....	54
2.5 Pisos brandos recomendados	64
Seção 3 Ambiência urbana e Ilha de Calor	66
3.1 O que é a ICU	66
3.2 Como as ICU se formam	68
3.3 Efeitos positivos e nocivos	69
3.4 Adaptação das cidades à ICU.....	71
3.5 O clima do município de São Paulo	72
3.6 Ilha de Calor no município de São Paulo	73
3.6.1 Doenças e a ICU em São Paulo	77
Seção 4 Pavimentos brandos e conforto ambiental	80
4.1 Pavimento	80

4.1.1 Pavimento Flexível	81
4.1.2 Pavimento rígido - sistemas em placas de concreto para pisos e pavimentos	82
4.1.3 Efeitos do calor nos pavimentos	83
4.1.4 Armazenamento de calor nos pavimentos	84
4.2 Pavimento brando	85
4.3 Pavimentos com alta refletância - PAR.....	88
4.4 Pavimentos permeáveis - PP	102
4.5 Referências de aplicação de pavimento brando internacionais	112
4.6 Referências de aplicação de pavimento brando nacionais	118

Seção 5 Infraestrutura verde e a aplicabilidade dos pavimentos brandos121

Conceito de Infraestrutura Verde	121
5.1 Tipologias de Infraestrutura verde	121
5.2 Jardins de Chuva	123
5.3. Biovaleta	124

5.4 Canteiro pluvial.....	126
5.5 Arborização viária.....	127
5.6 Trincheiras de infiltração.....	128
Parte II – Estudos de Caso em São Paulo/SP.....	132
Seção 6 - Estudo de caso: a aplicabilidade de pavimentos brandos no planejamento da Infraestrutura Verde de São Paulo/SP	133
6.1 Metodologia de aplicação dos pavimentos brandos.....	142
6.2 Propostas viárias	143
6.3 Proposta para via arterial.....	144
6.4 Proposta para a via coletora	147
6.5 Proposta para via local	154
Seção 7 Simulações computacionais: estudo de caso no entorno do Parque da Luz....	159
7.1 Apresentação da área de estudo	159
7.2 Simulações computacionais no ENVI-met.....	168
7.3 Pesquisas com simulação ambiental com ENVI-met e Infraestrutura Verde	168

7.4 Estudos com infraestrutura verde e outras simulações	172
7.5 Materiais e métodos das simulações	173
7.5.1 Dias das simulações escolhidos	174
7.5.2 Metodologia das simulações.....	177
7.5.3 Dados climáticos de entrada do programa ENVI-met	182
7.5.4 Cenários	185
7.5.5 Cenário com aumento de arborização	185
7.5.6 Cenário com pavimento brando	191
7.6 Resultados e discussão das simulações.....	192
7.7 Simulação de verão.....	194
7.7.1 Temperatura do ar de verão	194
7.7.2 Temperatura de superfície de verão	208
7.8 Simulações de Inverno.....	215
7.8.1 Temperatura do ar de inverno.....	215
7.8.2 Temperatura de superfície de inverno	224

Seção 8 Discussão.....	233
Considerações finais.....	241
Referências bibliográficas	245

Introdução

Há mais de um século, observa-se que as áreas urbanas e suburbanas possuem “Ilhas de Calor”, regiões onde o ar e a temperatura da superfície são mais quentes do que nas áreas rurais circundantes (GARTLAND, 2010).

A primeira notícia sobre Ilha de Calor Urbana - ICU foi publicada por Luke Howard em 1818 comparando pontos de medição de temperatura em áreas rurais com as da cidade, concluindo que a temperatura nas áreas urbanas era influenciada por calor artificial gerado pela urbanização, induzido pelas construções, adensamento populacional e elevados consumos de combustíveis. O autor observou que Londres possuía uma média de temperatura 1,58°C mais alta que outras localidades no campo. De forma geral analisou que a magnitude da Ilha de Calor aumentava em direção ao centro londrino, onde a densidade de edifícios era maior (HOWARD, 1833).

O fenômeno da ICU vem sendo detectada em todo globo terrestre (GARTLAND, 2010) e é gerada pelas alterações causadas pelo Homem, por meio de alterações da superfície pela substituição

de materiais naturais por artificiais na atmosfera nas cidades (OKE, 1973).

A ICU ocorre principalmente nas grandes cidades (OKE, 1973) e é mais intensa nos locais com maior grau de urbanização (SOBRAL, 2005). Considerando que a capital paulistana contava em 2010 com uma taxa de urbanização de 99,1%, pode-se ter uma ideia do impacto dos efeitos da ICU no município (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO, 2010). Este fenômeno é particularmente problemático nas cidades de clima naturalmente mais quentes, como é o caso de São Paulo/SP, devido ao aquecimento da temperatura no período diurno, o que leva ao desconforto da população e ao consumo suplementar de energia necessário ao resfriamento de ambientes, veículos etc. Nas cidades em que normalmente predomina o clima frio, as Ilhas de Calor são vistas como benéficas, pois diminuem a necessidade de energia para calefação no inverno (LOPES, 2006). Os efeitos negativos das ICU também incluem o aumento de ocorrência de eventos climáticos extremos como as chuvas torrenciais (LOMBARDO, 1985; JFS,

2008) e o agravamento de problemas de saúde pública, como doença cardíaca, respiratória, AVC e dengue (SOBRAL, 2005; ARAUJO et al., 2015; SON et al., 2016; IKEFUTI, 2017; IKEFUTI; BARROZO; BRAGA, 2018).

Mas quais seriam as formas de se combater e minimizar os efeitos das ICU? Existem três estratégias principais: o plantio maciço de arborização, a adoção de coberturas e os pavimentos brandos (GARTLAND, 2010; ROSENFELD et al., 1998). Neste sentido, a técnica de pavimentos brandos revela o seu alto valor, pois pode ser executada pelo poder público e não depende da boa vontade e da adesão da população, como seria o caso da estratégia de substituição das coberturas tradicionais por outras mais adequadas para diminuir as ICU. Nesta técnica é considerado tanto o tipo de material do pavimento brando quanto o sombreamento do mesmo pela arborização (EPA, 2012; ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012). Tais fatos trazem benefícios tanto para o aumento da vida útil do próprio pavimento, pela redução de sua temperatura, quanto pelo aumento do verde (GARTLAND, 2010; EPA 2012; ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012). Mais vegetação no meio urbano é benéfica para o microclima urbano, traz mais

qualidade de vida para a população, entre outros benefícios (HERZOG, 2010b).

Sendo assim o presente trabalho foi estruturado em duas partes principais:

- Parte I: onde são apresentados os aspectos teóricos do trabalho, fundamentos da pesquisa, conceitos de uso e qualidade dos ambientes externos, ambiência urbana e Ilha de Calor, pavimentos brandos e conforto ambiental e sobre Infraestrutura Verde.
- Parte II: apresenta a face experimental do trabalho realizada por meio de estudos de caso, tanto em termos de aplicabilidade dos pavimentos brandos em conjunto com a Infraestrutura Verde na paisagem urbana da mobilidade, como em simulações computacionais para compreender os impactos que as proposições de introdução do Verde e dos pavimentos brandos podem causar para reduzir as Ilhas de Calor em São Paulo/SP.

A seguir será feita breve explanação de cada seção.

- Seção 1 – Traz os antecedentes da pesquisa, explicando o caminho percorrido para se chegar ao objeto, o objetivo, o recorte espacial e o tipo de pesquisa desenvolvido (qualitativa-quantitativa). Também introduz o assunto da Ilha de Calor Urbana, expõe a justificativa do trabalho, a

hipótese, o objetivo geral e os específicos e os fundamentos metodológicos.

- Seção 2 – Aborda o uso e qualidade dos ambientes externos, sob o enfoque da qualidade da caminhada e o papel da calçada, a fim de trazer embasamento sobre o tema que posteriormente será mencionado no estudo de caso da aplicação dos pavimentos brandos na paisagem urbana. Apresenta conceitos e definições de calçada, dimensões ideais, recomendações sobre o plantio de árvores e os pisos brandos recomendados.
- Seção 3 – Trata sobre a ambiência urbana e a Ilha de Calor Urbana – ICU e das estratégias para a sua mitigação a fim de trazer o entendimento de conceitos sobre o fenômeno da ICU, como ela se origina na cidade, formas de mitigação e de adaptação das cidades, observações sobre o clima e a ICU no município de São Paulo.
- Seção 4 – Discorre sobre os pavimentos brandos e o conforto ambiental. Assim, apresenta os principais tipos de pavimentos utilizados, o efeito danoso do excesso de calor nos pavimentos e comenta sobre o armazenamento de calor

nos pavimentos. Como este é um dos temas chaves da pesquisa, o assunto é detalhado mais profundamente nos tópicos a respeito do pavimento brando. Nele, é comentado os dois principais tipos deste pavimento brando (PAR e permeável), as diversas possibilidades de pavimentos existentes e são mencionadas as referências de aplicação nacionais e estrangeiras reveladas pela revisão de literatura.

- Seção 5 – Expõe sobre o assunto Infraestrutura Verde – IV – e a aplicabilidade dos pavimentos brandos na paisagem urbana. Assim, apresenta o conceito de IV e os tipos de tipologias sugeridas para serem adotadas no cenário urbano, para serem integradas à calçada e às vias: jardins de chuva, biovaleta, canteiro pluvial, pavimentos permeáveis e arborização urbana.
- Seção 6 – Apresenta estudo de caso sobre a aplicabilidade dos pavimentos brandos no planejamento de uma IV em São Paulo, para que seja possível visualizar de que forma os pavimentos brandos e a IV podem ser inseridos numa paisagem urbana consolidada. Esta seção está interrelacionado à seção 7, que trata das simulações computacionais, pois na seção 6 são apresentadas

proposições projetuais em termos de desenho urbano nas vias e calçadas e, na seção 7, é feita a quantificação dos benefícios que as propostas de incorporação de pavimentos brandos e da IV poderiam trazer à cidade e aos seus habitantes. Nesta seção 6, o estudo de caso é realizado no mesmo trecho onde as simulações computacionais foram executadas.

- Seção 7 – Detalha as simulações computacionais realizadas num estudo de caso no entorno do Parque da Luz. Este trecho foi escolhido por se tratar de uma área inserida dentro de uma das “Trilha Norte-Sul” que anteriormente foram alvo de pesquisas durante o desenvolvimento do doutorado. Nesta seção, foram desenvolvidas explicações sobre conceitos de simulações computacionais no ENVI-met e seu funcionamento, o método de aplicação das simulações, resultados e discussões das simulações. Foram realizadas simulações para duas épocas do ano diametralmente opostas, uma para uma data de inverno outra para o verão, a fim de verificar o comportamento dos resultados obtidos. Pontos de comparação são estabelecidos para tal, um dentro do Parque da Luz e outro fora, na Av. Tiradentes.

- Seção 8 – Na oitava seção, são realizadas considerações sobre a pesquisa, onde as hipóteses levantadas na seção 1 são comprovadas e há a indicação de que os objetivos propostos no início da pesquisa foram alcançados. São discutidos os resultados das simulações à luz da revisão de literatura pertinente, assim como são feitos comentários entre os resultados obtidos no verão e inverno, sobre as semelhanças e diferenças observadas para cada cenário proposto. Também são discutidos os resultados observados no Parque da Luz e na Av. Tiradentes com relação às temperaturas para cada cenário. Nesta seção, são tecidas considerações sobre as limitações da pesquisa.
- Considerações finais – Neste tópico são expostas as considerações finais sobre a pesquisa e seus resultados, sintetizando o que foi discutido na seção 8 da discussão. Ao final, são indicadas recomendações na área da Arquitetura da Paisagem e propostas sugestões de pesquisas futuras, a fim de dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

Parte I: Abordagem teórica – fundamentos da pesquisa, calçadas, Ilha de Calor, pavimento brando, Infraestrutura Verde

Nesta primeira parte, são apresentados os aspectos fundamentais da pesquisa de modo a subsidiar e fundamentar a parte experimental do trabalho, realizada na parte II, que corresponde às seções 6 e 7. Sendo assim, compõem a parte inicial do trabalho os fundamentos da pesquisa, os conceitos de uso e qualidade dos ambientes externos, os aspectos de ambiência urbana e Ilha de Calor e os conceitos básicos de clima, pavimento brando e conforto ambiental, assim como Infraestrutura Verde e aplicabilidade dos pavimentos brandos.

Esta abordagem teórica é importante tanto para que o leitor compreenda os assuntos tratados nesta tese, tais como: pavimento brando, Ilha de calor, calçadas e Infraestrutura Verde, quanto para a pesquisa em si, que se apoiou nos conceitos apresentados aqui para o desenvolvimento dos estudos de caso.

Seção 1 Fundamentos da Pesquisa

Neste tópico, serão apresentados os antecedentes da pesquisa explicando como foi delineado o objeto e objetivo de estudo e o recorte espacial. Também será introduzido o assunto das Ilhas de Calor Urbanas e como os revestimentos podem auxiliar na mitigação deste calor. Serão apresentados também: a hipótese, a justificativa, o objetivo geral e específicos e os fundamentos metodológicos.

1.1 Antecedentes da pesquisa

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho houve um amadurecimento dos objetivos, métodos e delimitação da área de estudo. Colaboraram para isto as disciplinas realizadas, as recomendações recebidas na banca de qualificação e as diversas reuniões realizadas com a orientadora de doutorado. Desde o princípio, havia o desejo de se trabalhar com a Infraestrutura Verde

– IV – na Paisagem da Mobilidade de São Paulo/SP. No mestrado foi realizado o trabalho com o tema do transporte ciclovitário, por isso, manteve-se a intenção de se estudar a paisagem da mobilidade.

Ao longo do doutorado, foram realizadas pesquisas ao longo da “trilha Norte – Sul”, alvo de estudos, naquele momento, do time de pesquisadores do laboratório LABVERDE, da qual a autora e a sua orientadora fazem parte, tendo como temas os assuntos de tese: caminhada, arborização, ICU, propostas de inserção de Infraestrutura Verde – IV em áreas da “trilha”.

Outro fato que influenciou a escolha do objeto de estudo foi cursar a disciplina na Escola Politécnica da USP – Drenagem de Estradas e Aeroportos. Assim, a partir dos conhecimentos e reflexões obtidos com a matéria, e as demais disciplinas cursadas, decidiu-se em conjunto com a orientadora adotar o tema pavimentos brandos na IV para combate às ICU no município de São Paulo.

A banca de qualificação do doutorado trouxe colaborações valiosas, dentre elas destacou a importância de se incorporar a abordagem quantitativa à tese, de modo a mensurar quais são os benefícios que a adoção do pavimento brando e da IV podem trazer à cidade, pois existem muitos trabalhos apenas qualitativos na área e a falta desta abordagem quantitativa é um ponto que pode levar à fragilidade do estudo. Esta quantificação seria feita por meio de simulações computacionais e houve a sugestão de utilizar o programa ENVI-met. Outra colaboração importante da banca foi o de acrescentar uma seção voltada ao uso e qualidade dos ambientes externos, tratando do assunto da qualidade das calçadas e espaços de circulação, para que o enfoque da tese tivesse uma abordagem mais voltada à área da Arquitetura da Paisagem.

Outro fator importante foi a localização dos artigos de Barros e Lombardo (2016) e principalmente de Mendes et al. (2018), que trouxeram os mapas de temperatura de superfície de São Paulo atualizados e os critérios de análise da ICU. Até então, a única referência de mapa de temperatura de superfície que se tinha era o

da Secretaria do Verde e do Meio Ambiente, datado de 1999. Assim, havia um espaço temporal de dez anos do mapa da prefeitura à época do desenvolvimento da pesquisa, muito desatualizado para os trabalhos a serem desenvolvidos, o que poderia gerar uma inconsistência muito grande nos resultados.

Ainda havia o desafio da aprendizagem do programa de simulação ambiental ENVI-met, o qual foi possível de realizar graças à colaboração importante do pesquisador Flávio Mendes, da ESALQ/USP, e da disponibilização dos recursos computacionais da máquina virtual deles. A partir do conhecimento do funcionamento do simulador ENVI-met e da análise do mapa de temperatura de superfície da capital paulistana (MENDES et al., 2018), definiu-se o recorte do objeto de estudo das simulações computacionais no entorno do Parque da Luz.

Como havia também o objetivo de elaborar proposições projetuais da inserção do pavimento brando e da IV na paisagem urbana, decidiu-se adotar o mesmo recorte espacial utilizado nas simulações computacionais para as propostas de projeto.

1.2 Hipótese, objetivo e justificativa

Em novembro de 2019, numa conferência no Instituto dos Estudos Avançados da USP sobre Mudanças Climáticas, o professor e pesquisador do IAG/USP, Tércio Ambrizzi, afirmou que a temperatura média global de 1850 a 2016 tem se elevado e isto tem ocorrido em todo o globo, então o Brasil se inclui nesta constatação. Há projeções indicando aumento de temperatura no verão entre 2 a 4°C e no inverno de 3 a 5°C na América do Sul, em especial na região Sudeste (MARENGO et al., 2009b). Usando o modelo climático PRECIS foi observado que existe uma tendência num cenário futuro a ocorrerem noites mais quentes e aumento significativo de eventos extremos de chuva na região da América do Sul (região Sudeste), o que inclui o Brasil (MARENGO et al., 2009a; 2009c).

No sudeste do país a tendência é de redução da chuva e, se considerarmos que grande parte da população nacional reside nesta região, essa constatação representa um problema porque mostra uma tendência na falta d'água para distribuição. O estado de São Paulo concentra a maior população em comparação com os outros

estados da nação, indicando, de igual forma, que deverá sofrer com os impactos das mudanças climáticas (SÃO PAULO, sem data). O mesmo pesquisador afirmou que a temperatura da capital paulistana já aumentou 3°C em um século e que antes dos anos de 1970 não havia relatos de enchentes no município.

Outro fator preocupante é que a capital paulistana e sua região metropolitana tem sofrido uma rápida urbanização ao longo dos anos e isto tem se refletido em alterações climáticas. Este processo, juntamente com a perda de vegetação que o processo de urbanização traz tem levado à modificações na temperatura e precipitação, com tendências de aumento, observadas especialmente após os anos de 1970 (LIMA; MAGAÑA RUEDA, 2018).

Com relação à justificativa da importância deste trabalho, após realizar diversas buscas sobre os estudos que versam sobre o tema, notou-se que há poucas pesquisas no contexto nacional que trataram o assunto sob o enfoque de adotar estratégias de pavimento brando para mitigar Ilhas de Calor Urbanas. As poucas existentes limitam-se ao estudo de novos materiais de pavimentação. Desta forma, esta tese intenta trazer colaborações sobre o assunto e assim auxiliar gestores de órgãos públicos, projetistas, tomadores de

pesquisa

decisão e afins, no sentido de balizar suas decisões sobre os investimentos em obras novas e reconstruções que envolvam pavimentos, vias, ciclovias, calçadas, caminhos e outros espaços de circulação pública. O estudo também se mostra relevante para os pares da ciência da comunidade mundial ao apresentar parâmetros de relação entre área arborizada e redução térmica, assim como os benefícios de atenuação de temperatura dadas pelo pavimento brando em um município grande e um dos mais populosos do mundo.

Também se deve considerar que a ICU provoca outros efeitos nocivos como a elevação da concentração do ozônio, prejudicial à saúde humana. A intensidade da ICU e a concentração do O_3 são afetados pela maior temperatura de superfície (WANG et al., 2018). Tanto a elevação da temperatura quanto a pior qualidade do ar têm reflexo negativo na saúde pública, pois têm relação com o aumento de doenças e mortes, principalmente por doença cardiovascular e respiratória. Na capital paulistana, a cada $1^\circ C$ a mais na temperatura há um aumento de 3,26% de mortes por doença cardiorrespiratória (MCMICHAEL et al., 2008).

Diante deste cenário sombrio, faz-se necessária a criação de instrumentos para a mitigação da ICU e para aumentar a resiliência

das cidades frente aos eventos das mudanças climáticas, que já estão acontecendo, para melhorar a qualidade de vida da população. Neste sentido, trabalhos que versem sobre estratégias de mitigação da ICU são importantes para auxiliar administradores, gestores e projetistas sobre as melhores decisões a tomar.

A revisão da literatura revelou a carência no contexto brasileiro de pesquisas de mitigação de ICU com técnicas de pavimento brando. Os trabalhos existentes se pautam no desenvolvimento e estudo de materiais frios para pavimentação, mas não focam na sua aplicação em ambiente urbano com o desenvolvimento de estudos de caso.

Vislumbrando a aplicação do pavimento no desenho urbano, juntamente com a mensuração do seu impacto em termos de redução de temperatura do ar e de superfície, o desenvolvimento de novas pesquisas pode ser alcançado por meio de simulações computacionais. No Brasil há ainda um papel conservador com relação a ações concretas no sentido de enfrentar às ICU, por isto trabalhos que exaltem a importância e apresentem soluções sobre o assunto são de extrema importância, a fim de criar um ambiente de sensibilização sobre o tema.

Um dos principais motivos para o sobreaquecimento das grandes cidades é o tipo de superfície existente nas áreas com altas taxas de urbanização. Nestes casos, há o predomínio de materiais estanques que não proporcionam condições de umidade para dissipar o calor do sol. Além disto, deve-se ao aumento da rugosidade¹ e das propriedades térmicas dos edifícios e pavimentos a tendência do aquecimento nas cidades, os quais são mais quentes e secos que as superfícies vegetadas ou cobertas por água (GARTLAND, 2010).

Assim sendo, são preconizadas três formas principais de mitigar as Ilhas de Calor Urbanas: a adoção de revestimentos e pavimentos brandos, plantio maciço de árvores e de vegetação (GARTLAND, 2010; ROSENFELD et al., 1998²). Neste sentido, como recorte de objeto de pesquisa, o presente trabalho se volta para a os pavimentos brandos e o tipo de pesquisa escolhido foi o qualitativo.

Com relação à hipótese, considera-se que a adoção do pavimento brando, isolado ou associado à Infraestrutura Verde, pode auxiliar na mitigação das ICU em São Paulo/SP. A partir desta hipótese central foram elaborados outros pressupostos a respeito do assunto:

- Os revestimentos e pavimentos de uma região urbana influenciam na formação das ICU. Assim, os pavimentos brandos podem ser utilizados em calçadas e ciclovias, áreas de estacionamento de veículos e pavimentos de vias para redução da temperatura;
- A adoção do pavimento brando, em conjunto com as tipologias Infraestrutura Verde, pode colaborar para reduzir a temperatura e melhorar as condições climáticas urbanas;

¹ Presença de edificações.

² Rosenfeld et al.. (1998), são importantes referências no assunto de ICU pois foram os pioneiros a apresentar um estudo de simulação para cidade em que discutem os benefícios trazidos pelas estratégias de combate às ICU. Em seu

artigo, quantificam o quanto a cidade de Los Angeles poderia economizar em valores monetários e em energia reduzindo as ICU.

pesquisa

- Há diferentes tipos de pavimentos brandos, cada um adequado a um uso, que devem ser devidamente especificados para cada situação.
- É possível inserir os pavimentos brandos e as tipologias de IV numa paisagem urbana consolidada como é a da capital paulista.

O objetivo geral da pesquisa é de analisar as possibilidades de implantação dos pavimentos brandos como parte de uma Infraestrutura Verde no entorno do Parque da Luz em São Paulo/SP, para a mitigação das Ilhas de Calor Urbanas – ICU. Os objetivos específicos são:

- Avaliar o espaço físico disponível para a implantação de pavimentos brandos, considerando o uso do solo urbano, o espaço edificado, o espaço viário, as hierarquias viárias, entre outros elementos;
- Elaborar estudos de seções viárias propondo a inserção do pavimento brando em conjunto com as tipologias de Infraestrutura Verde;
- Analisar os mapas de cobertura do solo em relação às Ilhas de Calor Urbanas existentes na área e as

possibilidades de mitigação, com a adoção de pavimentos brandos;

- Elaborar simulações computacionais para quantificar como a adoção dos pavimentos brandos, de forma isolada ou associada à arborização, pode colaborar para reduzir a temperatura por meio de cenários ambientais;
- Avaliar as possibilidades de melhorias de vias para caminhadas e ciclovias, entendidas como elementos parte de uma Infraestrutura Verde e a possibilidade da adoção de pavimentos brandos nestes espaços.

1.3 Fundamentos metodológicos

A metodologia da revisão de literatura envolveu os seguintes aspectos: pesquisas no portal Capes pelas palavras-chaves em inglês referentes aos temas principais a serem desenvolvidos, a fim de localizar os trabalhos internacionais na área, como pavimento brando – *fresh pavement*, Ilha de Calor Urbana – *Urban Heat*

Island, Infraestrutura Verde – *Green Infrastructure*. Também foram pesquisadas as mesmas palavras-chave em português em sites de busca de pesquisa como o Google acadêmico. A partir daí, foram escolhidos os estudos mais recentes (últimos 3 anos) que poderiam acrescentar contribuições com relação ao assunto dos pavimentos brandos, no sentido do combate das ICU e verificados os autores que trabalham na área. A partir destes artigos foram observados quais eram os pesquisadores citados e estudados, para listar os referidos trabalhos mais importantes, principalmente os mais citados e os que primeiro trabalharam na área, como Pomerantz et al. (1997) e Rosenfeld et al. (1998).

Outra fonte de busca escolhida foi o uso dos livros que tratam especificamente do assunto de combate às ICU, como o livro de Lisa Gartland (2010). Também foram usados sites governamentais, tais como: EPA – órgão de proteção ambiental norte-americano que têm várias informações a respeito de ICU e as formas de combatê-las; manuais de estados ou municípios estrangeiros que já adotam a IV em suas políticas públicas (como Portland – EUA); manuais de municípios dos EUA que trabalham com pavimentos brandos, como o Engineering Department of Chula Vista (Califórnia). Isto porque

no exterior há mais trabalhos governamentais já desenvolvidos do que no Brasil neste sentido.

Outras fontes de busca foram legislações nacionais, estaduais e municipais, e normas técnicas brasileiras. Também foram estudados os autores clássicos sobre o assunto da ICU em São Paulo (LOMBARDO, 1985) e sobre o clima da cidade de São Paulo (TARIFA, JOSÉ ROBERTO; AZEVEDO, 2001). Os dados de base para produção de mapas no programa QGIS foram localizados a partir do MDC do Município de São Paulo, disponíveis no site oficial da prefeitura. Na sequência, serão indicados os aspectos metodológicos do trabalho com relação aos dados primários e secundários adotados.

1.3.1 Dados primários

Os dados primários gerados nesta pesquisa foram os seguintes:

pesquisa

- Propostas de seções de acordo com cada hierarquia viária: via local, coletora e arterial, a fim de ilustrar a inserção dos pavimentos brandos e demais elementos da IV na paisagem urbana.
- Propostas de calçadas “ideais”, de acordo com as dimensões necessárias obtidas a partir de normas técnicas (NBR 9050, 2015), legislação sobre as calçadas (SÃO PAULO, 2011; BRASIL, 1997) e revisão de literatura para fundamentar a incorporação de elementos da IV para desfrutar dos benefícios que ela pode proporcionar à paisagem urbana.
- Estudo de caso sobre a aplicabilidade dos pavimentos brandos no entorno do Parque da Luz: propostas de seções viárias para vias no entorno do Parque da Luz, para cada hierarquia – via local, coletora e arterial. Foram eleitas três ruas no entorno do parque e realizadas as proposições de acordo com os modelos idealizados nas propostas de seções viárias do seção 2, sobre uso e qualidade dos ambientes externos.
- Informações de temperatura do ar e de superfície para as épocas de inverno e verão de acordo com os

quatro cenários idealizados apresentados em forma de tabelas, gráficos e mapas, gerados a partir das simulações no ENVI-met.

1.3.2 Dados secundários

Os dados secundários empregados neste trabalho a fim de fundamentar a pesquisa, assim como para auxiliar no desenvolvimento dos estudos, são:

- Mapa de temperatura de superfície (BARROS & LOMBARDO, 2016; MENDES et al., 2018) para alicerçar a análise do fenômeno da ICU em São Paulo e para ajudar a delimitar o trecho de estudo.
- Dados de temperatura e outros dados climáticos da Agência Aeroespacial norte-americana, NOAA (sem

data), da Universidade de Wyoming (UNIVERSITY OF WYOMING, sem data), INMET (INMET, sem data), entre outros, para carregar a entrada de configurações no programa ENVI-met para realizar as simulações.

- Base de dados MDC em *shapefiles*, da prefeitura de São Paulo, para suporte à produção de mapas.
- Imagens de satélite do *Google Earth* e do projeto FAPESP (FRANCO, 2015).
- Informações de livros, normas técnicas, artigos, teses e legislações para apoiar o dimensionamento das caixas das árvores e da calçada ideal.

1.4 Autores principais

A seguir, serão indicados os autores principais que serviram de fundamentação e inspiração para a elaboração deste trabalho, assim como os aportes interpretativos extraídos de cada um.

Tabela 1 - Autores e trabalhos de referência

Autor	Obra	Aportes interpretativos
Seção 1		
Gartland (2010)	Ilhas de Calor: Como Mitigar Zonas de Calor em Áreas Urbanas.	Contexto histórico da ilha de calor, formas de mitigação de ilhas de calor.
Lopes (2006)	O sobreaquecimento das cidades - causas e medidas para a mitigação da Ilha de calor de Lisboa.	Problemáticas das ilhas de calor.
Rosenfeld et al. (1998)	<i>Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction.</i>	Explicar quais as estratégias de mitigar as ilhas de calor (plantio de árvores e vegetação, adoção de tetos e pavimentos brandos).
Seção 02 – Uso e qualidade dos ambientes externos		
SÃO PAULO/SP (2011)	Lei municipal 15.442 de 09 de setembro de 2011.	Revisão de literatura sobre a legislação de calçadas no município de São Paulo, para fundamentar aspectos legais.

externos

Prefeitura Municipal de São Paulo (2012)	Conheça as regras para arrumar a sua calçada (2012).	Revisão de literatura sobre a cartilha acerca das calçadas no município de São Paulo, para fundamentar aspectos legais.
Brasil (1997)	Código de Trânsito Brasileiro.	Revisão de literatura sobre normas a respeito de calçadas.
Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015)	NBR 9050.	Revisão de literatura sobre normas técnicas incidentes nas calçadas.
Santos et al. (2017)	8 Princípios da Calçada. Construindo cidades mais ativas.	Revisão de literatura sobre faixa livre, conceito, dimensionamento, especialmente em áreas especiais como as comerciais.
Autor	Obra	Aportes interpretativos
Seção 02 – Uso e qualidade dos ambientes externos		
Mascaró (2005)	Loteamentos Urbanos.	Revisão de literatura para apoiar o dimensionamento das faixas veiculares das proposições e critérios para espaço livre mínimo para o plantio de árvores.
Abbud (2006)	Criando Paisagens.	Revisão de literatura sobre porte de árvores.
Seção 3 – Ambiência Urbana e ilha de calor		
Lombardo (1985)	Ilha de calor nas metrópoles.	Revisão de literatura da origem do fenômeno da Ilha de Calor Urbana – ICU. Motivo da formação da ICU nas cidades.
Gartland (2010)	Ilhas de Calor: Como Mitigar Zonas de Calor em Áreas Urbanas.	Revisão de literatura da origem do fenômeno da ilha de calor urbana – ICU. Formas de adaptação da cidade às ICU.
Rosenfeld et al. (1998)	<i>Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction.</i>	Revisão de literatura sobre formas de adaptação das cidades às ICU. Exemplo de experimento para reduzir ICU.
¹ EPA (2008) ² EPA (2008a) (1985) ³ Oliveira (s/d)	¹ <i>Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Urban Heat Island Basics;</i> ² <i>Conceptual Green Infrastructure Design for Washington Street, City of Sanford;</i> ³ Ilhas de calor em centros urbanos.	¹ Revisão de literatura sobre ICU superficial e atmosférica, mudanças climáticas e aquecimento global e o conceito de ICU. ^{1;2;3} Motivos da formação das ICU nas cidades.
Tarifa e Azevedo (2001)	Os climas na cidade de São Paulo.	Revisão de literatura sobre o clima do município de São Paulo.

Barros e Lombardo (2016)	A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo -SP.	Revisão de literatura sobre a ICU em São Paulo, inclusive com mapa de temperatura de superfície de São Paulo.
Mendes et al. (2018)	<i>Thermal spatial pattern changes in São Paulo/SP/Brazil from 1999 to 2018.</i>	Revisão de literatura sobre a ICU em São Paulo Mapa de temperatura de superfície de São Paulo (2018)
Autor	Obra	Aportes interpretativos
Seção 4 – Pavimentos brandos e conforto ambiental		
Senço (1997)	Manual de técnicas de pavimentação.	Revisão de literatura sobre pavimento, conceitos gerais e sobre pavimento flexível.
Autor	Obra	Aportes interpretativos
Engineering Department of Chula Vista (2012)	<i>Cool pavements study final report.</i>	Revisão de literatura sobre tipos de pavimentos brandos e tabela com custos e benefícios destes pavimentos.
Bernucci et al. (2008)	Pavimentação asfáltica.	Conceitos sobre pavimento. Conceitos sobre pavimento flexível. Conceitos de pavimento porosos, quanto à índice de vazios.
NBR 7207	NBR 7207: terminologia e classificação de pavimentação: terminologia.	Definição de pavimento.
Gartland (2010)	Ilhas de Calor: Como Mitigar Zonas de Calor em Áreas Urbanas.	Efeitos negativos do calor nos pavimentos. Vantagens do menor aquecimento no pavimento. Como o pavimento permeável se mantém brando sob o sol. Revisão de literatura sobre tipos de pavimentos brandos.
Pomerantz et al.(1997)	<i>Paving materials for heat island mitigation.</i>	Composição de pavimento brando de alta refletividade – PAR. Revisão de literatura sobre tipos de pavimento brando.
Suzuki et al. (2014)	Drenagem subsuperficial de pavimentos. Conceitos e dimensionamento.	Conceito, história de pavimento brando permeável e seus tipos e diferentes funções da sub-base do pavimento. Benefícios deste pavimento.
Manual de Connecticut (2004)	<i>Connecticut Stormwater Quality Manual.</i>	Recomendações de uso do pavimento brando permeável. Recomendação de uso de pavimento poroso.

externos

Tomaz (2009)	Curso de manejo de águas pluviais. Seção 60 - pavimento poroso.	Tipos de pavimento e revestimento brando permeável. Revestimento modular conceitos e recomendações de uso e de projeto.
EPA (2008a)	<i>Conceptual Green Infrastructure Design for Washington Street, City of Sanford.</i>	Recomendação de limpeza do pavimento poroso.
Autor	Obra	Aportes interpretativos
Seção 4 – Pavimentos brandos e conforto ambiental		
Carpio (2014)	Uso de pigmentos de óxido de metais mistos na pavimentação para a mitigação da ilha de calor urbana.	Referência de aplicabilidade de pavimento brando nacional: pavimentos asfálticos com adição de pigmentos. Avaliação das misturas propostas com o ENVI-met.
Carpio et al. (2016)	<i>Urban pavements used in Brazil : Characterization of solar reflectance and temperature verification in the field.</i>	Revisão de literatura sobre aplicabilidade de pavimentos brandos: avaliação de pavimentos mais usados no Brasil.
Autor	Obra	Aportes interpretativos
Castro (2014)	Uso de pigmentos de óxido de metais mistos na pavimentação para a mitigação da ilha de calor urbana.	Estudo de desenvolvimento de novos pavimentos brandos, com adição de materiais especiais ao concreto para refrescá-lo.
Seção 5 – Infraestrutura verde e a aplicabilidade dos pavimentos brandos		
Bonzi (2015)	O zoneamento ambiental geomorfológico como método para planejar a infraestrutura verde em áreas densamente urbanizadas.	Recomendações de qual tipologia aplicar para cada área. Conceitos das tipologias jardim de chuva e canteiro pluvial.
Schutzer (2012)	Cidade e Meio Ambiente: a apropriação do relevo no desenho ambiental urbano.	Recomendações de qual tipologia aplicar para cada área.
Seção 6 – Estudos de caso: a aplicabilidade de pavimentos brandos no planejamento de Infraestrutura Verde de São Paulo/SP		
Prefeitura de São Paulo (sem data)	Geosampa. Mapa digital da Cidade de São Paulo - MDC, sem data.	Bases digitais do Mapa Digital da Cidade de São Paulo em <i>shapefiles</i> para uso no QGIS e produção de mapas.
Santamouris (2012)	<i>Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments.</i>	Revisão de literatura indicando a eficiência das árvores para refrescar o meio urbano por meio da evapotranspiração.
Pellegrino (2017)	Paisagem como infraestrutura hídrica. In Estratégias para uma infraestrutura verde.	Revisão de literatura sobre como utilizar a IV para reduzir os escoamentos na fonte.

Mascaró (2005)	Loteamentos Urbanos.	Porte da árvore a plantar para subsidiar as propostas das seções viárias.
Autor	Obra	Aportes interpretativos
Seção 7 – Simulações computacionais: estudo de caso no entorno do Parque da Luz		
Barros e Lombardo (2016)	A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo-SP.	Subsídio para determinar a localização da área de estudo, por ter sido identificada ilha de calor forte em trecho da “Trilha Norte-Sul número 2”. Suporte à análise das temperaturas que ocorrem na região do entorno da área de estudos, a partir a identificação da potência das ilhas de calor.
Gartland (2010)	Ilhas de Calor: Como Mitigar Zonas de Calor em Áreas Urbanas.	Revisão de literatura sobre como tornar as coberturas mais frescas.
Bruse e Fleer (1998)	<i>Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model.</i>	Revisão de literatura sobre o funcionamento do programa ENVI-met.
Autor	Obra	Aportes interpretativos
NG et al. (2012a)	<i>A study on the cooling effects of greening in a high-density city : An experience from Hong Kong.</i>	Revisão de literatura sobre o uso do programa ENVI-met por outros pesquisadores. Subsídios para as análises de redução de temperatura com os cenários envolvendo arborização.
Shashua-Bar e Hoffman (2000)	<i>Vegetation as a climatic component in the design of an urban street An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees.</i>	Revisão de literatura sobre a redução de temperatura pela arborização.
Labaki et al. (2012)	Conforto térmico em espaços públicos de passagem: estudos em ruas de pedestres no estado de São Paulo.	Revisão de literatura sobre faixa de temperatura de conforto em São Paulo

externos

University of Wyoming (sem data)	<i>Departament of atmospheric science.</i>	Dados climáticos para configuração no programa ENVI-met.
NOAA (sem data)	<i>Time related maps.</i>	Dados climáticos de velocidade e vento para configuração no ENVI-met.
Rosenfeld et al. (1998)	<i>Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction.</i>	Revisão de literatura sobre uma simulação semelhante à proposta na presente pesquisa.
Autor	Obra	Aportes interpretativos
Seção 7 – Simulações computacionais: estudo de caso no entorno do Parque da Luz		
Pomerantz et al. (1997)	<i>Paving materials for heat island mitigation.</i>	Indicação do albedo do pavimento brando PAR utilizado nas simulações.

Seção 2 Uso e qualidade dos ambientes externos

Incorporar a caminhada como parte de uma rotina é importante para a manutenção da saúde, em geral, da população e para incentivar que o espaço público tenha maior uso. Além disto, vale lembrar que a prática da caminhada ganha um bom estímulo se as calçadas forem adequadas, dotadas de segurança e conforto e principalmente, de acessibilidade. É importante que a calçada seja um espaço acessível a todos, com as condições necessárias para tal, ou seja, sem degraus ou desníveis no caminho, pisos que não escorregam, rampas para acesso a partir do leito carroçável, dentre outros elementos recomendados nas normas técnicas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

Os deslocamentos a pé representam uma parcela importante do total de viagens realizadas dentre todos os modais, totalizam 41,8% de todos os deslocamentos diários, conforme dados de uma pesquisa na cidade de São Paulo/SP (COMPANHIA METROPOLITANA DE SÃO PAULO, 2008). Quase toda viagem se inicia ou termina com uma parte do trajeto a pé e em algum

momento será necessário o uso da calçada. Estas viagens a pé podem configurar uma rotina que traga bem-estar ou pelo contrário serem algo forçado e desagradável devido à falta de opções melhores.

Nos dias atuais pode-se afirmar que o tema “calçada” é objeto de estudo de áreas diversas, tais como: Arquitetura e Urbanismo, Saúde Pública e Sociologia, Engenharia de Tráfego e Engenharia de Transportes. Ela é também tema de trabalho de órgãos da prefeitura e de legislações específicas, assim como de decretos e leis municipais, normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas entre outros.

No presente trabalho esta seção foi incluída devido à necessidade de embasar e contextualizar a inserção dos pavimentos no ambiente urbano, tendo em vista o uso do espaço público e a comodidade das pessoas que ali transitam. Pois, desde o princípio, o objetivo desta tese foi o de trazer contribuições que possam melhorar o bem-estar daqueles que transitam e habitam nas cidades, tendo em vista o contexto das problemáticas das Ilhas de Calor e

externos

procurando soluções para sua mitigação utilizando os pavimentos brandos e a arborização onde isto for possível.

É ainda com foco na qualidade de vida humana que nesta tese será comentado o assunto das calçadas. Pois é de conhecimento geral a necessidade de incorporar hábitos saudáveis na rotina das pessoas para que elas sejam saudáveis, sendo assim incluir a caminhada no dia-a-dia é uma boa forma de se evitar doenças diversas. Caminhar de forma segura e com qualidade implica no preenchimento de alguns quesitos, como por exemplo: existirem calçadas que permitam caminhar sem risco de acidentes devido à pisos inadequados e sem a necessidade de desviar de desviar de obstáculos, entre outros. Ainda se faz necessária a existência de dimensões adequadas na calçada para que seja possível o trânsito confortável entre os pedestres, segundo os quesitos de ergonomia. E somam-se a estes itens a necessidade de provimento de conforto ambiental. Neste sentido, o plantio de árvores e a instalação de pavimentos brandos são importantes para atenuar o desconforto das altas temperaturas que ocorrem em grande parte do ano na capital paulistana, região do estudo de caso.

Portanto, no presente tópico serão tecidos comentários sobre as calçadas com relação à conceitos e definições, reflexões e

recomendações do que seria a calçada ideal e como chegar neste objetivo, comentários sobre a arborização e sua relação com a calçada e a via, proposição para uma seção viária “ideal” que comporte pedestres, ciclistas, arborização e veículos e por fim, pisos brandos recomendados.

2.1 Calçada – conceitos e definições

No início, as cidades brasileiras possuíam o espaço da via compartilhado por pessoas e veículos de tração animal, fato que gerava conflitos. Os pedestres procuravam se proteger das rodas das carroças e carruagens se espremendo junto aos muros e paredes das edificações, utilizando o piso estreito e mais alto que as habitações construíam no exterior. Esta é a origem da calçada, que na época era a denominação de “uma faixa horizontal empedrada, de pequena largura, colada à parede externa da construção, destinada a proteger as fundações da infiltração das águas pluviais” (YAGIZI, 2000, p. 31 apud MALATESTA, 2017).

As calçadas paulistanas são regidas pela Lei 15.442 de 09 de setembro de 2011 (SÃO PAULO/SP, 2011). Dentre outros aspectos, ela estabelece a largura mínima da faixa livre, que deve ser livre de obstáculos e menciona que os proprietários possuem a responsabilidade pela edificação e manutenção de suas calçadas. Com relação às orientações a respeito da construção, a lei prevê que a prefeitura pode ajudar com a prestação de orientação técnica. A mesma legislação indica a elaboração e distribuição de uma cartilha orientativa com relação às orientações técnicas, de construção e manutenção das calçadas e as responsabilidades dos proprietários de imóveis.

Além da iniciativa da criação da cartilha das calçadas em 2012, em 2017 o governo municipal de Bruno Covas atrelou ao gabinete do prefeito a Comissão Permanente de Calçadas – CPC. Atualmente ela está desenvolvendo uma nova norma que pretende aglutinar a dispersa legislação referente às calçadas, organizando quatro leis e cinco decretos existentes sobre o assunto (WENZELL, 2018).

Para um melhor entendimento dos termos técnicos que serão utilizados com relação aos espaços de circulação pública de

pedestres, teceremos algumas definições, a saber os conceitos de: calçada, passeio, faixa livre, faixa de serviço e faixa de transição.

Calçada

No Código de Trânsito Brasileiro – CTB (BRASIL, 1997), o entendimento da calçada é dela ser um local público destinado apenas aos pedestres e de ser um espaço integrante da rua, mas que possui cota diferenciada. Nos locais onde existe espaço suficiente, nela também se distribui o mobiliário urbano, a vegetação, a sinalização vertical entre outros.

Passeio

O CTB (BRASIL, 1997) define passeio como parte da calçada ou da pista de rolamento, e quando ocorre nesta última situação, deve ser separada por pintura ou elemento físico separador. O passeio deve estar livre de interferências e destina-se à circulação exclusiva de pedestres e, em casos excepcionais, de bicicletas e tráfego peatonal. No caso do presente trabalho, pode-se

externos

entender passeio como sinônimo de faixa livre, conceito que será discutido mais a frente.

Na Figura 1, há o exemplo da Rua Joel Carlos Borges, próxima à estação Berrini da CPTM, em São Paulo/SP, onde o passeio foi delimitado sobre a via por pintura verde no piso e obstáculos verticais, a fim de trazer mais segurança aos que circulam a pé. Trata-se de exemplo de um projeto adaptativo, devido à alta circulação de pedestres no local e pela constatação da insuficiência de largura das calçadas, além do fato de haver baixo trânsito de veículos, o que tornou viável expandir a área de tráfego peatonal sobre o leito carroçável.

Este projeto foi uma requalificação projetada em parceria pelo WRI Brasil, Frente Nacional de Prefeitos, Instituto Clima e Sociedade (CIDADE ATIVA, 2018), a partir de um concurso promovido pela parceria entre USP Cidades e o WRI Brasil, que convidou arquitetos a proporem soluções para requalificar três estações de trem de São Paulo: Berrini, Vila Olímpia e Santo Amaro. A Rua Joel Carlos Borges fica próxima à estação Vila Olímpia.

Figura 1 - Passeio delimitado por elementos físicos

Fonte: Cidade ativa (2014)

Faixa livre

Por outro lado, o conceito de faixa livre consta na norma técnica NBR 9050 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) e foi inicialmente desenvolvido na sua edição em 2004, sete anos após a promulgação da lei do CTB (BRASIL, 1997), como sendo uma parte do passeio, da calçada, via ou rota, onde podem circular apenas pedestres. Note aqui a diferença da NBR do CTB que enquanto no CTB no passeio se admite circulação de ciclistas, na faixa livre descrita na NBR 9050 (Ibidem) as bicicletas não são permitidas.

A criação desta faixa era uma reivindicação antiga dos portadores de deficiência, discutida nos Conselhos Municipais da pessoa com deficiência muito antes da existência da NBR 9050. Isto

porque as pessoas com tais limitações físicas tinham dificuldade de se locomover pelas cidades em meio aos obstáculos dos equipamentos urbanos espalhados ao longo da calçada, além de ter de desviar de mesas e cadeiras de bares e restaurantes que também ocupavam o passeio sem organização e delimitação espacial.

Na Figura 2 há a ilustração da ocupação irregular da calçada, atrapalhando a circulação de pedestres e desrespeitando a faixa livre.

Figura 2 - Ocupação irregular da calçada região central de São Paulo

Fonte: Alves (2017).

Faixa de serviço

A faixa de serviço é entendida como espaço da calçada destinado à instalação de diversos elementos, tais como: árvores, rampas de acesso para veículos ou para pessoa em cadeira de rodas – PCR , poste de iluminação, sinalização de trânsito e mobiliário como bancos, floreiras, telefones, caixa de correios e lixeiras (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO, 2012). No piso desta faixa, situam-se também as tampas de acesso para as diversas redes de infraestrutura urbana instaladas sob a calçada, como rede de telefonia, cabos de internet, água, esgoto entre outros. Muitas vezes estas tampas criam conflitos com a circulação das pessoas.

Para que o acesso às edificações se torne mais confortável e não cause interferências na faixa livre exclusiva dos pedestres, além de permitir a acomodação do mobiliário de estabelecimentos comerciais, a calçada pode ter uma faixa de transição, onde isto for possível. Ou seja, onde houver espaço suficiente para esta área (SANTOS et al., 2017). Entende-se que calçadas que possuam larguras acima da mínima para comportar a faixa livre e a faixa de serviço, podem incluir a faixa de transição. No próximo tópico, serão discutidas as larguras mínimas de calçada para cada situação.

externos

Como pode-se perceber pelas descrições dadas anteriormente o espaço da calçada compreende o passeio, a faixa de serviço, a faixa livre, enfim, todo o espaço segregado do nível da rua em nível diferenciado destinado ao tráfego de pedestres (Figura 3). A Figura 4 ilustra um exemplo de calçada no bairro paulistano da Vila

Mariana que sofreu adaptação na gestão do prefeito Gilberto Kassab.

Figura 3 - As três faixas da calçada

Fonte: Santos et al. (2017) e editado pelas autoras (2020).

Figura 4 – Exemplo de calçada com as três faixas

Fonte: Soluções para cidades (sem data) apud Inclua-se (sem data).

2.2 A calçada ideal

A calçada é o lugar onde transitam as pessoas na movimentada vida cotidiana, em direção às suas casas, à escola, para trabalhar, entre outros destinos. Ela é adequada quando permite o uso com conforto, segurança e o caminhar com fluidez. Dentre

outros aspectos a Secretaria Municipal de Planejamento e Desenvolvimento Sustentável (2012) indica que é necessário existir na calçada ideal:

- Largura adequada: deve atender às dimensões mínimas na faixa livre.
- Fluidez: os pedestres devem conseguir andar em velocidade constante.
- Segurança: não oferecer aos pedestres perigo de queda ou tropeço.

O dimensionamento da calçada requer, no mínimo, a consideração do espaço necessário para acomodar as faixas de serviço e a livre. Também seria importante incluir as árvores, de modo a proporcionar os seus efeitos positivos, tais como: redução do escoamento superficial devido à interceptação das gotas da chuva antes destas atingirem o solo, atenuação da temperatura efetivada pelo sombreamento e evapotranspiração entre outros (HERZOG, 2010; TOSETTI, 2012). Entretanto, caso seja possível, também existe a possibilidade da inclusão da faixa de transição.

externos

A faixa livre deve ter largura suficiente para a circulação de pessoas com e sem órtese³, com conforto, segurança e fluidez, de modo que seja possível se deslocar sem esbarrar nos demais que transitam em sentido oposto. A indicação da largura da faixa livre mínima na norma técnica 9050 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) é de 120cm.

Mas baseados em quais fatos os autores desta norma chegaram a esta medida? Provavelmente foi considerada a dimensão necessária para dois indivíduos sem órtese caminharem em sentido contrário. Na mesma norma técnica consta que para uma pessoa caminhar é preciso 60cm de largura, então para duas são necessários 120cm. Entretanto, a calçada precisa acomodar também os demais usuários que têm a necessidade de equipamentos especiais para se locomoverem, como por exemplo as Pessoas com Cadeira de Rodas – PCR.

De acordo com a NBR 9050 (ibidem), a largura mínima para a PCR se deslocar é de 90cm, então acrescentado os 60cm necessários para o deslocamento da pessoa sem órtese, chega-se à largura de faixa mínima de 150cm. Note-se que como a NBR 9050

(ibidem) indica 120cm como largura mínima da faixa livre, a cartilha de construção de calçadas da Prefeitura Municipal de São Paulo – PMSP (2012) também adota tal valor para esta faixa, mas, como discutimos anteriormente, considera-se ser necessário mais largura, ao menos 150cm para a faixa livre.

Na Figura 5 estão indicadas as larguras mínimas e as ideais para deslocamento da PCR, segundo indicação da NBR 9050 (Ibidem).

³ Órteses são acessórios para auxílio no deslocamento, tais como bengalas, muletas e cadeiras de roda. Nota da autora.

Figura 5 - Dimensões para deslocamento de PCR e PCR e pedestre

Fonte: NBR 9050 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

No caso de dimensionamento da faixa livre onde há alto trânsito de pessoas, tais como polos geradores de serviço e regiões de comércio, é necessário a adoção de cálculos e contagens na área para o projeto da calçada. O dimensionamento da faixa deve ser tal que possa acomodar com conforto um fluxo de 25 pedestres por minuto, em ambos os sentidos, a cada metro de largura, sendo 1,20m a largura mínima. Deste modo, para determinar a largura da

faixa livre, em função do fluxo de pedestres, é adotada a seguinte equação: $L = F/K + \Sigma_i \geq 1,20m$, onde (SANTOS et al., 2017):

- L é a largura da faixa livre;
- F é o fluxo de pedestres estimado ou medido no horário de pico, considerando o nível de conforto de 25 pedestres por minuto a cada metro de largura;
- K corresponde a 25, que representa o fluxo de pedestres por minuto que define o nível de conforto da calçada conforme a NBR 9050 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015);
- Σ_i é o somatório dos valores relativos aos fatores de impedância, ou seja, elementos junto à calçada que são contornados pelos pedestres, sendo: 0,45m junto a vitrines ou comércio no alinhamento, 0,25m junto ao mobiliário urbano, 0,258m junto à entrada de edificações no alinhamento.

Ao analisar os diversos parâmetros estabelecidos na fórmula de cálculo da faixa livre verificam-se a existência de falhas na cartilha da PMSP (figura 6), pois ela apenas estabelece a largura mínima de 1,20m para a faixa livre, sendo que nos casos onde há

externos

mais movimentação de pessoas esta dimensão pode ser bastante insuficiente e, se for adotada esta dimensão mínima, ela pode tornar a calçada estreita para a circulação dos pedestres.

Figura 6 - Cartilha da Prefeitura de São Paulo

Fonte: Prefeitura Municipal de São Paulo (2012).

Santos et al. (2017) enumeram diversos benefícios no correto dimensionamento da largura da faixa livre, dentre eles: tornar a calçada um local convidativo para a prática da caminhada e assim

estimular este hábito salutar, calçadas que garantem a observância da faixa livre evitam conflitos entre pedestres se movimentando, pessoas paradas em frente de lojas ou comércio de rua e o mobiliário urbano. Vale lembrar também que os pontos de parada de ônibus nunca devem ser instalados na faixa livre pois induzem os pedestres a circular pela via de tráfego para ultrapassagem dos demais que bloqueiam a faixa livre na espera pelo transporte coletivo.

A dimensão da faixa de serviço é estipulada pela PMSP (2012) em 0,75m. Computando o mínimo para espaço para a faixa de serviço (0,75m) e para a faixa livre (1,50m), concluímos que a calçada mínima deve possuir largura de 2,25m e somente aquelas com mais espaço são capazes de admitir a faixa de transição. Por outro lado, na cartilha da PMSP a calçada mínima é apresentada com 1,95m de largura, ou seja, 30cm inferior ao que os cálculos anteriores indicaram (Figura 6). Uma pesquisa em cinco regiões de São Paulo/SP observou calçadas com larguras médias de 1,80m e em vários pontos foram detectadas dimensões muito menores, ou seja, as condições em termo de espaço ao pedestre estão precárias no município (GOLD, 2004 apud ANDRADE, LINKE, 2017).

Outras informações que podem ser necessárias no dimensionamento da calçada são a largura usual das faixas

veiculares e a das ciclofaixas. Para as faixas veiculares a largura mais comum é de 2,50m a 3,0m, sendo 3,0m a mais adotada⁴ (MASCARÓ, 2005). Tal informação pode ser importante, pois muitos projetos incluem adaptações e no caso pode ser preciso reduzir a largura da faixa veicular, então é preciso saber em qual proporção isto é possível.

Normalmente, onde há a circulação de ônibus e outros veículos pesados é preciso deixar ao menos uma faixa veicular com a largura de 3,0m. Para fins de incentivar o transporte ciclovitário, pode ser necessária a adoção de ciclofaixas em locais onde se torna insegura a circulação em meio aos veículos automotores. Sendo assim, elas precisam de 1,80m a 2,0m de largura para a sua instalação (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2007).

2.3 Arborização

Com relação ao plantio de árvores, devem ser considerados alguns fatores. O primeiro é se a largura total da via comporta arborização, pois em ruas muito estreitas isto não é recomendável

(MASCARÓ, 2005). Isto será desenvolvido no tópico 2.3 – Porte da árvore. O segundo fator é que se deve evitar plantar árvore na faixa de serviço, pois no subsolo desta faixa estão várias redes de infraestrutura que vão conflitar com as raízes das plantas e elas podem causar estragos a estas redes.

Também é necessário espaço e profundidade sob o solo, para que as raízes das árvores cresçam de forma saudável e não perezam e acabem causando prejuízos e inúmeros riscos à sociedade e aos imóveis, ao provocar a queda de árvores. É necessário também espaço mínimo ao redor da planta para que seja possível a sua respiração, absorção e recepção dos nutrientes, importantes para a sua saúde geral.

É muito comum observarem-se nas cidades árvores com a base do tronco quase que totalmente impermeabilizadas, isto leva ao enfraquecimento das raízes que não se desenvolvem de forma adequada e tornam a planta mais suscetível a tombamentos (Figura 7). Recomenda-se assim que seja prevista ao menos uma área de 1,50m x 1,50m de solo permeável para o plantio de uma árvore de

⁴ Mascaró (2005) traz uma importante contribuição para o presente trabalho pois apresenta parâmetros para dimensionamento de vias urbanas e para o plantio de árvores em calçadas.

externos

médio porte. Na Figura 8 há ainda um exemplo interessante de uma calçada na Av. João Dias, Zona Sul de São Paulo/SP, onde houve a previsão de uma faixa verde linear ao longo da calçada para permitir melhor permeabilidade para as raízes das árvores.

Figura 7 - Árvore com raiz impermeabilizada

Fonte: Quiririm News (2016).

Figura 8 - Árvore com espaço permeável

Fonte: Cardim (2011).

O importante é reforçar a necessidade de se procurar aumentar a quantidade de árvores plantadas no meio urbano, principalmente as de médio e de grande porte, pelos diversos benefícios que elas propiciam ao meio ambiente e ao Homem, e como estratégia para tornar os pavimentos brandos devido ao sombreamento que elas propiciam. Como forma de incentivo a este plantio iniciativas governamentais poderiam ocorrer, como a redução de IPTU para

quem plantasse e mantivesse uma árvore dentro de sua propriedade, no local onde seria a garagem.

Tendo em vista a tendência da sociedade de se mobilizar no sentido da busca de uso de modais alternativos e do transporte coletivo em lugar do individual, esta poderia ser uma iniciativa com boas chances de sucesso. Quem sabe assim, num futuro ideal seja, então, possível a cidade ter mais árvores nas propriedades do que áreas cobertas e impermeabilizadas das garagens de carros.

Frente ao exposto sobre a faixa livre, a faixa de serviço, a arborização e a faixa de transição (quando possível), serão exemplificadas algumas sugestões de arranjos que permitem acomodar tais elementos.

Nas Figuras 9 e 10, temos o exemplo de rua com calçada em dimensão mínima e neste caso sugere-se o plantio da árvore na via, no espaço onde normalmente existe o estacionamento de veículos. A dimensão da calçada totaliza 2,25m, que é resultante de 1,50m de faixa livre e 0,75m de faixa de serviço. Para a caixa de plantio das árvores, foi previsto o espaço mínimo de 1,50m x 1,50m, contudo seria interessante que esta área permeável seja estendida no sentido

do comprimento para permitir melhor desenvolvimento das raízes das plantas.

Sobre esta mesma caixa de plantio das árvores, foi sugerida a instalação do jardim de chuva (Figura 11) para ajudar o sistema tradicional de drenagem no manejo das águas pluviais, pois pesquisadores indicam que os eventos extremos climáticos, como as chuvas mais intensas e volumosas, tendem a ter maior ocorrência nos próximos anos ((SKANSI et al., 2013; MARENGO et al., 2009a; 2009c). Este dispositivo seria uma solução que procura simular a matriz natural, atuando também no tratamento inicial dos escoamentos, envolvendo sedimentação, filtragem, absorção e ação biológica (HATT et al., 2009; PGC, 2000 apud MOURA, 2013).

Do mesmo modo também se sugere o plantio agrupado de árvores de porte médio, para maximizar os benefícios que elas proporcionam às pessoas e ao meio ambiente, como já comentado anteriormente. Nesta proposta, a ciclofaixa fica ao lado da faixa arborizada, em nível abaixo da calçada, de forma que os ciclistas possam se beneficiar do conforto climático propiciado pelo sombreamento e não entrem em conflito com os pedestres, fato que geralmente ocorre quando se posiciona a ciclofaixa em mesma cota e ao lado da calçada.

Os ciclistas tendem a respeitar o espaço destinado a eles, mas os pedestres ainda não têm esta cultura. A separação entre a área do tráfego cicloviário e dos automóveis se daria por obstáculos do tipo tachão refletivo, também conhecido por tartaruga. No caso, os pisos seriam do tipo permeável de cor clara na calçada, pavimento permeável cor vermelha na ciclofaixa e ciclovia, e pavimento brando reflexivo PAR de cimento branco na via.

Outro importante cuidado que as municipalidades devem ter é a elaboração de um plano de arborização urbana, com todas as diretrizes de plantio das árvores, indicação das espécies recomendadas e não recomendadas entre outros elementos. Sempre que possível se plantar no lado da rua onde não há rede aérea de fiação, pois as podas geralmente são complicadas para o crescimento e a saúde das plantas. Ou seja, não necessariamente as calçadas precisam ser simétricas em ambos os lados da via, conforme as especificidades do local pode haver adaptações. Também é importante o manejo e a manutenção das árvores por um corpo técnico especializado, a fim manter a saúde da vegetação.

Para a locação da arborização, utilizou-se como referência as medidas usualmente adotadas em São Paulo nos parcelamentos, com lotes de 10m de frente para lotes inteiros e 5m de testada para

externos

meio lote. Com base neste princípio, foram projetadas as locações das árvores nas divisas dos terrenos.

A partir desta reflexão, pode-se observar que em parcelamentos com lotes inteiros há mais possibilidades de plantio

de árvores do que em regiões onde os imóveis se apresentam com testada pequena.

Figura 9 – Vista superior de rua com árvore na via com calçada mínima

Fonte: As autoras (2019).

externos

Figura 10 – Detalhe da vista superior com árvore na via

Fonte: As autoras (2019).

Figura 11 – Seção com árvore na via

Seção viária – árvore na via

Fonte: As autoras (2019).

Figura 12 - Proposta com árvore na calçada - vista superior

Fonte: As autoras (2019).

Figura 13 – Seção com árvore na calçada

Fonte: As autoras (2019)

Nas Figuras 12 e 13, são apresentados outros exemplos de calçada com dimensão mínima de 3,75m de largura para que possa receber arborização. Esta é uma solução mais desejável do que no exemplo apresentado anteriormente, nas Figuras 10 e 11, pois o pavimento viário é normalmente o elemento mais caro da

urbanização e por isto é preferível evitar obras neste piso, no caso de projetos adaptativos.

Em casos de limitação extrema de espaço na via, em um dos lados da rua deve ser aplicada a calçada indicada anteriormente de 2,25m (com faixa livre e faixa de serviço) e no outro lado da via deve ser prevista calçada mínima de 1,95m, onde é possível a

circulação em um sentido de uma PCD e a acomodação da faixa de serviço. A cartilha da PMSP peca também em não indicar os passeios dos dois lados da via e as possíveis configurações para áreas com pouco espaço para circulação de pedestres, fato que poderia ser melhorado incorporando as sugestões apresentadas.

2.3.1 Porte da árvore

Uma forma de classificar as árvores é pelo seu porte, que varia de grande, médio a pequeno. Os elementos que influenciam no porte são o tamanho da copa e a sua altura da base do vegetal até o topo. Uma espécie é considerada de grande porte quando a copa é maior que 8m, e sua altura total é de 10m para mais. No porte médio a copa é de 5 a 8m e a altura total até 8m e por último, o pequeno porte inclui exemplares com copa de 4 a 5m de diâmetro que atingem altura total máxima de 4m (ABBUD, 2006).

Na Tabela 2 está indicado um resumo com o porte das árvores em relação à sua copa e altura.

Tabela 2 – Porte das árvores

Porte da árvore	Altura	Copa – diâmetro
Pequena	4m	4 a 5m
Média	8m	5 a 8m
Grande	10m para +	> 8m

Fonte: Autora; Abbud (2006).

Conforme o porte da árvore pode ser recomendado o seu plantio ou não em calçadas. Diversos fatores influenciam nesta ponderação, tais como largura da rua, da calçada, da situação das construções, recuadas ou edificadas no alinhamento predial (Tabela 3). Outros fatores como o tipo das raízes das árvores também são importantes a serem considerados num projeto completo de arborização. Mas como aqui está sendo desenvolvido o assunto de estratégias de pavimentos brandos para mitigação das ICU, o assunto do projeto de plantio da arborização se limitou à especificação do porte das árvores.

Tabela 3 - Tipo de plantio recomendado em função da largura da rua e da situação da ocupação dos lotes

		Situação Construções		Plantio Espécie	
Faixa viária	Calçada	Na divisa	Com recuo	Porte	Local
≤ 6,0m	≤ 2,25	sim		Pequeno	Faixa viária (estacionamento) e oposto fiação
	≤ 2,25		Sim	Pequeno	Dentro propriedade
	≤ 2,25	sim			Via sem estacionamento: não arborizar
	≥ 3,75	sim	Sim	Pequeno	Calçada e oposto fiação Ou dentro da propriedade
≥ 9,0m	≤ 2,25	sim	Sim	Pequeno	Faixa viária (estacionamento) e sob fiação
	≤ 2,25	sim		Médio ou Grande	Dentro da propriedade Faixa viária (estacionamento) e oposto fiação
	≤ 2,25		Sim	Médio ou Grande	Dentro da propriedade Faixa viária (estacionamento) e oposto fiação
	≥ 3,75	sim		Médio ou Grande	Calçada e oposto fiação
	≥ 3,75	sim	Sim	Pequeno	Sob fiação
	≥ 3,75		Sim	Grande	Calçada, oposto Fiação
≥ 12,0m	≤ 2,25		Sim	Pequeno	Na faixa viária (estacionamento) e sob fiação
	≤ 2,25	sim	Sim	Grande e Médio	Na faixa viária (estacionamento) e sob fiação
	≥ 3,75		Sim	Pequeno	Calçada e sob fiação
	≥ 3,75	sim		Grande	Calçada e oposto fiação

Fonte: Mascará (2005) e adaptado pelas autoras (2019).

2.5 Pisos brandos recomendados

Com relação à legislação, o município de São Paulo estabelece a padronização dos passeios públicos pelo Decreto Municipal 45.904/2005. Dentre as diversas providências previstas neste texto está a largura mínima de faixa livre de 1,20m e a recomendação dos materiais do pavimento da calçada serem em concreto, ladrilho hidráulico ou intertravado. Também é interessante notar a preocupação ecológica, quando o texto sugere que quando possível se aplique piso permeável, o qual deve fazer parte do sistema drenante que encaminhe as águas para o sistema de drenagem pública.

De acordo com a revisão de literatura os pavimentos brandos recomendados para os diferentes espaços da paisagem viária são:

Para vias coletoras e arteriais:

- Pavimentos de concreto
 - Pavimento de concreto Portland (ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA⁵, 2012; GARTLAND, 2010);
 - Pavimento de concreto com cimento e agregados brancos (LEVINSON, AKBARI, 2002; POMERANTZ et al., 1997⁶);
 - Pavimento de concreto com dióxido de titânio (SHEN et al., 2012; ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012).

- Pavimento asfáltico

⁵ Esta referência é importante pois traz organizada uma série de pavimentos brandos, assim como indicações de aplicações e ordens de grandeza de custos de implantação, o que é um fator significativo a considerar, já que a pavimentação é uma das partes mais caras das obras de urbanização.

⁶ Pomerantz et al. (1997) são uma referência valiosa pois são pioneiros no assunto dos pavimentos brandos.

externos

- Pavimento asfáltico com filme hidrofugante de cor clara (GARTLAND, 2010);
- Pavimento asfáltico com selantes asfálticos de cores claras (GARTLAND, 2010);
- Pavimento asfáltico com texturização com material de cor clara (GARTLAND, 2010);
- Pavimento asfáltico à base de resinas (GARTLAND, 2010; POMERANTZ *et al.*, 1997).

Para vias locais de baixo volume de tráfego, estacionamentos, calçadas:

- Pavimento permeável de concreto (GARTLAND, 2010; ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012);

- Pavimento permeável intertravado de concreto de cor clara (GARTLAND, 2010; ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012).

Nas calçadas, sugere-se a utilização de piso de concreto permeável de cor clara, tipo pavimento intertravado ou concreto permeável. Nas calçadas, há ainda a opção de se utilizar as pedras em suas versões brutas e antiderrapantes, utilizando as que não acumulam calor como a São Tomé e o Arenito. No caso das ciclovias, recomenda-se adotar o pavimento permeável, pois o pavimento intertravado pode causar o problema da trepidação, que não é adequado para o deslocamento das bicicletas, além do que têm a maior facilidade do pavimento se desagregar em caso de soltura das peças.

Seção 3 Ambiência urbana e ilha de calor

Nesta seção, serão descritos conceitos de Ilha de Calor Urbana – ICU, suas causas, efeitos positivos e nocivos, adaptação das cidades à ICU, o clima e a ICU na capital paulistana, doenças associadas à ICU.

Os primeiros estudos a respeito de clima e ICU foram feitos em Londres por Howard num livro publicado em 1813 (HOWARD, 1833). Lombardo (1985) comenta que os estudos de Landsberg e Chandler (1965) são clássicos, mas numa abordagem mais meteorológica do que geográfica, deixando de lado a correlação dos fenômenos meteorológicos e urbanos. A mesma autora também comenta que, no Brasil, o trabalho de Tarifa (1977) foi inovador na área estabelecendo a relação entre temperatura e tamanho de cidade em São José dos Campos/SP.

Em 1978, Matson *et al.* (1978) utilizaram dados digitais e imagens de satélite NOAA-5 a fim de detectar Ilhas de Calor nos EUA. Por estes dados digitalizados foram elencadas as cidades onde

foram observadas variações de temperatura urbana, entre 2,6°C a 6,5°C. A partir disto, discutiu-se a possibilidade de estudos regionais a respeito do efeito da Ilha de Calor.

3.1 O que é a ICU

O desenvolvimento urbano traz consigo alterações na paisagem de modo geral, edifícios, estradas e outras infraestruturas cinzas substituem espaços abertos e vegetação. As superfícies que outrora eram permeáveis e úmidas, tornam-se impermeáveis e secas. Esta forma de urbanização conduz à formação das Ilhas de Calor Urbanas – ICU (EPA, 2008⁷), que há tempos são observadas em pontos urbanos e suburbanos como regiões com “oásis ao inverso”, onde as superfícies são mais quentes do que em locais rurais adjacentes.

Já no século XIX, Luke Howard mediu diferenças de 1,58°C entre Londres, na época a maior metrópole do mundo, e outras

⁷ EPA – órgão da agência de proteção ambiental americana, traz importantes contribuições ao entendimento do fenômeno da ICU por apresentar diversas

alternativas de controle destas ICU, além de trazer exemplos de aplicação nos EUA e em outros países.

calor

idades no campo próximas (HOWARD, 1833). Atualmente, tal fenômeno tem sido observado em diversas partes do globo (GARTLAND, 2010). As ICU correspondem a uma área onde a temperatura de superfície é mais elevada que as áreas rurais circunvizinhas, o que propicia aumento da circulação local (LOMBARDO, 1985).

A urbanização, quando considerada do ponto de vista do espaço edificado, altera de modo significativo o clima nas cidades, aumentando as superfícies de absorção térmica. Principalmente adicionando muitos materiais que absorvem mais calor que os elementos naturais de regiões rurais e menos urbanizadas (LOMBARDO, 1985; GARTLAND, 2001), o que contribui para criar áreas com temperatura atmosférica mais elevada do que em outras. A figura 14 ilustra este fenômeno.

A média das temperaturas anuais de uma cidade de 1 milhão ou mais de habitantes podem ser de 1 a 3°C mais quente do que

localidades rurais. Numa noite limpa e calma, esta diferença de temperatura pode ser bem maior do que 12°C. Tal fenômeno também pode atingir pequenas cidades que produzem ICU, embora sua influência seja menor, conforme o porte da cidade (EPA, 2008).

Figura 14 – Gráfico ilustrando as ICU

Fonte: Disponível em <http://geography.name/>

3.2 Como as ICU se formam

Há vários fatores que contribuem para a formação das ICU, serão citados os principais: a) a redução de arborização, da vegetação e das áreas permeáveis nas cidades, b) as propriedades dos materiais das infraestruturas cinzas, c) a geometria urbana dos edifícios, d) o calor antropogênico e outros.

Nas áreas rurais ou densamente vegetadas as árvores fornecem sombra, que ajuda a superfície a se manter em menor temperatura do que se fosse exposta ao sol. Outro fator é que as plantas fornecem umidade ao ambiente por evapotranspiração, que ajuda a diminuir o calor (EPA, 2008a). A figura 15 ilustra o fato de os locais mais urbanizados terem maior área impermeável, levando à menor quantidade de superfície úmida disponível e assim haver menos evapotranspiração no ambiente, fato que retira calor do ar.

Figura 15 – Superfícies impermeáveis e diminuição da evapotranspiração

Por que ocorre o efeito ilha urbana de calor

Fonte: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/10/11/ilha-de-calor-na-amazonia/>
apud Oliveira, s/d

Calor

Por outro lado, as propriedades dos materiais das infraestruturas cinzas existentes nas cidades colaboram para a formação das ICU. Há muitos materiais escuros em edifícios e pavimentos que absorvem mais energia do sol. Também a emissividade termal e a capacidade de armazenamento de calor, influenciam no desenvolvimento das ICU, pois elas determinam como a energia do sol é refletida, emitida e absorvida (EPA, 2008a). Os materiais de construção geralmente são impermeáveis e estanques e isto não cria condições de umidade para dissipação do calor do sol (EPA, 2008a; LOMBARDO, 1985).

O terceiro fator é o tipo da superfície da cidade construída, pois as condições climáticas de áreas extensas e densamente edificadas são muito diferentes das abertas e dotadas de verde, podendo ocorrer diferenças térmicas, de velocidade de vento de umidade do ar etc. (LOMBARDO, 1985). Nas áreas urbanizadas, as superfícies e estruturas são frequentemente obstruídas por objetos, como as construções das imediações, e se tornam massas termais que não conseguem liberar com facilidade seu calor devido a tais obstruções (EPA, 2008a).

O quarto fator está ligado ao calor antropogênico e é aquele gerado por carros, aparelhos de ar-condicionado, indústrias e a

variedade de recursos humanos, que contribuem para o balanço de energia urbana. Nas áreas densas e altamente urbanizadas o calor antropogênico pode contribuir de forma significativa para a formação das ICU (EPA, 2008a). Outros fatores ainda favorecem a formação das ICU, como o clima e a localização geográfica. Quanto ao clima, o vento e a cobertura por nuvens são fatores de impacto nas ICU, fortes ventos e dias nublados suprimem as ICU. De modo contrário, ICU se formam em dias de céu claro e ventos calmos. Com relação à localização geográfica, a proximidade de grandes corpos d'água diminui a temperatura e pode criar ventos que carregam o calor para longe das cidades. As montanhas próximas podem impedir os ventos de chegar a uma cidade ou criar padrões de vento que a atravessam (EPA, 2008a).

3.3 Efeitos positivos e nocivos

Lopes (2006) afirma que em cidades naturalmente mais frias, em latitudes e longitudes mais elevadas, os efeitos de aquecimento das Ilhas de Calor são tomados como benéficos, pois evitam o

consumo de energia no inverno. Mas em grande parte das cidades do planeta os efeitos das Ilhas de Calor são encarados como problema, devido: a) ao consumo de energia suplementar necessário para o resfriamento dos ambientes, veículos, etc.; b) impacto na qualidade do ar; c) aumento de doenças entre outros (OLIVEIRA, s/d).

Com relação à qualidade do ar, a temperatura de superfície mais quente favorece a formação de poluentes como ozônio, danoso para a saúde humana. Pesquisadores chineses identificaram uma relação temporal e espacial entre a ICU e a poluição por ozônio. Tanto a intensidade da ICU quanto a concentração de O₃ são afetados pela temperatura de superfície. Altos níveis de urbanização também indicam estar relacionados ao aumento da ICU e do ozônio no ar e os autores também relataram observar a relação entre a baixa cobertura vegetal e o aumento da ICU (WANG et al., 2018). As temperaturas mais elevadas aliadas à menor qualidade do ar podem agravar as doenças respiratórias e relacionadas ao calor, criar desconforto geral, distúrbios de coração, exaustão entre outras que podem colocar em risco as populações mais vulneráveis, como

crianças, idosos e debilitados⁸ (OLIVEIRA, s/d; EPA, 2008a; LOMBARDO, 1985).

O aumento na temperatura também pode levar a desequilíbrios ambientais, como nas bacias hidrográficas com a elevação da temperatura da água de escoamento, no incremento na precipitação das áreas urbanas e na ocorrência de chuvas localizadas torrenciais, com grande capacidade de causar prejuízos, fatos monitorados em locais como o Japão. A maior rugosidade das construções, o aumento do ar quente ascendente entre outros aspectos, podem elevar a quantidade de precipitações em 5 a 10% e registrar elevação de incidência de granizos (LOMBARDO, 1985; JFS, 2008). Vários estudos também apontam a redução da vida útil dos pavimentos relacionados às ICU (2008b).

São Paulo/SP é um município de clima quente em grande parte do ano e sofre com os efeitos das ICU. É, por isso, objeto de estudo de caso da presente pesquisa, onde o trabalho se concentra nos aspectos negativos das Ilhas de Calor.

⁸ Em 1995 uma onda de calor de Julho no meio oeste americano causou mais de 1.000 mortes (EPA, 2008).

3.4 Adaptação das cidades à ICU

Gartland (2010) está de acordo com Rosenfeld *et al.* (1998) ao apresentar em sua obra as seguintes práticas principais para mitigar os efeitos das ICU: coberturas e pavimentos brandos, plantio de árvores e de vegetação. Rosenfeld *et al.* (1998) alega ser o plantio em larga escala de árvores para provisão de sombra essencial como componente para uma comunidade mais fresca, e uma concomitante mudança de pavimentos e tetos de tons escuros para materiais mais claros.

O mesmo autor afirma que o efeito resfriativo das árvores é muito associado ao fenômeno da evapotranspiração, que retira calor do ambiente durante este processo. Por outro lado, adotando cores mais claras nas coberturas e materiais dos pavimentos há maior reflexão da radiação solar e menor absorção, ou seja, há alteração no albedo. O autor cita Goodridge (1989) que observou o resfriamento em 1°C da maioria das cidades da Califórnia /EUA, com o advento da introdução da irrigação, sugerindo haver uma relação entre maior presença de processos evaporativos e redução de temperatura do ambiente.

Num estudo no qual propôs uma simulação para Los Angeles/EUA, foram considerados 1250km² de coberturas de edificações aos quais foi proposto alterar o albedo, dos tons usuais de verde para tonalidades com albedo mais alto, 1.250km² de área pavimentada a qual foi sugerida modificação de asfalto para concreto ou asfalto com pigmento claro, além do plantio de cerca de 11.000 milhões de árvores totalizando 550km² de copas.

No horário mais quente, às 14h00, a elevação do albedo de coberturas e pavimentos corresponderia ao decréscimo de 1,5°C na temperatura do ar. Por outro lado, apenas o plantio das árvores levaria à redução de 1,5°C na temperatura do ar. Portanto somando a elevação do albedo de coberturas e pavimentos, com o plantio de árvores, a redução total térmica seria de 3°C (ROSENFELD *et al.*, 1998). Para este cálculo, o autor usa um modelo meteorológico (TAHA, 1995).

O presente trabalho se voltou para o que os estudos científicos denominam como pavimentos frios – *cool pavements* e aqui serão denominados pavimentos brandos – PB.

3.5 O clima do município de São Paulo

O município de São Paulo está em uma latitude de 23°32'S, longitude de 46°38' W, junto ao Trópico de Capricórnio. Tais condições levam à uma realidade climática caracterizada pela transição, entre os Climas Tropicais Úmidos de Altitude, com períodos de seca bem definidos, e os subtropicais, sempre úmidos, do Brasil meridional. Uma das principais características desta transitoriedade entre zonas é a alternância entre estações: de quente-úmida para outra fria-seca, juntamente com variações bruscas do ritmo e da sucessão dos tipos do tempo (TARIFA & AZEVEDO, 2001).

Neste caso pode haver situações de muito calor, bem como de intenso resfriamento, em curto espaço de tempo, podendo ser de dias a semanas. Tal alternância explica dentro do âmbito regional tanto a ocorrência de fortes impactos pluviométricos, assim como,

pontualmente em certos anos, haver longos períodos de seca (TARIFA & AZEVEDO, 2001⁹).

Com relação às Unidades Climáticas¹⁰ “naturais”, os mesmos autores indicam que São Paulo/SP está inserido em terras altas, com cotas predominantes variando entre 720 e 850m, denominado Planalto Atlântico. A topografia apresenta feições diversas, que vão das várzeas, colinas, morros, serras e maciços. O Oceano Atlântico está relativamente próximo, a 45km de distância em média. Este cenário define um conjunto de controles climáticos que, em conjunto com a sucessão habitual dos sistemas atmosféricos, trazem identidade aos climas locais, produzidos pelo encadeamento de diferentes tipos de tempo (TARIFA & AZEVEDO, 2001).

⁹ Tarifa e Azevedo (2001) são uma leitura importante para compreender o clima no município de São Paulo, pois são autores clássicos que em sua obra estudaram a fundo o assunto.

¹⁰ Unidade dentro das diversidades (TARIFA & AZEVEDO, 2001).

3.6 Ilha de Calor no município de São Paulo

Magda Lombardo descobriu em 1985 haver diferenças grandes de temperatura na Região Metropolitana de São Paulo, de até 10°C entre o centro e as áreas rurais, denotando que há 34 anos o fenômeno da ICU já era intenso na região (LOMBARDO, 1985).

A mesma autora também observou nos seus resultados uma íntima relação entre os usos do solo urbano e a variação na temperatura do ar, sendo que as áreas onde predominam os espaços abertos dotados de vegetação ou próximos a reservatórios de água as temperaturas são consideravelmente mais baixas. Em locais como o Parque do Estado e em outros espaços urbanos como os bairros jardins, bairros residenciais onde as áreas verdes atingem mais de 10% da área total ocupada, este fato foi verificado em seu trabalho. Mais vegetação implica em alteração do balanço de energia, pois as plantas absorvem o calor em função da transpiração e fotossíntese (LOMBARDO, 1985).

O tamanho da cidade, em termos de população, também é um fator que influencia a ICU ser mais intensa (OKE, 1973; WANG et

al., 2018). Um estudo clássico sobre este assunto mostrou haver uma correlação entre o tamanho da cidade e a intensidade da Ilha de Calor (OKE, 1973). Considerando que o município de São Paulo é um dos maiores do mundo, com população estimada de 12.252.023 pessoas em 2019 e densidade demográfica de 7.398,26 hab/km² (IBGE CIDADES, sem data), observa-se a necessidade de mais estudos sobre a ICU na capital paulistana. Maior intensidade de ICU também é notada nos locais mais densamente construídos e com pouca vegetação (GARTLAND, 2010; WANG et al., 2018; LOMBARDO, 1985). Daí a necessidade de inserir a Infraestrutura Verde numa paisagem urbana como a de São Paulo, que em 2010 possuía alta taxa de urbanização, de 99,10% (SECRETARIA MUNICIPAL DE SAÚDE, 2010) e em 2011 possuía menos de 40% de área verde em seu território. Em certos bairros mais carentes como o Itaim Paulista cada morador tinha menos de 1m² de verde, o que é abaixo do recomendado pela OMS de 12m² por habitante (GLOBO, 2011).

Em 2016, Barros e Lombardo adotaram critérios para distinguir a potência da Ilha de Calor urbana no município de São Paulo, baseados no resultante das diferenças das temperaturas de superfície do centro em relação aos seus arredores rurais de forma

a poder determinar o delta de temperatura (ΔT). No caso, Parelheiros, localizado no extremo sul do município foi adotado como parâmetro mais baixo para o cálculo da temperatura. As divisões englobam três faixas e, de modo a simplificar as análises, seus valores foram estabelecidos de acordo com o mesmo critério, conforme a tabela 4.

Tabela 4 - Faixas de divisão de Ilha de Calor

Ilha de calor forte	$\Delta T > 8^{\circ}\text{C}$
Ilha de calor moderada	$5^{\circ}\text{C} < \Delta T < 7^{\circ}\text{C}$
Ilha de frescor	$4^{\circ}\text{C} < \Delta T$

Fonte: Barros e Lombardo (2016)

Ao observar o mapa da temperatura de superfície elaborada a partir da banda termal do satélite Landsat 5 (figura 16), com data da passagem em 28/09/2011 (BARROS; LOMBARDO, 2016), indicando as Ilhas de Calor Urbanas, já se observavam diferenças de 10°C entre trechos centrais e ramificações na área sudoeste e

regiões nos limites do município de São Paulo. A presença marcante de superfícies cobertas por água com áreas densamente arborizadas, como na Serra da Cantareira e Parque do Carmo, é característica da presença da Ilha de Calor Urbana. Neste mapa, a resolução do satélite foi de 30m x 30m, mas a banda termal utilizada possuía resolução de 120m x 120m¹¹.

Em outro mapa de temperatura de superfície mais recente (MENDES *et al.*, 2018; MENDES, 2019a, autoras, 2019), feito a partir de imagem da banda termal do satélite Landsat 8, com passagem em 30/08/2018 (figura 17), e resolução espacial de 100m x 100m, observa-se alteração nas manchas de Ilhas de Calor. Houve uma expansão destas ilhas na região central, norte e leste. Por outro lado, a região ao extremo norte e sul permanecem com as temperaturas mais baixas, por terem maior área florestada, fato que ocorre por exemplo na região do parque da Cantareira na zona norte.

¹¹ Informação obtida com o autor do mapa.

Figura 16 - Mapa de temperatura de superfície - 2011.

Fonte: Barros e Lombardo (2016)

Figura 17 – Mapa de temperatura de superfície (2018)

Fonte: Mendes *et al.*... (2018) e editado por Mendes (2019a) e pelas autoras (2019)¹².

¹² Tanto Mendes *et al.* (2018), quanto Barros e Lombardo (2016) são referências importantes para o presente trabalho por trazerem mapas de temperatura de superfície mais recentes do município de São Paulo do que o existente da Secretaria do Verde e de Meio Ambiente, que é de 1999.

calor

3.6.1 Doenças e a ICU em São Paulo

As pessoas saudáveis habitantes de regiões quentes como o Brasil têm uma grande capacidade de adaptação ao calor extremo, o que não ocorre com os mais vulneráveis, como os idosos, grávidas e crianças, que sofrem mais com o estresse provocado pelos excessos de calor (SOBRAL, 2005). As altas temperaturas provocadas pela ICU tendem a agravar doenças cardiovasculares e respiratórias e são associadas a desconforto e estresse psicológico, sendo que a faixa de conforto aceitável sem causar prejuízos à saúde é de 17°C a 31°C (Idem). Um estudo conduzido por uma pesquisadora do Departamento de saúde pública da USP mapeou a distribuição da ICU em São Paulo/SP. Foi observado que os locais com maior grau de urbanização foram os identificados como os de maior intensidade de ICU. Tais condições refletiram o uso do solo, as condições de tráfego, a falta de vegetação e a intensa poluição do ar. Na pesquisa foi detectado que 73,5% da população com mais de 55 anos moradora das áreas centrais, e com maior concentração de ICU, tiveram maior tendência a doenças cardiorrespiratórias, do que as de outras regiões estudadas (Santana e Jabaquara) (Idem).

Outra pesquisadora também identificou nas áreas centrais de São Paulo maior distribuição espacial de valores de risco por embolia pulmonar. Outros locais identificados como de alto risco para doença por AVC foram nas regiões periféricas do município, que coincidem com áreas pobres em vegetação e de baixo poder aquisitivo (IKEFUTI, 2017).

Outro trabalho concorda com Sobral (2015) concluindo que altas temperaturas no Brasil tem relação com aumento de patologias, em específico de derrames. O maior impacto observado para estas doenças ocorreu quando houve período de mais de 5 dias quentes (IKEFUTI; BARROZO; BRAGA, 2018). No caso o risco para AVC em idosos acima dos 65 anos foi indicado como maior quando as temperaturas médias ficavam acima de 26°C. Isto ocorre porque os idosos têm menor habilidade de manter a homeostase no caso de mudanças de temperaturas habituais como resultado de diminuição do metabolismo (IKEFUTI, 2017).

Por outro lado, a ICU agrava as ondas de calor, causando aumento de mortalidade, como indicam Son et al. (2016). Eles examinaram os óbitos na capital paulistana ao longo de 14,5 anos

(1996 a 2010) e verificaram que as ondas de calor elevaram as mortes por doença respiratória.

Doenças tropicais como a dengue também são favorecidas pelas altas temperaturas. Pesquisadores avaliaram o município de São Paulo e concluíram que 93,10% dos casos detectados de dengue correspondiam a áreas de temperatura de superfície alta, acima de 28°C. Por outro lado, nos locais com alto índice de vegetação a incidência de dengue foi muito baixa, enquanto nos trechos mais pobres em verde e temperatura de superfície alta, de cerca de 29°C, os casos foram muito maiores. A análise geral mostrou uma elevada incidência de casos de dengue nas regiões com alta temperatura de superfície, acima de 32°C, indicando haver forte correlação entre alta temperatura, baixa cobertura vegetal e doenças de dengue. Em laboratório observaram que a reprodução do mosquito causador da doença é muito favorecida por altas temperaturas, entre 28 a 32°C (ARAUJO et al., 2015).

Analisando os resultados dos estudos científicos (SOBRAL, 2005; ARAUJO et al., 2015; SON et al., 2016; IKEFUTI, 2017; IKEFUTI; BARROZO; BRAGA, 2018) observa-se o impacto negativo na saúde pública causado pelas altas temperaturas ocasionadas pela ICU e da necessidade de ações no

sentido de reverter este quadro e procurar soluções para a mitigação das ICU, em especial nas áreas centrais de São Paulo. Pois os fatores negativos vão desde aumento de doenças e óbitos causados por doença respiratória, cardiovascular e AVC, até outras como a elevação de casos de dengue. Neste sentido ações que busquem a redução de temperaturas, com o uso do pavimento brando e da infraestrutura verde são muito importantes.

ambiental

Seção 4 - Pavimentos brandos e conforto

Seção 4 Pavimentos brandos e conforto ambiental

4.1 Pavimento

Nesta seção, serão apresentados conceitos gerais de pavimentos usuais no Brasil, a sua relação com as Ilhas de Calor e outros dados importantes para subsidiar e embasar a elaboração e organização do método de pesquisa e análise dos resultados. A seguir serão comentados conceitos gerais de pavimentos para melhor entendimento dos diversos aspectos a serem estudados nestes pavimentos.

No Brasil, o transporte rodoviário é responsável pela maior fatia do transporte de carga. No estado de São Paulo, o transporte rodoviário de carga representa mais de 70% do total, enquanto a ferrovia transporta menos de 15% das cargas. Em locais com baixo tráfego, um dos princípios de norteammento do projeto do pavimento é o baixo custo. Uma das premissas deste baixo custo reside no fato

dele ter vida útil inferior à prevista para os projetos normais, os quais variam normalmente de 10 a 15 anos de vida útil. Então, os pavimentos de baixo custo teriam de um terço a metade deste tempo (SENÇO, 1997). Neste sentido, pode colaborar a redução da temperatura do pavimento para o aumento da sua vida útil, conforme será descrito mais adiante.

Por definição, pavimento é uma estrutura construída sobre uma superfície final de terraplanagem, destinada técnica e economicamente para resistir aos diversos esforços provenientes do tráfego de veículos e do clima, com o objetivo de propiciar aos usuários melhores condições de rolamento e circulação, com conforto, economia e segurança (NBR 7207, 1982; BERNUCCI¹³, 2006; SENÇO, 1997).

Como o pavimento rodoviário é classificado tradicionalmente em rígido e flexível, recentemente tem sido adotada a terminologia

¹³ A obra de Bernucci (2006) e Senço (1997) são referências interessantes pois trazem em seus textos aspectos fundamentais da pavimentação asfáltica, fornecendo um embasamento importante a respeito do assunto.

ambiental

de pavimentos de concreto de cimento Portland (ou concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, para indicar o tipo de revestimento do pavimento. Pavimentos de concreto-cimento são aqueles em que a camada de revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland. Já os asfálticos são aqueles cujo revestimento é uma mistura formada de agregados e ligantes asfálticos (BERNUCCI, 2006).

Além dos dois tipos de pavimentos citados anteriormente existe um terceiro tipo, o chamado de semirrígido. Este último se diferencia dos flexíveis por ter a presença de ligantes hidráulicos (cimento Portland ou cal hidratada) na sua base, com o objetivo de se obter uma rigidez necessária para suportar às cargas do tráfego. A figura 18 ilustra as camadas do pavimento *semirrígido* (PAIXÃO; CORDEIRO; CORREIA, 2017).

Figura 18 – Composição do pavimento semirrígido.

Fonte: DER-PR (2008).

A seguir serão tecidas explicações sobre o pavimento flexível e o rígido.

4.1.1 Pavimento Flexível

De modo geral, as camadas que compõem o pavimento asfáltico podem ser divididas em revestimento e base, sendo que a base pode ser complementada por sub-base e reforço do subleito,

como mostrado na figura 19 (SENÇO, 1997; BERNUCCI *et al.*, 2006).

Figura 19 - Camadas do pavimento flexível

Fonte: Grupo SPT sondagens (sem data).

O revestimento asfáltico pode ser composto pela camada superficial de rolamento e por outras intermediárias denominadas *binder* (figura 22). O revestimento é a camada superior que recebe diretamente a ação do tráfego e tem as finalidades de resistir às ações do rolamento de veículos e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento e melhorar as

condições do deslocamento de automotores quanto ao conforto e segurança.

Por outro lado, a base é a camada do pavimento com a função de resistir aos esforços verticais vindos do tráfego e distribuí-los. Já a sub-base é a camada complementar à base, adotada quando as condições técnicas e econômicas não aconselham construir a sub-base diretamente sobre a regularização ou sobre o reforço do subleito¹⁴ (SENÇO, 1997; BERNUCCI *et al.*, 2006).

4.1.2 Pavimento rígido - sistemas em placas de concreto para pisos e pavimentos

Os pavimentos de concreto são aqueles cuja camada de rolamento é executada em concreto, os quais podem ser construídos com diferentes técnicas, como pré-moldagem ou *in loco*, as quais irão resultar em diferentes formas de execução, operação e manutenção. Existe diversidade de tipos de concreto em placas, no entanto, serão apresentados com maiores pormenores o tipo adotado

¹⁴ Reforço do subleito é uma camada construída quando necessário acima da regularização (SENÇO, 1997).

ambiental

na pesquisa: o pavimento de concreto simples – PCS moldado *in loco* (BALBO, 2009).

Os PCS são feitos de placas de concretos moldados *in loco*, e não recebem armadura (figura 20). Horas após a moldagem do concreto, são executadas por cortes as juntas transversais e longitudinais. Tais placas são assentadas em um sistema de apoio de base, a qual eventualmente pode se apoiar numa sub-base, e num subleito.

Para a construção das placas existem tanto o concreto convencional, o concreto de alta resistência, o concreto compactado com rolo e o concreto permeável. O motivo para a execução das juntas é o controle da retração hidráulica da massa de concreto fresco, nas condições adversas como sol, chuva, ventos, quando comparadas às condições de concreto corriqueiras em ambientes internos de edifícios (BALBO, 2009).

Figura 20 - Seção típica de PCS

Fonte: Balbo (2009), adaptado pela autora (2017).

4.1.3 Efeitos do calor nos pavimentos

Com relação aos efeitos do calor nos pavimentos, quando estes estão secos, a refletância solar é um fator que exerce grande influência na temperatura, então os pavimentos claros são os menos quentes. Via de regra os revestimentos flexíveis são quentes, mas podem receber pigmentos ou agregados de cores claras, os quais podem aumentar a refletância solar em até 30 pontos percentuais e reduzir sua temperatura (GARTLAND, 2010).

Tais agregados podem elevar a refletância típica do asfalto de 15% para até 45%. Outra opção é adicionar pigmentos e agregados às capas selantes e hidrofugantes usados nos processos de restauração asfáltica. Outro recurso é adotar acabamentos no pavimento asfáltico imitando texturas diversas, como tijolo ou pedra para simular a aparência de outros materiais (GARTLAND, 2010).

Já os pavimentos de concreto, normalmente possuem cor mais clara que os asfálticos, com valores de refletância solar que podem os caracterizar como brandos. Quando novos, tais pavimentos

possuem refletância solar entre 35 e 40% e esta cai para 25 a 35% com o uso. Entretanto é possível baixar ainda mais sua temperatura com uso de agregados e aglutinantes de cimento de cores mais claras (Ibidem).

Há ainda a possibilidade de aplicar concreto sobre revestimento asfáltico por meio de processo de revestimento de piso asfáltico com concreto de cimento Portland (*white-topping*) (GARTLAND, 2010). Num estudo conduzido no Japão foi observada a temperatura do pavimento de concreto com refletância de 45% num dia de verão. A temperatura ambiente era de 34°C e o concreto esquentou até 38°C, isto se deu principalmente pelo fato da superfície refletir mais energia solar. O pavimento de concreto usualmente armazena menos calor pela manhã e libera menos calor para o ar no período vespertino do que o típico pavimento asfáltico, isto considerando os pavimentos secos (ASAEDA; CA; WAKE, 1996).

Por outro lado, uma das vantagens do menor aquecimento do pavimento reside na sua maior durabilidade. Vários aspectos podem colaborar para as falhas dos pavimentos asfálticos, os quais são intensificados pela elevação da temperatura, dentre os quais cita-se: formação de sulcos – os pneus dos carros causam deformação

permanente na trilha de roda, escorregamento da massa betuminosa devido aos esforços horizontais devido à frenagem, envelhecimento – o asfalto se torna quebradiço e endurecido no decorrer do tempo, fadiga e rachaduras (GARTLAND, 2010).

Tais falhas podem ser reduzidas com a diminuição da temperatura do pavimento. Mas ainda são necessários mais estudos para relacionar claramente a temperatura com o índice de falhas do pavimento asfáltico. Contudo, é certo que o pavimento de concreto é mais durável que o asfáltico. Em média, a vida útil do pavimento de concreto é de 13 a 35 anos, ao passo que a do asfáltico é de 6 a 20 anos (PACKARD, 1994 apud GARTLAND, 2010). Outras vantagens do pavimento de concreto é ele não sofrer tanto a ação de sulcos, empurramento ou envelhecimento como ocorre com o pavimento flexível (GARTLAND, 2010).

4.1.4 Armazenamento de calor nos pavimentos

Refletância solar e condução do calor são fatores primários para a performance termal em pavimentos asfálticos. Um estudo japonês (ASAEDA, 1996 apud ENGINEERING DEPARTMENT

ambiental

OF CHULA VISTA, 2012) indicou que devido à alta condutividade termal, o pavimento asfáltico semirrígido de concreto tem a problemática de armazenar grande quantidade de calor ao longo do dia e liberar alta quantidade de calor à noite. A alta condução de calor dos pavimentos semirrígido permite ao pavimento se manter com baixa temperatura de superfície durante o dia do que o asfalto comum, mas à noite o calor armazenado pela camada de concreto é maior do que seria o de um pavimento comum asfáltico, devido ao grande reservatório existente na subsuperfície.

Em resumo, baixa condutividade termal pode produzir grande temperatura durante o dia e menor durante a noite, enquanto alta condutividade causa o efeito oposto (ASAEDA, 1996 apud ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012). Sendo assim, para a adoção do pavimento asfáltico com semirrígido com a finalidade de reduzir a ICU deve ser cuidadosamente analisado, para evitar o problema de ter um efeito contrário ao esperado. A recomendação seria elaborar estudos mais aprofundados que envolvam o balanço energético para idealizar cenários mais próximos do real e com maior chance de sucesso quando aplicado.

4.2 Pavimento brando

Inicialmente serão feitos alguns comentários com relação à nomenclatura adotada neste trabalho com relação aos pavimentos brandos. A literatura internacional denomina este tipo de pavimento de *cool pavement*, que em português pode ser traduzido por pavimento frio (ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012; EPA, 2012; GUNTOR *et al.*, 2014; QIN & HILLER, 2016; SANTAMOURIS, 2013; CARPIO *et al.*, 2016). Esta mesma tradução de pavimento frio também foi adotada no trabalho de Carpio (2014), apenas no livro de Gartland (2010) a tradução do termo utilizada foi de pavimento fresco.

No presente trabalho, optou-se pela denominação pavimento brando pois não se considera que um material como o concreto que atinge até 50°C seja frio (GARTLAND, 2010, p. 105). Ele é apenas menos quente do que outros pavimentos não brandos, como o asfalto que atinge picos de até 65°C ou mais no verão (GARTLAND, 2010). Alguns dos significados na língua portuguesa de “brando” são: de pouca intensidade; moderado; de

clima ameno (FERREIRA, 1999). No caso, adotaremos como “brando” algo que se aquece pouco.

Os pavimentos afetam intensamente o clima urbano. Seu balanço energético é determinado pela quantidade de radiação solar absorvida pelo material, a radiação infravermelha emitida, o calor transferido por convecção ao ar, ao calor armazenado na massa do pavimento e ao calor conduzido ao solo. O calor antropogênico gerado devido ao tráfego também influencia no balanço energético dos pavimentos (SANTAMOURIS, 2013). Um estudo indica que a radiação infravermelha dos pavimentos de Tóquio são a principal causa do aquecimento da atmosfera, a necessidade de resfriamento deste ar corresponde à metade da energia consumida nas áreas comerciais (ASAEDA; CA; WAKE, 1996). Os pavimentos são os maiores contribuintes do fenômeno da ICU (SANTAMOURIS, 2013).

Existem basicamente dois grupos de estratégias para refrescar os pavimentos. O primeiro adota materiais com alta refletividade ou permeáveis para reduzir a absorção e retenção do calor. O segundo se utiliza da vegetação, principalmente da arborização para reduzir a incidência de raios solares no pavimento (ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012). Estudos indicam

que o sombreamento das árvores nas vias (especialmente as de asfalto) tendem a melhorar a performance do pavimento, que necessitará de menos serviços de reparos e recapeamentos (MCPHERSON; MUCHNICK, 2005). A seguir, serão apresentadas as estratégias do primeiro grupo, referente aos materiais dos pavimentos. Na seção 8, serão feitos comentários sobre o uso da arborização para o combate das ICU e como estratégia para tornar os pavimentos brandos.

De modo geral os pavimentos revestem de 25 a 50% das superfícies totais das cidades. As características térmicas dos pavimentos exercem grande influência sobre a formação de ICU, portanto são pauta de trabalhos que se propõem a reduzi-las.

Há duas alternativas para tornar os pavimentos convencionais em brandos: aumentar a sua refletância solar (albedo) ou elevar sua capacidade de armazenar e evaporar água. Neste momento é importante esclarecer o conceito de albedo, que é sinônimo de refletância (GARTLAND, 2010).

Albedo vem do latim *albedus* que significa a partir de, e de *albus* que significa branco. É calculado a partir da razão entre a radiação refletida e a incidente, podendo ser expresso em número

ambiental

ou em porcentagem (TRICHÊS *et al.*, 2014). Por exemplo, para um material que tem albedo de 0,10 como o asfalto, significa que ele absorve 90% da radiação solar e reflete 10%.

Os materiais nem sempre refletem a energia com diferentes comprimentos de onda de maneira uniforme, mas geralmente refletem mais energia com determinado comprimento de onda e menos com outro. Se for medido o quanto de energia um material reflete em cada comprimento de onda entre 0,3 e 2,5 μ m (faixa de luz visível), e depois verificar a média destes valores, determina-se a refletância solar (GARTLAND, 2010). Os albedos mais comuns estão na tabela 05:

Tabela 5 – Tabela de albedos

Material	Albedo	
	Faixa	Médio
Concreto Asfáltico (CA) novo	-	0,05
Concreto Asfáltico (CA) velho	-	0,20
CA com capa refletiva	0,20 -0,30	0,20
Concreto Portland novo	-	0,35
Concreto Portland envelhecido		0,29
CA permeável	0,08 – 0,12	0,10
Concreto Portland permeável	0,18 – 0,28	0,25
Cimento Portland branco	-	0,80
Solo	0,21 – 0,23	0,22
Areia do deserto	-	0,40
Região do Ártico	-	0,77

Fonte: (LI *et al.*, 2014 apud BRITTO & HELLER 2016; ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012).

Os pavimentos mais quentes têm a tendência a serem compostos por materiais impermeáveis de cores escuras, com valores de refletância solar (albedo) abaixo de 25%. Tais pavimentos podem aquecer até 67°C ou mais sob o sol do verão. Por outro lado, as temperaturas dos pavimentos brandos são reduzidos em 15°C ou mais mantendo os picos de temperatura abaixo de 50°C (GARTLAND, 2001; 2010).

O revestimento asfáltico que, como já visto, possui baixo albedo e portanto contribui para o aquecimento das cidades, reveste cerca de 90% das estradas brasileiras (PAIXÃO; CORDEIRO; CORREIA, 2017). Por isto, é importante o desenvolvimento de trabalhos no sentido de alertar para a necessidade de se buscar alternativas aos pavimentos usuais, no sentido criar condições urbanas propícias para o enfrentamento da tendência de formação das ICU.

As figuras 21 e 22 ilustram a temperatura do pavimento convencional, sem proteção de sombreamento.

Figura 21 - Pavimento convencional

Fonte: EPA (2008b).

Figura 22 - Temperatura do pavimento no verão

Fonte: EPA (2008b).

4.3 Pavimentos com alta refletância – PAR

Os pavimentos com refletância solar a partir de 25% podem ser considerados brandos. A elevação na refletância solar significa na prática adotar tons mais claros na coloração dos pavimentos, no caso o pavimento de concreto seria mais indicado do que o asfáltico por ter maior albedo (tabela 6). No caso do uso de pavimento flexível, como opção podem ser adicionados agregados minerais que aumentem a reflexão dos raios solares, elevando o albedo do material. Outros métodos incluem capa refletiva e pintura refletiva

ambiental

(BRITTO & HELLER, 2016). Portanto existem dois grupos de estratégias para tornar os pavimentos brandos com alta refletância: (i) a utilização de insumos mais claros, (ii) o uso de pinturas especiais.

Considerando que a cor exerce o efeito mais importante sobre a refletância solar, os pavimentos de cores mais claras se tornam normalmente mais frescos, mas ressalva-se que tais tonalidades incluem cinza, bege, vermelho, amarelo e outras cores similares (GARTLAND, 2010).

Como observação à utilização de pavimentos com alto albedo, cumpre-se duas observações. A primeira, com relação à manutenção necessária aos materiais de cores claras ao longo do tempo, para que os efeitos do tráfego e da sujeira não se reduzam a valores abaixo do mínimo necessário à refletividade dos materiais. A segunda é com relação ao efeito da geometria urbana nesta estratégia, fato que será abordado mais à frente na subseção 5.4.

A alta quantidade de albedo faz com que o pavimento reflita um percentual alto de radiação solar, o que significa que uma grande quantidade de radiação pode ser direcionada aos edifícios de entorno e outras estruturas altas (ENGINEERING DEPARTMENT

OF CHULA VISTA, 2012). Sendo assim, estudos complementares se fazem necessários para observar o grau de efeitos negativos na paisagem urbana. Ressalta-se que a seleção do tipo do pavimento não se restringe a seu albedo, ocorrendo também em função de outras características mecânicas e construtivas, mas ele é um elemento importante a considerar.

Os PCS se tornam cinzentos devido à presença de óxidos metálicos e isso torna o seu albedo, quando novo, de até 0,40. O seu albedo pode ser elevado com a adição de cimento branco usando caulim. É possível produzir concreto com refletividade visível solar de até 0,80 quando novo. A sua composição leva agregados brancos com cimento que possui baixo teor de ferros óxidos (POMERANTZ *et al.*, 1997).

Os pavimentos brandos podem ser aplicados em novas construções ou em outras já existentes. As estratégias de pavimentos brandos listadas a seguir podem ser aplicadas também para readequações, pela remoção do revestimento do pavimento ou sobrepondo sobre a superfície existente de uma fina camada do novo material.

A certificação *Leadership in Energy and Environmental* – LEED – para novas construções, desenvolvida e gerida pelo *United States Green Building Council*, premia com créditos as novas construções e os projetos que utilizam uma das combinações de pavimentos brandos, indicadas a seguir em pelo menos 50% do espaço urbano de projeto. No caso de reconstruções, as premiações iniciam com 25% da área com estratégias de pavimento brando com um crédito, dois créditos para 50% da área e o máximo de três créditos para quem atinge o percentual de 75% da área tratada com estratégias de pavimentos brandos. Estas estratégias já foram indicadas anteriormente e são: o sombreamento dos pavimentos com árvores ou vegetação, a adoção de materiais nos pavimentos com refletância solar elevada, de no mínimo 29%, e utilização de pavimentos permeáveis (TRAN; POWELL, 2009).

Tanto para construções novas quanto para reconstruções, no caso de vias arteriais e coletoras a principal recomendação é da utilização dos seguintes pavimentos brandos com refletância solar maior que 29%: concreto convencional, concreto de cimento branco e cimento de dióxido de titânio. Os pavimentos asfálticos não foram indicados por possuírem albedo abaixo de 29%. No caso de ruas locais de baixo tráfego, os pavimentos permeáveis e *pavers* também

podem ser utilizados (ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012). A seguir serão listadas as estratégias para vias coletoras e arteriais, divididos entre os pavimentos com insumos mais claros e os que recebem aplicação de pinturas especiais.

4.3.1 Pavimentos com alta refletância com insumos mais claros

Neste tópico serão apresentados os pavimentos de alta refletância, com elevado albedo, devido aos seus insumos (componentes do material) serem mais claros. Serão comentados os pavimentos: de concreto convencional, de concreto de cimento branco, à base de dióxido de titânio, *whitetopping* e os à base de resinas naturais.

4.3.1.1 Pavimento de concreto convencional

Como já comentado na subseção 4.1.2, o pavimento de concreto é uma estrutura forte resistente à altas cargas de tráfego e

ambiental

de grande durabilidade. É ainda pouco utilizado no país, pois aqui impera o pavimento de revestimento asfáltico, devido ao alto custo inicial de construção do pavimento de concreto e da dificuldade de ajustes e do maior tempo necessário para finalizar manutenções. O seu uso mais comum ainda é em rodovias e em corredores de ônibus, no caso urbano. Ao contrário do pavimento asfáltico, o seu albedo tende a diminuir ao longo do tempo pois ele se torna sujo devido ao movimento do tráfego, tendo sua refletância solar diminuída de cerca de 40% para 27% a 35% após aproximadamente 6 anos (ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012).

Contudo, o albedo do concreto pode ser aumentado com o uso de materiais mais claros do que os tradicionais em sua composição, como: a cor da areia, os agregados, o cimento branco, o dióxido de titânio ou outros aditivos. Pesquisas correlacionam o albedo do pavimento de concreto com o do cimento, dos agregados finos (areia) e dos agregados maiores. O albedo do cimento exerce uma enorme influência no albedo final do pavimento (LEVINSON; AKBARI, 2002). A tabela 6 indica o albedo de materiais que compõem o concreto, com alternativas mais claras que as tradicionais.

Tabela 6 – Albedos dos materiais que compõem o concreto

Cimentos
	Cimento Portland cinza ($\rho=32\%$)	Cimento Portland branco ($\rho=87\%$)		
Areias
	Areia cinza de leito de rio ($\rho=20\%$)	Areia vermelho escura vulcânica (basáltica) ($\rho=22\%$)	Areia marrom ($\rho=27\%$)	Areia de praia ($\rho=45\%$)
Rochas
	R1 Rocha basáltica vermelho escuro ($\rho=17\%$)	R2 Rocha granito ($\rho=19\%$)	R3 Rocha plagioclase ($\rho=49\%$)	R4 Rocha chert ($\rho=55\%$)

ρ = albedo de cada material na mistura do concreto

Fonte: Lenvinson e Akbari (2002) e adaptado pelas autoras (2020).

4.3.1.2 Pavimento de concreto com cimento branco

O concreto convencional é feito com cimento cinza, por outro lado o cimento branco é similar exceto pelo fato de ser mais claro. Sua tonalidade clara está associada à redução de ferro existente no material bruto do qual o cimento é produzido. Como o ferro é um material fundente, esta mudança altera a temperatura no qual o cimento deve ser processado, consequentemente aumentando o custo da produção do material, assim como as emissões poluentes associadas à produção. Esta é a única diferença real existente, pois o comportamento do cimento branco e a resistência que ele gera no concreto é similar à do cimento cinza. O cimento branco é muito mais refletivo do que o cinza, seu albedo é de 18% a 29% maior do que o concreto de cimento cinza (LEVINSON & AKBARI, 2002).

O custo do agregado dolomita branco nos EUA, em 1996, era de cerca de US\$ 30,00 por tonelada na pedreira, enquanto as pedras usuais giravam em torno de US\$ 4 a 9,00 por tonelada. O preço final do concreto com cimento e agregados brancos ficava em torno de

US\$ 2,00 para cada pé quadrado¹⁵ para a espessura de 4 polegadas (POMERANTZ *et al.*, 1997).

O cimento cinza também pode ser clareado reduzindo a presença de óxidos de ferro com a adição de caolin. Outra possibilidade para produzir concreto com albedo de aproximadamente 68% é associar o uso de cimento branco usando agregados claros, como as areias e pedras, embora tais agregados também são mais caros que os tradicionais. Contudo, experimentos chegaram ao albedo de até 80% em concreto de cimento branco (POMERANTZ *et al.*, 1997). A tabela 07 indica os albedos obtidos com diferentes agregados, nota-se que quando se utiliza o cimento branco a refletividade aumenta consideravelmente em relação ao cimento cinza. No caso do uso do concreto de cimento branco junto com pedra granito ou plagioclase e areia de praia foi atingido albedo de até 77%, enquanto com o cimento cinza o máximo que se obteve foi de 52%, ou seja, o cimento branco pode ser de até 32,46% mais refletivo que o cinza.

¹⁵ Aproximadamente 0,093m²

Tabela 7 – Albedo de superfícies de concreto usando agregados claros

Cimento branco				
	Pedra basáltica	Pedra de granito	Pedra plagioclase	Pedra chert
Areia de leito de rio	54%	68%	69%	38%
Areia basáltica	32%	47%	57%	33%
Areia marrom	54%	48%	54%	39%
Areia de praia	59%	77%	77%	60%
Cimento cinza				
	Pedra basáltica	Pedra de granito	Pedra plagioclase	Pedra chert
Areia de leito de rio	34%	44%	41%	43%
Areia basáltica	27%	33%	38%	22%
Areia marrom	24%	29%	25%	19%
Areia de praia	41%	44%	52%	48%

Fonte: Levinson e Akbari (2002)

4.3.1.3 Pavimento à base de dióxido de titânio

A adição de dióxido de titânio também torna o cimento mais claro. Certas formas de dióxido de titânio são fotocatalísticas, ou seja, passam por um processo que usa energia solar para acelerar uma reação química sem que o material seja consumido durante o processo. Na presença da luz do sol, o concreto com dióxido de titânio em sua composição ou revestido com este material irá oxidar alguns poluentes das emissões dos veículos como NO_x (óxidos de nitrogênio) e SO_x (óxidos de enxofre). Materiais orgânicos como componentes da poluição (fuligem, óleo e elementos particulados), organismos biológicos (mofo, algas, bactérias e alergênicos) e químicos que causam odores são decompostos pelo efeito fotocatalístico (SHEN *et al.*, 2012).

O fato de o dióxido de titânio ser capaz de reduzir o NO_x, que é um poluente e que causa o escurecimento da superfície do concreto, o pavimento mantém sua tonalidade mais clara e vai melhorando este aspecto ao longo do tempo. O NO_x agrega monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂), sendo

ambiental

que o NO é gerado principalmente pela combustão da frota de veículos (Ibidem).

Portanto este tipo de cimento tem benefícios para a saúde das pessoas, para a redução da poluição e para reduzir as ICU. O custo da adoção do cimento de dióxido de titânio é cerca de 50% maior do que o do cimento tradicional, mas a elevação nos custos globais da construção do pavimento é de apenas 10% (ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012). A tabela 08 indica os custos e benefícios dos diferentes pavimentos indicados e seu impacto na redução das ICU. Um estudo comparou o custo por km do pavimento asfáltico e o de concreto Portland e chegou respectivamente aos valores de: US\$ 260.672,80¹⁶ para o primeiro tipo de pavimento e US\$ 595.441,27 para o segundo (KOSTULSKI; KLAMT; BUDNY, 2017). Ou seja, o PCC tem custo inicial de implantação mais do que o dobro do pavimento flexível. Mas se deve considerar que o PCC tem vida útil muito maior do que o pavimento asfáltico e requer menos manutenção, além dos benefícios ambientais de ajudar na redução de ICU.

¹⁶ Os valores apresentados no estudo foram convertidos para o dólar vigente na época do trabalho, correspondendo a R\$ 3,31, para fins de uniformizar

com os dados da tabela do ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012.

Tabela 8 – Custos e benefícios dos pavimentos

Tecnologia	Albedo		Custo aproximado	Tempo de serviço	Impacto na ICU
	Inicial	Ao longo do tempo			
Via arterial e coletora					
Asfalto convencional	5% - 10%	10% a 15%	US\$ 100* por tonelada	15 - 20	Baixo
Concreto convencional	35% a 40%	20% a 30%	US\$ 4 a 6 por m² ¹⁷	20 - 35	Médio
Concreto de cimento branco	70% a 80%	40% a 60%	US\$ 3,40 a 12 por m²	20 - 35	Alto
Concreto de dióxido de titânio	35% a 40%	35% a 40%	US\$ 3 a 9 por m²	20 -35	Alto

Fonte: Engineering Department of Chula Vista (2012).

¹⁷ No original consta pé quadrado, que corresponde a aproximadamente 1m². Na tabela foi arredondado para facilitar a leitura. Nota da autora.

A seguir serão listadas outras técnicas e tecnologias de pavimentos que podem ser empregadas como pavimentos brandos.

4.3.1.4 *Whitetopping*

Whitetopping é uma sobreposição de concreto colado sobre um pavimento existente asfáltico. Nas áreas urbanas é normalmente utilizado em intersecções e em corredores de ônibus onde problemas como empurramento provocado pelo movimento do ônibus é comum. Mas este pavimento não precisa ficar sujeito à estas aplicações, especialmente nas áreas sujeitas ao tráfego pesado ele é indicado. Para estes casos esta técnica construtiva aumenta a vida útil do pavimento, assim como melhora o seu desempenho ao tráfego (ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012). Utilizando esta técnica é possível fazer a reconstrução de vias existentes em pavimento asfáltico, que por sua vez obterão na superfície o albedo do concreto (até 40%), que é mais alto que o do pavimento asfáltico

4.3.1.5 Pavimento à base de resinas naturais

Diferentemente dos pavimentos asfálticos comuns, cujos aglutinantes são provenientes do petróleo, os pavimentos à base de resina modificada usam aglutinantes à base de resina de árvores. Este aglutinante é inicialmente aplicado separadamente na área preparada no local e então é aplicado e compactado para obter um acabamento liso. Ao final recebe revestimento de resina para selagem do pavimento (GARTLAND, 2010; ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012).

Como o aglutinante de resina é translúcido o pavimento adquire a cor de quaisquer agregados adotados. Portanto, o uso de agregados mais claros produz um pavimento com maior albedo e mais fresco. O custo é de aproximadamente de US\$ 3,00 por pé quadrado para materiais e instalação (GARTLAND, 2010). Este material não necessita de aquecimento para ser instalado. Esta tecnologia de pavimento é produzida por empresas americanas como a *Road Products Corp* (POMERANTZ *et al.*, 1997). A recomendação do uso é para áreas ecologicamente sensíveis, como regiões próximas a baías.

4.3.1.6 Técnicas mistas

Além das técnicas descritas anteriormente, também existe a possibilidade de renovação de asfalto existente com recapeamento. Neste caso podem ser empregados no recape outras misturas como as à base de aglutinantes que usam resinas arbóreas e o emprego de agregados de cores claras, obtendo como resultado pavimento com albedo maior do que o asfáltico (SANTAMOURIS et al., 2013).

4.3.2 Pavimentos com pinturas especiais

Neste tópico serão apresentadas as opções de pinturas e revestimentos especiais passíveis de serem aplicados nos pavimentos a fim de aumentar o albedo, a refletividade no infravermelho ou ambos os quesitos. Serão comentados: os filmes hidrofugantes, os selantes asfálticos coloridos e capas selantes, as pinturas com alta reflexão e as pinturas de baixo brilho.

4.3.2.1 Filme hidrofugante (asfalto, renovação)

A aplicação de filme hidrofugante sobre os pavimentos asfálticos para renovações e é uma técnica de manutenção que há tempos já é adotada nos EUA. Ela custa menos do que o recapeamento completo e pode ser aplicado com maior agilidade, propiciando a liberação das rodovias em menor tempo, em menos de um dia. Como o aglutinante fica pouco aparente a superfície do pavimento adquire a aparência dos agregados adotados (GARTLAND, 2010).

Este processo é mais indicado para rodovias do que em estacionamentos, uma vez que a brita não tem adequada aderência sob movimentos de baixa velocidade laterais do pneu no processo de estacionar. Como a rodovia assume a aparência da cor das pedras adotadas na camada de brita, já que é misturada ao aglutinante asfáltico, o uso dos agregados mais claros pode tornar o pavimento mais brando. A refletância solar do pavimento asfáltico pode chegar de 40 a 50% com esta técnica, dependendo da cor dos agregados adotados. O custo inicial é de US\$ 0,50 a 1,00 por pé quadrado para materiais e instalação (GARTLAND, 2010).

4.3.2.2 Selantes asfálticos coloridos e capas selantes (asfalto, renovação)

Selantes asfálticos pretos e capas selantes são produtos pré-misturados conhecidos, encontrados em *shoppings centers* e vias de acesso nos EUA. São feitos de agregados finos (pedras pequenas) em uma emulsão (suspensão em água) com aglutinante asfáltico preto. Estas capas podem ser preparadas em diferentes cores pela adição de pigmentos especiais (GARTLAND, 2010).

São construídas sobre pavimentos e são de diferentes tipos, desde as impermeabilizações leves (*fog seals*) até as mais pesadas – *sand seals* (aplicação de emulsão ou asfalto líquido na superfície e aplicação de cobertura de areia). Uma aplicação interessante é a diferenciação da coloração das ciclovias das pistas dos automotores com o uso dos selantes. Normalmente são feitos na cor preta, coloração indesejável quando o objetivo é mitigar as ICU, alternativamente podem ser adotadas cores mais claras na pigmentação, como os tons de cinza, bege, vermelho ou verde. Misturas mais personalizadas de cores mais claras podem ser obtidas com a adição de dióxido de zinco, dióxido de titânio ou

outros materiais clareadores (GARTLAND, 2010). O custo gira em torno de US\$ 0,50 a 1,00 por pé quadrado para materiais e instalação.

A seguir serão descritas técnicas que estão sendo desenvolvidas em pesquisas no sentido de criar pinturas especiais para refrescar os pavimentos.

4.3.2.3 Pinturas com alta reflexão

É possível a aplicação de pinturas brancas com alta reflexão na superfície do pavimento, que pode ser o asfáltico ou de o concreto. Esta nova geração de tintas alcança albedo em que muitos casos excedem 90% (SANTAMOURIS, 2013). Experimentos executados em placas de concreto, com tintas à base de cal e *binder* de acrílico alcançaram albedo de 88% e emitância no infravermelho de 85% (SANTAMOURIS et al., 2008). As pinturas convencionais brancas do mercado atingiram refletância solar de 76% e emitância no infravermelho de 89%. A cal é um material barato, não causa dano ao meio ambiente, permite a passagem do ar e tem resistência a sujeira. Sua desvantagem é a suscetibilidade a riscos, para corrigir este problema foi empregado o *binder* acrílico (Ibidem). Ressalta-se que a emitância do

infravermelho também colabora para reduzir a temperatura de superfície do material, tanto que no experimento em questão o material testado ficou com a temperatura de superfície de 1 a 5°C mais frio do que o que a qual utilizou a pintura branca existente no mercado.

Em outro experimento as pinturas brancas existentes aplicáveis a pavimentos, (i) tinta branca acrílica à base de elastômeros, (ii) pintura branca acrílica à base de cerâmica, foram testados quanto ao seu desgaste ao longo do tempo com relação ao albedo, num período de 2,5 anos exposto ao tempo. O resultado foi uma redução de albedo inicial de 76% para 57% e de 83% para 77%, ou seja, ainda mantiveram elevada reflexão solar (Ibidem). Destaca-se que as placas testadas ficaram em posição horizontal acima do nível do chão (SANTAMOURIS, 2008).

4.3.2.4 Pinturas de baixo brilho

Outros estudos têm se concentrado no desenvolvimento de pinturas brancas ou de cores claras aplicáveis sobre os pavimentos, mas que não causem ofuscamento, que pode comprometer a segurança viária e gerar desconforto aos usuários dos espaços urbanos (SANTAMOURIS, 2013).

Pesquisadores desenvolveram um tipo de pavimento branco que possui elevado albedo e baixo brilho aplicando uma pintura inovadora sobre o asfalto convencional (KINOUCI et al., 2004). Os pigmentos e a estrutura da tinta atingem baixa refletividade na parte visível do espectro (23%) e elevada refletividade do infravermelho (86%) que também é responsável pelo aquecimento do pavimento. Experimentos de campo demonstraram que a temperatura máxima de superfície dos pavimentos pintados com estas tintas especiais chega a ser 15°C inferior do que o dos asfaltos tradicionais (SYNNEFA et al., 2011). A Figura 23 ilustra as quatro cores testadas.

Figura 23 – Cores testadas com pintura sobre o asfalto

Legenda: 1- bege, 2- off-white, 3- verde, 4 - vermelho, 5 – amarelo.

Fonte: Synnefa et al. (2011).

Das cores utilizadas no experimento, a que obteve o melhor desempenho foi a mais clara, a off-white que obteve albedo de 55% e refletância visível de 63% no infravermelho (SYNNEFA et al., 2011). O interessante do uso desta cor é que ela não é tão

branca quanto as tintas convencionais, desta forma não tem tanto potencial de ofuscamento devido a sua baixa refletividade na parte visível do espectro (45%). Outra cor que seria uma interessante opção é o bege, que atingiu albedo de 45%, refletividade do infravermelho de 56 e 31% na parte visível do espectro (SYNNEFA et al., 2011), com menos possibilidade ainda de causar desconforto de ofuscamento visual se aplicado em vias e calçadas.

Por outro lado, até mesmo as cores mais escuras se mostraram com alta refletância no infravermelho. Por exemplo, o asfalto pigmentado de verde tem refletância visível de 10% e a da amostra da pesquisa alcançou 39% (Ibidem).

Na pesquisa indicada anteriormente os autores executaram simulações computacionais em *Computer Fluid Dynamics* (CFD) e utilizaram o programa PHOENICS CFD para uma área no subúrbio de Atenas, na Grécia. Obtiveram como resultado que com o uso do asfalto comum nas vias a temperatura do ar a 1,5m de altura variava entre 37°C a 47°C (média de 42°C). Para o caso do uso do asfalto pigmentado de off-white numa camada fina de asfalto (albedo de 55%), a temperatura a 1,5m variou de 36°C a 41°C (média de 37°C).

Como se pode observar houve um decréscimo significativo na temperatura máxima obtida e na média.

Estudos complementares seriam necessários de serem executados para obter mais informações sobre a eficácia da pintura de baixa refletividade, com aplicação em trecho experimental em área urbana. Assim seria possível testar quais cores seriam as mais indicadas para evitar ofuscamento em motoristas e pedestres, se o *off-white* ou o bege. Com esta área experimental também seria possível a coleta de dados e a montagem de banco de dados para a confrontação das informações obtidas em simulações computacionais com experiência prática.

4.4 Pavimentos permeáveis – PP

O pavimento que possui alta capacidade de armazenar água é permeável. A água é infiltrada pela camada superior e é armazenada no solo ou nas camadas inferiores que lhes dão suporte. Pavimentos permeáveis permitem que a água escoe por entre o pavimento durante as chuvas para ser posteriormente evaporada nos dias de sol

e calor. O processo de evaporação da água retira calor do pavimento, tornando-o brando, pois o mantém menos quente sob o sol (GARTLAND, 2010).

Sobre esse aspecto, deve-se ter cautela de que o pavimento permeável somente será brando em relação ao convencional se o mesmo for mantido umedecido, caso contrário pode até mesmo ser mais quente do que os pavimentos convencionais (QIN & HILLER, 2016). Os achados nos textos científicos ainda demonstram a necessidade de mais estudos sobre o tema.

A princípio, os mesmos autores elaboraram experimento no qual observaram a redução na temperatura do pavimento permeável quando este era umedecido novamente, principalmente se esta ação ocorrer por volta de meio dia, em dias de verão. Umedecendo novamente a superfície do pavimento, poderá manter a superfície mais fresca durante um período de 12 a 24hs nos dias mais quentes do verão. Os mesmos autores registraram decréscimo de temperatura superficial no pavimento de 8° - 10°C.

Por outro lado, é necessário observar as condições do clima, o pavimento permeável é recomendado para locais com climas quentes e úmidos, onde a chuva teria o papel de refrigerar o

pavimento. O seu uso em local com clima seco gera temperatura de superfície ainda maior, devido aos poros do pavimento, por isso os autores sugerem que nestes casos o pavimento poderia ser molhado com águas residuais (BRITTO & HELLER, 2016). Outras vantagens do pavimento brando permeável é o de ajudar no manejo das águas pluviais e o de auxiliar na filtragem de poluentes presentes nestas águas, ajudando a melhorar a qualidade das dos rios e córregos.

A seguir serão apresentados aspectos gerais a respeito dos pavimentos permeáveis, quanto à definição, usos, tipos entre outros elementos, e o estudo de uma possibilidade de aplicação num estudo de caso em São Paulo/SP. Tais considerações foram publicadas no Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes, v. 4, série 9, ano 2016, pp. 73-86. por Maruyama e Franco (2016), sob o título “Pavimentos permeáveis e Infraestrutura Verde”.

4.4.1 Definições

O conceito de pavimento permeável é daquele em que é possível a infiltração da água dos escoamentos pluviais. Estes pavimentos também são nomeados por estrutura-reservatório, porque este fato está relacionado às funções que a sub-base desempenha (SUZUKI *et al.*, 2014). Tais funções são a mecânica e a hidráulica. A mecânica está relacionada ao termo estrutura, a respeito de suportar as cargas advindas da movimentação de pessoas, veículos e objetos. A função hidráulica é associada ao termo reservatório, pelo fato de reter provisoriamente a água pela porosidade do material, que é seguido por drenagem e se possível a infiltração desta água no solo.

O manual de Connecticut (2004) comenta como exemplos de aspectos positivos ambientais do pavimento permeável a diminuição do escoamento, a recarga dos lençóis freáticos e a ajuda no processo de filtragem da poluição. Também existem benefícios relacionados à segurança e à engenharia de tráfego, como o aumento da segurança e do conforto para trafegar nos dias de chuva devido à

diminuição dos empoçamentos (SUZUKI *et al.*, 2014). O lençol freático deve ter uma distância mínima do pavimento de 1,50m.

Os mesmos autores comentam que foi a França a responsável por lançar o pavimento permeável nos anos 1950, mas questões técnicas relacionadas aos ligantes de asfalto, que ocasionaram diminuição da resistência, fizeram com que não se difundisse. Ele ressurgiu nos anos de 1970, novamente na França e nos EUA

(SUZUKI *et al.*, 2014). Este pavimento é composto por diversas camadas, como mostra a figura 24.

Figura 24 – Figura esquemática de corte de pavimento permeável com infiltração total

Fonte: LPE Engenharia (sem data)

- Em ruas locais para acessos residenciais, em calçadas e nas ciclovias e ciclofaixas etc.

4.4.2 Usos

O pavimento permeável tem a vantagem de poder reduzir os volumes escoados e melhorar o tempo de resposta da bacia em que se encontra, simulando uma condição semelhantes daquela existente na área anteriormente à instalação do pavimento, no processo de urbanização (TUCCI, GOLDENFUM & ARAUJO, 2000). São recomendados os seguintes usos pelo manual de Connecticut (2004):

- Adoção conjunta com as tipologias de Infraestrutura Verde a fim de reduzir os coeficientes de escoamento superficial e da poluição carregada pela água;
- Em locais onde há baixo tráfego, tais como os estacionamentos;

4.4.3 Tipos de pavimento permeável

Com relação ao funcionamento hidráulico do pavimento permeável, os seguintes princípios são os seguintes (SUZUKI *et al.*, 2014¹⁸):

- Entrada da água da chuva no pavimento. Isto pode ser de modo uniforme ou ocorrer de forma localizada. Na segunda opção são adotadas as bocas de lobo ou os drenos laterais.

¹⁸A obra de Suzuki et al. (2014) é uma leitura importante sobre o assunto pavimentos permeáveis pois traz na literatura nacional diversos conceitos sobre o assunto, reunidos num único livro, o que facilita o entendimento da matéria.

- Armazenagem temporária da água na estrutura reservatório, nos vazios desta camada no pavimento.
- Por fim, a liberação em velocidade lenta da água, que ocorre por meio de infiltração no solo. Recomenda-se que este tempo seja de um a três dias, pois isto contribuirá para que a água da chuva chegue nos canais de drenagem em mais tempo do que ocorreria com os sistemas de pavimentos tradicionais, também é útil para evitar a ocorrência de enchentes e alagamentos.

Os pavimentos permeáveis são classificados em (SUZUKI *et al.*, 2014):

- Tipo 1: possui tanto o revestimento quanto reservatório porosos e a água é liberada por meio de infiltração no solo;
- Tipo 2: com manta impermeável de modo a permitir que a água evacue por meio de coletor, não por processo de infiltração, tem reservatório e revestimento poroso;
- Tipo 3: possui revestimento impermeável e coletor que envia a água a um reservatório poroso. A água é armazenada e infiltra no solo;
- Tipo 4: neste caso o revestimento é impermeável, juntamente com coletor que envia a água a reservatório

poroso. Há armazenamento da água, direcionamento a coletor e depois para exutório.

Há três categorias principais nas quais é possível se enquadrar o pavimento permeável, dependendo do armazenamento da água proporcionado pelo reservatório e da capacidade do solo infiltrar a água (SUZUKI *et al.*, 2014). Estas categorias são:

O primeiro sistema é o que permite a total infiltração no solo. A água é liberada por meio de infiltração no solo. Neste caso há um reservatório de material granular de grande dimensão para receber a água da chuva calculado por projeto. Tal alternativa reduz de forma total a descarga de pico, atenua o volume e melhora a qualidade da água, importante dentro de uma Infraestrutura Verde - IV. A recomendação de uso é em locais onde o solo possui boa capacidade para infiltração e sem que haja acúmulo de materiais na superfície do pavimento que podem ser prejudiciais ao lençol freático. Evitar em locais com aquíferos que provém abastecimento de água para uma cidade (Ibidem).

O segundo sistema é o de infiltração parcial. Ele é usado para solos com baixa capacidade de infiltração ou em casos em que o lençol freático é elevado, a cerca de 1m de profundidade. Nesta solução associa-se ao sistema de drenagem subsuperficial com

tubos perfurados alocados na parte inferior de um reservatório de brita. O período de retorno da chuva calculado em projeto mínimo deve ser de dois anos. Há fatores positivos de redução de enchentes e alagamentos, importantes numa IV (Ibidem).

O último sistema é o que permite a infiltração para controlar a qualidade da água. Neste caso há a coleta do fluxo inicial da precipitação, que traz o maior volume de elementos poluentes. O benefício desta alternativa é o de filtrar a poluição, fato de grande valia dentro de uma IV (Ibidem).

4.4.4 Tipos

Inicialmente é preciso separar dois conceitos quanto ao pavimento permeável, a respeito do que é pavimento e do que é revestimento, porque existe muita confusão neste assunto. O pavimento permeável refere-se a toda estrutura: revestimento e sub-base. Por outro lado, o revestimento é apenas a camada da superfície

do pavimento. A sub-base se refere a estrutura reservatório e a parte estrutural deste pavimento (SUZUKI et al., 2014).

O pavimento pode ser classificado como permeável possuindo revestimento impermeável. O fator que vai definir a permeabilidade é o elemento estrutura reservatório que se localiza na sub-base. Quando se utiliza o revestimento impermeável, existem tubos que conduzem a água da chuva para a estrutura reservatório ou então o processo de infiltração ocorre por meio das juntas. Neste último caso, o revestimento é nomeado modular (figura 25). Quando o revestimento é permeável ele é denominado poroso (figura 26) e neste caso há infiltração da água pela superfície do material (TOMAZ, 2009).

Os materiais do revestimento poroso podem ser asfálticos ou de concreto. No caso do pavimento modular o material é constituído por peças pré-fabricadas de blocos de concreto convencional, blocos de concreto vazados preenchidos com material granular (grama ou areia). Ainda existem as geocélulas, estruturas plásticas preenchidas com gramado ou pedras, no caso as geocélulas reforçam o pavimento para permitir o tráfego veicular. Mas este último tipo de revestimento ainda é pouco comum no país.

Figura 25 - Seção de pavimento modular

Fonte: ABCP (sem data).

Figura 26 - Seção típica de pavimento poroso

(i) e (ii) Concreto ou Asfalto Poroso

Fonte: Tucci, Goldenfum e Araujo (2000) apud Urbonas e Stahre (1993).

4.4.5 Revestimento Modular

O revestimento do tipo modular é constituído de estruturas rígidas com cerca de 30% de vazios, os quais são preenchidos como materiais permeáveis, tais como o pedrisco. Ele é construído sobre uma camada de pedra britada cuja finalidade é acumular a água do escoamento pluvial. Esta camada de revestimento pode ser executada com bloco de concreto pré-moldado ou moldado *in loco*, granito ou tijolo. No caso de ter o revestimento de concreto o mesmo não é poroso e a água penetra pelas juntas existentes entre os blocos (TOMAZ, 2011).

Como exemplo de utilização, cita-se em estacionamentos e em calçadas. Num projeto de IV em locais de circulação de pessoas, recomenda-se o uso de blocos de concreto, pela menor trepidação que oferece para o trânsito de cadeirantes, bicicletas entre outros. No projeto deve ser incluída a manta geotêxtil, tipo bidim, a fim de evitar a colmatação e a declividade máxima de 5%. O revestimento modular tem bom desempenho quanto à redução do escoamento pluvial, importante benefício dentro de uma IV. Na tabela 9 estão

apresentados resultados de coeficiente de escoamento superficial obtidos com simulador de chuva (TUCCI, 2000).

Tabela 9 - Coeficiente de escoamento superficial por material

Tipo de Superfície	Coeficiente de escoamento superficial (<i>runoff</i>) C
Solo compactado (rua de chão batido)	0,66
Concreto (pavimento impermeável)	0,95
Blocos de concreto (<i>blockets</i>)	0,78
Paralelepípedo de granito	0,60
Blocos vazados (pavimento modular)	0,03

Fonte: Tucci (2000).

O coeficiente de *runoff* igual a 0,03 significa que o material permite a passagem de 97% da água. Com relação às juntas, almeja-se facilitar o movimento em sentido vertical da água na sub-base do pavimento modular. Na instalação, é indicada a adoção de pedriscos entre 2mm a 6,3mm nas juntas e não se deve aplicar areia nestes

locais. Há a opção de utilizar alargamento nas juntas para potencializar a infiltração da água no solo (INTERPAVE, 2008).

4.4.6 Revestimento Poroso

São dois os tipos de revestimento poroso: os de material asfáltico e os de concreto. No caso do asfalto poroso há misturas abertas tipo camada porosa de atrito – CPA, que garante um alto percentual de vazios graças às pequenas quantidades de filer, agregados miúdos e de ligante asfáltico. Estes índices de vazios ficam entre 18 a 25% (DNER-ES), muito mais alto que os comumente existentes no asfalto convencional, de 3 a 5% (BERNUCCI *et al.*, 2008). É a presença deste elevado índice de vazios que proporciona a rápida percolação da água. Também há a vantagem de aumentar a aderência pneu-pavimento e a redução do ruído.

Já com relação ao concreto poroso há baixo teor ou retira-se totalmente os finos da mistura dos agregados do pavimento. Desta forma obtém-se índice de vazios da ordem de 15 a 25%, por isto há menos estabilidade estrutural do que o concreto comum (ABCP,

sem data). Por esta razão, deve-se ter cuidado com a elevação exagerada do índice de vazios, seja o pavimento de asfalto ou de concreto, pois ela está diretamente relacionada com a resistência do material. Equilibrar a permeabilidade com estabilidade é o desafio dos projetos.

Nos projetos de IV, a recomendação é adotar o revestimento concreto poroso nas calçadas, ciclovias e ciclofaixas, pelos benefícios que o concreto também proporciona por ter maior albedo do que o asfalto.

4.4.7 Projeto, manutenção, limitação, vantagens e legislação

A primeira etapa de um projeto de pavimento permeável é a determinação da sua área de contribuição, como, por exemplo, para o caso de pavimento permeável destinado a estacionamentos. Se forem incluídas as áreas ao redor como contribuintes, o tamanho máximo destas não deve exceder cinco vezes a área a ser pavimentada. O dimensionamento do sistema de drenagem

considera a precipitação da região, o carregamento do tráfego e a permeabilidade do solo, se houver pouca permeabilidade não se recomenda instalar o pavimento permeável (CORSINI, 2014).

É necessário executar dois dimensionamentos, um hidráulico e outro mecânico. O referente ao mecânico irá avaliar o carregamento a que o sistema será submetido. O hidráulico irá mensurar o volume de água a ser recebido e definir os níveis de infiltração.

A eficiência de um sistema de pavimento permeável está ligada à manutenção constante, a fim de evitar os entupimentos dos vazios que permitem a sua permeabilidade (colmatação). Caso não ocorra manutenção, nos primeiros dois anos a tendência é de que o concreto poroso perca 50% da capacidade de permeabilidade, e isto prossegue até estar totalmente colmatado, após cerca de sete anos. Os concretos permeáveis moldados *in loco* devem ter manutenção com retirada de 3 a 4cm da camada externa, seguida por substituição do revestimento (MAZONETTO, 2011).

Por outro lado, um sistema de pavimento permeável de blocos tem como opção a sua substituição ou a remoção e troca de lado. Deste modo a parte que inicialmente era externa torna-se interna.

Outro cuidado é trocar o material do rejunte e realizar limpeza por aspiração (CORSINI, 2014). A recomendação é que esta limpeza seja realizada quatro vezes por ano por meio de lavagem com equipamentos à vácuo ou a lavagem com mangueira de água para remover as partículas, a fim de evitar o entupimento (EPA, 2008a). Sansalone *et al.* (2012) indica que com tal procedimento há considerável recuperação da capacidade de infiltração do pavimento permeável.

Há ainda as seguintes limitações de uso dos pavimentos permeáveis, segundo o Manual de Connecticut (2004):

- Deve haver solo na sub-base com suficiente permeabilidade;
- Necessita manutenção constante, devido à suscetibilidade ao entupimento por sedimentos;
- É indicado para pequenas áreas de drenagem;
- Existe risco de contaminar o lençol freático, este fato deve ser avaliado pelas condições da superfície;

Também se destaca a importância de controlar a execução do pavimento permeável, pois falhas neste item pode levar ao entupimento dos dispositivos, tornando o sistema ineficiente.

Outro detalhe é o custo do pavimento permeável ser até 15% maior do que o do pavimento convencional. Mas deve-se considerar que este pavimento também trabalha a função da drenagem, podendo colaborar com a diminuição de enchentes e alagamentos. Estes fatores positivos podem ser bem maiores do que os custos adicionais de sua construção.

A seguir serão listadas mais vantagens do pavimento poroso (ABCP, sem data):

- Maior conforto e segurança para trafegar nos dias chuvosos, por reduzir os empoeamentos;
- Pavimentos que contam com infiltração trazem ganhos ambientais, associados à possibilidade de recarga das reservas subterrâneas de água;
- A possibilidade da filtragem proporcionada pelo pavimento melhorar a qualidade das águas;
- Economia nos sistemas de drenagem da jusante.

Por fim, como comentário final, a eficiência do pavimento brando permeável está ligada ao seu grau de umidade. Sendo assim, garantir umidade adicional por meio de estratégias para umedecimento do material podem ser necessárias, mas estudos complementares podem auxiliar no melhor entendimento disto.

4.5 Referências de aplicação de pavimento brando internacionais

Neste tópico serão apresentadas referências de aplicação de pavimento brando internacionais. Foram selecionados exemplos de três continentes: América do Norte, Ásia e Europa. A América do Norte foi representada pelo Canadá e Estados Unidos, a Ásia pelo Japão e a Europa pela Alemanha e Grécia.

De modo geral, procurou-se apresentar um panorama que apresentou as possibilidades, problemas a serem enfrentados, simulações feitas em programas, avaliações de aplicação do pavimento brando no local, exemplos de aplicações em ambientes reais. Tais dados foram importantes para formar uma visão global

do estado da arte do pavimento brando no exterior, formular ideias para subsidiar o método de aplicação e os estudos de casos futuros.

AMÉRICA DO NORTE

Canadá

Um estudo observou diferentes estratégias de mitigação de ICU em Toronto, uma das mais urbanizadas cidades do Canadá (WANG, BERARDI & AKBARI, 2016). Avaliou o efeito das superfícies brandas (em coberturas e pavimentos) e das áreas cobertas por vegetação, por meio de simulações numéricas com o programa *ENVI-met*. Analisou também dados como: temperatura de superfície, temperatura do ar, temperatura radiante e sensação térmica. Os resultados apontaram uma forte influência da forma urbana no conforto térmico.

Toronto possui em média um total de 29,9% de superfícies impermeáveis, sendo 16,2% em asfalto e 13,7% em concreto, o qual pode ser admitido como área de coberturas de edificações. Asfalto

e concreto possuem baixo albedo, a estratégia para mitigação das ICU adotada foi a utilização de materiais de superfície com alto albedo e emissividade, para manter as superfícies frescas quando expostas ao sol.

Os resultados indicaram que o aumento do albedo pode reduzir as temperaturas durante o dia, mas os benefícios durante a noite não foram significativos. No caso, o custo inicial do pavimento brando refletivo, mais elevado do que o convencional, seria compensado pelo aumento da sua vida útil. A alta capacidade de armazenar calor do asfalto aumenta o T_a durante a noite. Então, o ideal é aumentar o albedo urbano ao mesmo tempo que se reduz a capacidade de armazenamento de calor dos materiais de superfícies urbanos (WANG, BERARDI & AKBARI, 2016).

Estados Unidos

Outra investigação fez a comparação *in loco* entre pavimentos brandos (permeável e refletivo) e convencional num cânion urbano, em cinco pontos em Chicago, para avaliar a eficiência do *Chicago's Green Alley Program*. Este programa municipal teve início em 2007

e encorajava o uso de pavimento permeável em novas vias, 46 foram executados desde o início da iniciativa (EPA, 2008b). A estimativa dos pesquisadores é que os pavimentos revestem cerca de 23% do total da superfície da área em análise.

Os pavimentos brandos analisados foram: o de concreto com elevado albedo, concreto poroso, asfalto poroso e pavers permeáveis modulares que estavam executados nos locais já há algum tempo. O objetivo foi estabelecer a influência dos pavimentos brandos na temperatura do ar ao redor de 3m dos pontos de medição em diferentes condições de velocidade de vento. Avaliou a temperatura do ar e de superfície dos pavimentos e o modelo de controle era pavimento asfáltico instalado próximo à localidade a ser analisada. O método usou estações climáticas móveis e fixas para comparar temperaturas do ar no pavimento de concreto refletivo, asfalto poroso, e concreto poroso em relação ao asfalto convencional em cinco localidades de Chicago (COSEO & LARSEN, 2015).

Os resultados indicaram que nas localidades onde havia paredes verticais altas restringindo a liberação da radiação solar, os pavimentos refletivos aumentaram a temperatura do ar. Em dois pontos o concreto refletivo aumentou a temperatura do ar diurna em

0,9°C a 0,5°C e não teve influência na temperatura do ar noturna (Ibidem).

O pavimento de concreto e asfalto permeável aumentou a temperatura diurna em 0,8°C e 0,5°C e não reduziram a noturna. Os pavimentos de paver permeáveis mantiveram o ar mais quente que os asfálticos durante o dia, no período noturno apresentaram temperatura do ar inferior ao asfáltico convencional. No período imediatamente após os eventos de chuva a temperatura do ar sobre os pavimentos permeáveis não ficaram significativamente mais brandas (Ibidem).

Estes resultados mostram a necessidade de avaliar mais dados antes de indicar os pavimentos refletivos ou permeáveis, para que estes tenham efetividade na redução das temperaturas do ar e para que não causem o efeito contrário ao desejado. Um dado importante a incluir é a geometria do lugar, observando critério como a existência de paredes altas nas edificações.

O órgão americano de proteção ambiental EPA (2008b) indica que, nos EUA, os esforços no sentido da mitigação das ICU partem tanto da ação de voluntários quanto das políticas públicas. Muitas vezes os programas estão dentro de outros que envolvem qualidade

ambiental

do ar, da água ou sustentabilidade. Algumas comunidades preferem adotar tanto as iniciativas voluntárias quanto as políticas públicas, pois tratam-se de esforços complementares. A mesma agência comenta que iniciativas de edifícios verdes ou sustentáveis estão ajudando a encorajar as instalações de pavimentos brandos, são exemplos disto:

- Na cidade de Evanston, Illinois, o pavimento permeável é incluído no conceito de edifício verde;
- O programa *Chicago's Green Alley Program* defende a adoção de técnicas de construções sustentáveis para repavimentar mais de 1.900 milhas de vias e oferece um manual informativo sobre a redução das ICU pelo pavimento brando, assim como explica outros benefícios, tais como manejo das águas permeáveis entre outros;
- Alguns programas de classificação ambiental como o LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design*, *Green Globes* e *EarthCraft* pontua aquele que incorpora certos pavimentos permeáveis e pavimentos com alto índice de refletância solar.

ÁSIA

Algumas cidades japonesas como Tóquio e Osaka estão testando a eficiência de pavimentos dotados de sistema de retenção de água com o intuito de reduzir as ICU (EPA, 2008b). Desde o ano 2002, o governo japonês criou o comitê para estudar a mitigação das suas ICU's, o qual elaborou diretrizes para uma política no sentido da redução deste sobreaquecimento (JFS, 2008).

O governo de Tóquio conduziu um experimento que instalou 4km de pavimento com estrutura de reservatório, e os resultados mostraram que este tipo de pavimento resfriou a superfície do mesmo em cerca de 10°C (JFS, 2008). Tanto em Osaka quanto em Tóquio, os pavimentos permeáveis adotados são asfálticos ou à base de concreto, e possuem nas camadas inferiores materiais de propriedades que retêm a água e promovem a sua evaporação pela capilaridade.

Alguns destes sistemas envolvem a instalação de canos para garantir a umidade do pavimento. Os pesquisadores também investigam a umidificação dos pavimentos por esguichos de água horizontais (*water sprinklers*) durante alguns períodos do dia. Os resultados têm sido promissores e nos dois sistemas, pavimento com

estrutura reservatório e uso de esguichos de água horizontais, têm mostrado eficiência em manter a temperatura do pavimento baixa (EPA, 2008b).

Outras medidas para reduzir as ICU's no Japão estão sendo adotadas, como o aumento espaços abertos verdes, coberturas com barreiras térmicas para refletir o calor solar entre outras. Como exemplo, na cidade de Nagóia foi fixada uma lei que determina que os novos prédios e habitações com mais de 300m² devem possuir espaços verdes cobrindo de 10 a 20% do terreno. Pesquisas do governo de Tóquio indicam que a temperatura de piso de concreto exposto ao sol pode atingir 55°C no verão (figura 27), enquanto superfícies cobertas de vegetação atingem marcas abaixo de 30°C (EPA, 2008b).

Figura 27 – Temperatura do piso de concreto e da vegetação

Fonte: Governo de Tóquio apud JFS (2008).

EUROPA

Alemanha

Embora o exemplo a seguir não se trate de aplicação de pavimento brando no combate às ICU's, ele é pertinente de ser comentado por ser mais uma estratégia de mitigação desta problemática no âmbito de planejamento da paisagem urbana.

Na Europa, uma medida bastante conhecida é a que promoveu a criação de corredores de vento na cidade de Stuttgart. Foram induzidos ventos frios soprando da montanha a circular no centro urbano, por meio da criação de cinturões verdes das florestas (JFS, 2008).

Trata-se de um exemplo interessante de uso da natureza para o resfriamento das cidades, iniciativa inovadora pois normalmente ela não é incluída nos projetos com este propósito.

Grécia

Em Maroussi, na Grécia, uma experiência conduzida em uma área densamente urbanizada de 16.000m² foram aplicados materiais refletivos nos pavimentos e houve aumento dos espaços verdes e do solo permeável para combater as ICU (SANTAMOURIS, 2013). O pavimento existente era asfáltico e concreto escuro (albedo abaixo de 0,4). Foram instalados pavimentos asfálticos coloridos com refletividade próxima de 0,35, enquanto para os demais espaços livres foram adotados pavimentos naturais como mármore e pavimentos de concreto com pinturas altamente refletivas. Foi calculado que a adoção de pavimentos brandos podia diminuir a temperatura de pico do ambiente em 1,2 a 2,0°C enquanto as temperaturas de modo geral poderiam decair mais de 3,4°C devido às diversas ações.

O mesmo autor cita outra reabilitação, numa praça na área central de Atenas, Grécia, em um local que se situa próximo ao mar e cobre uma área total de 4.500m². Foi obtida redução da temperatura do ar de 1,9°C calculada num dia típico de verão. Antes da reforma, o revestimento existente era de asfalto e concreto, com albedo abaixo de 0,2. A temperatura era monitorada no verão e, tanto as temperaturas do ar quanto às de superfície, estavam fora dos padrões de conforto.

O projeto de reforma envolveu o uso extensivo de pavimentos brandos conjugados à inclusão de espaços verdes. Foram adotados pavimentos de concreto na área do parque com pinturas refletivas com albedo de 0,60. O projeto foi exaustivamente monitorado e foi medida redução da temperatura do ar em de 1,9°C, enquanto o pico da temperatura de superfície do parque foi reduzido em 12°C (Ibidem).

4.6 Referências de aplicação de pavimento branco nacionais

São extremamente escassos os estudos nacionais a respeito do tema do pavimento branco, os poucos disponíveis foram conduzidos na região sul, no estado de Santa Catarina, e se trata de propostas de novos materiais. Até o momento, não foram localizadas aplicações brasileiras de pavimentos brancos, monitoradas para combate a ICU, nem outras ações neste sentido.

Carpio (2014)¹⁹ analisou a adição de pigmentos de metais mistos na pavimentação, a fim de criar materiais com maior índice de reflexão solar a serem usados no combate às ICU. Foram executados ensaios de laboratório e campo para verificar os materiais com melhor desempenho quanto à refletância solar e menor absorção de radiação solar.

Os ensaios em laboratório e de campo indicaram redução de temperatura superficial de 3,7°C do asfalto com adição de óxidos

coloridos em relação ao material tradicional. A avaliação das misturas propostas em microclima urbano foi feita pelo software *Envi-met* e indicou redução da temperatura superficial dos pavimentos em até 1,5°C quando adotadas superfícies reflexivas ao invés das de asfalto tradicionais (Ibidem).

Outra pesquisa avaliou a refletância solar e temperatura de 20 diferentes pavimentos mais usados no Brasil: paver, *petit pavê*, concreto Portland e asfalto (CARPIO et al., 2016). Os testes foram conduzidos tanto com pavimentos novos quanto com aqueles já em uso. Misturas especiais de concreto Portland e asfálticas foram feitas em laboratório, com adição de pigmentos coloridos em diferentes porcentagens. A diferença de temperatura de superfície entre o *petit pavê* mais claro (branco) e o concreto asfáltico convencional medida foi de 18,4°C.

Os pisos *petit pavê* e as misturas asfálticas aplicados tinham mais de 20 anos de uso e estão localizados numa praça central na UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. No campo foram construídas superfícies de teste de piso *petit pavê* na cor branca e vermelha, paver de

¹⁹ Na literatura nacional sobre pavimentos brancos, Carpio (2014) e Carpio et al. (2016) são um dos poucos autores que estudam o assunto.

concreto Portland vermelho e amarelo, concreto Portland comum e permeável. Também foram moldados no laboratório superfícies de concreto Portland com a adição de pigmentos em diversas cores, tais como amarelo, verde, vermelha. A refletância solar foi apurada num dia de verão, com céu claro, ventos fracos e umidade do ar em cerca de 60% (CARPIO et al., 2016).

Os melhores resultados quanto à refletância solar se apresentaram para o *petit pavê* na cor branca e no concreto Portland tradicional denso, que atingiu refletância solar de 42,7%, enquanto os valores mais baixos foram obtidos no asfalto permeável denso. Também apresentaram bons resultados os pavers nas cores amarelo e vermelho (CARPIO et al., 2016).

De acordo com os dados coletados, o uso de concreto Portland denso (DPC) em lugar da mistura asfáltica densa (CoDAM) reduziria a temperatura de superfície em aproximadamente 1,5°C. Entretanto, como o alto índice de refletância pode ser perigoso aos motoristas, devido ao risco de ofuscamento, o estudo sugere como alternativa de pavimento o uso de paver nas cores amarelo ou vermelho, que conseguem redução de temperatura do pavimento em 10 a 12°C, em relação ao pavimento asfáltico denso (tradicional).

Observa-se, no entanto, que este estudo não fez medição nem simulação para redução na temperatura do ar, somente temperatura superficial dos pavimentos (Ibidem).

Outro trabalho desenvolvido na UFSC se voltou também para a avaliação da adição de pigmentos coloridos nas misturas asfálticas para aumentar a refletância do pavimento. Foram testadas pigmentação amarela, verde, vermelha. A que obteve os melhores resultados foi a amarelo-albino, com refletância de 12,53%, enquanto a amostra de referência possuía 4,27%. Apesar dos bons resultados obtidos estes ainda são bastante inferiores aos obtidos com o concreto Portland, que atinge refletância média de 25% (como descrito na tabela 2, seção 4), sendo ainda indicado o pavimento de concreto como pavimento frio em lugar do asfáltico (TRICHÊS et al., 2014).

Ainda em Santa Catarina, outra pesquisa estudou o desenvolvimento de novos materiais, adicionando talco ou Mica ao concreto, obtendo resultados melhores do que o concreto comum. Foram realizadas comparações de temperatura de amostras expostas ao sol de: pedra São Tomé, concreto com Mica, concreto com talco, asfalto e material de referência (concreto Portland). Os materiais

que obtiveram melhor resultado foram pedra São Tomé, que naturalmente não acumula calor, e o concreto com talco, atingindo as temperaturas de 37°C e 37,5°C. Em comparação, asfalto teve o

pior desempenho com 49,8°C. Contudo, os novos materiais testados apresentaram resistência abaixo da prevista em norma, podendo ser usados em calçadas e ciclovias (CASTRO, 2015).

Seção 5 Infraestrutura verde e a aplicabilidade dos pavimentos brandos

Conceito de Infraestrutura Verde

A Infraestrutura Verde – IV, é um sistema ou rede de espaços abertos naturais integrados de forma espacial e funcional. É formada por estruturas de suportes naturais, artificiais e híbridos. Ela conforma paisagens, conserva valores e funções dos ecossistemas naturais. Provê apoio à sustentabilidade de assentamentos humanos e traz benefícios à vida selvagem por meio de serviços ecológicos múltiplos e complementares (AHERN, 2011²⁰; BENEDICT, MCMAHON, 2006²¹). Entendida neste contexto, a IV é uma estrutura ecológica para a saúde do meio ambiente, da sociedade e da economia.

A natureza nas cidades pode desempenhar papéis que vão além do meramente estético, ela pode prover importantes serviços ecológicos, tais como redução do risco de enchentes e inundações,

mitigação das ICU e da melhoria da saúde pública, entre outros. Quando a natureza é desta forma aplicada, ela é reconhecida como uma IV (PELLEGRINO, 2019). Em contraponto, a “Infraestrutura Cinza” pode ser entendida, assim como o dicionário conceitua a palavra “infraestrutura”, isoladamente: “conjunto de instalações, equipamentos e serviços, geralmente públicos (redes de esgotos, de água, de eletricidade, de gás, de telefone etc.) que garantem o funcionamento de uma cidade” (PRIBERAM, sem data). Neste caso entende-se como Infraestrutura Cinza aquela que adota soluções tradicionais de engenharia para o manejo das águas e das outras infraestruturas urbanas.

5.1 Tipologias de Infraestrutura verde

A IV tem diferentes escalas de aplicação, que vão desde a grande escala como os parques e as florestas, até a local, como:

²⁰Ahern (2011) é uma das importantes referências estrangeiras sobre Infraestrutura Verde.

²¹ Foram pioneiros em organizar um livro a respeito de infraestrutura verde, apresentando conceitos e sugestões de aplicação.

arborização viária e as tipologias para controle na fonte dos escoamentos superficiais, tais como os jardins de chuva, as biovaletas, os canteiros pluviais e os pavimentos permeáveis (PELLEGRINO, 2019).

As tipologias de IV são elementos que simulam as funções tanto de hidrologia e ecologia dos ambientes naturais. Desta forma, se tornam parte de uma abordagem de planejamento dos espaços abertos urbanos que desempenham funções de infraestrutura, como manejo do escoamento pluvial, conforto ambiental, biodiversidade, alternativas de circulação para pedestres e ciclistas, entre outros (CORMIER; PELLEGRINO, 2008).

Esta nova tecnologia urbana é estrangeira, originária dos EUA e Canadá. Portanto, para efetiva aplicação no contexto brasileiro, ainda carece de adaptações. Contudo é válido e necessário o desenvolvimento de estudos para o seu aperfeiçoamento, assim como procurar sua inserção em projetos no espaço urbano, pois as tipologias são um importante leque de opções para os projetistas no sentido de criarem paisagens urbanas mais resilientes e adaptadas para o enfrentamento da problemática das ICU e das mudanças

climáticas, que trazem problemas como intensificação de eventos extremos como chuvas intensas, secas, invernos e verões mais rigorosos, dentre outros.

A decisão de qual tipologia a ser adotada em uma área se apoia na análise do relevo e dos processos naturais que ocorrem no local. O processo de projeto pode iniciar com um zoneamento ambiental que objetiva a preservação dos processos naturais que ocorrem em cada compartimento do relevo analisado (BONZI, 2015²²). Os processos naturais são principalmente as dinâmicas hidrológicas e do clima. Os compartimentos de relevo são separados de acordo com critérios de análise geomorfológica e da topografia.

Schutzer (2012) indica quatro compartimentos do relevo: (i) as áreas tabulares favoráveis à ocupação humana, (ii), as íngremes que devem ser mantidas da forma natural ou com ocupação controlada, (iii) as planícies aluviais com vocação mista à ocupação e mantidas como espaço da natureza e, por fim, (iv) as nascentes e os seus anfiteatros que devem ser espaços preservados. Na tabela 10 estão indicadas as recomendações de tipologias de IV indicadas

²² Esta é uma leitura importante pois tem o mérito de propor aplicações de tipologias de IV, de acordo com as diversas compartimentações do relevo

existentes numa cidade. Isto ajuda em muito os projetistas na dimensão prática da aplicabilidade dos conceitos de Infraestrutura Verde na área urbana.

brandos

para o espaço viário urbano (objeto desta pesquisa) de acordo com cada compartimentação de relevo.

Tabela 10 –Aplicação de tipologias de acordo com o zoneamento ambiental

Tipologia	Zona ambiental			
	Áreas tabulares	Áreas íngremes	Nascentes	Várzeas
Jardim de chuva	XX	-	-	-
Canteiro pluvial com infiltração	XX	-	-	-
Canteiro pluvial sem infiltração	-	X	X	XX
Biovaleta	XX	X	X	X
Pavimento permeável	XX	X	X	X
Arborização urbana ou floresta urbana	X	X	XX	XX

XX máximo desempenho na aplicação da tipologia, com vistas ao incentivo dos processos naturais da área;

X aplicação compatível, mas com menor desempenho, no caso a tipologia maneja processos naturais predominantes que são incompatíveis com a ocupação existente;

- aplicação incompatível pois a tipologia facilita processos não desejáveis na zona ambiental.

Fonte: Adaptado de Bonzi (2015).

A seguir, serão apresentadas as tipologias de IV que melhor se enquadram no contexto viário, objeto do presente estudo.

5.2 Jardins de Chuva

Os jardins de chuva são jardins rebaixados destinados a acomodar as águas dos escoamentos superficiais das áreas próximas, a fim de infiltrá-las para que possam auxiliar na microdrenagem de uma área. São vegetados e colaboram com a remoção da poluição difusa, principalmente a proveniente das vias (óleos, graxas etc.) que são danosas ao serem lançadas diretamente aos corpos d'água, como ocorre nas soluções tradicionais de drenagem (figura 28 e 29).

O ideal é possuírem elementos extravasores ou serem associados aos sistemas de drenagem tradicional, quando recebem águas das ruas e, deste modo, podem receber as precipitações mais intensas ou prolongadas, como as que tendem a ocorrer com mais frequência devido às ICU (BONZI, 2015). Possuem em suas camadas inferiores elementos como brita e macadame hidráulico para facilitar a infiltração da água no solo. O solo existente na

camada inferior a estas pedras não devem receber compactação, também com o objetivo de permitir a infiltração da água. A decisão de sua implantação, ou não, depende das características geotécnicas do solo e da topografia. Ela não é recomendável para áreas íngremes e várzeas, apenas para regiões tabulares (BONZI, 2015).

Figura 28 - Corte de jardim de chuva

Fonte: Portland (sem data) apud Bonzi (2015).

Figura 29 – Jardim de chuva

Fonte: Portland (2016).

5.3. Biovaleta

As biovaletas (figuras 30 e 31) são faixas lineares em forma de depressões no terreno preenchidas com vegetação, solo e elementos filtrantes com a finalidade de limpar as águas de chuva e

brandos

ao mesmo tempo aumentar o seu tempo de escoamento, redirecionando-o para o jardim de chuva ou outros sistemas de retenção e detenção de águas (PORTLAND, 2016). Diferentemente dos jardins de chuva, que é inserida na paisagem com a finalidade de promover a infiltração da água, a biovaleta trabalha principalmente com a diminuição da velocidade em que a água dos escoamentos é lançada nos rios e córregos e, assim, colabora para evitar o pico das vazões e a sobrecarga da rede de drenagem.

Em geral, esta tipologia é indicada para reter escoamentos de água das ruas e estacionamentos e pode ser instalada dentro da via, entre o meio fio e a calçada (CORMIER & PELLEGRINO, 2008). As características geotécnicas, da região a ser implantada a tipologia, indicarão se é recomendável a biovaleta, pela pouca capacidade de infiltração do solo ou o jardim de chuva, devido à existência capacidade de infiltração. Em outras regiões como as litorâneas, em que o solo possui capacidade de infiltração mas há a limitação de existência de lençol freático elevado, pois se este lençol se aproxima da camada drenante a biovaleta deixa de ser eficiente por não ser mais capaz de filtrar a carga hidráulica presente (PORTLAND, 2016).

Figura 30 - Esquema de biovaleta

Fonte: Portland (sem data) apud Bonzi (2015).

Figura 31 - Biovaleta em Portland

Fonte: Portland (2016).

5.4 Canteiro pluvial

Os canteiros pluviais (Figura 32 e 33) são jardins de chuva em menor dimensão que podem ser projetados junto às ruas, residências ou edifícios a fim de receber água do escoamento superficial de

áreas impermeáveis (Ibidem). Eles podem dispensar a infiltração, realizando apenas a evaporação e a evapotranspiração do escoamento superficial (BONZI, 2015).

Figura 32 - Esquema de canteiro pluvial com infiltração

Fonte: Portland (sem data) apud Bonzi (2015).

Figura 33 – Canteiro pluvial

Fonte: Portland (2016).

5.5 Arborização viária

A arborização viária integra a floresta urbana, que é um dos elementos mais importantes da IV. Esta floresta compreende o

somatório de todas as árvores de uma cidade. Ainda no contexto da vegetação urbana, as árvores desempenham papel essencial, pois devido ao seu volume de folhas das copas, seu porte e outros elementos, exercem influência positiva no meio ambiente muito mais significativa do que plantas menores, como as rasteiras e arbustivas.

Por terem maior quantidade e volume de folhas que as plantas de estratos menores, as árvores possuem maior capacidade de afetar positivamente o microclima urbano, ajudando a diminuir os picos de temperatura e aumentando umidade relativa do ar devido à evapotranspiração, entre outros benefícios. Isto é muito significativo nas cidades que tendem a ter microclimas com temperaturas mais elevadas e menor umidade relativa do ar, como é o caso de São Paulo/SP.

Desta forma, as árvores fornecem ainda outros serviços ecológicos, tais como oferecimento de *habitat* para diversas espécies e, assim, colaboram para manutenção da biodiversidade, captura de gases que provocam o efeito estufa, auxílio na minimização dos efeitos das Ilhas de Calor e provisão de conforto climático aos pedestres, dentre outros (HERZOG, 2010; MASCARÓ & MASCARÓ, 2005).

Outro benefício importante das árvores dentro de uma IV é o auxílio na infiltração da água no solo, diminuindo o escoamento superficial (HERZOG, 2010). Para um planejamento adequado da arborização é preciso considerar itens como: o seu porte, vida útil, a adaptabilidade ao clima urbano, a velocidade de crescimento, características das raízes, tipo de floração e resistência às pragas e doenças (MASCARÓ & MASCARÓ, 2005).

Ainda com relação aos serviços ecossistêmicos que as árvores podem prover ao meio-ambiente, se a árvore for plantada nas cotas altas da bacia hidrográfica e em locais de alta declividade, conseguem prover mais serviços de infiltração e controle de enchentes do que as que estão em cotas mais baixas e em terrenos de menor declividade. Neste último caso o serviço que presta está mais ligado à composição da mata ciliar e proteção dos rios (TOSETTI, 2012). Outro fato a considerar é a espécie plantada, por exemplo, a Tipuana e a Sibipiruna conseguem interceptar até 70% da chuva pelas copas, então a seleção das espécies no projeto é outro fato importante (SILVA, 2008).

Tosetti (2012) esclarece a diferença entre interceptação de água da chuva pelas copas e infiltração. Se o solo estiver compactado, ou seja, impermeável, não há infiltração, mas a

velocidade da água que formará as enxurradas será menor, já que esta água ao ser interceptada pela copa e pelas folhas, irá reter uma parte e o restante demorará mais tempo para atingir o solo. Uma alternativa é o plantio de canteiros, calçadas verdes e jardins associados à arborização, capazes de deter um maior volume de água, retardando a sua chegada aos sistemas de drenagem, aumentando o período para a sua infiltração no solo e sua evapotranspiração (Ibidem).

5.6 Tríncheiras de infiltração

A trincheira de infiltração é uma técnica compensatória que pode ser utilizada como parte de uma IV para ajudar no manejo das águas da chuva, a resgatar os mecanismos naturais do escoamento, reduzir as vazões a jusante e aumentar o controle de escoamento na fonte (MELO et al, 2016). Ela é indicada para uso no sistema viário e outros espaços, seja em canteiros centrais (figura 34), ao lado da via ou em estacionamentos, pode colaborar para a infiltração das águas, reduzindo os escoamentos superficiais e a recarga de aquíferos (MELO et al., 2016).

Figura 34 – Trincheira de infiltração em canteiro central

Fonte: Nunes et al. (2017).

Trincheiras de infiltração são elementos lineares, onde o comprimento é superior à largura e profundidade. São projetadas ao longo de superfícies impermeáveis com o objetivo de reduzir os volumes superficiais das chuvas. Pode ser implantada em diversos locais por se integrar facilmente à diversos projetos (MELO et al.,

2016). Geralmente estas estruturas são valas escavadas na terra, com pouca profundidade e preenchidas com material granular, do tipo areia ou brita. Além disto, é requerido o uso de manta geotêxtil entre o solo e o material granular e entre a superfície e a trincheira a fim de evitar a formação da colmatção (deposição de partículas sólidas que entopem o dispositivo) e a presença de contaminantes (NUNES et al., 2017).

Estas trincheiras podem ser superficiais ou enterradas, dependendo do espaço disponível no local. Também podem ter formatos diversos, como os retangulares ou os trapezoidais (MELO et al., 2016). A figura 35 indica alguns formatos de trincheira utilizadas em alguns estudos observados na literatura.

Figura 35 – Formatos de trincheiras

MATERIAL GRANULAR	DUCHENE; McBEAN & THOMSON (1994) AKAN (2002)
MATERIAL GRANULAR GEOTÊXTIL	SOUZA (2002) EMERSON; WADZUK & TRAVER (2010)
GEOTÊXTIL MATERIAL GRANULAR	WARNAAS <i>et al.</i> (1999)
SEIXO ROLADO AREIA GROSSA GEOTÊXTIL MATERIAL GRANULAR	LUCAS; BARBASSA & MORUZZI (2013)
PAVIMENTO PERMEÁVEL MATERIAL GRANULAR	CHAHAR; GRAILLOT & GAUR (2012)

Fonte: Melo et al. 2016

O projeto de uma trincheira de infiltração requer análises sobre os aspectos de uso e ocupação do solo, características hidrogeológicas, topográficas e de infraestrutura existente (MELO et al., 2016). Algumas restrições de implantação:

- Evitar áreas de aterro devido as alterações já existentes no solo (MELO et al., 2016).
- É desaconselhado a locação em áreas onde a inclinação do terreno seja superior a 5%, devido à maior velocidade potencial do escoamento superficial e menor chance de captura desta água pela superfície da trincheira (EPA, 1999)
- Solos naturais devem conter baixos teores de siltes e argila, a fim de proporcionar taxa de infiltração eficiente (MELO et al., 2016).

Recomendações de projeto:

- As dimensões mais comuns da trincheira são de 1 a 2m de largura e de 1 a 4m de profundidade (DUCHENE; MCBEAN; THOMSON, 1994).
- Considerar no projeto a distância entre o fundo da trincheira e o lençol freático, a fim de evitar contaminações e evitar o comprometimento da capacidade de infiltração. Quanto maior a distância entre o fundo da trincheira e o lençol freático,

maior a taxa de infiltração da água DUCHENE; MCBEAN; THOMSON, 1994).

- Como parâmetro no dimensionamento da trincheira é o tempo de esvaziamento do sistema, o qual indica o tempo que a água armazenada na camada inferior seja drenada para a interface sistema-solo natural (AKAN, 2002; CREACO; FRANCHINI, 2012; BROWNE et al., 2013).
- Melo et al., 2016 comentam que para a máxima capacidade de infiltração é necessário existir uma considerável área de infiltração e atentar para o tempo de esvaziamento do sistema. O melhor é que este tempo seja curto, proporcionando esvaziamento rápido. Há literatura que recomenda 48h (WASHINGTON DEPARTMENT OF ECOLOGY, 2014) e em outras 72h (DUCHENE; MCBEAN e THOMSON, 1994).
- Devem ser considerados os comportamentos dos fluxos das águas neste sistema de trincheira e os possíveis problemas, como erosão interna e perda da capacidade de infiltração do solo (MELO et al., 2016).

O custo da construção da trincheira de infiltração, em relação às técnicas tradicionais é inferior. Isto está relacionado principalmente ao fato da trincheira se manter em contato com o solo natural, evitando a necessidade de uso de elementos para vedação e isolamento, os quais são necessários em projetos de drenagem urbana convencional. Outro fato que diminui o custo desta técnica compensatória é a menor manutenção requerida e a não necessidade de muitos equipamentos. O objetivo da manutenção é evitar a acumulação de sedimentos na base da trincheira, os quais formam camada de colmatção. A recomendação é a de prever pré-tratamento das águas superficiais antes de adentrar no sistema. Por exemplo, com o uso de filtros, tanques de decantação entre outros. elementos de detenção (EPA, 1999; WASHINGTON DEPARTMENT OF ECOLOGY, 2014; MELO et al., 2016).

Parte II – Estudos de Caso em São Paulo/SP

Nesta parte II é apresentada a parte prática da pesquisa, realizada tanto por meio de estudos qualitativos quanto quantitativos. O aspecto qualitativo foi feito por meio dos estudos de caso de aplicabilidade do pavimento brando, integrado a uma Infraestrutura Verde na paisagem da mobilidade. Desta forma, procurou vislumbrar por meio de propostas de projeto como seria a inserção destas tecnologias no meio urbano, apresentados na seção 6. Tal fato é importante, pois fornece uma contribuição da visão aplicada do assunto para os pares da ciência, projetistas, tomadores de decisão e outros que se interessem pelo tema.

Por outro lado, considerou-se importante agregar ao trabalho aspectos quantitativos, para se ter uma dimensão da real contribuição das propostas deste trabalho no sentido de mitigar as

Ilhas de Calor em São Paulo/SP. Tal fato foi realizado por meio das simulações computacionais com o programa ENVI-met, tal como apresentado na seção 7. Desta forma, pode-se chegar a valores de quantos graus seria possível reduzir no ambiente urbano com a proposta de cada cenário idealizado, inserindo o pavimento brando, a vegetação e os dois juntos.

A realização desta parte prática de simulações foi sugestão da banca de qualificação de doutorado, e observamos que a incorporação destas simulações agregou muito ao trabalho, pois trouxe ordens de grandeza do real impacto positivo que as alterações propostas pelos pavimentos brandos e da Infraestrutura Verde podem trazer à paisagem do meio urbano e para o aumento da qualidade de vida da população.

Seção 6 - Estudo de caso: a aplicabilidade de pavimentos brandos no planejamento da infraestrutura verde de São Paulo/SP

No transcorrer dos estudos de doutorado foram desenvolvidos diversos trabalhos no laboratório LABVERDE. Estes foram parte da pesquisa intitulada “Infraestrutura Verde para a resiliência urbana às mudanças climáticas para cidade de São Paulo” (FRANCO, 2015). Para a execução dos estudos foi delimitado um retângulo conceitual sobre o qual foram idealizadas a “Trilha Norte-Sul” número 1 e a número 2 (figura 36). Tais “trilhas” foram pensadas a partir da mobilidade do cidadão paulistano ao longo de um percurso de cerca de 25km, da Serra da Cantareira até a calha do Rio Pinheiros, conectando parques e diversas áreas verdes importantes.

Figura 36 – Área de estudo

Parques objeto da área de estudo:

- 1- Horto Florestal,
- 2- Parque da Água Branca,
- 3- Trianon,
- 4- Ibirapuera.

Fonte: FRANCO (2015).

Na “Trilha Norte-Sul” número 1 foram desenvolvidos trabalhos que auxiliaram no desenvolvimento desta tese, como: (i) pavimentos brandos permeáveis e proposta de sua aplicação nas calçadas juntamente com as tipologias de IV (MARUYAMA & FRANCO, 2016), (ii) avaliação da qualidade da caminhada e propostas de seções viárias incorporando tipologias de IV (MARUYAMA & FRANCO, 2017), (iii) corredor de Infraestrutura Verde com rota cicloviária conectando parques (MARUYAMA, LEITE & DEUS, 2017). Estes trabalhos foram importantes para a construção da pesquisa da tese, no auxílio à elaboração do método de aplicação dos pavimentos brandos na paisagem, reflexões projetuais sobre a aplicabilidade do pavimento brando em conjunto com as tipologias de IV entre outros aspectos.

A seguir, serão apresentadas as proposições a respeito de como se inserir os pavimentos brandos e a IV na Paisagem Urbana nas vias, calçadas e ciclovias, elaboradas a partir de um estudo de caso no entorno do Jardim da Luz em São Paulo/SP. Esta região é a mesma adotada nos estudos das simulações computacionais da

seção 7. A figura 41 traz uma ilustração da localização do trecho de estudo, que se localiza sobre a “trilha” Norte-Sul número 2.

A região da pesquisa realizada na “trilha” Norte-Sul número 2 se localiza entre três subprefeituras: Bom Retiro, Sé e República, e possui diversos prédios e locais históricos, como por exemplo: o Parque Jardim da Luz e a estação de trem da Luz, o museu Pinacoteca do Estado e a igreja de São Cristóvão. Nas proximidades há também outros marcos, como o Mosteiro da Luz, o Museu de Arte Sacra e a Praça Coronel Fernando Prestes, onde se localizam prédios importantes, como o Comando Geral da Polícia, o Arquivo Histórico e a escola técnica Paula Souza. Nas figuras 42 e 43, temos uma vista da Estação da Luz e à direita com o Parque Jardim da Luz e a Pinacoteca do Estado.

Figura 37 - Localização da área de estudo

Legenda: 1 Rua São Caetano; 2 Rua Dr. Pedro Arbues.

Fonte: Prefeitura do Município de São Paulo (sem data) e editado pelas autoras (2019).

Figura 38 – Pinacoteca do Estado

Fonte: Laís Padilha Leite (2019).

Figura 39 – Estação de trem da Luz

Fonte: A autora (2019).

O Parque Jardim da Luz é a mais antiga área verde da cidade e inicialmente foi criado para ser um Jardim Botânico, concebido por iniciativa da Coroa Portuguesa, em 1798, e aberto ao público, em 1825 (MONUMENTOS SP, sem data). Em 1860, parte das terras foi cedida à estrada de ferro para a construção da Estação da Luz. No final do século XIX, outros lotes foram cedidos para a construção do Colégio Prudente de Moraes e do Liceu de Artes e Ofícios, atual museu Pinacoteca do Estado projetado por Ramos de Azevedo no fim dos anos de 1800.

O parque se tornou popular no governo de João Teodoro (1872 – 1875), quando foram incluídas reformas que tornaram o local uma área de lazer para os estratos abastados da população, local de passeio familiar e ponto de encontro dos passageiros que desciam da Estação da Luz (figura 44). A partir dos anos de 1970, o Parque Jardim da Luz começou a sofrer com a degradação da área do centro da cidade e então ficou repleto de prostituição, tráfico de drogas e outras atividades ligadas ao crime, ocorrendo então o afastamento da população. No final dos anos de 1990, o governo recuperou o local, executou obras de restauração e devolveu o espaço para a população (SÃO PAULO IN FOCO) (figura 45).

Figura 40 - Parque Jardim da Luz em 1908

Fonte: Guilherme Gaensly apud São Paulo in Foco (sem data).

Figura 41 - Parque Jardim da Luz atualmente

Fonte: a autora (2019).

Além disso a via principal, que corta a área, a Av. Tiradentes, é carregada de história e recebeu este nome em homenagem ao mártir da Inconfidência Mineira. Antigamente, ela era conhecida por “estrada real de Guarepe” e inicialmente abrigava a criação de

gado. No século XVIII, ela começou a ficar mais movimentada e nela foi erguido o Mosteiro da Luz. Relaciona-se a largura excepcional da via, larga para os padrões da época, como um sinal de importância comercial, como comenta o professor da FAU USP, Benedito Lima de Toledo (VEIGA, 2014).

No início dos anos de 1900, a Av. Tiradentes era muito diferente do que é hoje, dotada de intensa arborização de grande porte (figura 55). Atualmente, a maior parte das árvores cederam lugar às diversas faixas de veículos que ligam o Centro à Zona Norte de São Paulo e integram o Corredor Norte – Sul (figura 56), indicando que a administração pública tem se preocupado mais com o incentivo aos modais motorizados e individuais do que com os diversos benefícios que as árvores podem propiciar às pessoas e ao meio ambiente.

As figuras 46 e 47 ilustram a Av. Tiradentes sob ângulos que englobam a igreja de São Cristóvão em diferentes épocas, no início dos anos de 1900 e como está atualmente, ilustrando como a avenida era formada por alamedas como os canteiros centrais

arborizados com espécies de grande porte e posteriormente cederam lugar a muretas de concreto e faixas de veículos.

Figura 42 - Av. Tiradentes em 1905

Fonte: Guilherme Gaensly (1905) apud Folha de São Paulo (sem data).

Figura 43 - Av. Tiradentes atualmente

Fonte: Laís Padilha Leite (2019).

Outro fato que chama atenção é que região é bem servida de transporte de alta capacidade, pois conta com duas linhas de metrô, a linha 4 amarela e a 2 azul e rede ferroviária com estações de trem (figura 48).

Figura 44 – Ampliação da localização da área de estudo

Fonte: Prefeitura do Município de São Paulo (s/d); Autora (2019).

O objetivo proposto foi o de apresentar soluções para a adoção do pavimento brando em vias, calçadas e ciclovias, juntamente com o plantio de árvores e vegetação. Também, procurou-se incluir a

bicicleta nos espaços viários a fim de se estimular os modais não motorizados.

6.1 Metodologia de aplicação dos pavimentos brandos

Como indicado no início desta seção, foram executados diversos estudos preliminares ao desenvolvido da presente tese. Um dos méritos destes trabalhos foi o de amadurecer a metodologia a ser empregada para a aplicação dos pavimentos brandos e da Infraestrutura Verde na paisagem da mobilidade.

Na primeira proposta de projeto, no trabalho de 2016 (MARUYAMA & FRANCO, 2016), foi indicada uma aplicação dos pavimentos brandos e das tipologias de IV por meio de estudo em uma calçada (figura 38). Em 2017, outras versões de aplicação destes pavimentos brandos e das tipologias de IV foram testadas, com estudo de seção viária da rua toda, pois cada lado da calçada tende a ser diferente na complexidade da malha urbana e observou-

se que analisar apenas um dos lados pode tornar a proposta com uma visão limitada das possibilidades que o espaço pode oferecer (MARUYAMA & FRANCO, 2017; MARUYAMA, LEITE & DEUS, 2017).

Contudo, como uma evolução das propostas testadas anteriormente, entendeu-se que a análise ficaria mais eficiente se considerasse também as hierarquias viárias, pois para cada uma há diferentes propostas possíveis. Por este motivo, no presente estudo foi considerada a análise das proposições de acordo com cada hierarquia viária: para a via arterial, a coletora e a local, que depois seriam replicadas para as demais vias da área.

Os dados avaliados foram a largura total disponível no espaço viário, considerando o espaço existente de divisa a divisa de lotes, a existência de estacionamentos de veículos e se há a circulação ou não de ônibus no local, para analisar qual a largura necessária para as faixas veiculares. Outros fatos observados foram a presença ou não de rede aérea de fiação, que geram condicionamentos quanto ao porte das árvores possíveis de serem plantadas. Para realizar as proposições no espaço viário foram selecionadas vias na área de estudo.

A via arterial analisada foi a Av. Tiradentes, como coletora adotou-se a Rua São Caetano e pôr fim a rua local eleita foi a R. Dr. Pedro Arbues. A seguir serão realizadas descrições destes logradouros obtidas pela visita a campo e por análises a partir de imagens do *Google Earth* e *Google Maps* e serão feitas as propostas de intervenção. As medidas apresentadas das calçadas e das vias foram feitas a partir do MDC – Mapa Digital da Prefeitura de São Paulo (PREFEITURA DE SÃO PAULO, s/d), por *shapefiles* que foram exportadas do programa Quantum GIS para o AutoCAD, onde foram elaboradas as propostas e realizadas as medições. De modo geral procurou-se aumentar os espaços onde seriam possíveis plantar árvores de grande a médio porte, propiciar calçadas

adequadas para pedestres, pessoas com deficiência, ciclistas entre outros, conforme descrito na seção 2 e assim incentivar a mobilidade não motorizada.

6.2 Propostas viárias

Com relação aos pavimentos nas três vias analisadas estes são atualmente asfálticos nas faixas veiculares e de concreto nas calçadas. Nas vias sugere-se a aplicação de pavimento brando tipo PAR de concreto de cimento branco, para ajudar na mitigação de Ilhas de Calor. Outra vantagem deste tipo de pavimento é auxiliar na economia de eletricidade, pois ele reflete melhor a iluminação noturna e requer menor quantidade de iluminação para clarear o ambiente. Nas calçadas, a sugestão é o uso de pavimentos permeáveis na cor amarela e nas ciclovias e ciclofaixas concreto permeável na cor vermelha.

A seguir serão apresentadas propostas viárias de aplicação dos pavimentos brandos de acordo com as hierarquias viárias.

6.3 Proposta para via arterial

A via arterial escolhida, a Av. Tiradentes, se apresenta da seguinte forma: ela possui faixa exclusiva de ônibus em uma das faixas, calçadas largas e pouca arborização de modo geral. A travessia dos pedestres é difícil porque ela precisa cruzar até quatro faixas de veículos em cada trecho até chegar num canteiro central, o que gera insegurança. Outro fato que dificulta as travessias é que os locais onde isto é possível são distantes, há uma passarela próxima à estação de metrô Luz e depois há um cruzamento com semáforo distante, localizado a aproximadamente 420m. Esta medição foi feita aproximadamente pelo *Google Earth*.

No local, também há a presença de muretas de concreto dividindo o fluxo entre cada sentido de circulação dos automóveis e separando faixas locais de outras mais rápidas. A topografia se apresenta plana, o que torna possível a instalação de jardins de chuva e favorece a caminhada e pedalada. A figura 49 ilustra a posição em que foi feita a seção da avenida para as propostas e a figura 50 indica a seção viária atual da Av. Tiradentes, com quatro

pistas para veículos e dois canteiros centrais com árvores no trecho onde a seção foi traçada.

A proposta para a Av. Tiradentes prevê a redução das faixas veiculares para que sejam alocados canteiros, que funcionam como jardins de chuva ou biovaletas, para ajudar no manejo das águas da chuva e para onde seria direcionada a água das vias. Ali, seriam plantadas as árvores de grande e médio porte para o esforço de redução das ICU (figura 51). A decisão sobre a possibilidade de serem implantadas biovaletas ou jardins de chuva dependeriam de projeto paisagístico mais aprofundado, que analisasse as características geotécnicas do solo quanto ao grau de infiltração, além da consideração da topografia do local. Tal recomendação é válida na via coletora e local, onde também foi indicado o jardim de chuva.

Por outro lado, incentivar a caminhada nesta avenida é interessante devido aos diversos marcos históricos e culturais instalados ao longo do percurso e, por isso, seria muito estimulante a presença das árvores para favorecer estes deslocamentos a pé. As tipologias de Infraestrutura Verde trabalhariam em conjunto com a rede de drenagem tradicional, conectando-se a galerias pluviais.

Outro fato positivo da instalação dos canteiros centrais seria o do estreitamento das vias, o que facilitaria e tornaria mais segura a travessia dos pedestres. Seria priorizado o transporte coletivo por meio do corredor de ônibus para compensar a retirada das faixas veiculares, hoje este corredor não existe e seria uma alternativa relativamente de baixo custo que poderia ser implantado em curto a médio prazo. Deve-se considerar que a área é bem servida de transporte de massa, pois possui uma linha de trem e duas de metrô. Contudo esta proposta se trata de uma diretriz projetual, pois a implantação de fato requer estudos complementares de capacidade viária e outros de Engenharia de Tráfego para analisar a quantidade

de faixas passível de ser reduzida sem causar muitos prejuízos à mobilidade urbana. A inclusão de ciclovia também beneficiaria o transporte cicloviário, interessante para a área pela topografia de baixa declividade. Esta ciclovia foi posicionada ao lado da calçada para que o ciclista tenha maior possibilidade de acessar os edifícios.

Figura 45 - Localização da seção da Av. Tiradentes

Fonte: Autoras (2019).

Figura 46 – Av. Tiradentes seção atual

Figura 47 – Av. Tiradentes seção proposta

Legenda: 1 calçada; 2 corredor de ônibus; 3 ciclovia; 4 jardim de chuva, 5 rede de drenagem tradicional
Fonte: autoras (2019).

6.4 Proposta para a via coletora

A via coletora eleita para o estudo, Rua São Caetano, é marcadamente comercial, com lojas voltadas para eventos de casamento e, por isto, é conhecida como “rua das noivas”. Há a presença de edifícios de dois a três pavimentos, com raras exceções de prédios mais altos. Nos andares superiores os usos são geralmente residenciais. A via é larga, o fluxo veicular é em apenas um sentido, há a circulação de ônibus e existe a presença de estacionamento de veículos nos dois lados rua (figura 52). As calçadas são estreitas, do lado esquerdo com 2,14m e do lado direito com 2,56m, mas no dia da visita verificou-se pouco fluxo de pedestres, sendo assim estão suficientes (figura 53). Atualmente o cenário é árido com pouquíssima arborização. Os pavimentos são asfálticos e as calçadas de concreto.

Figura 48 - Rua São Caetano e suas faixas de estacionamento

Fonte: Google Earth Pro (2019).

Figura 49 - Calçadas da Rua São Caetano

Fonte: Cíntia Miua Maruyama (2019).

A intervenção proposta prevê o plantio de árvores em ambos os lados da via sobre o local onde hoje há o estacionamento, pois, as calçadas são estreitas e não comportam tal plantio (figura 54). Além disto, também se propõe a execução de ciclofaixa ao lado da calçada, protegida pela faixa vegetada dotada de biorretenção sobre a qual será plantada a arborização. Tais mudanças serão possíveis devido a retirada de estacionamento dos dois lados. Em contrapartida deve ser prevista a instalação de estacionamentos próximos a esta via para não prejudicar o comércio. Sobre esse aspecto da mobilidade, pondera-se que a região é bem servida de transporte público de alta capacidade, pois lá existem duas linhas de metrô e outra de trem, que acabam sendo mais vantajosos para os clientes das lojas locais utilizarem a fim de evitar os engarrafamentos e a dificuldade de estacionamento por ser região central (figura 48).

Sendo assim, a retirada dos estacionamentos é justificável, tendo em vista os diversos benefícios ambientais e de melhoria de qualidade de vida advindos da intervenção proposta. As árvores a serem plantadas serão de porte médio, para isto sugere-se enterrar rede aérea da fiação existente. É importante procurar dotar a cidade

do máximo de árvores possível, pois cada via onde elas estão presentes em abundância equivalem a pequenas praças.

Se multiplicarmos então o plantio das árvores no máximo de ruas pela cidade, o efeito climático seria extremamente benéfico, maior do que se instalar uma praça por bairro, ou um grande parque em áreas pontuais, porque o efeito de arrefecimento das temperaturas do parque ou praça limita-se às suas bordas. Santamouris (2001) analisou o papel das áreas verdes no tecido urbano e verificou que as árvores provocam uma sensação de frescor devido à evapotranspiração. Mas o mesmo autor indicou que os trechos arborizados exercem influência apenas no seu arredor e seria necessário a execução de diversas áreas verdes, distribuídas no espaço urbano para um melhor aproveitamento sobre o clima das cidades. Um exemplo de aplicação desta ideia seria a arborização intensa nas vias, tal como proposto na presente seção desta tese. Tal fato será discutido com mais profundidade na seção 7, nas simulações computacionais com o ENVI-met.

A figura 54 apresenta a seção existente na via e a figura 55 a proposta de como ficaria a Rua São Caetano, com as árvores plantadas na via e a ciclofaixa. Na figura 55 também é possível observar a rede coletora de água pluvial que continuaria existindo

em conjunto com os jardins de chuva alocados nas caixas de plantio das árvores. Isto reside no fato da taxa de urbanização e de impermeabilização com pavimentos impermeáveis serem altos, então não se considera que os jardins de chuva suportem absorver todos os escoamentos incidentes neste trecho. A figura 56 indica a vista aérea idealizada na mesma rua, destacando as árvores que ficariam sobre a via.

O papel esperado destes jardins de chuva da arborização e da instalação dos pavimentos permeáveis é o indicado por Pellegrino (2017), com a redução dos escoamentos na fonte, nos pontos mais altos e na meia encosta, colaborando para diminuir a sobrecarga dos sistemas tradicionais de drenagem e assim ajudando a evitar alagamentos e enchentes. A figura 57 mostra uma vista área da proposta, da relação das bocas de lobo que continuariam coexistindo com os jardins de chuva e a arborização. Trata-se apenas de uma figura ilustrativa da proposta, para detalhamento do projeto seria necessário, projeto de drenagem e outros de Engenharia.

Com relação às análises do porte da árvore a se plantar, conforme a tabela 3 na seção 2 (MASCARÓ, 2005), devem ser considerados os seguintes aspectos: a largura da rua e da calçada e

se as construções estão no alinhamento predial ou se existe recuo. Na área em questão a faixa viária teria menos que 6m de largura. De acordo com a tabela 3, é possível plantar árvores de pequeno porte, mas para maior efeito de combate às ICU e considerando que neste caso está sendo prevista a retirada da fiação aérea, enterrando-a em galerias, foi proposta arborização em porte médio.

Na caixa de plantio das árvores também haveria faixa permeável de 1,50m com jardim de chuva. Sobre estas caixas de plantio podem ser previstas grelhas metálicas para reter a poluição difusa que ocasionalmente possa ocorrer, como copinhos e garrafinhas plásticas jogados na rua (figura 58). Como observação, considera-se que o projeto efetivo da aplicação das tipologias de IV no sistema viário precisa levar em conta os aspectos mencionados na seção 6, elaborando um zoneamento ambiental e analisando os compartimentos existentes a fim de se obter os resultados positivos esperados.

Figura 50 – Rua São Caetana seção existente

Legenda: 1 estacionamento; 2 faixas veiculares.

Fonte: Autoras (2019).

Figura 51 – Seção proposta R. São Caetano

Legenda: (01) = árvore plantada na via.

Fonte: As autoras (2019).

Figura 52 – Vista superior proposta R. São Caetano

Fonte: Autoras (2019).

Figura 53 – Vista superior de esquema da relação dos bueiros e da arborização proposta

Legenda:

A= Rampas nas calçadas;

B= Bocas de lobo;

C = biorretenção na calçada;

D = biorretenção na via.

Todas as árvores neste exemplo estão plantadas na via.

Fonte: as autoras (2019).

Figura 54 – Grelha em árvore em Paris

Fonte: Cíntia Miua Maruyama (2019).

Na visita em campo observou-se pouca presença de arborização, a presença de estacionamento de carro na rua em um dos lados, e não há a circulação de ônibus (figura 59).

As poucas árvores que existem estão plantadas em condições inadequadas com canteiros muito pequenos que provavelmente limitaram o crescimento sadio das raízes. Além disto algumas foram podadas de forma drástica por estarem em conflito com a fiação aérea, sendo assim é possível que muitas destas árvores estejam em más condições de saúde e possam até oferecer risco. A topografia é plana. A figura 60 ilustra a seção viária existente na rua estudada.

6.5 Proposta para via local

A rua local R. Dr. Pedro Arbues também possui edificações de altura mediana, de em média dois a três pavimento, uso misto, no térreo comercial e nos pavimentos acima residenciais. À semelhança da Rua São Caetano, o tipo de comércio desta via também é relacionado à casamentos, mas com lojas mais simples.

Figura 55 – Rua Dr. Pedro Arbues

Fonte: maps Google (2017).

A proposta para a R. Dr. Pedro Arbues previu a ampliação das calçadas para que possam receber a arborização. Atualmente, uma calçada se apresenta com 3,05m de largura e a outra com 2,60m. A proposição considerou ampliar as calçadas para 3,75m para ser possível receberem arborização de pequeno porte, a qual seria instalada entre a faixa livre e a de serviço.

Nestes espaços de plantio das árvores também haveria jardins de chuva (figura 61). A rede aérea de fiação seria enterrada para não conflitar com as árvores. Outra alternativa seria também não usar da simetria de plantio e local as árvores apenas do lado onde não há fiação. Como não há circulação de ônibus no local não seria um problema a redução da largura das faixas veiculares para 2,80m cada, ficando 5,60m no total da calha viária.

Áreas de estacionamento devem ser previstas para não prejudicar o comércio local já que a faixa destinada aos carros estacionarem seria retirada para permitir o alargamento das calçadas para o plantio das árvores. Como na proposta, restou um espaço limitado de faixa veicular e neste local não há circulação de ônibus, recomenda-se estabelecer a velocidade máxima como 40 km/h e não delimitar ciclofaixa, pois nestas condições a bicicleta poderia circular juntamente com os carros.

As figuras 62 e 63 trazem ilustrações de como ficaria a proposta viária, com a tipologia de jardim de chuva na área permeável das árvores e os pavimentos permeáveis em cor clara como o amarelo. A ideia é que a tipologia auxilie o sistema

tradicional de drenagem, coletando a água da calçada e a água pluvial das vias seja direcionada para a rede de drenagem tradicional. Outra vantagem do jardim de chuva é o de filtrar a poluição difusa e ajudar na melhoria da qualidade da água que infiltra no solo. Novamente neste caso, o pavimento da via seria o de concreto brando PAR.

Figura 56 – Seção existente na Rua Dr. Pedro Arbues

Legenda: 1 estacionamento; 2 faixa veicular.
Fonte: autoras (2019).

Figura 57 - Seção da Rua Dr. Pedro Arbues proposta

Legenda: A = árvores plantadas na calçada com jardim de chuva; B = calçada;
C = estrutura de biorretenção.
Fonte: as autoras (2019).

Figura 58 – Vista superior proposta R. Dr. Pedro Arbues

Fonte: as autoras (2019).

Figura 59 – Ampliação da proposta da R. Dr. Pedro Arbues

Legenda: A = árvores plantadas na calçada com jardim de chuva
Fonte: as autoras (2019).

Seção 7 Simulações computacionais: estudo de caso no entorno do Parque da Luz

Nesta seção serão apresentados os aspectos quantitativos da pesquisa, realizados utilizando as simulações computacionais no programa ENVI-met, a fim de mensurar os benefícios que os pavimentos brandos e a arborização podem trazer para a mitigação das ICU. Serão feitos comentários de como se definiu a área de estudos, apresentação geral desta área, comentários sobre o funcionamento do programa ENVI-met, metodologia empregada, explicação sobre os cenários ambientais simulados e os resultados obtidos por meio de tabelas, gráficos e mapas. Basicamente foram testados dois cenários em épocas do ano distintas, um de verão e outro de inverno, para observar o comportamento dos pavimentos brandos e das árvores para efeito o de arrefecimento das temperaturas do ar e de superfície.

7.1 Apresentação da área de estudo

Inicialmente apresentaremos breve comentário sobre como se chegou à determinação da área foco de estudos desta tese. Neste sentido, é importante destacar um estudo realizado durante o doutorado, que se voltou para a análise de ICU em São Paulo. Na ocasião, foi observado existirem diferenças de temperatura de 8,5°C entre o bairro da Bela Vista e a Reserva da Cantareira (Zona Norte)²³, medidas de temperatura observadas a partir de um mapa de temperatura de superfície de 1999 (MARUYAMA, 2019).

No mesmo trabalho foram feitas algumas reflexões dos motivos para haver diferenças tão grandes entre estes locais. Entre

²³ Entre a Bela Vista e a Serra da Cantareira a distância aproximada é de 13km, medida feita em linha reta no programa *Google Earth Pro* (nota da autora).

outros aspectos foi mencionado que a presença de corpos d'água e de vegetação (principalmente árvores) são fatores importantes, pois os processos de evaporação da água e de evapotranspiração das plantas retiram calor do ambiente e ajudam a reduzir a temperatura. Dobbert (2019) realizou estudo sobre os tipos de cobertura no Parque da Cantareira, incluindo uma *buffer zone* de 1km ao redor do mesmo, e concluiu que a cobertura arbórea representa 46,10% do total da área analisada, fato bastante significativo. Apenas como comparação, em 1985, Lombardo detectou diferenças de temperatura de 10°C, mas entre pontos da RMSP entre o centro e áreas rurais, já naquela época observando a presença da Ilha de Calor em São Paulo, como mencionado na seção 3.

No estudo de Maruyama (2019) foram analisados pontos da cidade ao longo da “trilha” Norte-Sul²⁴ e observou-se que nos locais mais impermeabilizados, e com menos arborização e vegetação, ocorriam ICU. Na época deste trabalho foi adotado para a análise das ICU o mapa de temperatura de superfície da Secretaria do Verde e do Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de São Paulo, de 1999 (figura 64), elaborado a partir de imagem do satélite LANDSAT 7, de 1999. Entretanto, mais tarde foram localizados trabalhos com mapas mais recentes, como o de Barros e Lombardo (2016) e o de Mendes et al. (2018). Este último foi fundamental pois trouxe uma imagem mais recente da ICU paulistana, pois utilizou imagem do LANDSAT 8 de 2018, tal como comentado na seção 3, item 3.9.

²⁴ O estudo foi feito na “trilha” Norte-Sul número 1, onde se concentraram as pesquisas do doutorado, tal como explicitado na seção 7.

Figura 60 – Mapa de temperatura de superfície com indicação de Ilhas de Calor em São Paulo/SP

Fonte: Secretaria do Verde e do Meio Ambiente (1999); Prefeitura de São Paulo (s.d) e editado pelas autoras.

A partir da análise do mapa de temperatura de superfície de Mendes et al. (2018) e da metodologia de Barros e Lombardo (2016), de verificação da potência de Ilhas de Calor forte, moderada e Ilha de Frescor, tal como indicado na seção 3, foi escolhido o local onde seria realizado o estudo de caso para as simulações computacionais da presente tese (Figura 65). Nesta área foi identificada a presença de Ilha de Calor moderada, além disto, há também uma área densamente arborizada (Parque da Luz) que apresenta temperaturas bem mais baixas devido à presença intensa de arborização, desta forma seria possível fazer a comparação de temperatura entre os trechos pavimentados e os arborizados. O trecho escolhido se situa sobre a “Trilha Norte-Sul” número 2, conforme explicado na seção 6.

A figura 66 traz uma imagem da área de estudos, identificada como o retângulo preto, sobre o mapa de temperatura em relação aos bairros de entorno. Nesta imagem pode-se observar manchas com alta temperatura, na faixa máxima de 28,1°C em locais como

Santana, Pari, República e Sé. Dentro da delimitação da área de estudos, observa-se que na região do Parque da Luz ocorreram as menores temperaturas, de cerca de 23°C. Nota-se também dentro da área de estudos trechos com alta temperatura, de cerca de 28,1°C. Sendo assim neste local foram encontradas diferenças de temperatura de 5,1°C, o que denota a existência de Ilha de Calor moderada (BARROS & LOMBARDO, 2016)²⁵.

A escolha do enquadramento da área de estudos teve como balizadores os seguintes aspectos: o seu tamanho e forma, a localização da via principal (a Av. Tiradentes, elegida para os estudos) no centro da área, para evitar erros de borda na simulação e a existência de Ilha de Calor moderada a forte. Como o programa é microclimático, o tamanho da área de estudos recomendado para otimizar o tempo de simulação²⁶ corresponde, em torno de, no máximo 600m x 600m, e esta foi a dimensão aproximada adotada. É possível simular áreas com no máximo 2000m x 2000m, mas isto não é recomendável devido ao grande tempo necessário para

²⁵Conforme indicado na subseção 4.8.1, quando existe uma diferença de temperatura $5^{\circ}\text{C} < \Delta T < 7^{\circ}\text{C}$ a ilha de calor é considerada moderada (BARROS & LOMBARDO, 2016).

²⁶O tempo de processamento também é influenciado pela configuração do equipamento utilizado na simulação. Foram empregadas máquinas virtuais com

configuração de, por exemplo, Intel(R) Xeon(R) CPU E7-2870 com 2.40 GHz (8 processadores em cluster), com 32 GB de memória RAM, com isto o tempo de processamento foi de aproximadamente três dias para cada cenário.

processamento de cada simulação, além do grande tamanho dos arquivos gerados e dificuldade de processamento destes dados. Além disto, a forma deveria ser quadrada, pois o programa trabalha com área de grids de dimensões iguais no eixo x e y.

Figura 61 – Localização da área de pesquisa no mapa de temperatura do município de São Paulo

Legenda:

A – Pesquisa FAPESP no contexto do município;

B – As “Trilhas Norte-Sul 1 e 2” no retângulo da pesquisa FAPESP;

C – Área de pesquisa do entorno do Parque da Luz em relação às “Trilhas Norte-Sul 1 e 2”

Fonte: Prefeitura de São Paulo (s.d); Mendes et al.. (2018); editado por Mendes (2019) e pela autora.

Figura 62 - Área de estudo no mapa de temperatura e os bairros de entorno

Seção 7 - Simulações computacionais: estudo de caso no entorno do Parque da Luz

Fonte: Prefeitura de São Paulo (s.d); Mendes et al. (2018); editado por Mendes (2019) e pela autora.

A figura 67 ilustra uma imagem de satélite da área de estudo, onde pode-se observar a alta ocupação por edificações, que as vias são praticamente todas impermeabilizadas por pavimento asfáltico e a baixa cobertura vegetal das vias. As calçadas são em sua grande maioria de concreto do tipo comum. O destaque de fragmento verde fica por conta do Parque da Luz.

O local também conta com diversos estacionamentos de pavimento asfáltico. Outro fator a colaborar com o aquecimento da região são as coberturas, pois muitas são do tipo metálica sem revestimento, sendo, portanto, com baixa emissividade e por isso acumulam calor. Conforme Gartland (2010) para a cobertura ser mais fresca ela precisa ter tanto alto albedo quanto elevada emissividade. Além disso, as demais coberturas existentes são de fibrocimento já envelhecidas, portanto, de baixo albedo.

Figura 63 – Caracterização da área de estudo

Fonte: Google Earth (2018)

7.2 Simulações computacionais no ENVI-met

O tecido urbano apresenta uma diversidade de tipos de superfície, devido à troca dos materiais naturais por outros artificiais, o que provoca a alteração na rugosidade da superfície e em suas características, como o albedo e emissividade, fatores que influenciam na formação das ICU. Particularmente, o uso dos pavimentos de baixo albedo e a existência de pouca cobertura vegetal tende a levar a alterações negativas no microclima urbano, como a maior concentração de poluentes e de calor (ASSIS, SIRQUEIRA & BAMBERG, 2013). Em Kassel, na Alemanha, uma experiência mediu temperaturas superficiais e do ar a 40cm de altura sobre amostras de diferentes tipos de revestimentos urbanos em condições microclimáticas idênticas, que resultaram em grandes variações de até 10°C na temperatura de superfície destes materiais (KATSZCHNER, 2010).

O programa ENVI-met é um simulador ambiental em três dimensões projetado para simular as interações entre a superfície, a vegetação e atmosfera no meio urbano, permitindo que sejam inseridos elementos vegetados, pavimentos e outros alterando a

morfologia da área estudada. Ele é baseado nas leis fundamentais da dinâmica dos fluidos e termodinâmica (ENVI-met, sem data). Ele calcula o balanço de energia para ondas curtas e longas utilizando dados climáticos, como: a direção e a velocidade do vento (m.s^{-1}), a radiação global (W.m^{-2}), a temperatura do ar (K), a umidade relativa (%) e a umidade específica do ar (g.kg^{-1}) (BRUSE; FLEER, 1998). Para a visualização em forma de figuras dos resultados gerados a partir das simulações durante a instalação do ENVI-met, é possível instalar o programa Leonardo, que se trata de um visualizador gráfico em forma de mapas dos arquivos binários gerados pelas simulações computacionais (MENDES et al., 2014).

7.3 Pesquisas com simulação ambiental com ENVI-met e Infraestrutura Verde

O programa ENVI-met tem sido utilizado por diversos pesquisadores para estudar as influências climáticas das alterações feitas pelo Homem nos ambientes externos, tanto no Brasil quanto no exterior, com cenários ambientais diversos. Em termos nacionais, uma pesquisa avaliou as alterações microclimáticas ocorridas numa praça em Piracicaba/SP devido à retirada de cerca

de 25% das árvores e alteração dos pisos de cores claras para asfalto. Os resultados indicaram que tais modificações implicaram em aumento de temperatura de 0,5°C e redução da umidade relativa do ar (MENDES et al., 2015).

Duarte (2015) propôs cenários idealizados com diferentes distribuições de verde, mas com a mesma densidade construída para uma área na capital paulistana, (b) um parque com 1ha com árvores numa área central, (c) a mesma área verde distribuída em pequenos parques, (d) a mesma área de vegetação agora distribuída ao longo da arborização ao longo das vias nas quadras. O cenário (d) foi o que apresentou os melhores resultados, tanto em distribuição com efeito oásis com distribuição mais homogênea de temperatura, quanto em redução de temperatura, de até 0,6°C em relação ao cenário original (simulação no verão em fevereiro às 15h00). Este estudo mostra a importância da arborização viária no sentido de amenizar as temperaturas, por ter uma potencialidade maior do que parques isolados em refrescar o ar nas cidades e criar condições de conforto térmico aos pedestres.

Outro estudo brasileiro avaliou a relação em termos de desenho urbano, de densidade construída e o microclima. Utilizando o programa ENVI-met V.4, o cenário paramétrico para um trecho em São Paulo com torres reduziu a temperatura do ar em 0,6°C no nível do pedestre (15h00) e em cerca de 1,4°C a menos no período noturno (GUSSON, 2014). Isto mostra que também pode-se unir às estratégias de pavimentos brandos, vegetação e coberturas frias novos arranjos geométricos das edificações para combater as ICU.

Como indicado na seção 3, o município de São Paulo localiza-se na latitude 23°32' S e longitude 46°38' W entre as cotas 720 e 850m de altitude, com uma população estimada em 2019 de 12.252.023 pessoas e densidade demográfica de 7.398,26 hab/km² (IBGE CIDADES, sem data). Como efeito comparativo serão apresentados outros estudos feitos com o ENVI-met com o objetivo de reduzir temperaturas em outros países, conduzido em cidades também de tamanho grande e que utilizaram cenários ambientais com a Infraestrutura Verde.

Em Hong Kong, latitude 22° 17' N e longitude 114°09' E, altitude a 3m do nível do mar, com população de 7 milhões de habitantes (NG et al., 2012a) o programa ENVI -met foi empregado juntamente com dados coletados em campo, para simular situações com diferentes alturas de prédios e estratégias de arborização diversas e seus efeitos no microclima urbano. Trata-se de uma cidade de alta densidade, onde a vegetação ajuda no resfriamento e provisão de sombreamento para o pedestre, embora possua uma taxa baixa de verde por habitante, de 2m² per capita. O trabalho concluiu que uma ocupação de 33% das árvores em relação a área urbana resulta em redução de 1°C na temperatura do ar. Também observaram que se aumentassem 16% da arborização na área total analisada a redução de temperatura seria de 0,4°C e se o aumento fosse de 56% a queda seria de 1,8°C (NG et al., 2012).

A região metropolitana de Colombo no Sri Lanka está localizada na latitude 6°56' N e longitude 79°50' E, numa cota aproximada a 1m do nível do mar e com uma população de 5,6 milhões de habitantes. Num cenário simulado no ENVI-met (V4) em que inseriam árvores nas esquinas, conseguiram arrefecimento de temperatura do ar de 1,87°C no horário mais quente às 15h00 num dia escaldante de verão (HERATH; HALWATURA;

JAYASINGHE, 2018). Na cidade de Kaohsiung (Taiwan), (22°6'N, 120°00 E) com área de 23,90 ha e uma população de 2,77 milhões de pessoas foi conduzido outro estudo com simulações em CFD no programa ENVI-met. Os pesquisadores observaram ser possível reduzir 0,15°C na temperatura no nível do pedestre para cada aumento de 10% de árvores nas ruas e para abaixar 1°C seria preciso haver ao menos 26% da área total arborizada (HUANG; CHEN, 2020). A tabela 11 sintetiza os estudos analisados com o ENVI-met tanto nacionais quanto estrangeiros.

Tabela 11 - Estudos no ENVI-met

Autor	Modificação de temperatura	Alteração	Local do estudo
Mendes et al. (2015)	0,5°C – aumento de temperatura	Retirada de 25% das árvores e alteração de pavimento de cor clara para asfalto	Piracicaba/SP
Autor	Redução de temperatura	Técnica de mitigação	Local do estudo
Gusson (2014)	0,60°C (dia) 1,40°C (noite)	Geometria das edificações em torres	São Paulo/SP
Duarte (2015)	0,60°C	Arborização viária	São Paulo/SP
Estrangeiros			
Ng et al. (2012)	0,40°C – 16% área arborizada 1°C – 33% da área arborizada 1,8°C – 56% da área arborizada	Arborização	Hong Kong população de 7 milhões de habitantes
Autor	Redução de temperatura	Técnica de mitigação	Local do estudo
Herath; Halwatura; Jayasinghe (2018)	1,87°C – arborização nas esquinas	Arborização	Colombo no Siri Lanka, população de 5,6 milhões
Huang & Chen (2020)	0,15°C a cada 10% de arborização 1°C com 26% de arborização	Arborização	Kaohsiung (Taiwan), população de 2,77 milhões de pessoas

Fonte: Mendes et al. (2015); Gusson (2014); Duarte (2015); Ng et al. (2012); Herath; Halwatura; Jayasinghe (2018); Huang & Chen (2020) e organizado pelas autoras.

7.4 Estudos com infraestrutura verde e outras simulações

A diminuição da temperatura do ar pela infraestrutura verde (arborização urbana) também tem sido alvo de estudos. Em Tel-Aviv, Israel, uma pesquisa avaliou a temperatura de ruas arborizadas, pequenas praças e espaços verdes, considerando o efeito do resfriamento do ar causado pelas árvores e pelo sombreamento dos edifícios. Para isto, instalaram equipamentos receptores de medição de temperatura, umidade e outras variáveis climáticas ao longo das áreas estudadas e utilizaram os dados obtidos para os cálculos de atenuação de temperatura. Adotaram modelo empírico a partir de contas feitas por múltiplas regressões lineares (SHASHUA-BAR & HOFFMAN, 2000).

Os achados indicaram que, para o horário das 15h00 de verão, as vias tinham taxa de sombreamento médio de 60% e a redução média de temperatura do ar foi de 3°C. As vias com tráfego pesado tiveram quedas menores de temperatura, de cerca de 1°C, o que indica o efeito negativo dos carros na formação das ICU. No mesmo

trabalho se verificou que 80% da atenuação de temperatura do ar foi atribuído ao sombreamento arbóreo (SHASHUA-BAR & HOFFMAN, 2000).

O mesmo trabalho também observou que as pequenas áreas verdes em intervalos suficientes são preferíveis para a redução de temperatura à existência de grandes áreas vegetadas. Isto sugere a importância da arborização urbana, que se equivale à instalação de diversas pequenas praças na malha urbana. Com tal inserção o efeito de amenização da temperatura seria espalhado pela cidade, ao invés de se concentrar nos arredores dos grandes parques. O efeito do resfriamento dos arredores devido à existência das áreas verdes foi percebido até cerca de 100m de distância (SHASHUA-BAR & HOFFMAN, 2000).

Outro trabalho que envolveu simulações computacionais para o cálculo do resfriamento propiciado pela arborização, aumento de albedo de telhados e pavimento foi o de Rosenfeld et al (1998). No caso a área de estudo era de 25% da cidade de Los Angeles, 2500km². Estimaram plantar árvores em 22%²⁷ da área total (11

²⁷ Este cálculo foi feito a partir das informações dadas no texto de Rosenfeld et al. (1998) que cada copa de árvore teria 50m², que seriam plantadas 11 milhões de árvores e da área de estudo de 2500km² (nota das autoras).

milhões de árvores), elevar o albedo de telhados e pavimentos. Com o plantio das árvores apenas a redução térmica seria de 1,5°C e acrescentando a modificação dos pavimentos e telhados para materiais mais claros, haveria mais 1,5°C de refrescamento na temperatura do ar. No caso foi proposto elevar o albedo dos telhados de 5000 casas (40% da área de estudo) de albedo médio de 0,15 para 0,50. Também a substituição de 1250km² dos pavimentos de asfalto (albedo 0,05) para outro com albedo maior de 0,30 (pavimento de concreto ou asfalto pigmentado). Então somando todos os fatores de ataque às ICU, a redução total possível seria de 3,0°C (Ibidem).

A falta de vegetação nas urbes é um dos fatores que prejudica a qualidade ambiental pois impõe modificações no seu microclima, na medida que altera a umidade relativa e a temperatura do ar (DOBBERT, 2019), como visto anteriormente. O verde nas cidades deve ser visto além da importância da melhoria no clima, é uma importante ferramenta que ajuda a restabelecer a conexão do Homem com o ambiente natural (DOBBERT, 2019).

7.5 Materiais e métodos das simulações

As simulações utilizaram equipamentos de duas máquinas virtuais executadas simultaneamente porque, devido às limitações do programa, só é possível executar um trabalho (*job*) por vez, caso contrário uma simulação derruba a outra, inviabilizando todo o processo. Outro fator a considerar para esta opção foi o prazo de trabalho, pois cada simulação demorou de cerca de 84 a 100 horas em média. Como, a princípio, foram estipulados oito cenários, executar o trabalho em duas máquinas foi uma forma de otimizar o tempo para esta etapa da pesquisa.

A primeira máquina virtual adotada foi a da Cidade Universitária da Universidade de São Paulo utilizando os recursos da Superintendência de Tecnologia de Informação, na versão de acesso gratuito com configuração de 2 núcleos, 2vCPU 2.3Ghz,

4GB de RAM. Completava o *cluster* um *filesystem* com 100 GB de memória para arquivos temporários. A segunda máquina virtual foi utilizada via ESALQ/USP - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e se tratava de um equipamento Intel(R) Xeon(R) CPU E7-2870 com 2.40 GHz (8 processadores em cluster), com 32 GB de memória RAM.

A título de ilustração da necessidade de uso das máquinas virtuais, uma simulação foi feita no notebook pessoal. A configuração era de um processador Intel core i3, com 6 GB de memória RAM, HD de 500 GB para arquivos temporários. Esta demorou 107 horas para a sua finalização, devido ao tempo que o computador hibernava durante a noite.

Para realizar as simulações computacionais no programa ENVI-met uma das informações necessárias é a escolha das datas das simulações, para que em cada dia elegido sejam calculados e inseridos os respectivos dados climáticos requeridos pelo *software*. O dia escolhido deve ter atmosfera neutra, ou seja, sem chuva (MENDES et al., 2014). Sendo assim, inicialmente serão realizados comentários a fim de justificar a escolha das referidas datas para as simulações.

7.5.1 Días das simulações escolhidos

Tal escolha se apoiou em informações que indicassem as condições climáticas adversas e que o organismo humano entra em estresse e pode, até, desenvolver doenças. Acrescenta-se o fato de que as condições de vento também influenciam na saúde humana, pois ele ajuda a dispersar os poluentes e, então, a propiciar um ambiente com menor quantidade de poluição. Tal fato é importante, pois a área de estudo é cortada pelo corredor viário Norte-Sul, onde circulam diariamente uma enormidade de veículos, além de estar numa área central do município onde normalmente se concentra muita poluição no ar.

Em condições normais de saúde e conforto térmico, a temperatura média normal de um adulto situa-se em torno de 36,5°C e 37°C, quando medida por via oral. Alterações neste intervalo podem ser ocasionadas por práticas de atividade física (origem metabólica) ou externa, como fatores climáticos e de vestuário. Quando isto ocorre, mecanismos termorreguladores agem para reequilibrar a produção e eliminação do calor, mantendo a normotermia (GUYTON & HALL, 2006; BASTOS et al., sem

data). O limite mínimo para sobrevivência é de 32°C e o máximo 42°C em estado de enfermidade (FROTA & SCHIFFER, 2003).

A temperatura do ambiente exerce influência sobre a perda de calor do corpo, quando a temperatura cutânea está mais elevada do que a do ambiente, ocorre a perda de calor por radiação (por meio de ondas eletromagnéticas), por convecção (perda de calor para o ar ou água que envolve o corpo) ou por condução (por contato com objetos mais frios). Caso contrário, o calor é eliminado pela evaporação (GUYTON & HALL, 2006; BASTOS et al., sem data).

Altas temperaturas têm relação com aumento de doenças e mortes. Uma pesquisa avaliou doze grandes cidades de países de renda baixa a média, incluindo a capital paulistana, e identificou a relação entre o incremento de falecimentos por doença cardiovascular e respiratória conforme a elevação da temperatura (MCMICHAEL et al., 2008). Na capital paulistana foi observado aumento de fatalidades de 3,26% por doenças cardiorrespiratórias para cada acréscimo de 1°C na temperatura média. No mesmo estudo foi identificado que no município as mortes por doença cardiovascular entre os anos de 1991 a 1994 corresponderam a

32,4% de todos os óbitos e a 10,7% por enfermidades respiratórias (Ibidem). Por estes percentuais, verifica-se o impacto destas patologias na saúde da população e a importância de se buscar meios para a sua redução, como por exemplo, combatendo as ICU (BARROS & LOMBARDO, 2016).

A umidade relativa do ar é outro parâmetro importante para o conforto ambiental e a qualidade de vida das pessoas. A Organização Mundial de Saúde (OMS) indica como confortáveis os valores de umidade relativa variando entre 30 a 60%, mas destaca que tal intervalo pode sofrer modificações quando considerados outros aspectos meteorológicos. Quando a umidade relativa do ar se situa abaixo de 30%, o Centro de Gerenciamento de Emergências da cidade de São Paulo considera como estado de atenção e recomenda evitar exercícios físicos externos entre 11 e 15 horas e, se possível, permanecer em locais protegidos do sol ou próximo de áreas vegetadas (CGE, sem data).

Por outro lado, taxa de umidade acima de 60% e temperatura alta são prejudiciais, afetando a perda de calor por evaporação e causando desconforto ao organismo, pois ocorre a dificuldade de

realizar trocas com o ambiente e assim manter a normotermia (CAMARGO & FURLAN, 2011). Tanto o excesso quanto a falta de umidade prejudicam a respiração, o ideal é que a umidade relativa do ar esteja em torno de 60% (ORGANIZACION PANAMERICANA DE LA SALUD; ORGANIZACION MUNDIAL DA SAÚDE, 1992).

Como neste tópico está sendo discutido o assunto do conforto climático na dimensão humana, entende-se ser importante identificar qual a faixa de temperatura da zona de conforto térmico da maioria das pessoas. Um estudo feito sobre conforto térmico em espaços abertos em ambientes de passagem, em ruas de pedestres no estado de São Paulo nas cidades de Campinas, Bauru e Presidente Prudente, mostrou que a maior parte das entrevistas indicaram a sensação de neutralidade térmica (conforto) para a faixa de temperatura entre 18 a 26°C (LABAKI et al., 2012).

Quando a temperatura ultrapassou os 30°C todos os entrevistados se mostraram insatisfeitos, tanto em condição seca quando úmida. O mesmo estudo indicou que há maior tolerância ao calor quando o espaço de passagem é arborizado do que se ele é árido, tanto quando o calor é seco quanto na existência de alta temperatura e umidade. Isto indica a importância de se procurar o

aumento da arborização em meio urbano, especialmente nos espaços de passagem, como as vias e calçadas, pois ela propicia melhor conforto aos usuários, além de aumentar a umidade relativa do ar.

O método para chegar ao resultado da faixa de conforto térmico, indicado anteriormente, utilizou correlações entre o índice preditivo de conforto de temperatura fisiológica equivalente – PET (*Physiological Equivalent Temperature*) e a sensação térmica real – ASV (*Actual Sensation Vote*). PET é uma temperatura fictícia, resultante de interação entre variáveis físicas e ambientais de um ambiente real e pode ser aplicada tanto em ambientes internos quanto externos (LABAKI et al., 2012).

A partir das informações obtidas sobre as condições climáticas adversas para a saúde humana, elegeram-se os dias críticos a serem adotados nas simulações. Retomando o objetivo principal da pesquisa, a mitigação das ICU em seus aspectos danosos ao ser humano e lembrando que isto ocorre nos dias de mais calor, optou-se por adotar os dias de maior temperatura e baixa umidade, tanto no verão quanto no inverno, pois como apresentado anteriormente, esta é uma situação desconfortável ao ser humano. Acrescenta-se o fato de que o cenário de aumento de arborização

pode colaborar para diminuir a secura e melhorar o conforto ambiental da área de estudo. Considera-se aqui como critério para alta temperatura aquelas que estejam acima de 26°C (LABAKI et al., 2012), e baixa umidade relativa do ar aquela que esteja no patamar de 30% ou abaixo deste valor (FRANCA, 2009). Em ambas as datas escolhidas para as simulações foram selecionados dias com pouco ou nenhum vento, baixa umidade do ar, pois estas seriam situações extremas em que a dispersão de poluentes não é favorecida. Para a data eleita de verão, 2/2/19 a temperatura máxima neste dia foi de 35,7°C (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, sem data), bastante acima dos 26°C indicada por Labaki et al. (2012) e baixíssima umidade de 21,1%, para o inverno na data de 1/08/19 a máxima foi de 27,3°C (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, sem data), também superior ao indicado para a temperatura de conforto por Labaki et al. (2012) e umidade de 31% (baixa).

7.5.2 Metodologia das simulações

A metodologia das simulações envolveu as seguintes etapas: inicialmente foi feita a demarcação da área de estudo no QGIS, com

dimensão aproximada de 600 x 600m, que a seguir foi demarcada e recortada sobre uma imagem de satélite com resolução de 60cm para uso no programa ENVI-met para a modelagem do trecho analisado (arquivo .in). A figura 68 traz uma ilustração desta área de estudos analisada.

Figura 64 – Área de estudos para uso no ENVI-met

Legenda: linha vermelha: demarcação da área de estudos

Fonte: Google Earth 2020.

No arquivo de modelagem, foram classificados os tipos de solo, revestimento de piso e pavimentos, as alturas de edifício, assim como alocadas a vegetação separada por estrato (rasteira ou arbórea) e seu porte (grande, média ou pequena). As figuras 69 e 70 ilustram as telas de modelagem da área.

Figura 65 – Tela do arquivo de modelagem do cenário inicial no ENVI-met

Fonte: programa ENVI-met e editado pelas autoras (2020)

Figura 66 – Ampliação da tela de modelagem do cenário inicial ENVI-met

Legenda: em cinza são os edifícios e os números indicam a sua altura; em verde os tipos de vegetação (rasteira, árvore de grande, médio e pequeno porte); as cruzes em azul são as áreas tipos de solo.

Fonte: ENVI-met e editado pelas autoras (2020).

Foram realizados diferentes arquivos de configuração para cada cenário: (i) cenário atual, (ii) cenário com aumento de arborização, (iii) cenário com pavimento brando e (iv) pavimento brando com mais árvores.

A seguir, foram feitas as configurações de entrada do programa com os dados climáticos conforme será descrito no item 7.3.1. A figura 71 ilustra a tela do arquivo de configuração do sistema para entrada de dados climáticos no programa ENVI-met.

Figura 67 - Tela de configuração do ENVI-met

Fonte: ENVI-met e editado pelas autoras (2020).

Este mesmo arquivo de configuração foi adotado para todas as simulações. Realizados estes procedimentos, foram executadas as oito simulações, quatro para o verão e a mesma quantidade para o inverno. A figura 72 ilustra a tela de simulação. Finalizadas esta etapa foi utilizado o programa Leonardo para a produção dos mapas a partir dos dados gerados.

Para efeito de comparação de temperaturas entre as áreas arborizadas e as desprovidas de árvores no local das vias, foram eleitos dois pontos fixos, um no interior do Parque da Luz e outro na Av. Tiradentes, nos quais foram lidas as temperaturas nos mapas gerados dentro do programa Leonardo. A leitura de temperatura nestes mesmos pontos se repetiu em todos os cenários analisados. Por fim os resultados foram organizados no programa Excel em forma de tabelas e gráficos e foram criados mapas, no programa Leonardo, dos horários onde foram identificadas as temperaturas máximas, a fim de ilustrar visualmente os resultados obtidos para cada cenário.

Figura 68 – Tela do ENVI-met de simulação

Fonte: ENVI-met e editado pelas autoras (2020).

7.5.3 Dados climáticos de entrada do programa ENVI-met

O programa trabalha como modelo tridimensional e é basicamente um plano horizontal, com uma área de borda e um perfil vertical da mesoescala à altitude de 2500m acima do nível do mar, onde há uma única entrada de dados onde são descritas as condições iniciais em suas diversas camadas: solo, superfície (incluindo tipos de pavimentos, construção e vegetação), assim como a atmosfera (MENDES et al., 2014).

Na camada da atmosfera o modelo faz prognóstico do fluxo de ar quanto à velocidade e direção, turbulência, temperatura potencial, umidade do ar e fluxos de radiação de ondas curtas e longas com base nas leis fundamentais da dinâmica de fluidos e termodinâmica. No nível de solo, o modelo calcula o perfil vertical de temperatura e umidade do ar a partir da superfície, sendo que os processos de hidrologia e termodinâmica variam de acordo com as

propriedades e cada tipo de composição do solo (MENDES et al., 2014).

Os dados climáticos para entrada no ENVI-met são a temperatura potencial e umidade específica a 2500m, umidade relativa do ar a 2m, velocidade e direção do vento nas datas e horários selecionados. Os dados climáticos a 2500m de umidade específica foram obtidos a partir da de dados de altitude e umidade específica da Universidade de Wyoming nos EUA (UNIVERSITY OF WYOMING, sem data) com estes foram realizados gráficos de dispersão no programa *Excel* com curva de regressão exponencial referente à data escolhida (figuras 73 e 74).

Figura 69 - Curva de regressão exponencial para determinar a umidade específica a 2500m para o Verão

Fonte: Elaboração das autoras (2019).

Figura 70 – Curva de regressão exponencial para determinar a umidade específica a 2500m para o Inverno

Fonte: Autoras (2019).

A temperatura potencial foi obtida também a partir de informações de pressão e de temperatura da Universidade de Wyoming. A partir destes dados foi feito o gráfico de dispersão com curva de regressão linear para determinar a temperatura e o gráfico de dispersão com curva de regressão exponencial para determinar a

pressão, ambos a 2500m. Os resultados obtidos foram lançados na calculadora *shodor* para determinar a temperatura potencial²⁸ para cada dia escolhido para as simulações (SHODOR, sem data) em Kelvin.

Os demais dados de velocidade e direção de vento, umidade relativa do ar para os dias e horários escolhidos foram obtidos junto à *National Aeronautics and Space Administration* – NASA, dos EUA (NOAA, sem data). A resolução espacial da simulação ficou em 5,5m.

Os dados de entrada do programa ENVI-met para as simulações para o cenário existente atualmente constam na tabela 12:

Tabela 12 – Dados de configuração de entrada no ENVI-met no cenário existente

Dados de entrada	Valor	Valor
Data de início da simulação (DD.MM.AAA)	02/02/2019 (verão)	01/08/2019 (inverno)
Hora de início da simulação (HH:MM:SS)	21	21
Tempo da simulação em horas	48	48
Salvar modelo a cada (min)	60	60
Velocidade do vento a 10m de altura (m.s ⁻¹)	5,1	7,2
Direção do vento (graus)	150	170
Rugosidade z0 no ponto de referência	0,1	0,1
Temperatura potencial atmosférica (K)	312,4	308,7
Umidade específica a 2500m (g.kg ⁻¹)	8,4	6,6
Umidade relativa a 2m (%)	68	83

Fonte: Autoras (2019).

²⁸ Temperatura potencial é segundo Vianello e Alves (2012) a temperatura que teria uma parcela de ar, inicialmente em um nível qualquer da atmosfera (pressão P), se fosse levada adiabaticamente seca a uma pressão padrão (Po em geral

correspondente a 1000 hPa). Este conceito é útil para comparar temperaturas a diferentes alturas, eliminando o efeito da variação de pressão (ASSIS et al., 2013).

Para o horário de início da simulação deve-se adotar o período noturno ou o nascer do sol, ou seja, condições de atmosfera neutra (MENDES et al., 2014). Sendo assim, o início da simulação às 21h00 se justifica porque as informações para o cálculo da temperatura potencial e umidade específica estão disponíveis na Universidade de Wyoming, para a hora 0 UTC (21h00 local).

7.5.4 Cenários

A seguir serão apresentados os diferentes cenários idealizados para as simulações no ENVI-met, a fim de quantificar os benefícios que podem ser obtidos com as alterações propostas. Os cenários simulados foram os seguintes: primeiro cenário com área de estudo original, segundo propondo plantio em larga escala de arborização, terceiro alterando os pavimentos de asfalto para pavimento brando de concreto e, por fim, quarto cenário integrando alteração pavimento para concreto com plantio de arborização viária.

7.5.5 Cenário com aumento de arborização

Nos cenários com aumento de arborização na Av. Tiradentes, as árvores de médio porte existentes foram substituídas por outras de grande porte, já que seria previsto o alargamento dos canteiros centrais para cerca de 6m, como indicado na seção 6, item 6.3. Outro fator positivo é que nesta avenida não há rede aérea de fiação, então a inserção das árvores do porte mencionado anteriormente não conflitaria com a fiação.

Ressalta-se que os estudos viários feitos na seção 6, com inclusão e aumento de arborização nas vias é genérico, não tem uma ligação direta com o aumento de árvores proposto nesta seção 7. Pois na seção 6 procurou-se exemplificar que é possível inserir a Infraestrutura Verde no cenário urbano da capital paulistana, mas a real quantificação e o detalhamento do projeto paisagístico requerem mais estudos aprofundados, que não são o objetivo deste trabalho, que se propõe a apresentar diretrizes projetuais.

Nas demais vias onde há rede aérea de fios, estes seriam enterrados. Destaca-se que para esta operação ser implementada seriam requeridos mais estudos técnicos, principalmente do tipo de raízes das árvores a serem plantadas e outros aspectos. De maneira geral nos canteiros centrais de todas as vias foram propostas árvores de grande porte, pois como na Av. Tiradentes seria previsto o alargamento dos canteiros centrais, nas demais ruas foram inseridas árvores conforme o indicado nas tabelas 02 e 03, na seção 03. Nas vias onde existiam árvores de pequeno porte foram substituídas por de médio porte, sempre que possível, conforme a largura da via e da calçada. Todas estas ações foram feitas no sentido de propiciar maior sombreamento e melhor efeito de redução de temperaturas para mitigar as ICU.

Outro fator a ser considerado principalmente na Av. Tiradentes e na região é que existem linhas de metrô subterrâneas, como indicado na seção 7. O projeto de arborização deverá considerar tal fato, obtendo as informações da profundidade do metrô e da viabilidade técnica do plantio das árvores mencionadas. Este mesmo projeto também deve ponderar outros aspectos para a especificação das espécies, como o tipo de raízes das árvores, para que elas não causem conflitos e problemas nas diversas redes

enterradas de infraestrutura urbana. No presente trabalho apenas é mencionado o porte das árvores, pois isto é o suficiente para as simulações computacionais.

A quantificação da arborização foi realizada no programa gratuito MultiSpec versão 3, capaz de processar imagens (*rasters*) e fazer as quantificações de cada classe de uso do solo, por meio da classificação orientada a objetivos, utilizando o algoritmo ECHO. Esse método permite distinguir arborização de médio e de grande porte, vegetação rasteira, telhados, asfalto, rios entre outros, conforme metodologia adotada por Mendes et al. (2016). Foi utilizada uma imagem do programa ENVI-met quanto ao cenário com aumento de arborização, por meio de captura de tela (*print-screen*). Para identificar cada classe no programa foram criados polígonos de teste e de treino sobre o *raster* inserido, ensinando ao programa MultiSpec que a resposta espectral dos pixels representava uma determinada classe de uso de solo. Após esta etapa o programa disponibilizou o cálculo das áreas para cada classe de vegetação solicitada (SILVA FILHO; GIRÃO, 2009).

Na figura 75, apresenta-se o cenário atual onde o tom mais claro de verde corresponde à vegetação rasteira, o tom médio às árvores de médio porte e o mais escuro para as árvores de grande

porte. No cenário atual, as árvores de grande porte representam 10,4% da área total, as médias 7,7% e a vegetação rasteira 6,4%. Na tabela 13, há uma estimativa do total das árvores existentes, assumindo que as copas das árvores de grande porte tenham raio de 5m e as de médio porte 2,5m.

Figura 71 – cenário atual

Fonte: Prefeitura de São Paulo (s/d); Mendes (2019b).

Na Figura 76, apresenta-se o cenário com aumento de arborização nas vias e calçadas, onde praticamente a quantidade de vegetação foi dobrada. Em termos percentuais no cenário simulado, as árvores de grande porte representam 22,1% do total da área, as de médio porte 13,0% e a vegetação rasteira 8,8%. Considerando que a área total de estudos ocupa 540.806m², informação extraída do QGIS, as árvores de grande porte ocupam 119.518,13m² e as de médio porte 70.304m². Priorizou-se o plantio das árvores de grande e médio porte pelo seu melhor potencial de sombreamento e de melhoria nos fatores de qualidade climática, como aumento de umidade e redução de temperatura do ar.

Os percentuais de arborização a serem incrementados correspondem ao plantio de 5.102 plantas, sendo 1.521 de grande porte e 3.581 de médio porte. Este cálculo tomou como base os seguintes aspectos: árvore de grande porte com 5m de raio e as de médio porte com 2,5m, conforme indicado por Abbud (2006). Depois foi calculada a área ocupada por cada projeção de copa e por fim uma regra de três para estimar a quantidade total de plantas (tabela 13).

Tabela 13 – Quantificação de árvores do cenário atual e com o aumento de arborização

Cenário atual			
Área total de estudo	540,806m ²	Área	Quantidade de árvores (aproximadamente)
Árvore: grande porte (raio = 5m)	10,4%	56.243m ²	716
Árvore: médio porte (raio = 2,5m)	7,7%	41.642m ²	2.121
Total	18,10%	97.885m ²	2837
Cenário com aumento de arborização			
Área total de estudo	540.806m ²	Área	Quantidade de árvores (aproximadamente)
Árvore: grande porte (raio = 5m)	13,00%	119.518m ²	1521
Árvore: médio porte (raio = 2,5m)	22,10%	70.304m ²	3581
Total	35,10%	189.822m ²	5102

Fonte: Autoras (2019).

Figura 72 – cenário com aumento de arborização

Fonte: Prefeitura de São Paulo (s/d); Mendes (2019b)

7.5.6 Cenário com pavimento brando

A área existente de pavimento asfáltico do trecho de estudo em vias, calçadas e estacionamentos de edificações, é de 127.470m² e corresponde a 23,57% da área total. Este cálculo foi feito no programa QGIS, a partir de imagem de satélite da área de estudo com resolução de 60cm e o Mapa MDC da Prefeitura de São Paulo (PREFEITURA DE SÃO PAULO, s/d) com as *shapefiles* quadra viária e quadra predial, juntamente com verificação adicional no Google Earth.

No cenário com adoção dos pavimentos brandos, foi feita a substituição dos pavimentos de asfalto para concreto no arquivo de modelagem da área e depois foi alterado o albedo padrão do pavimento de concreto no arquivo de bibliotecas do ENVI-met. O albedo padrão do pavimento de concreto no programa é de 0,40, este foi alterado para 0,80 pois considerou utilizar pavimento brando PAR de concreto, com cimento e pedras brancas (POMERANTZ et al., 1997) como visto na tabela 14. A

refletividade do pavimento brando de cimento branco tende a cair ao longo do tempo, conforme ele se torna sujo, como indicado na tabela 14. Conforme consulta ao professor da Escola Politécnica da área de projeto de estradas, Carlos Yukio Suzuki, a pesquisa assumiu que a cada 6 anos seja executada uma micro fresagem da ordem de 1,0mm na estrutura existente do pavimento de concreto PAR para que ele recupere a coloração inicial. A figura 77 indica como o albedo do pavimento de concreto tende a decair ao longo do tempo e o do asfalto a aumentar.

Tabela 14 – Albedo dos pavimentos

Material	Albedo
Pavimento de concreto – padrão ENVI-met	0,40
Pavimento de concreto brando envelhecido* (cimento branco)	0,40 - 0,60*
Pavimento de concreto brando novo (cimento branco)	0,70 - 0,80*
Pavimento asfáltico – padrão ENVI-met	0,20

Fonte: Pomerantz et al.. (1997), Autoras (2019).

Figura 73 – Refletância típica do asfalto e concreto convencional ao longo do tempo

Fonte: EPA (2012).

No arquivo de modelagem do cenário com mais árvores e uso do pavimento branco PAR, foi utilizado o mesmo arquivo do cenário com arborização e nele foi alterado o pavimento de asfáltico para concreto. Novamente o albedo do pavimento de concreto foi alterado para 0,80 no arquivo de bibliotecas do programa.

7.6 Resultados e discussão das simulações

Para que se obtivesse sucesso na simulação do cenário inicial de inverno, foi necessário realizar cinco simulações para a obtenção dos resultados aqui presentes. Esta primeira simulação foi feita na máquina virtual dos computadores da ESALQ/USP. Com o desejo de simular 48 horas, desconsiderando as primeiras 24 horas para fins de estabilização do programa (ASSIS, SIRQUEIRA & BAMBERG, 2013), a primeira tentativa apresentou vários pontos de instabilidades, na qual o ENVI-met acusou durante a checagem.

A simulação deu erro logo no primeiro dia e o programa abortou antes de processar as 48 horas. Na segunda tentativa, os dados de entrada do arquivo de configuração foram arredondados (sem casas decimais) para se observar se solucionava tal problema, mas as mesmas complicações se repetiram. Na terceira vez, foram analisados os *grids* que causaram a instabilidade na primeira simulação, corrigindo-os, ao buscar a simplificação do modelo quanto ao *design* da área, não obtendo sucesso mais uma vez, na qual o ENVI-met acusou a necessidade de correção de outros *grids*

instáveis (gerando *outliers* de temperatura do ar). Assim feito, a quarta tentativa apresentou os mesmos problemas, porém, em outros locais.

Por fim, na quinta simulação, foram feitas alterações: (i) aumentou-se a área de borda de 3 *grids* para 7 (de ~17m para 39m) e (ii) principalmente, a área foi remodelada para evitar o aparecimento de *grids* complexos para simular, isto é, foi feita uma simplificação da área e, dessa vez, sim, simulou o programa com precisão. Até a quarta tentativa de simulação, destaca-se que os resultados obtidos não eram consistentes, apresentando zonas muito divergentes entre si, como diferenças na temperatura do ar de até 4,5°C, num recorte de apenas alguns metros, posto que o ENVI-met é um modelo microclimático, o que levava a resultados incorretos e irreais. Após a realização dos procedimentos de ajustes e da primeira simulação ter sido realizada com sucesso, as demais foram executadas.

O dia escolhido para a simulação no verão foi 2/2/2019, em que a temperatura máxima foi de 35,7°C e registrou 21,1% de umidade relativa do ar às 18h00, condições consideradas como

críticas. Tais dados foram levantados junto à estação meteorológica em Mirante de Santana pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (INMET, sem data), na Zona Norte de São Paulo/SP, que fica a 4km da área de estudo. Cumpre mencionar que esta temperatura foi utilizada apenas de forma referencial para a escolha do dia da simulação de verão.

Para a simulação de inverno foi escolhida a data de 01/08/19, quando a temperatura do ar foi de 27,3°C e a umidade relativa do ar foi de 31%, estes dados foram obtidos novamente junto à estação convencional de Mirante de Santana pelo INMET (INMET, sem data). Foram descartadas as primeiras 24hs de simulação com o intuito de se obter estabilidade do programa (ASSIS, SIRQUEIRA & BAMBERG, 2013). Portanto os dados considerados para compor os simulados para o verão são os do dia 04/02/2019.

Foram coletadas as informações de temperatura de superfície e do ar das simulações feitas de hora em hora a partir dos mapas gerados no programa Leonardo. Para o cenário atual foram coletadas as temperaturas dos mapas gerados das 6h00 até às 21h00, a fim de determinar o horário mais quente do dia que seria

representado em forma de mapa. O restante dos resultados foi organizado em forma de tabelas e gráficos do Excel.

Se fossem apresentados todos os mapas gerados haveria um excesso desnecessário de figuras pois para cada cenário proposto foram produzidos mapas das 6h00 às 18h00, totalizando dez mapas para temperatura do ar e mais dez para temperatura de superfície. Isto multiplicando por quatro (cenário atual, com mais árvores, com árvores e alteração do pavimento, com alteração do pavimento), daria um total de cento e sessenta mapas apenas para o cenário de verão. Isto sem contar que no cenário atual foram feitos mapas até às 21h00, o que aumentaria o total de mapas para inserir na tese.

7.7 Simulação de verão

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nas simulações para os diferentes cenários propostos para o cenário de verão. As primeiras 24 horas de simulação são descartadas pois neste tempo está sendo feita a estabilização do programa, conforme metodologia descrita por (ASSIS, SIRQUEIRA & BAMBERG,

2013). O cenário dos pavimentos brandos obteve excelentes resultados com reduções significativas na temperatura do ar e principalmente na superfície, mas ele se mostrou ainda mais eficiente quando aliado ao aumento de arborização, fatos que serão expressos a seguir pelas tabelas, gráficos e mapas de temperatura do ar e de superfície.

7.7.1 Temperatura do ar de verão

A tabela 15 indica as reduções nas temperaturas do ar obtidas em diferentes cenários por outros pesquisadores, a fim de serem obtidos parâmetros de correlação com ordem de grandeza dos resultados obtidos no presente trabalho.

Tabela 15 – Reduções de temperatura do ar observadas na literatura

Autor	Redução na temperatura do ar	
Rosenfeld et al. (1998), Los Angeles	Alteração de albedo de cobertura e pavimento	Vegetação
	1,5°C	1,5°C 22% da área total em copas de árvores
Ng et al. (2012), Hong Kong	-	Arborização de 33% da área total reduz 1°C; Arborização de 16% da área urbana reduz 0,4°C; Arborização de 56% da área urbana reduz 1,8°C (verão)
Shashua-Bar; Hoffman (2000), Tel Aviv		Vias arborizadas Redução média de 3,0°C 60% da área total de sombreamento por árvores às 15h00 (verão)

Fonte: Rosenfeld et al. (1998); Ng et al. (2012); Shashua-Bar; Hoffman (2000) e organizada pelas Autoras (2019)

Na Tabela 16 são apresentados os dados de medições das simulações feitas para o cenário atual de temperatura do ar, a partir dos pontos de medição na Av. Tiradentes e dentro do Parque da Luz. Em média a avenida se mostrou 0,83°C mais quente do que o interior do parque, tendo sido este valor calculado por média aritmética simples pelo Excel. Esta tendência já era esperada pelo fato de o parque ser um ambiente altamente vegetado, sombreado por árvores de grande porte e permeável.

Pelos dados da Tabela observa-se um aumento gradativo de diferença de temperatura, até atingir um pico às 11h00 da manhã com diferença de 1,00°C, que se mantém até às 13h00 e a partir daí a diferença decai um pouco mas continua significativa em cerca de 0,90°C. Nota-se que o pico das temperaturas neste dia ocorreu às 16h00, quando o parque registrou 36,5°C e a Av. Tiradentes 37,30°C.

Tabela 16 – Cenário atual – temperatura do ar na simulação de verão (°C)

Hora	Parque da Luz	Av. Tiradentes	Diferença de temperatura entre Parque da Luz e Av. Tiradentes
6h00	29,80	26,80	0,70
7h00	29,90	30,50	0,60
8h00	30,40	31,00	0,60
9h00	31,00	31,70	0,70
10h00	32,00	32,80	0,80
11h00	32,9	33,90	1,00
12h00	33,9	34,90	1,00
13h00	34,8	35,80	0,90
14h00	35,6	36,50	0,90
15h00	36,2	37,10	0,80
16h00	36,5	37,30	0,70
17h00	36,3	37,00	0,80
18h00	35,3	36,10	0,90
19h00	34,3	35,20	0,90
20h00	33,8	34,70	0,90
21h00	33,4	34,30	0,90

Fonte: Autoras (2019).

Na tabela 17, observa-se que mesmo no interior do Parque da Luz houve redução significativa de temperatura do ar, de 1,61°C no melhor dos cenários. A diferença mais significativa foi observada na Av. Tiradentes no cenário com arborização e pavimento brando, com a redução de 2,21°C na temperatura do ar. Ambas as medições são das 12h00. Optou-se por analisar os dados referentes às 12h00 porque foi o que deram mais condizentes com os resultados de outros pesquisadores em simulações similares computacionais (NG et al., 2012; ROSENFELD et al., 1998). Pois Ng et al. (2012) indicou que uma área arborizada de 33% em relação ao total decai cerca de 1°C a temperatura do ar e Rosenfeld et al. (1998) indicou que com 22% de área total arborizada há refrescamento de 1,5°C.

Tabela 17- Resumo das diferenças da temperatura do ar cenário de verão

Diferença de temperatura do ar às 12h00		
Cenário	Av. Tiradentes °C	Jardim da Luz °C
A- Arborização e pavimento brando	-2,21	-1,61
B- Aumento de arborização	-1,86	-1,46
C- Adoção do pavimento brando	-0,45	-0,19°

Fonte: autoras (2020).

Nas tabelas 18 e 19 são apresentados os dados obtidos para os quatro cenários de verão. Estas reduções foram maiores na proposta que aumenta a arborização e adota o pavimento brando e isto indica o papel inestimável das árvores como um componente importante para a mitigação das Ilhas de Calor Urbanas. As grandes diferenças de temperatura observadas a partir das 15h00 da tarde (mais de 3°C), podem estar relacionadas a calibração mais detalhada, como fator de radiação em que foi usado o padrão do programa ENVI-met. Também pode apontar a necessidade de instalar alguns pontos de medição no local para apuração da temperatura na área de estudo

com maior grau de precisão, já que se trata de um modelo microclimático. Contudo, como trata-se de um estudo empírico que procura indicar caminhos para novas pesquisas e verificar se as Infraestruturas Verdes aliadas aos pavimentos brandos ajudam no combate às ICU, ele continua tendo seu valor. Cumpre também ressaltar que no dia da simulação de verão, 2/2/19, a temperatura máxima do ar foi bastante alta, de 35,7°C às 19h00, o que pode ter influenciado nos resultados, conforme dados da estação automática de Mirante de Santana/SP (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, sem data).

Em termos de redução de temperatura no Jardim da Luz a tabela 18 revela os resultados do meio dia: (i) o cenário com adoção do pavimento brando e mais arborização teve a maior atenuação de temperatura, de 1,61°C; (ii) no cenário com mais árvores a diferença térmica em relação ao cenário atual ainda foi expressiva, de 1,50°C; (iii) o cenário com adoção do pavimento brando apenas teve o pior desempenho e abrandou a temperatura do ar em apenas 0,23°C em relação ao cenário original. Sendo assim, de modo geral não se observaram ganhos significativos em termos de refrescar o ar com o cenário do pavimento brando no interior do parque no cenário de verão. Mas de qualquer forma dentro do parque existe o efeito do

sombreamento das árvores e as condições de umidade diferentes da Av. Tiradentes, o que diminuem a necessidade de estratégias para redução do calor.

Na Av. Tiradentes, o pavimento brando se mostrou com melhor desempenho do que no Parque da Luz e isto é importante porque é neste local árido de circulação que os ganhos em termos de aumento do conforto propiciando maior frescor aos pedestres e demais usuários da área são mais relevantes. Na tabela 19 observa-se novamente que às 12h00 o cenário com a IV e os pavimentos brandos tiveram o melhor resultado, com redução de 2,21°C em relação ao cenário original, contra os 1,86°C do cenário com aumento de árvores apenas. Os pavimentos brandos também causaram uma elevada redução de temperatura, de 0,47°C. Como trata-se de um horário quente em dia de verão, este refrescamento indicado por todos os cenários é muito importante.

Destaca-se que o arrefecimento da temperatura obtido apenas com o pavimento brando ao meio dia de 0,47°C é significativo e condizente com os achados de outros pesquisadores, conforme visto na tabela 15. Pois para conseguir reduzir em 1°C a temperatura do ar é preciso um esforço muito grande, obtido por exemplo com o plantio de árvores em 33% da área urbana (NG et al., 2012). Por

outro lado, novamente as maiores atenuações de temperatura ocorreram nos cenários em que as árvores estão presentes, seja aumentando apenas as plantas ou com arborização mais adoção do pavimento brando, como já era esperado em vista das indicações da revisão de literatura de pesquisas que indicaram ser de 80% do refrescamento de uma área atribuído ao dossel arbóreo (SHASHUA-BAR & HOFFMAN, 2000).

Como análise geral dos resultados obtidos na temperatura do ar, ressalta-se que o programa ENVI-met é microclimático e é projetado para simulação em três dimensões com coordenadas cartesianas e prevê a interação entre a superfície, vegetação e atmosfera no meio urbano e tem resolução espacial entre 0,50 a 10m e a temporal de 10 segundos. Assim, a recomendação da escala de uso do modelo é a do projeto urbano, ou seja, em frações de bairro ou vizinhanças (ASSIS, SIRQUEIRA & BAMBERG, 2013). No presente estudo, a resolução espacial adotada foi de 5,5 x 5,5m. No caso então não é possível a comparação dos resultados obtidos com as simulações no ENVI-met com as geradas a partir de imagens de satélite, devido à grande diferença em termos de resolução espacial. Por exemplo, o Landsat 7 tem resolução espacial de 60m e o

Landsat 8 de 100m, então ficaria muito discrepante tentar fazer correlações diretas com o modelo usado pelo ENVI-met com as temperaturas de superfície obtidas pelas imagens de satélite.

Tabela 18 – Temperatura do ar dos cenários de verão no Parque da Luz (°C)

Hora	Cenário atual (O)	Cenário A	Diferença cenário (O-A)	Cenário B	Cenário B (O-B)	Cenário C	Cenário C (O-C)
6h00	29,8	29,19	-0,60	29,19	-0,61	29,79	-0,01
7h00	29,9	29,33	-0,60	29,32	-0,58	29,89	-0,01
8h00	30,4	29,77	-0,60	29,75	-0,65	30,31	-0,09
9h00	31,0	30,27	-0,70	30,21	-0,79	30,88	-0,12
10h00	32,0	31,04	-1,0	30,96	-1,04	31,81	-0,19
11h00	32,9	31,74	-1,20	31,62	-1,28	32,71	-0,19
12h00	33,9	32,44	-1,50	32,29	-1,61	33,67	-0,23
13h00	34,8	33,03	-1,80	32,87	-1,93	34,56	-0,24
14h00	35,6	33,46	-2,10	33,20	-2,40	35,33	-0,27
15h00	36,2	33,48	-2,70	33,34	-2,86	35,98	-0,22
16h00	36,5	33,38	-3,10	33,26	-3,24	36,31	-0,19
17h00	36,3	33,10	-3,20	33,01	-3,29	36,17	-0,13
18h00	35,3	32,43	-2,90	32,37	-2,93	35,28	-0,02

Cenário A = com mais árvores,

Cenário B = mais árvores e pavimento brando,

Cenário C = pavimento brando

Fonte: autoras (2019).

Tabela 19 – Temperatura do ar dos cenários de verão na Av. Tiradentes

Hora	Cenário atual (O)	Cenário A	Diferença cenário (O-A)	Cenário B	Diferença cenário (O-B)	Cenário C	Diferença cenário (O-C)
6h00	30,50	29,53	-0,97	29,49	-1,01	30,52	+0,02
7h00	30,50	29,63	-0,87	29,61	-0,89	30,53	+0,03
8h00	31,00	30,07	-0,93	30,01	-0,99	30,87	-0,13
9h00	31,70	30,65	-1,05	30,52	-1,18	31,51	-0,19
10h00	32,80	31,50	-1,30	31,29	-1,51	32,49	-0,31
11h00	33,90	32,29	-1,61	32,01	-1,89	33,45	-0,45
12h00	34,90	33,04	-1,86	32,69	-2,21	34,43	-0,47
13h00	35,80	33,66	-2,14	33,28	-2,52	35,33	-0,47
14h00	36,50	34,01	-2,49	33,62	-2,88	36,09	-0,41
15h00	37,10	34,09	-3,01	33,74	-3,36	36,7	-0,40
16h00	37,30	33,91	-3,39	33,61	-3,69	36,96	-0,34
17h00	37,00	33,51	-3,49	33,29	-3,71	36,78	-0,22
18h00	36,10	32,8	-3,30	32,67	-3,43	36	-0,10

Legenda:

Cenário A = com mais árvores,

Cenário B = mais árvores e pavimento brando,

Cenário C = pavimento brando.

Fonte: autoras (2019).

Figura 74 – Gráfico das simulações de verão no ponto dentro do Parque da Luz

Legenda:

Série 1: cenário atual,
 série 2: cenário com alteração de árvores e pavimento,
 série 3: cenário com mais árvores,
 série 4: cenário com alteração apenas de pavimento

Fonte: autoras (2019).

Figura 75 – Gráfico das simulações de verão no ponto da Av. Tiradentes

Legenda:

Série 1: cenário atual,
 série 2: cenário com alteração de árvores e pavimento,
 série 3: cenário com mais árvores,
 série 4: cenário com alteração apenas de pavimento.

Fonte: autoras (2019)

A figura 78 traz um gráfico que ilustra as temperaturas ao longo do dia para cada cenário analisado do ponto no interior do Parque da Luz, com intervalos de 1h00. As leituras foram feitas das 6h00 às 18h00 pois este é aproximadamente o período que há ocorrência de luz solar, que é um dos fatores que exerce influência na temperatura do ar e de superfície. Pelo gráfico nota-se que o cenário (4) com adoção do pavimento brando e o atual (1) praticamente têm temperaturas idênticas portanto as curvas do gráfico coincidem. Observa-se que, a partir das 11h00 aproximadamente, os cenários que adotam arborização são idênticos e sofrem decréscimo de temperatura em relação ao cenário atual, tendência que continua aumentado ao longo do dia.

Na Av. Tiradentes, o gráfico das temperaturas (figura 79) é similar ao do Parque da Luz, apenas com maior diferença de temperatura entre o cenário atual e os que adotam a arborização. Novamente, estes cenários com arborização (2 e 4) tiveram temperaturas praticamente coincidentes devido à baixa diferença de temperatura, da ordem de décimos de graus Celsius. Da mesma

forma o cenário do pavimento teve temperatura similar ao atual, resultando em gráfico coincidente.

A seguir, serão apresentadas as figuras com os mapas das simulações de verão no ENVI-met com o resultado da temperatura do ar organizados no programa Leonardo, um dos módulos do programa ENVI-met. Todos os mapas são referentes ao segundo dia de simulação, dia 04/02/2019. Como foi programado para a realização de resultados de hora em hora, nestes mapas estão apresentados os dados obtidos às 12h00. Para efeito de análise e comparação entre os diferentes cenários simulados, todos os mapas foram uniformizados com a mesma escala de temperatura, que foi convertida do original em Kelvin para Celsius, para facilitar a leitura.

Os fluxos de vento são representados pelas setas e indicam que ele vem de sul para noroeste e direcionam o frescor do parque conforme o sentido do vento, ou seja, para noroeste do mapa. Se estes fluxos fossem de norte a sul, provavelmente o efeito do resfriamento provocado pelo parque seria observado na área mais a sul do mapa. Mas, conforme indica Lombardo (1985), em São

Paulo, há a predominância dos ventos da direção SE, SSE e S, devido à ação do Anticiclone Polar e Tropical, tais ventos ocorrem mais na primavera e verão. A autora destaca que há possibilidade de haver uma relação entre a velocidade e orientação dos ventos e a intensidade da ICU, predominantemente de tarde e de noite. Mas estes ventos sofrem influência com a rugosidade da cidade, o que diminui a sua intensidade e direção. Edifícios em concentração desaceleram os ventos e favorecem também o efeito de canalização.

Observa-se que no cenário atual as vias estão predominantemente na faixa das temperaturas altas, identificadas pela cor vermelha, amarela e magenta, que estão entre 34,17°C a 35,35°C (figura 80). O cenário com adoção de pavimento brando (figura 81) obteve bons resultados e houve redução térmica em toda a área, onde as vias passaram de 34,90°C (vermelho) a 34,45°C (verde) e 34,75°C, redução de 0,45°C a 0,15°C. Inclusive o Parque se beneficiou com redução de temperaturas, principalmente em suas bordas e nas ruas ao redor do mesmo na parte superior e esquerda do mapa, onde atingiram as faixas mínimas de temperatura de 34,00°C, onde anteriormente estavam com 34,60°C, ou seja, 0,40°C a menos. Ressalta-se que, apesar de parecerem singelas, estas reduções de temperatura são do ar em termos de sensação térmica

do ser humano, podem significar muita diferença em relação ao conforto climático. Quanto aos outros cenários, ambos ficaram em temperaturas abaixo da faixa mínima estipulada pela legenda de temperatura de 34,00°C, por isso as cores estão uniformes (figuras 82 e 83). Estes resultados mostram espacialmente e com melhor visualização os dados que as tabelas 18 e 19 indicaram.

Figura 76 – Temperatura atual cenário atual de verão

Legenda:
Em preto: edificações.
Corte a 2m de altura, dia 04/02/19 às 12h00.
Fonte: autoras (2019).

Figura 77 – Temperatura do ar cenário de pavimento brando

Legenda:
Em preto: edificações.
Corte a 2m de altura, dia 04/02/19 às 12h00
Fonte: autoras (2019).

Figura 78 – Temperatura do ar cenário com mais árvores

Legenda:
Em preto: edificações.
Corte a 2m de altura, dia 04/02/19 às 12h00
Fonte: autoras (2019).

Figura 79 – Temperatura do ar no cenário com mais árvores e pavimento brando - verão

Legenda:
Em preto: edificações.
Corte a 2m de altura, dia 04/02/19 às 12h00.
Fonte: autoras (2019).

7.7.2 Temperatura de superfície de verão

A seguir, serão apresentados os dados obtidos para a temperatura de superfície em cenário de simulação para o verão. Segundo a tabela 20, pode-se observar que o horário com a temperatura máxima ocorreu às 14h00 e neste período a diferença entre o interior do parque e a Av. Tiradentes foi grande, de 21°C.

A tabela 21 mostra que as maiores reduções de temperatura ocorreram na Av. Tiradentes, no cenário de arborização e pavimento branco, com 22,39°C. Mas o cenário com o pavimento branco houve também uma redução significativa de temperatura, com 10,27°C.

Tabela 20 – Temperatura de superfície cenário atual (°C)

Hora	Tiradentes	Parque da Luz	Diferença de temperatura Tiradentes e Parque da Luz
6h00	29,60	24,40	-5,20
7h00	30,20	24,90	-5,30
8h00	32,70	26,40	-6,30
9h00	40,60	28,50	-12,10
10h00	45,40	31,40	-14,00
11h00	49,10	30,70	-18,40
12h00	51,80	31,40	-20,40
13h00	53,30	32,10	-21,20
14h00	53,60	32,40	-21,20
15h00	52,60	32,40	-20,20
16h00	50,20	32,00	-18,20
17h00	46,30	31,40	-14,90
18h00	41,00	30,10	-10,90
19h00	37,50	28,50	-9,00
20h00	36,10	27,80	-8,30
20h00	29,40	29,35	0,05
21h00	29,30	29,25	0,05

Fonte: autoras (2019).

Tabela 21 – Diferenças de temperatura de superfície de verão às 14h00

Cenário	Parque da Luz	Av. Tiradentes
Mais árvores	-1,20	-17,77
Árvores e pavimento brando	-1,29	-22,39
Pavimento brando	-0,18	-10,27

Fonte: autoras (2019).

Analisando apenas o Parque da Luz, não houve diferenças de temperaturas de superfície significativas entre os diversos cenários analisados, o que já era de se esperar pois trata de área densamente sombreada (tabela 22). Por outro lado, o mesmo fato não se aplica na Av. Tiradentes que apresentou diferenças térmicas bastante expressivas (tabela 23). O cenário com o pavimento brando C teve excelentes resultados, com atenuações de temperatura de mais de 10°C nos horários quentes, entre 12h00 e 14h00.

Ainda na Avenida Tiradentes, o cenário A com mais árvores também foi satisfatório, mas o que mais impressionou foi o cenário com aumento de árvores e pavimento brando B, que teve entre 12h00 e 14h00, quase o dobro de atenuação de calor que apenas o pavimento brando, reduzindo em até 22,39°C a temperatura. Isto comprova o alto desempenho da Infraestrutura Verde aliada ao pavimento brando no combate à mitigação das Ilhas de Calor Urbanas em São Paulo.

As figuras 84 e 85 expressam de forma mais clara as informações das tabelas 22 e 23, sendo possível identificar com mais facilidade o que foi dito anteriormente. Primeiro, no ponto do parque, as temperaturas praticamente coincidem devido à pequena

variação que ocorreu nos diferentes cenários. Segundo, na Av. Tiradentes, a curva do cenário atual é a com as maiores temperaturas, o cenário com os pavimentos brandos tem uma grande diferença de temperatura ao longo de quase todo o dia. O cenário com as árvores e o pavimento brando é o que se destaca com as temperaturas mais baixas em todos os cenários analisados, novamente comprovando a eficiência desta tecnologia.

Nos mapas de temperatura de superfície de verão no horário mais quente, feito com dados, do segundo dia de simulação, às 14h00 (figura 86), observa-se a distribuição espacial das temperaturas. O cenário com o pavimento brando mostra-se com pouca diferença em relação ao cenário atual devido à legenda de temperaturas, pois houve atenuação de temperatura conforme observado nos gráficos e tabelas, mas estas temperaturas ainda eram elevadas segundo os parâmetros da legenda do mapa, daí a coloração resultante. Também se nota novamente o quão favorável se tornou o cenário B com a aplicação das árvores com pavimento brando, o efeito em diversas vias é o de propiciar temperaturas semelhantes às encontradas no parque, como elas se tornassem vias verdes.

Tabela 22 – Temperaturas de superfície do cenário de verão do ponto no Parque da Luz (°C)

Hora	Cenário atual (O)	Cenário A	Diferença cenário (O-A)	Cenário B	Diferença cenário (O-B)	Cenário C	Diferença cenário (O-C)
6h00	24,40	24,10	-0,30	24,11	-0,29	24,40	-0,00
7h00	24,90	24,65	-0,25	24,63	-0,27	24,91	+0,01
8h00	26,40	26,11	-0,29	26,10	-0,30	26,37	-0,03
9h00	28,50	29,19	+0,69	28,16	-0,34	28,49	-0,01
10h00	31,40	30,75	-0,65	30,68	-0,72	31,30	-0,10
11h00	30,70	30,01	-0,69	29,94	-0,76	30,60	-0,10
12h00	31,40	30,56	-0,84	30,47	-0,93	31,27	-0,13
13h00	32,10	31,05	-1,05	30,94	-1,16	31,90	-0,20
14h00	32,40	31,20	-1,20	31,11	-1,29	32,22	-0,18
15h00	32,40	31,03	-1,37	30,94	-1,46	32,23	-0,17
16h00	32,00	30,63	-1,37	30,55	-1,45	31,94	-0,06
17h00	31,40	30,00	-1,40	29,44	-1,96	31,36	-0,04
18h00	30,10	30,75	+0,65	28,69	-1,41	30,06	-0,04

Legenda:

Cenário A = com mais árvores,

Cenário B = mais árvores e pavimento brando,

Cenário C = pavimento brando

Fonte: autoras (2019).

Tabela 23 – Temperaturas de superfície dos cenários de verão do ponto na Av. Tiradentes (°C)

Hora	Cenário atual (O)	Cenário A	Diferença cenário (O-A)	Cenário B	Diferença cenário (O-B)	Cenário C	Diferença cenário (O-C)
6h00	29,6	27,3	-2,35	26,54	-3,06	29,37	-0,23
7h00	30,2	27,8	-2,36	26,76	-3,44	29,57	-0,63
8h00	32,7	29,4	-3,29	27,47	-5,23	32,02	-0,68
9h00	40,6	30,8	-9,83	28,14	-12,46	34,63	-5,97
10h00	45,4	32,2	-13,23	28,88	-16,52	37,24	-8,16
11h00	49,1	33,5	-15,57	29,64	-19,46	39,55	-9,55
12h00	51,8	34,7	-17,10	30,34	-21,46	41,40	-10,40
13h00	53,3	35,5	-17,80	30,89	-22,41	42,69	-10,61
14h00	53,6	35,8	-17,77	31,21	-22,39	43,33	-10,27
15h00	52,6	35,7	-16,89	31,31	-21,29	43,26	-9,34
16h00	50,2	35,3	-14,95	31,22	-18,98	42,40	-7,80
17h00	46,3	34,6	-11,75	30,99	-15,31	40,69	-5,61
18h00	41,0	33,1	-7,87	30,36	-10,64	38,06	-2,94

Legenda:

Cenário A = com mais árvores,

Cenário B = mais árvores e pavimento brando,

Cenário C = pavimento brando

Fonte: autoras (2019).

Figura 80 - Gráfico com temperaturas de superfície dos cenários de verão no Parque da Luz

Legenda:

Série 1: cenário atual,
 série 2: cenário com alteração de árvores e pavimento,
 série 3: cenário com mais árvores,
 série 4: cenário com alteração apenas de pavimento
 Fonte: autoras (2019).

Figura 81 – Gráfico com temperaturas de superfície do cenário de verão na Av. Tiradentes

Legenda:

Série 1: cenário atual,
 série 2: cenário com alteração de árvores e pavimento,
 série 3: cenário com mais árvores,
 série 4: cenário com alteração apenas de pavimento
 Fonte: autoras (2019).

Figura 82 – Mapas de temperatura de superfície cenário de verão

Fonte: autoras (2019).

7.8 Simulações de Inverno

A seguir, serão apresentados os resultados das simulações de inverno que, de forma geral, seguiram a mesma tendência observada nas simulações de verão. O pavimento brando obteve bom resultado, principalmente quanto às reduções nas temperaturas de superfície. Mas o melhor cenário de todos os analisados foi o que adota tanto o pavimento brando quanto aumento de arborização, comprovando assim a eficácia da tecnologia dos pavimentos

brandos aliado à Infraestrutura Verde no combate às ICU e para a melhoria do conforto humano urbano.

7.8.1 Temperatura do ar de inverno

A tabela 24 traz as temperaturas do ar em cenário de inverno atual, observa-se que há pouca diferença térmica entre uma área e outra, da mesma forma que foi observado no cenário de verão, fato que é de se esperar pois as distâncias são pequenas. Às 12h00 a diferença termal entre o parque e a avenida foi de 0,8°C.

Tabela 24 – Temperatura do ar do cenário atual de inverno °C

Hora	Parque da Luz (A)	Av. Tiradentes (B)	Diferença temperatura (B-A)
6h00	26,1	26,8	0,7
7h00	26,0	26,8	0,8
8h00	26,2	26,9	0,7
9h00	26,6	26,9	0,3
10h00	27,3	28,1	0,8
11h00	28,1	28,9	0,8
12h00	28,9	29,7	0,8
13h00	29,5	30,4	0,9
14h00	29,9	30,8	0,9
15h00	30,1	30,9	0,8
16h00	30,0	30,8	0,8
17h00	29,5	30,3	0,8
18h00	28,9	29,8	0,9
19h00	28,7	29,6	0,9
20h00	28,5	29,4	0,9
21h00	28,4	29,3	0,9

Fonte: autoras (2019).

Tanto no Jardim da Luz quanto na Av. Tiradentes verificou-se reduções de temperatura, embora menos expressivas que as ocorridas no cenário de verão. A tabela 25 ilustra as diferenças térmicas detectadas pelo ENVI-met, sendo que o melhor cenário foi o com a Infraestrutura Verde e o pavimento brando na Av. Tiradentes, que conseguiu refrescar o ar em 1,46°C às 12h00.

Tabela 25 – Diferenças de temperatura do ar no cenário de inverno

Diferenças de temperatura do ar no cenário de inverno às 12h00		
Cenário	Av. Tiradentes °C	Jardim da Luz °C
A- Com mais árvores	-1,25	-0,94
B- Mais árvores e pavimento brando	-1,46	-1,01
C- Com pavimento brando	-0,30	-0,20

Fonte: Autoras (2020)

No parque (ilustrado pela tabela 26), também se observa que houve pouca diferença de temperatura em todos os cenários, sendo que os mais significativos foram os que envolveram arborização e

pavimento brando. No cenário do pavimento brando, identificado pela letra C, às 12h00 houve uma leve atenuação de temperatura, de 0,20°C. Novamente, o melhor desempenho às 12h00 foi para o cenário B com pavimento brando e alteração de árvores, com redução de temperatura de 1,01°C.

Por outro lado, na Av. Tiradentes (tabela 27) as alterações de temperatura foram mais notáveis. Neste caso, o desempenho do cenário dos pavimentos brandos se mostrou menor que no cenário de verão, embora isso não seja um fato ruim pois é na estação mais quente do ano é que as mitigações são mais necessárias. Às 12h00 este cenário apresentou atenuação de temperatura de 0,30°C e, ao longo no período diurno, a média foi de 0,20°C. O cenário A, com mais árvores, mostrou bons resultados às 12h00 e refrescou o ar em 1,25°C.

O resultado mais favorável foi novamente o B com aumento de árvores somadas ao uso de pavimento brando, que ao meio dia atingiu redução de temperatura de 1,46°C. Os cenários com aumento de arborização adotaram ocupação de 35% da área de estudo com as plantas, e decorrente disso, foi obtida redução de

temperatura de 1,25°C no cenário com mais árvores A, e de 1,46°C no cenário com mais árvores juntamente com o pavimento brando. Nota-se, portanto, que as respostas foram ligeiramente melhores do que os estudos em Hong Kong, onde os pesquisadores detectaram a necessidade de ocupar 33% da área urbana, com vegetação para reduzir 1,0°C da temperatura do ar (NG et al., 2012).

Os gráficos da figura 87 e 88 indicam que o comportamento da temperatura do ar tanto do parque quanto da avenida são similares, devido à semelhança do comportamento da temperatura do ar do cenário atual e o com o pavimento brando (série 1 e 4), e do cenário com mais árvores e pavimento brando e o que utiliza apenas aumento de arborização (série 2 e 3). No ponto da avenida (figura 92), observa-se a diferença de temperatura do cenário do pavimento brando (série 3, verde) em relação ao cenário atual (série 1, roxo). Mas, de qualquer forma, é notável a diferença de temperatura dos cenários com as árvores (série 2, preta, e série 3, vermelha), que propiciam uma notável amenização de temperatura em relação ao cenário atual.

O mapa da temperatura do ar, do cenário atual, mostra que a maior parte da área está muito quente na faixa dos 29,35°C (em magenta), com exceção do Parque, que está na faixa dos 28,90°C

(figura 89). Já o mapa do cenário do pavimento brando (figura 90) mostra uma amenização das temperaturas, principalmente na parte sul do mapa, onde várias vias passaram para as faixas mais baixas de temperatura, indicadas em 01 e 02 na figura 93, entre 28,90 e 28,95°C. No trecho indicado em 03 também houve refrescamento nas ruas, as quais foram de 29,35°C a 29,10°C, ou seja, 0,25°C mais frescas. No trecho indicado como 04, na Av. Tiradentes, também se observa considerável esfriamento, onde vários trechos passaram de 29,35°C a 28,95°C, ou seja, 0,40°C a menos. Também as bordas do Jardim da Luz e as ruas no seu entorno sofreram considerável redução de temperatura, pois estavam aproximadamente na faixa de 29,15°C e 29,20°C no cenário atual e passaram para 28,90°C a 29,15°C no cenário com os pavimentos brandos. Ou seja, redução entre 0,60 a 0,05°C.

Nos cenários com mais árvores e naquele com mais arborização e com pavimento brando os resultados são similares, com temperaturas bem abaixo do cenário atual e do com pavimento brando apenas. Nota-se também que nos dois cenários onde são empregadas as árvores o ar está na faixa das temperaturas mínimas das legendas, de 28,90°C, por isto estão ambos com cores uniformes (figuras 91 e 92).

Tabela 26 – Temperatura do ar dos cenários nas simulações de inverno no Parque da Luz (°C)

Hora	Cenário atual (O)	Cenário A	Diferença de temperatura (O-A)	Cenário B	Diferença de temperatura (O-B)	Cenário C	Diferença de temperatura (O-C)
6h00	26,10	25,60	-0,47	25,63	-0,47	26,01	-0,09
7h00	26,00	25,60	-0,45	25,59	-0,41	25,95	-0,05
8h00	26,20	25,80	-0,38	25,82	-0,38	26,16	-0,04
9h00	26,60	26,20	-0,36	26,22	-0,38	26,59	-0,01
10h00	27,30	26,80	-0,55	26,71	-0,59	27,18	-0,12
11h00	28,10	27,40	-0,75	27,33	-0,77	27,95	-0,15
12h00	28,90	28,00	-0,94	27,89	-1,01	28,70	-0,20
13h00	29,50	28,50	-1,05	28,34	-1,16	29,34	-0,16
14h00	29,90	28,70	-1,25	28,58	-1,32	29,79	-0,11
15h00	30,10	28,70	-1,45	28,59	-1,51	29,97	-0,13
16h00	30,0	28,50	-1,55	28,45	-1,55	29,92	-0,08
17h00	29,50	28,00	-1,46	28,02	-1,48	29,44	-0,06
18h00	28,90	27,60	-1,35	27,56	-1,34	28,91	+0,01

Legenda:

Cenário A = com mais árvores,

Cenário B = mais árvores e pavimento brando,

Cenário C = pavimento brando.

Fonte: Autoras (2019)

Tabela 27 – Temperatura do ar dos cenários nas simulações de inverno na Av. Tiradentes (°C)

Hora	Cenário atual (O)	Cenário (A)	Diferença de temperatura cenário (O-A)	Cenário (B)	Diferença de temperatura cenário (O-B)	Cenário (C)	Diferença de temperatura cenário (O-C)
6h00	26,8	26,3	-0,55	26,17	-0,63	26,81	+0,01
7h00	26,8	26,2	-0,65	26,12	-0,68	26,76	-0,04
8h00	26,9	26,3	-0,56	26,31	-0,59	26,86	-0,04
9h00	27,4	26,8	-0,65	26,66	-0,74	27,3	-0,10
10h00	28,1	27,3	-0,85	27,11	-0,99	27,87	-0,23
11h00	28,9	27,9	-1,05	27,71	-1,19	28,64	-0,26
12h00	29,7	28,5	-1,25	28,24	-1,46	29,4	-0,30
13h00	30,4	28,9	-1,55	28,68	-1,72	30,04	-0,36
14h00	30,8	29,2	-1,65	28,93	-1,87	30,49	-0,31
15h00	30,9	29,2	-1,75	28,96	-1,94	30,65	-0,25
16h00	30,8	29,0	-1,85	28,88	-1,92	30,56	-0,24
17h00	30,3	28,6	-1,73	28,5	-1,8	30,15	-0,15
18h00	29,8	28,2	-1,65	28,1	-1,7	29,73	-0,07

Legenda:

Cenário A = com mais árvores,

Cenário B = mais árvores e pavimento brando,

Cenário C = pavimento brando.

Fonte: autoras (2019).

Figura 83 – Gráficos com temperatura do ar dos cenários de inverno no Parque da Luz

Legenda:

Série 1: cenário atual,

série 2: cenário com mais árvores,

série 3: cenário com mais árvores e pavimento brando,

série 4: cenário com alteração apenas de pavimento.

Fonte: autoras (2019).

Figura 84 - Gráficos com temperatura do ar dos cenários de inverno na Av. Tiradentes

Legenda:

Série 1: cenário atual,

série 2: cenário com mais árvores e pavimento brando

série 3: cenário com mais árvores,

série 4: cenário com alteração apenas de pavimento.

Fonte: autoras (2019).

Figura 85 - Temperatura do ar de cenário atual

Figura 86 - Temperatura do ar do cenário com pavimento branco

Figura 87 - Temperatura do ar do cenário com mais árvores

Cenário do 2º dia de simulação 3/08/2019 às 12h00.
Fonte: Autoras (2019).

Figura 88 - Temperatura do ar do cenário com mais árvores e pavimento brando

Cenário do 2º dia de simulação 3/08/2019 às 12h00.
Fonte: Autoras (2019)

7.8.2 Temperatura de superfície de inverno

Na tabela 29, são apresentados os dados de temperatura de superfície do ponto na Av. Tiradentes e dentro do Parque da Luz para o cenário de inverno. Como no cenário de verão, percebe-se que a diferença de temperatura em ambos os ambientes é grande, embora seja menos intensa do que na estação onde predomina o calor que registrou diferenças termais de até 21,20°C, como comentado anteriormente. No ponto do parque, no horário do dia mais quente às 13h00, a diferença de temperatura entre o parque e a avenida foi de 16,4°C, o sinal negativo na coluna das diferenças de temperaturas é para enfatizar que ela é no sentido de redução dessa temperatura (tabela 26).

A tabela 31 indica que as maiores reduções térmicas ocorreram na Av. Tiradentes, onde o cenário com arborização e pavimento brando obteve o melhor resultado, com abatimento de 14,50°C na temperatura de superfície em relação ao cenário original. Interessante notar que o valor encontrado na redução térmica na temperatura do cenário de pavimento brando, de

10,16°C, foi similar ao obtido na temperatura de superfície de verão, com 10,27°C.

Tabela 28 – Reduções na temperatura de superfície de inverno às 13h00

Cenário	Parque da Luz °C	Av. Tiradentes °C
Com mais árvores	0,32	11,08
Àrvores e pavimento brando	0,36	14,50
Pavimento brando	0,06	10,16

Fonte: Autoras (2020).

No interior do parque as diferenças de temperatura foram pouco significativas, sendo que no horário mais quente do dia, às 13h00, o cenário com mais árvores atingiu a diferença de 0,32°C, com mais arborização e o pavimento brando 0,36°C e o cenário do pavimento brando de 0,06°C (tabela 30). Já na avenida as amenizações de temperatura foram mais intensas (tabela 31). Novamente, o pavimento brando se revelou com bom desempenho tanto no cenário que aparece sozinho, como representado por C, com atenuação de temperatura no horário mais quente de 10,16°C e

média de 5,22°C, ao longo do dia. No horário das 13h00 no cenário com aumento de árvores (A), a redução de temperatura em relação ao cenário inicial foi de 11,08°C, com média de redução de calor de 5,99°C ao longo do dia. Por outro lado, no cenário com arborização e o pavimento brando às 13h00 houve refrescamento na temperatura de superfície de 14,50°C, com atenuação média de 7,99°C, ou seja, foi o melhor dos cenários.

Os gráficos indicam de forma mais expressiva os achados comentados anteriormente. Na figura 93, são indicadas as temperaturas praticamente coincidentes no interior do parque. Na figura 94, do ponto na Av. Tiradentes onde mostra a linha da série 4, vermelha (pavimento brando), quase coincidente com a linha da série 3, preta (cenário com apenas aumento de arborização. E, finalmente, a série 2 verde (arborização mais pavimento brando), apresenta-se com a maior diferença entre o cenário atual e o proposto.

Tabela 29 – Temperatura de superfície do cenário atual de inverno (°C)

Hora	Av. Tiradentes (A)	Parque da Luz (B)	Diferença de temperatura (A-B)
6h00	26,0	20,01	-6,0
7h00	25,9	20,0	-5,9
8h00	26,5	20,8	-5,7
9h00	31,7	21,8	-9,9
10h00	35,4	22,7	-12,7
11h00	38,5	23,5	-15,0
12h00	39,6	25,0	-14,6
13h00	41,5	25,1	-16,4
14h00	41,2	24,9	-16,3
15h00	39,6	24,7	-14,9
16h00	36,8	24,2	-12,6
17h00	32,5	23,2	-9,3
18h00	30,5	22,0	-8,5
19h00	39,7	21,6	-18,1
20h00	29,3	21,3	-8,0
21h00	29,0	21,1	-7,9

Fonte: autoras (2019).

Tabela 30 – Temperaturas de superfície cenários de inverno no Parque da Luz (°C)

Hora	Cenário atual	Cenário A	Diferença cenário (O-A)	Cenário B	Diferença cenário (O-B)	Cenário C	Diferença cenário (O-C)
6h00	20,01	20,03	+0,02	20,03	+0,02	20,10	+0,09
7h00	20,00	19,96	-0,04	19,96	-0,04	20,03	+0,03
8h00	20,80	20,74	-0,06	20,74	-0,06	20,79	-0,01
9h00	21,80	21,80	0,00	21,80	0,00	21,83	+0,03
10h00	22,70	22,62	-0,06	22,64	-0,08	22,68	-0,02
11h00	23,50	23,38	-0,09	23,41	-0,12	23,50	0,00
12h00	25,00	23,96	-0,20	24,80	-1,04	24,97	-0,03
13h00	25,10	24,74	-0,32	24,78	-0,36	25,04	-0,06
14h00	24,90	24,50	-0,36	24,54	-0,40	24,86	-0,04
15h00	24,70	24,22	-0,44	24,26	-0,48	24,64	-0,06
16h00	24,20	23,73	-0,45	23,75	-0,47	24,17	-0,03
17h00	23,20	22,68	-0,50	22,70	-0,52	23,12	-0,08
18h00	22,00	21,58	-0,42	21,58	-0,42	21,96	-0,04

Legenda:

Cenário A = com mais árvores,

Cenário B = mais árvores e pavimento brando,

Cenário C = pavimento brando.

Fonte: autoras (2019).

Tabela 31 – Temperatura de superfície de inverno na Av. Tiradentes (°C)

Hora	Cenário atual (O)	Cenário A	Diferença de temperatura cenário (O-A)	Cenário B	Diferença de temperatura cenário (O-B)	Cenário C	Diferença de temperatura cenário (O-C)
6h00	26,00	25,18	-0,82	24,92	-1,08	25,85	-0,15
7h00	25,90	25,12	-0,78	24,88	-1,02	25,80	-0,10
8h00	26,50	24,96	-1,54	25,09	-1,41	25,93	-0,57
9h00	31,70	27,18	-4,52	25,49	-6,21	27,24	-4,46
10h00	35,40	28,17	-7,23	25,85	-9,55	28,43	-6,97
11h00	38,50	29,10	-9,40	26,27	-12,23	29,61	-8,89
12h00	39,60	29,89	-9,71	26,66	-12,94	30,62	-8,98
13h00	41,50	30,42	-11,08	27,00	-14,50	31,34	-10,16
14h00	41,20	30,62	-10,58	27,23	-13,97	31,66	-9,54
15h00	39,60	30,49	-9,11	27,32	-12,28	31,54	-8,06
16h00	36,80	30,34	-6,46	27,36	-9,44	30,95	-5,85
17h00	32,50	29,35	-3,15	27,13	-5,37	29,81	-2,69
18h00	30,50	27,90	-2,60	26,65	-3,85	29,10	-1,40

Legenda:

Cenário A = com mais árvores,

Cenário B = mais árvores e pavimento brando,

Cenário C = pavimento brando.

Fonte: autoras (2019).

Figura 89 – Gráfico com temperaturas de superfície no cenário de inverno do ponto no Parque da Luz

Legenda:

Série 1: cenário atual,

série 2: cenário com alteração de árvores e pavimento,

série 3: cenário com mais árvores,

série 4: cenário com alteração apenas de pavimento.

Fonte: autoras (2019).

Figura 90 – Gráfico de temperatura de superfície das simulações de inverno no ponto na Av. Tiradentes

Legenda:

Série 1: cenário atual,

série 2: cenário com alteração de árvores e pavimento,

série 3: cenário com mais árvores,

série 4: cenário com alteração apenas de pavimento.

Fonte: autoras (2019).

Por último, os mapas expressam de forma espacial e visual a distribuição das temperaturas em cada cenário (figura 95). O cenário atual mostra as vias de entorno bastante quentes em tons de magenta, nas faixas de temperatura máxima do mapa, acima de 40,55°C, e apenas uma mancha verde mais fresca significativa no interior do parque, que não consegue estender sua influência para seus arredores por se tratar de temperatura de superfície. O cenário com adoção do pavimento brando mostra como as vias ficaram mais frescas indo em diversos trechos das faixas, de cerca de 40,55°C para cerca de 29,05°C, ou seja, 11,5°C a menos de temperatura e, em trechos pontuais, até para 26,75°C com redução de 13,8°C. Esses são fatos bastante significativos no sentido de aumentar o conforto climático dos usuários da área.

O cenário com alteração somente das árvores trouxe menos impacto no sentido de atenuar o calor das vias do que o cenário com apenas pavimento brando, mas se refletiu em reduzir ainda mais a temperatura do parque. Por fim, a situação que adota tanto o pavimento brando quanto mais arborização apresentou as maiores minimizações de temperatura, inclusive resfriando diversos trechos da Av. Tiradentes, e outras vias de temperaturas abaixo das registradas no interior do parque, o que é algo notável. Isso mostra, novamente, o excelente desempenho que a Infraestrutura Verde aliada aos pavimentos brandos pode trazer no sentido da mitigação das ilhas de calor urbanas em São Paulo, e na melhoria do conforto ambiental das pessoas.

Figura 91 – Temperatura de superfície de inverno

Fonte: Autoras (2019).

Seção 8 Discussão

Nesta seção, serão apresentadas as considerações da pesquisa, com relação à hipótese e os resultados alcançados e comentários sobre estes resultados.

A hipótese de ser possível inserir os pavimentos brandos e as tipologias de IV numa paisagem urbana consolidada como a da capital paulistana verificou-se ser possível, por meio de adaptações, como a retirada de faixas de estacionamento e da redução do espaço destinado ao tráfego veicular. Como observação indica-se que para a real implantação deste projeto seria necessário estudo complementar de análise de capacidade de viária para avaliar quantas faixas seria possível reduzir sem causar grandes transtornos aos usuários. Pois a via em questão, Av. Tiradentes, faz parte do corredor Norte-Sul de São Paulo, que liga a Zona Norte à Zona Sul do município e por isto possui tráfego pesado.

O objetivo de avaliar o espaço físico disponível para a implantação dos pavimentos brandos foi alcançado, por meio do projeto das seções viárias proposto de acordo com as hierarquias viárias.

Nestas seções se verificou ser viável a implantação de jardins de chuva ou de biovaletas e de arborização de médio a grande porte e dos pavimentos brandos, importantes para a melhoria climática da cidade e o controle das ICU. Estas seções também revelaram ser possível beneficiar os modais suaves, com o alargamento de calçadas e a criação de ciclovias e ciclofaixas, que também seriam beneficiadas pela arborização a ser implantada.

A princípio as tipologias de IV trabalhariam em conjunto com as estruturas de drenagem tradicionais, pois se considera preferível haver uma margem de segurança quanto ao funcionamento de ambas, de modo a evitar a ocorrência de desastres como enchentes

e alagamentos. Pois, num cenário de adaptação às ICU, onde os eventos climáticos extremos têm maior possibilidade de ocorrer, a possibilidade de falhas dos sistemas tradicionais de drenagem se torna maior e, neste caso, as tipologias de IV seriam valiosas no sentido de evitar tais falhas.

Os pavimentos brandos seriam inseridos nas vias, calçadas e ciclovias. Nas vias seria adotado o pavimento PAR de alta refletividade de cimento e pedras brancas, nas calçadas o pavimento permeável paver de cor clara e nas ciclovias pavimento brando de concreto permeável de cor vermelha. Com relação à adoção deste pavimento algumas considerações. Inicialmente quanto aos custos do PAR em relação ao de asfalto. O pavimento de concreto convencional tem sofrido a tendência a ser mais barato do que o asfáltico tendo em vista a elevação do custo do petróleo. Também deve-se considerar o custo total do ciclo de vida do pavimento de concreto requer menor manutenção e maior durabilidade do que o de asfalto, portanto possui mais vantagens. E o PAR é sugerido a ser adotado tendo em vista seu papel no combate às ICU, tema importante a ser debatido, estudado e enfrentado atualmente.

Com relação aos custos do pavimento brando, o PCC requer investimento inicial de implantação o dobro do que o asfáltico

(KOSTULSKI; KLAMT; BUDNY, 2017). Por outro lado, o pavimento de cimento branco custa aproximadamente duas vezes mais do que o PCC comum (ENGINEERING DEPARTMENT OF CHULA VISTA, 2012). Entretanto, devemos levar em conta nos custos todo o ciclo de vida do pavimento e os PCC tanto comuns quanto os brancos têm tempo de serviço muito maior do que os flexíveis e requerem menos manutenções. O pavimento de concreto branco em relação ao PCC comum por aquecer menos tende a sofrer menos com problemas decorrentes do calor e a durar mais. Lembrando que o pavimento de concreto tem durabilidade de até 35 anos e o asfáltico de 20 anos (PACKARD, 1994 *apud* GARTLAND, 2010). Então, computando por este lado os pavimentos brandos de concreto acabam sendo mais econômicos que os asfálticos. E com a tendência de elevação do preço do petróleo o pavimento asfáltico tende a se tornar mais caro.

Outro fato a avaliar para a etapa de implantação do projeto do pavimento PAR em conjunto com a IV seria por exemplo de executá-lo por fases, por exemplo na periferia. Isto porque nestes locais muitas vezes são carentes de infraestrutura urbana e haveria menos transtornos de remodelações, como a que ocorreria na execução na Av. Tiradentes. As obras gerariam por um tempo certo

Discussão

transtorno à sociedade e poderiam causar obstrução pela aceitação política da execução do projeto, devido ao impacto das interdições de vias. No caso de montar um trecho experimental, seria interessante construir um banco de dados para analisar as medidas implantadas. Também seria importante a criação de mecanismos de divulgação técnica das medidas discutidas na presente tese para os políticos e administradores governamentais terem conhecimento do assunto e tomarem as iniciativas de implantação.

Na estratégia de pavimento brando se buscou também sombrear o pavimento ao máximo, por meio do plantio das árvores de grande a médio porte. Mas nas ruas muito estreitas, onde não é possível o plantio de árvores, o pavimento brando se revelou como alternativa para reduzir as ICU. E tal situação pode ocorrer em diversos trechos da cidade, pois a paisagem urbana já está consolidada, como indica a sua alta taxa de urbanização de 99,1% (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO, 2010).

Destaca-se que as ações de diminuição de estacionamento e faixas veiculares devem ter estudos complementares por meio de

planejamento conjunto de engenharia de tráfego e cálculos complementares de capacidade viária, priorizando transportes de massa como os de média capacidade, como os corredores de ônibus, a ser implantados na região e a disponibilização de outras áreas de estacionamento em edificações e terrenos, por meio de incentivo à iniciativa privada. Também, deve-se considerar que a área possui outros modais de alta capacidade como linhas de metrô e trem. Medidas de melhoria ao transporte público, de modo a incentivar o seu uso em lugar dos modais individuais, são desejáveis para o município ser mais ambientalmente sustentável e necessárias no cenário existente de crescente mudanças climáticas e de aumento das ICU. Esta intensificação das ICU foi comprovada pelos mapas de temperatura de superfície de Mendes et al. (2018) e de Barros e Lombardo (2016).

Quanto à hipótese inicial deste trabalho, de que a adoção dos pavimentos brandos nas áreas urbanas pode auxiliar na mitigação das ICU, foi comprovada positivamente nas simulações computacionais. Observou-se que o pavimento brando pode auxiliar na mitigação das ICU e se ele for associado ao aumento de arborização os resultados podem ser ainda melhores. A

recomendação seria a de utilizar o pavimento brando PAR de concreto de alto albedo nas vias, pavimento permeável de cor clara nas calçadas e pavimento brando PAR de concreto permeável nas ciclovias.

O cenário com pavimentos brandos mostrou reduções mais significativas na Av. Tiradentes do que no interior do Parque da Luz, o que é muito importante pois é na avenida árida onde é mais significativo melhorar a sensação térmica dos usuários, a fim de lhes propiciar maior conforto climático. No verão, na Av. Tiradentes o cenário de pavimento brando reduziu ao meio-dia em $0,47^{\circ}\text{C}$ a temperatura do ar, e em $10,27^{\circ}\text{C}$ a temperatura de superfície (14h00). Esta foi a redução máxima de temperatura obtida para este cenário, um excelente resultado pois é preciso um esforço muito grande para realizar reduções na temperatura do ar. Por exemplo, para resfriar em cerca de $0,4^{\circ}\text{C}$ é seria preciso arborizar cerca de 16% da área em análise (NG et al., 2012). A atenuação média obtida no cenário de pavimento brando foi de $0,26^{\circ}\text{C}$ de temperatura do ar. No Parque da Luz, também no verão e às 12h00, o pavimento brando também obteve resultados positivos e conseguiu reduzir em $0,23^{\circ}\text{C}$ a temperatura do ar e em $0,18^{\circ}\text{C}$ a temperatura de superfície (14h00).

Para reduzir em $1,86^{\circ}\text{C}$ a temperatura do ar na Av. Tiradentes, às 12h00 no verão, apenas com o plantio de mais árvores, seria preciso plantar cerca de 805 exemplares de grande porte e 1460 de médio porte. Em termos gerais percentuais isto representa aumentar a área de plantio de árvores de 18,10% para 35,10%, ou seja, um aumento de 17% na área de cobertura por arborização e, portanto, quase dobrar a quantidade de indivíduos vegetais. De modo geral os cenários com aumento de arborização tiveram bons resultados, sendo o melhor o que adota tanto a arborização quanto a substituição do asfalto por pavimento brando PAR nas vias e pavimento permeável nas calçadas e ciclovias. Isto comprova que os pavimentos brandos associados à Infraestrutura Verde podem trazer benefícios reais no sentido de mitigar as ICU e trazer maior conforto aos cidadãos paulistanos.

Às 12h00 no cenário de verão no interior do Parque da Luz o cenário, levando em conta apenas com aumento de árvores, reduziu de forma significativa a temperatura do ar, em $1,50^{\circ}\text{C}$ e em $1,20^{\circ}\text{C}$ a de superfície (14h00). O mesmo cenário, no mesmo horário, na Av. Tiradentes, reduziu em $1,86^{\circ}\text{C}$ a temperatura do ar e em $17,77^{\circ}\text{C}$ a temperatura de superfície. Por outro lado, ainda no verão e ao meio dia, o cenário com o pavimento brando e aumento de

Discussão

arborização teve o melhor desempenho de todos, com a redução da temperatura do ar na Av. Tiradentes de 2,21°C e em 22,39°C na temperatura de superfície.

O cenário analisado apenas com o aumento de árvores no verão, com redução de 1,86°C de temperatura do ar na Av. Tiradentes (12h00), teve melhor desempenho do que o simulado por Rosenfeld et al. (1998), que para o cenário apenas com aumento de arborização estimou reduzir a temperatura em 1,5°C. Mas, deve-se levar em conta, que ele adotou métodos e programas diferentes e o estudo da presente pesquisa é microclimático, tendo maior grau de precisão (5m de resolução espacial).

Comparando o verão com o inverno, no inverno o comportamento dos cenários analisados foi semelhante, com as curvas de temperatura do ar e de superfície, tendo desenvolvimento parecido com o verão ao longo do dia. A diferença é que a temperatura inicial foi mais baixa, como era de se esperar em se tratando de uma época do ano naturalmente mais fria. As reduções de temperatura do ar ocorreram, mas em menor intensidade. No cenário com o pavimento brando às 12h00, no Parque da Luz a

redução foi de 0,06°C na temperatura do ar e de 0,32°C na de superfície (13h00). Na Av. Tiradentes, as reduções de temperatura também foram mais modestas que no verão. No mesmo cenário às 12h00 houve amenização de 0,25°C na temperatura do ar e de 10,16°C na de superfície (13h00). Ou seja, a redução de temperatura de superfície foi idêntica à obtida no verão (10,27°C), mas a do ar foi inferior.

Ainda na estação mais fria do ano, o cenário de aumento de arborização às 12h00 no interior do parque a diferença de temperatura do ar em relação ao cenário atual foi inferior à observada no verão, sendo que houve atenuação da temperatura 1,75°C, enquanto no verão esta redução foi de 2,21°C. Quanto à temperatura de superfície no inverno, esta sofreu redução em 0,32°C no parque e em 11,08 °C na temperatura de superfície na avenida (14h00). A redução na temperatura de superfície na avenida foi bem menor no inverno do que no verão, que atingiu 17,77°C no cenário com mais árvores no mesmo horário. O mesmo ocorreu no interior do parque que no inverno teve redução termal (0,32°C) inferior ao cenário de verão (1,20°C).

O mesmo comportamento foi observado no cenário com aumento de árvores e adoção do pavimento brando. Por exemplo, a temperatura de superfície no inverno na Av. Tiradentes foi reduzida em 14,50°C no inverno contra os 22,39°C no verão.

Estes achados levam a conclusão de que, quando as temperaturas estão mais elevadas, como é o caso do verão, a influência benéfica – no sentido de mitigar as ICU adotando o pavimento brando, a arborização, ou os dois – é maior do que quando as temperaturas estão mais baixas. Isto é um bom sinal, pois nas épocas do ano mais quentes, o arrefecimento do calor se torna mais necessário para a melhoria do conforto humano, diminuição dos poluentes e outros benefícios como a economia de eletricidade devido à menor necessidade de ar-condicionado.

Além da amenização das temperaturas, há outras vantagens do uso do pavimento brando de concreto nas vias. Por exemplo, ele tem maior durabilidade do que o revestimento asfáltico e resiste a cargas maiores.

Por outro lado, são necessárias algumas considerações sobre algumas limitações da pesquisa. Inicialmente quanto ao plantio maciço de árvores de grande a médio porte nas calçadas e canteiros

centrais, tal fato pode ser complexo numa paisagem urbana consolidada, como é o caso do local de estudo. No projeto de arborização, devem ser observadas as interferências como linhas subterrâneas de metrô e outras infraestruturas urbanas que podem entrar em conflito com as raízes.

Também, deve-se levar em conta o fato destas plantas demorarem um tempo de crescimento para atingirem o porte adulto (como considerado nos cenários) e, até lá, não propiciarão a atenuação de temperatura idealizada. Sendo assim, o pavimento brando tem a vantagem de já trazer os seus benefícios de redução das ICU de forma imediata à sua implantação. Deve-se, assim, considerar que há diversas ruas estreitas onde não é possível o plantio de árvores, neste caso o pavimento brando se apresenta como opção viável.

Outra limitação da pesquisa foi o fato de ter sido disponível utilizar apenas a versão 3.1 do programa, por questões de recursos humanos, financeiros e de suporte técnico à execução das simulações. A possibilidade de aprendizagem do programa por meio da versão 3.1, com a colaboração do pesquisador Flávio Mendes, do Departamento de Silvicultura da ESALQ/USP, foi decisiva para a sua escolha, assim como no auxílio no

Discussão

desenvolvimento das simulações computacionais. Contudo, atualmente existe versão mais atual do programa, que talvez possibilite testar mais variáveis, o que pode levar a resultados diferenciados.

O pavimento brando adotado nas simulações tinha albedo de 0,80, de cimento branco com pedras brancas. Por limitação de tempo, somente este foi simulado, para se observar a máxima atenuação de temperatura que seria possível obter com o material, pois foi este que se encontrou na literatura com o maior albedo. Entretanto foi realizada uma simulação preliminar com o pavimento brando de albedo 0,60, que seria o material sujo ao longo do tempo e foram obtidos bons resultados.

Na Av. Tiradentes e no inverno, ele obteve redução de temperatura do ar de 0,30°C e de 5,93°C na de superfície (13h00), ao meio dia. No mesmo horário a simulação com o pavimento brando e albedo 0,80 indicou redução de 0,45°C na temperatura do ar e de 10,27°C na de superfície (13h00), ou seja, não houve diferença na temperatura do ar e na de superfície ocorreu um certo contraste. Isto comprova que mesmo ao longo do tempo ele

permanece fornecendo resultados positivos quanto à mitigação das ICU.

Com relação ao pavimento brando também há algumas limitações. Ele tem um alto custo, bem maior que o concreto convencional, isto pode levar os gestores da administração pública a terem receio quanto à sua adoção. Mas, se deve ter em vista que, em um panorama como o que se apresenta atualmente, com a intensificação das ICU ano a ano e todas as consequências danosas ao ser humano e meio ambiente, a tecnologia do pavimento brando se apresenta como uma alternativa necessária e urgente.

Outra limitação do pavimento brando PAR, adotado nas simulações, é a sua cor extremamente clara, com albedo inicial de 0,80, que pode trazer problema de ofuscamento aos motoristas. Isto poderia ser contornado utilizando-o em conjunto com o plantio das árvores, cenário indicado pelas simulações computacionais como ideal. Este problema do possível ofuscamento pode ser alvo de pesquisas futuras, que também podem estudar simulações de pavimentos com outras colorações e alto albedo.

Outro fato que permanece incerto é o efeito da adoção de pavimentos de alto albedo, ou seja, alta reflexão, sobre os pedestres. Os cenários indicaram que a temperatura de superfície e do ar se torna menor, portanto. Teoricamente seria mais confortável do ponto de vista térmico aos usuários, mas pesquisas complementares seriam necessárias para observar se existem efeitos negativos e até

que ponto isto seria um fator limitante para a sua adoção, em contraponto aos benefícios que estes pavimentos podem trazer ao microclima urbano.

Considerações finais

No percurso deste trabalho foram produzidos diversos estudos que auxiliaram no delineamento de como seria desenvolvida a pesquisa desta tese, especialmente em relação aos estudos de caso. Estas aproximações se deram pelos trabalhos na “Trilha Norte-Sul” número 1, conforme explicitado na seção 6. Nelas, foi estudada a qualidade das calçadas e avaliada a percepção dos usuários sobre a importância do verde e da arborização (MARUYAMA & FRANCO, 2017; MARUYAMA et al., 2017), assim como foram investigados os reflexos da falta de Infraestrutura Verde no clima, pela ocorrência de Ilhas de Calor (MARUYAMA, 2019). Também foram analisadas as possibilidades de implantação de ciclovias e ciclofaixas e de tipologias de Infraestrutura Verde em trechos da “Trilha” por meio de propostas de seções viárias (MARUYAMA, DEUS & LEITE, 2017).

Posteriormente, esta metodologia de estudo da paisagem da mobilidade por seções viárias foi empregada no presente trabalho,

como indicado na seção 6. Após os diversos trabalhos realizados ao longo da “Trilha Norte-Sul” número 1, optou-se por voltar o foco da pesquisa da presente tese na “Trilha Norte-Sul” número 2, que atravessa pontos históricos importantes da capital paulistana e que ainda não havia sido explorada. E pelo fato de na área escolhida existir contraste de um trecho dotado de intensa arborização (Jardim da Luz) e outro árido (a Avenida Tiradentes), como visto na seção 7.

A hipótese de ser possível inserir os pavimentos brandos e as tipologias de IV, na paisagem da capital paulistana, foi comprovada por meio das adaptações, como a retirada das faixas de estacionamento e de redução do espaço destinado ao tráfego veicular, como visto na seção 8 – Discussão. Tal ação seria feita em conjunto com aumento de modais de transporte público de média capacidade, como os corredores de ônibus. No espaço viário, as tipologias de IV de jardins de chuva ou biovaletas e arborização

trabalhariam em conjunto com as redes tradicionais de drenagem, a fim de ajudar estes sistemas e assim evitar as possíveis falhas que podem acontecer devido ao fato de as ICU aumentarem a possibilidade de eventos climáticos extremos, que podem levar a alagamentos e enchentes.

O objetivo de avaliar o espaço físico disponível para a implantação dos pavimentos brandos foi alcançado por meio do projeto das seções viárias, como indicado na seção 6. No mesmo estudo de caso das seções viárias verificou-se ser indicado a aplicação nas vias pavimento brando tipo PAR de cimento e pedras brancas, nas calçadas pavimento permeável de cor clara e nas ciclovias e ciclofaixas pavimento de concreto permeável vermelho.

Um dos estudos de caso da seção 6 tratou da Av. Tiradentes, que concentra inúmeros marcos históricos em ambos os lados da via. A avenida acaba por fragmentar este espaço cultural existente, pois ela é larga e possui como barreira inúmeras faixas de rolamento veicular. Como proposta de estudos futuros seria interessante o aprofundamento de projetos que procurassem a integração em alguns pontos dos dois lados da avenida, talvez com o seu rebaixamento em certos trechos, onde existem os prédios mais

relevantes. Para isto seriam necessárias análises complementares das redes de infraestruturas enterradas existentes, como o metrô.

A hipótese inicial do trabalho, de que a adoção dos pavimentos brandos pode ajudar na mitigação das ICU em São Paulo/SP foi comprovada positivamente por meio das simulações computacionais no ENVI-met, como indicado na seção 7. Tal fato foi evidenciado tanto nas simulações de inverno quanto nas de verão no interior do Jardim da Luz e na Av. Tiradentes. As reduções de temperatura mais significativas foram detectadas na Av. Tiradentes, aonde no verão, com o cenário adotando o pavimento brando, foram observadas reduções de temperatura do ar ao meio dia de em $0,45^{\circ}\text{C}$ e de $10,27^{\circ}\text{C}$ de temperatura de superfície às 14h00. E no caso do inverno, nos mesmos horários, atenuação de $0,25^{\circ}\text{C}$ na temperatura do ar e em $10,26^{\circ}\text{C}$ na de superfície.

Este resultados se mostraram excelentes, pois outros pesquisadores indicaram ser preciso arborizar cerca de 16% de uma área para reduzir em $0,40^{\circ}\text{C}$ a temperatura do ar (NG et al., 2012), como foi ponderado na seção 7. Entretanto, nos horários a partir das 15h00 da tarde, os mais quentes do dia, foram observadas grandes diferenças de temperatura do ar (redução de acima de 3°C) no cenário com aumento árvores e do com arborização e pavimento

brando no verão, as quais podem indicar a necessidade de calibração mais detalhada do modelo ENVI-met, principalmente quanto à radiação, que foi utilizada o dado padrão do programa. Destaca-se também que no dia escolhido para a simulação de verão a temperatura máxima foi bem elevada, de 35,7°C (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, sem data), o que também pode ter influenciado os resultados.

Ainda com relação ao cenário de verão, adotando o pavimento brando, no interior do Jardim da Luz as simulações computacionais apontaram que ele conseguiu reduzir às 12h00 a temperatura do ar de 0,19°C e de 0,45°C a de superfície (14h00).

Como foi visto na seção 7, na simulação do ENVI-met para o verão no cenário com aumento de arborização, seria preciso quase dobrar a quantidade de árvores para reduzir às 12h00 em 1,86°C a temperatura do ar na Av. Tiradentes, ou seja, aumentar a área de plantio de 18,10% para 35,10%. Por outro lado, as simulações computacionais do ENVI-met, na mesma seção 7, indicaram que o cenário de verão, com a incorporação da tipologia de IV de arborização e a adoção do pavimento brando com albedo de 0,80,

tipo PAR de cimento e pedras brancas, foi o que forneceu os melhores resultados. Neste caso foi possível reduzir a temperatura do ar (12h00) em 2,21°C e em 22,39°C (14h00) a de superfície na Av. Tiradentes.

A seção 4 mostrou haver mais vantagens no uso do pavimento brando além da redução das temperaturas, como, por exemplo, aumentar a durabilidade do pavimento. Também indicou algumas limitações do pavimento brando permeável, como a necessidade de manutenção, na baixa capacidade de suporte de cargas, entre outros.

Como contribuições da pesquisa, citam-se alguns, como: gerar parâmetros para os tomadores de decisão, gestores e planejadores da Paisagem Urbana e demais projetistas poderem se balizar quanto à eficiência dos pavimentos brandos para incorporá-los em seus projetos e obras. Por outro lado, a mensuração de quantos graus Celsius é possível reduzir em termos de temperatura do ar e de superfície, indicada na seção 7, é importante como referência para outros pesquisadores da área terem como balizador para medir o grau de eficiência dos pavimentos brandos para o combate às ICU.

Também, a noção de quantidade de árvores e do porte da vegetação necessárias para reduzir as temperaturas de uma área observada na seção 7, por meio das simulações no ENVI-met, é importante para os pares da ciência e para auxiliar projetistas da Arquitetura da Paisagem a elaborarem projetos que tenham funções além de estética, que se relacionem à melhoria do microclima urbana e do conforto ambiental para melhor qualidade de vida das pessoas.

Indica-se que a pesquisa pode ter continuidade nos seguintes aspectos: na simulação de pavimentos brandos com cores diferentes do branco²⁹ e em diferentes albedos, testar simulações de cenários com outras estações do ano³⁰, utilizar programa de simulação

ENVI-met com versão mais recente³¹, efetuar medições ambientais em campo e contrapor aos resultados obtidos pelas simulações no programa ENVI-met, instalar estação meteorológica na área e adquirir os dados a serem usados na configuração do ENVI-met³².

Por fim, outra sugestão estudo futuro é a de simular cenário com (i) adoção de pavimento, (ii) cobertura branda e (iii) aumento de arborização. Assim, seria possível quantificar a máxima redução de temperaturas que as políticas públicas poderiam obter efetuando as três práticas preconizadas para a mitigação das ICU, indicadas na seção 1, (GARTLAND, 2010; ROSENFELD et al., 1998) e mensurar os reais benefícios da adoção destas estratégias.

²⁹ Na presente pesquisa, por limitação de tempo, foi simulado apenas o pavimento PAR na cor branca, com albedo de 0,80. Mas podem ser testadas outras cores nas simulações, como vermelho, amarelo, tons de cinza claro, etc.

³⁰ Da mesma forma, devido ao curto tempo, foram simulados apenas cenários para inverno e verão, em outras pesquisas podem ser simulados o outono e a primavera e, assim, cobrir todas as estações do ano.

³¹ Nesta pesquisa, como explanado na seção 8, foi adotada a versão 3.1 por questões de facilidade de obtenção e de auxílio quanto ao treinamento. No caso o

recurso humano disponível possibilitava o aprendizado e auxílio na aplicação das simulações pela versão 3.1, pois foi esta a disponibilidade gentilmente ofertada pelo Flávio Mendes, pesquisador da ESALQ, em colaborar com a pesquisa. No entanto, atualmente existe a versão 4.1 do ENVI-met, com novos recursos e que pode ser uma possibilidade a ser explorada para novas pesquisas.

³² Nesta pesquisa não foram efetuadas medições ambientais de temperatura de ar, superfície e umidade, também por escassez de tempo.

Referências bibliográficas

1. ABBUD, B. **Criando Paisagens**. Guia de trabalho em arquitetura paisagística. São Paulo: Editora Senac, 2006
2. ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. **Projeto técnico: pavimento permeável**. Manual, sem data. Disponível em <http://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/10/AF_Pav%20Permeavel_web.pdf>. Acesso em 15/09/16
3. AKAN, A. O. Sizing stormwater infiltration structures. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 128, n. 5, p. 534–537, 2002.
4. AHERN, J. From *fail-safe to safe-to-fail*: sustainability and resilience in the new urban world. **Landscape and Urban Planning**, nº 100, pp. 341-343, 2011.
5. AHERN, J.; PELLEGRINO, P.R.M.; BECKER, N. **Infraestrutura verde desempenho, estética, custos e método**. In: Lucia Maria Sá Antunes Costa; Denise Barcellos Pinheiro Machado (org.). Conectividade e resiliência: estratégias de projeto para a metrópole. Rio de Janeiro. Rio Books: PROURB, 2012.
6. ANDRADE, V.; LINKE, C. C. (orgs.) **Cidades de pedestres. A caminhabilidade no Brasil e no mundo**. 1º ed. São Paulo: Editora Babilônia, 2017.
7. ARAÚJO, J. de L. O.; ARAÚJO, A. C.; ARAÚJO, A. C. Percepção ambiental dos residentes do bairro Presidente Médici em Campina Grande, PB, no tocante à arborização local. **REVSBAU**, 3, 1–14, 2010
8. ARAUJO, R. V. et al. São Paulo urban heat islands have a higher incidence of dengue than other urban areas. **Brazilian Journal of Infectious Diseases**, v. 19, n. 2, p. 146–155, 2015.

9. ASSIS, E. S.; SIRQUEIRA, C. A.; BAMBERG, A. M. Influência da vegetação no microclima em ambiente simulado controlado. In: XII ENCAC / VIII ELACAC, 1, Brasília. **Anais...** Brasília: 2013.
10. ASAEDA, T.; CA, V. T.; WAKE, A. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 3, p. 413–427, 1996.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207**: terminologia e classificação de pavimentação: terminologia. Rio de Janeiro, 1982.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9050. Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos**. 2015.
13. BALBO, J. T. **Pavimentos de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
14. BARROS, H. R.; LOMBARDO, M. A. A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo-SP. **Geousp - Espaço e Tempo**, v. 20, n. 1, p. 160–177, 2016.
15. BASTOS, M. S.; BORGES, T. M. T.; SHIMABUKO, G.; PIMENTA, R. G. NEVES, A. R. M. **Aplicação para recomendação contextualizada sobre atividades físicas aos usuários do Parque da Cidade**. sem data. Disponível em <https://art.medialab.ufg.br/up/779/o/artigo_finalizado.pdf>. Acesso em 13/08/2019.
16. BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de Setembro de 1.997. **Código de Trânsito Brasileiro (CTB)**. Brasília, 23 de Setembro de 1.997.
17. BENNEDIC, M. A.; MCMAHON, E. T. **Green Infrastructure: linking landscapes and communities**. 1ª Edição: Washington: Island Press; Conservation Found, 2006.
18. BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica. Formação básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2008.

19. BONZI, R. S. O zoneamento ambiental geomorfológico como método para planejar a infraestrutura verde em áreas densamente urbanizadas. **Revista LABVERDE**, n. 10, p. 62–82, 2015.
20. BRITTO, L.; HELLER, L., P. **Influência da temperatura no comportamento de Pavimentos Flexíveis – uma análise direcionada às ilhas de calor**. Prime - Engenharia e Consultoria; CONCEPA; ANTT, 2016
21. BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environmental Modelling & Software**, v. 13, p. 373–384, 1998.
22. CACCIA, L. S. Mobilidade Urbana: Políticas Públicas e Apropriação do Espaço em Cidades Brasileiras. p. 185, 2015. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Geografia, Porto Alegre, RS. Disponível em <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/133191/000984211.pdf?sequence=1>>. Acesso em 13 fev. 2017.
23. CAMARGO, M.; FURLAN, M. Resposta Fisiológica do Corpo às Temperaturas Elevadas: Exercícios, Extremos e Temperatura. **Revista Saúde e Pesquisa**, V. 4, n. 2, pp. 278-288, 2011. Disponível em <<http://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/saudpesq/article/view/1723/1286>>.
24. CARDIM, R. Árvores cimentadas e as chuvas de verão na cidade de São Paulo. **Árvores de São Paulo**. 2011. Disponível em <<https://arvoresdesaopaulo.wordpress.com/2011/10/05/arvores-cimentadas-e-as-chuvas-de-verao-na-cidade-de-sao-paulo/>>. Acesso em 24/04/2019.
25. CARPIO, J. A. V. M. **Uso de pigmentos de óxido de metais mistos na pavimentação para a mitigação da ilha de calor urbana**. Tese (doutorado). Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.
26. CARPIO, J. A. V. M. *et al.* Urban pavements used in Brazil : Characterization of solar reflectance and temperature verification in the field. **Solar Energy**, v. 134, p. 72–81, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.044>>.

27. CASTRO, L. C. **Estudo e desenvolvimento de materiais “frios” para pavimentação urbana**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, SC, 2015.
28. CGE - CENTRO DE GERENCIAMENTO DE EMERGÊNCIAS CLIMÁTICAS DA PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Umidade relativa do ar**. Disponível em < <https://www.cgesp.org/v3/umidade-relativa-do-ar.jsp>>. Acesso em 06/12/19.
29. CIDADE ATIVA. **Diagnóstico ruas completas: joel carlos borges Relatório Final - Revisão 01**. São Paulo/SP, 2018. . Disponível em: <https://cidadeativa.org/wp-content/uploads/2018/05/CA_RuaJoelCarlosBorges_Relatório_Rev01.pdf>.
30. COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO DE SÃO PAULO - CET – Companhia de Engenharia de Tráfego – São Paulo. **Pesquisa e Levantamento de Tráfego**. Boletim técnico 31. CET/SP, 1982
31. COMPANHIA METROPOLITANA DE SÃO PAULO. Pesquisa origem-destino 2007 na Região Metropolitana de São Paulo, 2008.
32. CORMIER, Nathaniel S; PELLEGRINO, P. R. M. Infraestrutura verde: uma estratégia paisagística para a água urbana. **Paisagem e Ambiente: ensaios**, São Paulo, v. 25, p. 127-142, 2008.
33. CORSINI, Rodnei. **Pavimento permeável. Sistema revestido com peças intertravadas de concreto poroso promovem a infiltração da água**. Infraestrutura Urbana, PINI. 2014. Disponível em <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/37/pavimento-permeavel-308773-1.aspx>>. Acesso em 01/09/16
34. COSEO, P.; LARSEN, L. Cooling the Heat Island in Compact Urban Environments : The effectiveness of Chicago ’ s Green Alley Program. v. 118, p. 691–710, 2015.
35. DICIONÁRIO PRIBERAM. Dicionário online da língua portuguesa. Disponível em <<https://dicionario.priberam.org/humanizar>>. Acesso em 27/02/2019.

36. DOBBERT, L. Y. Arborização de parques urbanos e sua relação com o microclima da cidade de São Paulo. In: **São Paulo nas mudanças climáticas. Cenários ambientais para a resiliência urbana**. Org. Maria de Assunção Ribeiro Franco. São Paulo: Annablume, 2019.
37. DUARTE, D. H. S. **O impacto da vegetação no microclima em cidades adensadas e seu papel na adaptação aos fenômenos de aquecimento urbano. Contribuições a uma abordagem intersdisciplinar**, 2015. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/16/tde-11052016-104104/>>.
38. DUCHENE, M.; MCBEAN, E. A.; THOMSOM, N. R. Modeling of infiltration from trenches for storm-water control. **Thermoacoustics: A Unifying J. Water Resources Planning Manager.**, v. 120, n. 3, p. 276–293, 1994.
39. EPA - United States Environmental Protection Agency. **Conceptual Green Infrastructure Design for Washington Street, City of Sanford**, 2008a. Disponível em < https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/sanford_concept_design_508.pdf>. Acesso em 24/01/2018.
40. _____. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Urban Heat Island Basics. p. 1–22, 2008. Disponível em: <<http://www.epa.gov/heatisland/resources/pdf/BasicsCompendium.pdf>>5Cn<http://www.epa.gov/heatisland/about/index.htm>5Cnpapers2://publication/uuid/E82A9E0C-E51A-400D-A7EE-877DF661C830>. Acesso em 24/01/2018.
41. _____. Reducing urban heat islands - cool pavements. In: Reducing urban heat islands: Compendium of strategies, 2012. v. 204p. 439–453. Disponível em < <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>>.
42. ENGINEERING DEPARTMENT. City of Chula Vista. Califórnia - EUA. **Cool pavements study final report**, 2012. Disponível em <<https://www.chulavistaca.gov/Home/ShowDocument?id=5481>>. Acesso em 01/05/2019.
43. ENVI-met. Página oficial do distribuidor do programa. Disponível em < <http://www.envi-met.info/doku.php?id=root:start>>. Acesso em 21/11/2019.

44. FRANCA, R. R. **Anticiclones e Umidade Relativa do Ar: Um estudo sobre o clima de Belo Horizonte**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. Disponível em <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MPBB-7VQH45/inicio.pdf?sequence=1>>. Acesso em 13/08/2019.
45. FRANCO, M. A. R.; ARANTES, B. L.; POLIZEL, J.L.; SILVA FILHO, D. F., 2016. Mapa de extração de uso e cobertura do solo por meio de imagens de alta resolução da cidade de São Paulo.
46. FRANCO, M. A. R. Projeto de pesquisa. **Infraestrutura verde para a resiliência urbana às mudanças climáticas para cidade de São Paulo**. Instituição sede: FAU USP. FAPESP/SP. 2015
47. FRANCO, M. A. R (org.). **São Paulo nas mudanças climáticas cenários ambientais para a resiliência urbana**. São Paulo/SP: Annablume Editora, 2019.
48. FERREIRA, A. B. H. **Aurélio século XXI: o dicionário da Língua Portuguesa**. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.
49. FERREIRA, F. L.; PRADO, R.T.A. **Medição do albedo e análise de sua influência na temperatura superficial dos materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil**. São Paulo: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, 351, 1-12. 2003
50. FOLHA DE SÃO PAULO. Seminário episcopal na Avenida Tiradentes. Coleção Folha São Paulo Antiga. Sem data. Disponível em <http://spantiga.folha.com.br/foto_9.html>. Acesso em 29/05/2019.
51. FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 2003.
52. GARTLAND, L. **Ilhas de Calor: Como Mitigar Zonas de Calor em Áreas Urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 248, 2010.
53. GARTLAND, L. Cool roof energy savings evaluation for City of Tucson Thomas. **O.Price Service Center Administration Building One**, Tucson, AZ, City of Tucson, 2001.

54. GEHL, J.; GEMZØE, L. **Novos Espaços Urbanos**. 1ª. ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2002.
55. GLOBO. São Paulo respirar. **SP tem menos de 40% de área verde em seu território**. 12/04/2011. Disponível em <<http://g1.globo.com/sao-paulo/respirar/noticia/2011/04/sp-tem-menos-de-40-de-area-verde-em-seu-territorio.html>>. Acesso em 23/06/20.
56. GONTIJO, B. M.; ASSIS, W. L. NORTE DE MINAS GERAIS E SUAS RELAÇÕES COM OS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ATUANTES : PERÍODOS CHUVOSOS DE 1978 / 79 E 1984 / 85. **GEONOMUS**, v. 5, n. 2, p. 6, 1997.
57. GRUPO SPT SONDAGENS. Dimensionamento dos pavimentos. Disponível em < <https://goo.gl/6xVLFy>>. Acesso em 09/07/17.
58. GUITON, A; HALL, J. **Tratado de fisiologia médica**. Editora Elsevier, Medicina Nacionais, 12º Edição, 2011.
59. GUSSON, C. dos S. **Efeito da densidade construída sobre o microclima urbano: construção de diferentes cenários possíveis e seus efeitos no microclima para a cidade de São Paulo, SP**. p. 152, 2014. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-15082014-143528/>>.
60. HOWARD, L. **The Climate of London deduced form meteorological observations made in the metropolis and it various places around it**. [s.l.] IAUC - International Association for urban climate., 1833. Volume 1.
61. IKEFUTI, P.V. **Associação entre variáveis meteorológicas, Índice Climático, fatores socioeconômicos e mortalidade por doenças do aparelho circulatório (Acidente Vascular Cerebral e Embolia Pulmonar) no município de São Paulo – SP**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. 2016. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-13022017-114517/>>.
62. IKEFUTI, P. V.; BARROZO, L. V.; BRAGA, A. L. F. Mean air temperature as a risk factor for stroke mortality in São Paulo, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, n. 8, p. 1535–1542, 2018.

63. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Página oficial. **Dados da estação automática de Mirante de Santana.** Disponível em < <http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em 14/08/2019
64. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001. Disponível em <<https://goo.gl/HoZcny>>. Acesso em 28/06/17
65. GUNTOR, N.; ANTING; MOHD, F.; PONRAJ, M.; IWAO, K. Thermal Performance of Developed Coating Material as Cool Pavement Material for Tropical Regions. **Journal of materials in civil engineering**, v. 26, n. April, p. 755–760, 2014.
66. INCLUA-SE. Faixa livre - cartilhas de acessibilidade às calçadas. Disponível em < <http://incluase.blogspot.com/2010/12/faixa-livre-cartilhas-de-acessibilidade.html>>. Acesso em 17/04/2019
67. HERZOG, C. P. Infraestrutura verde: sustentabilidade e resiliência para a paisagem urbana. **Revista Labverde** nº 1, pp. 92 – 115, 2010.
68. _____. **Seção IV: Ambiente construído. Infra-estrutura verde para cidades mais sustentáveis.** Secretaria do Ambiente. 2010b.
69. IBGE CIDADES. **São Paulo (município).** Disponível em < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>>. Acesso em 22/06/20.
70. IKEFUTI, P. V. **Associação entre variáveis meteorológicas, índice climático, fatores socioeconômicos e mortalidade por doenças do aparelho circulatório (acidente vascular cerebral e embolia pulmonar) no município de São Paulo - SP, 2017.** . Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-13022017-114517/>>.
71. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. Banco de dados BDMEP . **Série histórica, dados horários.** Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em 31/07/2019

72. INTERPAVE. **SUDS + permeable pavement today**. Disponível em < <http://www.paving.org.uk/commercial/permeable.php>>. Acesso em 01/09/16
73. INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em 20/06/2019.
74. JFS - JAPAN FOR SUSTAINABILITY. **Efforts in Japan to mitigate the Urban Heat Island Effect**. 30/09/2018. Disponível em <https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id027856.html> Acesso em 09/02/2018.
75. KATSZCHNER, L. Thermal comfort evaluation for planning in cities under consideration of global climate change. **Fórum Patrimônio: ambiente construído e patrimônio sustentável**, (on-line), Belo Horizonte (MG), v. 4, n. 1, 2010, 14p. Disponível em http://www.forumpatrimonio.com.br/seer/index.php/forum_patrimonio/article/view/39/34
76. KINOUCHI, T.; YOSHINAGA, T.; FUKANAE N.; KANDA, M.. Development of cool pavement with dark colored high albedo coating. In: Fifth conference for the Urban Environment, Vancouver. **Anais...** Vancouver: 2004.
77. KOSTULSKI, A. M; KLAMT, R. A.; BUDNY, J. Análise Comparativa De Custo Entre Pavimentos De Concreto De Cimento Portland, Blocos Intertravados E Concreto Asfáltico. In: CRICTE - XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, **Anais...**2017.
78. LABAKI, L. C.; FONTES, M. S. G. de C.; BUENO-BARTHOLOMEI, C. L.; DACANAL, C. Conforto térmico em espaços públicos de passagem: estudos em ruas de pedestres no estado de São Paulo. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, p. 167–183, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212012000100003&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em 26/02/2019.
79. LEVINSON, R.; AKBARI, H. Solar Reflectance of Cool Paving Materials Effects of Composition and Exposure on Albedo of Concrete. **Cement and concret research**. v. 32, p. 2001–2002, 2002.

80. LIMA, G. N. de; MAGAÑA RUEDA, V. O. The urban growth of the metropolitan area of Sao Paulo and its impact on the climate extremes. **Weather and Climate Extremes**, v. 21, n. May, p. 17–26, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.05.002>>.
81. LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles**. 1º ed. São Paulo/SP: Hucitec, 1985.
82. LOPES, A. **O sobreaquecimento das cidades - causas e medidas para a mitigação da ilha de calor de Lisboa**. 6º Jornada de Climatização da Ordem dos Engenheiros. Anais...2006
83. LPE ENGENHARIA. **Pavimento intertravado é sempre permeável?** Disponível em <<http://lpe.tempsite.ws/blog/index.php/pavimento-intertravado-e-sempre-permeavel/>>. Sem data. Acesso em 02/01/2020.
84. MALATESTA, M. E. B. **Caminhabilidade e segurança: o desafio do desenho urbano nas cidades brasileiras**. In: Cidades de pedestres. A caminhabilidade no Brasil e no mundo. Victor Andrade; Clarisse Cunha (orgs.). Rio de Janeiro: Babilonia, 2017.
85. MANUAL DE CONNECTICUT. **Connecticut Stormwater Quality Manual**, 2004. Disponível em <www.ct.gov/deep/stormwaterqualitymanual>
86. MARENGO, J. A. *et al.* **Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o século XXI: projeções de clima futuro usando três modelos regionais**. Relatório 5. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Secretaria de Biodiversidade e Florestas - SBF. Brasília, 2007 [s.l: s.n.]. Disponível em: < <https://goo.gl/mdbZB3> >. Acesso em 28/06/17
87. MARENGO, J. A.; JONES, R. ; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional Climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 2241–2255, 2009a.
88. MARENGO, J. A; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P.; ALVES, L. M.; CUADRA, S. V.; VALVERDE, M. C.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. C.; FERRAZ, S. E.T. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v. 35, n. 6, p. 1089–1113, 2009b.

89. MARENGO, J. A.; et al. (2009c). An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: Part 2: historical trends. **Climatic Change**, 98, 509–529.
90. MARQUES, T. H. N.; BATISTELA, T. S. Percepção da caminhabilidade no entorno da interseção das avenidas Engenheiro Caetano Álvares e Imirim. **Revista LabVerde**, 12, 151–177, 2016
91. MARUYAMA, C. M. **Análise de eixos viários na perspectiva do uso da bicicleta: o caso de Chapecó – SC**. 2013. 172 f. Dissertação (Mestrado em engenharia urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Santa Catarina, 2013
92. MARUYAMA, C.M.; SIMÕES, F. A. Arborização urbana e transporte ciclovitário: o caso de Chapecó, SC. **Revista dos Transportes Públicos - ANTP**, ano 36, 2º quadrimestre, 2014.
93. MARUYAMA, C. M.; FRANCO, M.A.R. Pavimentos permeáveis e infraestrutura verde. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, v. 4, nº 9, pp. 73-86, 2016.
94. MARUYAMA, C.M.; FRANCO, M.A.R. **Caminhar na Trilha Norte-Sul: infraestrutura verde entre o Parque da Água Branca e o Horto Florestal/SP**. Labor & Engenho, Campinas [SP] Brasil, v.11, n.3, p.355-373, jul./set. 2017.
95. MARUYAMA, C. M.; LEITE, L. P.; DEUS, L. B. D. de. Corredor de infraestrutura verde: rota ciclovitária como conexão entre Parque do Povo - Ibirapuera. **Revista LABVERDE** nº1, v.8, pp. 65 - 90, 2017.
96. MARUYAMA, C. M. **Arborização, Infraestrutura Verde e Pavimentos brandos para a mitigação as Ilhas de Calor Urbanas em São Paulo**. In São Paulo nas mudanças climáticas. Cenários ambientais para a resiliência urbana. Org. Maria de Assunção Ribeiro Franco. São Paulo: Annablume, 2019.
97. MASCARÓ, J. L. **Loteamentos Urbanos**. 2º ed. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2005.
98. MASCARÓ, J. L. **Loteamentos urbanos**. 2º Edição ed. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2005.

99. MASCARÓ, L.; MASCARÓ, J. **Vegetação Urbana**. 2º ed. Porto Alegre: Editores: L e J Mascaró, 2005.
100. MATSUDO, S. M.; MATSUDO, V. R.; ARAÚJO, T.; ANDRADE, D.; ANDRADE, E.; Oliveira, L. (2002). Nível de atividade física da população do Estado de São Paulo: análise de acordo com o gênero , idade , nível socioeconômico , distribuição geográfica e de conhecimento. **Revista Brasileira de Ciência E Movimento**, 10(4), 2002.
101. MAZZONETO, C. **Concreto permeável. Infraestrutura urbana**. Abril, 2011. Disponível em <infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/13/artigo254488-2.aspx>
102. MCMICHAEL, A. J.; WILKINSON, P.; KOVATS, R. S.; PATTENDEN, S.; HAJAT, S.; ARMSTRONG, B.; VAJANAPOOM, N.; NICIU, E. M.; MAHOMED, H.; KINGKEOW, C.; KOSNIK, M.; NEILL, M. S. O.; ROMIEU, I.; RAMIREZ-AGUILAR, M.; BARRETO, M. L.; GOUVEIA, N.; NIKIFOROV, B. International study of temperature , heat and urban mortality : the ‘ ISOTHURM ’ project. **Environmental Edipemiology**, n. June, p. 1121–1131, 2008.
103. MCPHERSON, E. G.; MUCHNICK, J. **Effects of street tree shade on asphalt concrete pavement performance**. **Journal of Arboriculture**, v. 31, n. 6, p. 303–310, 2005.
104. MEIOAMBIENTENEWS. Apresenta informações sobre Meio Ambiente. Desenvolvido por jornalistas, consultores ambientais com apoio do Banco Mundial e Governo do Sergipe. Disponível em <[http://www.meioambientenews.com.br/conteudo.ler.php?q\[1%7Cconteudo.idcategoria\]=26&id=6022](http://www.meioambientenews.com.br/conteudo.ler.php?q[1%7Cconteudo.idcategoria]=26&id=6022)>. Acesso em 26/02/2019
105. MELO, T. dos A. T.; COUTINHO; A. P.; DOS SANTOS, J. B. F.; CABRAL, J. J. S. P.; ANTONINO, A. C. D.; LASSABATERE, L. Trincheira de infiltração como técnica compensatória no manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 3, p. 53–72, 2016.
106. MENDES, F.; SILVA-FILHO, D.; LOPES, A. Proposta de Metodologia Para a Quantificação da Cobertura Arbórea Na Cidade De Lisboa a Partir De Imagem De Alta Resolução, **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, número 21, pp. 3254-3265, 2015.

107. MENDES, F. H.; ZANLORENZI, H. C. P.; DOBBERT, L. Y.; PRATA-SHIMOMURA, A. R.; SILVA FILHO, D. F. Alterações microclimáticas na Praça José Bonifácio em Piracicaba (SP). In: XVIII Congresso Brasileiro de Arborização Urbana (CBAU), Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2015. Disponível em < <http://sbau.web2204.uni5.net/Arquivos/21282.pdf>>. Acesso em 19/08/2019.
108. MENDES, F. H. ; HAMAMURA, C.; GUARDIA, I.; BRUN, E. J.; BRUN, F. G. K.; FILHO, D. F. Thermal spatial pattern changes in São Paulo/SP/Brazil from 1999 to 2018. *Climatologia Aplicada ao Meio Ambiente e Desempenho Térmico*. In XVI Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental. 29 a 31 de Outubro de 2018. **Anais eletrônico...** EESC - São Carlos - SP. Brasil, 2018. Disponível em < <http://biblioteca.eesc.usp.br/images/soac/ppgsea/ppgsea2018anais.pdf>>
109. MENDES, F. Organização do mapa de temperatura de superfície do Município de São Paulo, 2019a.
110. _____. Imagem de cenário de vegetação da área de estudo atual. 2019b.
111. _____. Imagem de cenário de vegetação da área de estudo com aumento de árvores. 2019c
112. _____. Tutorial para iniciantes: *software* ENVI-met versão 3.1. Outubro de 2014. Disponível em <http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=publico:projetos:envi-met31_tutorial_iniciantes.pdf>. Acesso em 16/02/2019.
113. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Coleção bicicleta Brasil: Programa Brasileiro de Mobilidade por Bicicleta. Ministério das Cidades: Brasília, 2007.
114. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. Disponível em < <https://goo.gl/zgj5j1> >. Acesso em 28/06/17
115. MONUMENTOS SP. **Parque jardim da luz**. Disponível em <<http://monumentos.spturis.com.br/parque-da-luz/>>. Acesso em 05/12/2019.

116. MOURA, N. C. B. **Biorretenção tecnologia ambiental urbana para o manejo das águas da chuva.** [s.l.] Tese (doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2013.
117. NATHANIEL S. C.; PELLEGRINO, P. R. M. Infra-estrutura Verde: uma estratégia paisaística para a água urbana. **Paisagem Ambiente: Ensaios**, (25), 127–142., 2008
118. NG, E.; CHEN, L.; WANG, Y.; YUAN, C. A study on the cooling effects of greening in a high-density city : An experience from Hong Kong. **Building and Environment**, v. 47, p. 256–271, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.014>>. Acesso em 20/08/2019
119. NOAA - NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. Time related maps. Disponível em <<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer>>. Acesso em 14/08/2019
120. NUNES, D. M.; ALVAREZ, M. G. L.; OHNUMURA JR., A. A.; DA SILVA, L. P. Aplicação de técnicas compensatórias no controle dos escoamentos superficiais: estudo de caso em loteamento residencial em Jacarepaguá, Rio de Janeiro. **Revista Internacional de Ciências**, v. 7, n. 1, p. 3–21, 2017.
121. OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, v. 7, p. 769–779, 1973.
122. OLIVEIRA, R. DI F.; ALVES, J. W. S. **Mudanças Climáticas Globais no Estado de São Paulo.** 1º ed. São Paulo/SP: Governo do Estado de São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente. CETESB, 2011.
123. OLIVEIRA, B. S. Ilhas de calor em centros urbanos. Disponível em < www.dsr.inpe.br/vcsr/files/16a-Ilhas_de_calor_em_centros_urbanos.pdf>. Acesso em 23/01/2018.
124. ORGANIZACION PANAMERICANA DE LA SALUD; ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD. Investigaciones operativas prioritarias para evaluar el impacto de las acciones de control de las infecciones respiratorias agudas. Ginebra: OPS/OMS, 1992

125. PACHECO, P. Espaços Públicos: 10 princípios para conectar as pessoas e a rua. **ArchiDaily**, Jun 2017. Disponível em < <https://www.archdaily.com.br/br/873962/espacos-publicos-10-principios-para-conectar-as-pessoas-e-a-rua>>.
126. PAIXÃO, M. P.; CORDEIRO, C. C. C.; CORREIA, M. da C. N. Pavimentos Semirrígidos: Prevenção E Tratamento Da Reflexão De Trincas. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 16, n. 9, p. 1689–1699, 2017. Disponível em: <[https://revistas.unifacs.br/index.php/sepa/search/authors/view?firstName=Monique&middleName=Paixão&lastName=Paixão&affiliation=Universidade Salvador - UNIFACS Campus Feira&country=BR](https://revistas.unifacs.br/index.php/sepa/search/authors/view?firstName=Monique&middleName=Paixão&lastName=Paixão&affiliation=Universidade%20Salvador%20-%20UNIFACS%20Campus%20Feira&country=BR)>.
127. PARANA. Departamento de Estradas e Rodagens – DER. **Norma de Pavimentos Flexíveis e Rígidos**. 2008.
128. PELLEGRINO, P. R. M. **Paisagem como infraestrutura hídrica**. In Estratégias para uma infraestrutura verde. Org. Paulo Renato Mequita Pellegrino; Newton Becker Moura. 1º edição. São Paulo: Manole, 2017.
129. _____. Paisagens híbridas: projetos de sistemas adaptativos da natureza às nossas cidades. In: ANNABLUME EDITORA (Ed.). **São Paulo nas mudanças climáticas. Cenários ambientais para a resiliência urbana**. 1º ed. São Paulo: Annablume Editora. p. 373, 2019.
130. PISELLO, A. L. State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities. **Solar Energy**, 144, 660–680. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.068>, 2017.
131. PORTLAND, city. **Stormwater Management Manual**. 502p. 2016. Disponível em < <https://www.portlandoregon.gov/bes/64040>>
132. POMERANTZ, M.; AKBARI, H.; CHEN, A.; TAHA, H.; ROSENFELD, A. H. **Paving materials for heat island mitigation**. 1º ed. Washington: U.S Department of Energy, 1997.
133. PORTLAND. **Vegetated infiltration basins**. Disponível em < <https://www.portlandoregon.gov/bes/article/127474>>. Acesso em 27/11/2019.

134. _____. BUREAU OF PLANNING. PORTLAND. OREGON. **Section B PEDESTRIAN EMPHASIS**. In: CITY OF PORTLAND. BUREAU OF PLANNING. PORTLAND. OREGON. **Central city fundamental design guidelines**, 2003. Disponível em < <https://www.portlandoregon.gov/bps/34250>>
135. _____. **Stormwater Management Manual**. August, 2016. Disponível em: < <https://www.portlandoregon.gov/bes/64040> >. Acesso em: 07/03/17
136. PREFEITURA MUNICIPAL DA CIDADE DE SÃO PAULO. Geosampa. Mapa digital da Cidade de São Paulo - MDC, sem data. Disponível em < http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx>
137. PREFEITURA MUNICIPAL DA CIDADE DE SÃO PAULO. **Conheça as regras para arrumar a sua calçada**. São Paulo/SP: Prefeitura Municipal de São Paulo. Coordenação das subprefeituras, 2012.
138. PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO de. **Boletim CEInfo Informativo Censo Demográfico 2010 Resultados parciais do Censo Demográfico 2010**, 2010. . Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=35&dados=0>>.
139. PRIBERAN. (dicionário eletrônico PRIBIBERAN. Disponível em: <<https://dicionario.priberam.org>>. Acesso em 27/11/2019.
140. PRUDENTE, P. **Clima seco x clima úmido: o que você precisa saber**. site. 2016. Disponível em <<https://boratreinarblog.wordpress.com/2016/03/14/clima-seco-x-clima-umido-o-que-voce-precisa-saber/>>. Acesso em 24/07/2019.
141. QUIRIRIM NEWS. Raízes de árvores são cimentadas em praça de Quiririm. Quiririm news.com.br. Disponível em < <https://quiririmnews.com.br/raizes-de-arvores-sao-cimentadas-em-praca-de-quiririm/>>. Acesso em 09/04/20219.
142. QIN, Y.; HILLER, J. E. Water availability near the surface dominates the evaporation of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 77–84, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.063>>.
143. RODRIGUES, T. D. *et al.* Percepção Sobre Arborização Urbana De Moradores Em Três Áreas De Pires Do Rio - Goiás. **Revista de Estudos Ambientais**, 12(2), 47–61, 2010.

144. ROSENFELD, A. H. *et al.* Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. **Energy and Buildings**, v. 28, n. 1, p. 51–62, 1998.
145. SALLES, S. Brasil vai estar entre os mais afetados por mortes em ondas de calor. *Jornal da USP*. São Paulo, 15 de agosto de 2018. Disponível em <<https://jornal.usp.br/ciencias/ciencias-da-saude/brasil-vai-estar-entre-mais-afetados-por-mortes-em-ondas-de-calor/>>. Acesso em 26/02/2019.
146. SANSALONE, J.; KUANG, X.; YING, G.; RANIERI, V. Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage. **Water Research** n° 46, pp. 6763-6774, 2012. Elsevier.
147. SANTAMOURIS, M. *et al.* Passive cooling of the built environment – use of innovative reflective materials to fight. **International Journal of Low Carbon Technologies**, v. 3, n. 2, p. 71–82, 2008. Disponível em: <<http://ijlct.oxfordjournals.org/content/3/2/71.abstract>>.
148. SANTAMOURIS, M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 26, p. 224–240, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>>.
149. SANTOS, P. M. dos; CACCIA, L. S.; SAMIOS, A. A. B.; FERREIRA, L. Z. WRI CIDADES.org. **8 Princípios da Calçada**. Construindo cidades mais ativas, 2017.
150. SÃO PAULO (município). Decreto n° 45.904 de 19 de maio de 2005. Regulamenta o artigo 6° da Lei n° 13.885 de 25 de agosto de 2004, no que se refere à padronização dos passeios públicos do Município de São Paulo. Disponível em <http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=20052005D%20459040000>. Acesso em 11 de Abril de 2017.
151. SÃO PAULO (município). Lei municipal 15.442 de 09 de setembro de 2011. Dispõe sobre a limpeza de imóveis não edificado e a construção e manutenção de passeios, bem como cria o disque-denúncia; revoga as leis n° 10.508, de 4 de maio de 1988, e n° 12.993, de 24 de maio de 2000, o art. 167 e o correspondente item constante no anexo VI da Lei n° 13.478, de 30 de dezembro de 2002.

152. SÃO PAULO (estado). Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC). Instituída pelo Decreto Estadual nº 13.798 de 09 de novembro de 2009. São Paulo/SP, 2009. Disponível em: <<https://goo.gl/zX6V9P>>.
153. SÃO PAULO. **São Paulo: aspectos territoriais**. Disponível em < <http://www.bibliotecavirtual.sp.gov.br/temas/sao-paulo/sao-paulo-aspectos-territoriais.php>>. Acesso em 15/12/2019
154. SÃO PAULO (município). Lei municipal 15.442 de 09 de setembro de 2011. Dispõe sobre a limpeza de imóveis não edificado e a construção e manutenção de passeios, bem como cria o disque-denúncia; revoga as leis nº 10.508, de 4 de maio de 1988, e nº 12.993, de 24 de maio de 2000, o art. 167 e o correspondente item constante no anexo VI da Lei nº 13.478, de 30 de dezembro de 2002.
155. SÃO PAULO. Geosampa. Mapa digital da cidade de São Paulo. Disponível em <http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx>. Acesso em 22/04/17
156. SÃO PAULO IN FOCO. **O Parque mais antigo do Brasil - O Jardim da Luz**. Disponível em < <http://www.saopauloinfoco.com.br/jardim-da-luz/>>. Acesso em 29/05/2019.
157. SANTAMOURIS, M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 224–240, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>>. Acesso em 12/02/2018
158. SANTAMOURIS, M. The role of green spaces. In: Santamouris, M. (ed). **Energy and climate in the built environment**, Londres: James; James, 2001. p 97-109.
159. SANTOS, G. E. O. (sem data). Cálculo amostral: calculadora on-line. Disponível em: <<http://www.calculoamostral.vai.la>>. Acesso em: 10/10/2016.
160. SECRETARIA DO VERDE E DO MEIO AMBIENTE. PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO/SP. **Atlas ambiental de São Paulo. Clima urbano**. Disponível em <file:///C:/Users/Cintia/Downloads/Atlas_Ambiental_SP_Clima_Urbano.pdf> Acesso em 26/11/17.

161. SECRETARIA MUNICIPAL DE SAÚDE DE SÃO PAULO. **Boletim CEinfo Informativo do Censo Demográfico 2010**. Maio 2010. Disponível em <CEInfo - BVS SMS-SPsms.sp.bvs.br > lildbi > docsonline > get>. Acesso em 22/06/20.
162. SCHUTZER, J. G. **Cidade e Meio Ambiente**: a apropriação do relevo no desenho ambiental urbano. 1ª. ed. São Paulo: Edusp, 2012.
163. SCHÜTZER, K. **A Percepção do Pedestre Sobre a Qualidade da Paisagem Urbana**. Dissertação (mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia Urbana. São Carlos: UFSCar, 2011
164. SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment**, 2006, nº 42, pp. 3830-3836.
165. SECRETARIA DO VERDE E DO MEIO AMBIENTE - PREFEITURA DE SÃO PAULO/SP, 1999. **Atlas Ambiental do Município de São Paulo. Temperatura de Superfície**. Disponível em <http://atlasambiental.prefeitura.sp.gov.br/conteudo/clima_urbano/clima_temp_09.htm>. Acesso em 22/04/17
166. SECRETARIA MUNICIPAL DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Projeto Calçada Acessível [Guia para projetos de espaços públicos]**. Seropédica/Rio de Janeiro. Secretaria Municipal de Planejamento e Desenvolvimento Urbano, 2012. . Disponível em: <<http://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/04/Nova-Cartilha.pdf>>.
167. SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação. V. 01**. 1º ed. São Paulo/SP: Thoser, 1997.
168. SHASHUA-BAR, L.; HOFFMAN, M. E. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. **Energy and Buildings**, v. 31, p. 221–235, 2000.
169. SHODOR. **Calculating Potential Temperature**. Disponível em <http://www.shodor.org/os411/courses/_master/tools/calculators/pttemp/pt1calc.html>. Acesso em 08/08/2019.
170. SILVA, L.F. **Interceptação da chuva nas espécies de Sibipiruna (Caesalpinia pluviosa DC.) e Tipuana (Tipuana tipu O. kuntze)**. 2008. 60p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

171. SILVA FILHO, D.; GIRÃO, R. J. **Passo a passo para cálculo da projeção de copas de árvores das cidades: programa MultiSpec**, 2009.
172. SKANSI, M.M. *et al.* Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 295- 307, 2013.
173. SMITH, D. R. **permeable Interlocking Concrete Pavements**. ICPI – Interlocking Concrete Pavement Institute. Washington D.C., 2001.
174. SOBRAL, H. R. Heat island in São Paulo, Brazil: Effects on health. **Critical Public Health**, v. 15, n. 2, p. 147–156, 2005.
175. SON, J. Y. et al. The impact of temperature on mortality in a subtropical city: effects of cold, heat, and heat waves in São Paulo, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 60, n. 1, p. 113–121, 2016.
176. SOUZA, S. M. **Mapeamento e avaliação da vegetação urbana da cidade de Vitória - ES, utilizando geotecnologias**. 2011. 140 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2011
177. SP BAIRROS. **Mandaqui**. Disponível em < <http://www.spbairros.com.br/mandaqui/>>. Acesso em 13/02/2018.
178. SREEDHAR, S.; KRISHNA, P. B. Comprehensive Laboratory Evaluation of Thermophysical Properties of Pavement Materials : Effects on Urban Heat Island. **American Society of Civil Engineers**, v. 28, n. 7, p. 1–12, 2016.
179. STULL, R.B. **Meteorology for Scientists and Engineers**, 2nd. edition, Brooks/Cole, 2000.
180. SUZUKI, Carlos Yukio; AZEVEDO, Angela Martins; KABBACH, Felipe Issa Kabbach Júnior. **Drenagem subsuperficial de pavimentos. Conceitos e dimensionamento**. Oficina de Textos. São Paulo, 2014. 1º edição.

181. TAHA, H. Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. **Atmospheric Environment**, 1995.
182. TARIFA, J. R.; AZEVEDO, T. R. de. **Os climas na cidade de São Paulo**. 1º ed. , São Paulo: GEOUSP - Coleção Novos Caminhos, 2001.
183. TRAN, N.; POWELL, B. Strategies for design and construction of high-reflectance asphalt pavements. **Transportation Research Record**, n. 2098, p. 124–130, 2009.
184. TOMAZ, Plínio. **Curso de manejo de águas pluviais**. Capítulo 60 - pavimento poroso. 2009. Disponível em <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo60_pavimento_poroso.pdf>. Acesso em 01/09/16
185. TOMAZ, Plínio. **Curso de manejo de águas pluviais**. Capítul15 – pavimento modular. 2011. Disponível em <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo15_pavimento.pdf>. Acesso em 01/09/16
186. TOSETTI, L. L. **Valoração arbórea em bacia hidrográfica urbana**. Dissertação (mestrado). Programa de recursos florestais. ESALQ/USP, 2012.
187. TRICHÊS *et al.* **Misturas asfálticas coloridas e a Ilha de Calor Urbana**. Resumo técnico. SINICESP - Sindicato da Indústria de Construção Pesada do Estado de São Paulo. Disponível em <<http://www.sinicesp.org.br/materias/2014/bt03a.htm>>. Acesso em 17/02/2018
188. TUCCI, C.; GOLDENFUM, J.; ARAUJO, P. Avaliação Da Eficiência Dos Pavimentos Permeáveis Na Redução De Escoamento Superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 21–29, 2000. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=44&SUMARIO=643>>.
189. TUCCI, C.E.M; ORSINI, L. F. **Águas urbanas no Brasil: cenário atual e desenvolvimento sustentável**. *In*: Brasil. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Gestão do território e manejo integrado das águas urbanas. Brasília: Ministério das Cidades, 2005.

190. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE - FURG. Mudanças climáticas globais. Site. Disponível em < <https://goo.gl/PYWZPC>>. Acesso em 30/05/17
191. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA DO PARANÁ - UTFPR . Atmospher - laboratory for urban air pollution and climate. **Cânions urbanos e degradação da qualidade do ar**. Site. Disponível em < <https://goo.gl/jr5DGp>>. Acesso em 30/05/17, sem data.
192. UNIVERSITY OF WYOMING. Departament of atmospheric science. Disponível em < <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>. Acesso em 14/08/2019
193. VEIGA, E. Avenida Tiradentes: a antiga estrada real cheia de história. **O Estado de São Paulo**, 19/04/2014. Disponível em <<https://sao-paulo.estadao.com.br/noticias/geral,avenida-tiradentes-a-antiga-estrada-real-cheia-de-historia,1156070>>. Acesso em 29/05/2019.
194. WANG, Y.; BERARDI, U.; AKBARI, H. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto , Canada. **Energy & Buildings**, v. 114, p. 2–19, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>>.
195. WANG, Y. et al. Temporal and spatial variation relationship and influence factors on surface urban heat island and ozone pollution in the Yangtze River Delta, China. **Science of the Total Environment**, v. 631–632, n. 2, p. 921–933, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.050>>.
196. WASHINGTON DEPARTMENT OF ECOLOGY. **Stormwater Management Manual for Western Washington**, 2014. Disponível em < <https://fortress.wa.gov/ecy/publications/documents/1410055.pdf>>.
197. WENZELL, M. Como recuperar nossas calçadas, o patinho feio do urbanismo local. **Revista Veja**, seção cidades. 19 de outubro de 2018. Disponível em < <https://vejasp.abril.com.br/cidades/calçadas-sao-paulo-problemas-especialistas/>>. Acesso em 17/04/2019.