UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PATRICIA MARTINS TORRES DE MACEDO

TELHADOS ECOLÓGICOS: avaliação do desempenho térmico e hidrológico em clima tropical úmido

Recife
2022

PATRICIA MARTINS TORRES DE MACEDO

TELHADOS ECOLÓGICOS: avaliação do desempenho térmico e hidrológico em clima tropical úmido

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutora em Engenharia Civil, área de concentração de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Sylvana Melo dos Santos
Coorientadora: Prof.ª Dr.ª Sávia Gavazza dos Santos Pessôa

Recife

2022

Catalogação na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

M141t Macedo, Patricia Martins Torres de.
Telhados ecológicos: avaliação do desempenho térmico e hidrológico em clima tropical úmido / Patricia Martins Torres de Macedo. - 2022.
127 folhas, il.; tab., abr. e sigl.

Orientadora: Profª. Drª. Sylvana Melo dos Santos.
Coorientadora: Prof.ª Dr.ª Sávia Gavazza dos Santos Pessôa.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Telhados verdes. 3. Argila expandida.
4. Capacidade de retenção. 5. Conforto térmico. I. Santos, Sylvana Melo dos (Orientadora). II. Pessôa, Sávia Gavazza dos Santos (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2022-158

PATRICIA MARTINS TORRES DE MACEDO

TELHADOS ECOLÓGICOS: avaliação do desempenho térmico e hidrológico em clima tropical úmido

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutora em Engenharia Civil, área de concentração de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovado em: 14/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof.ª Dr.ª Sylvana Melo dos Santos (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof.ª Dr.ª Sávia Gavazza dos Santos Pessôa (Coorientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Ronaldo Lopes Rodrigues Mendes (Examinador externo)
Universidade Federal do Pará

_____
Prof.ª Dr.ª Cristiane Guiselini (Examinadora externa)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedico este trabalho a todos que acreditam na pesquisa, na ciência e na construção de um mundo melhor através do cuidado com o meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Ao criador de todos e de tudo nesta vida;

Ao meu esposo, que é meu porto seguro e que sempre compartilhou comigo o cuidado dos nossos filhos e da nossa casa;

Aos meus filhos, pelos quais possuo um amor incondicional que me motiva a sempre buscar melhorias para as nossas vidas;

A minha mãe, que sempre incentivou a busca do conhecimento através dos estudos com a conciliação do trabalho e ainda do exercício de ser mãe;

Ao meu pai, *in memoriam*, que tenho certeza que escutou as minhas orações quando me senti cansada precisando de forças para continuar;

A minha avó, *in memoriam*, que lutou pela vida até o fim, por conta da fé e do amor que alimentava pelos seus entes queridos;

As minhas irmãs, que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos de nossas vidas;

As minhas orientadoras, que depositaram confiança em meu trabalho e me forneceram ensinamentos que servirão para o resto de minha vida;

Aos amigos de curso, pelas trocas de conhecimento, companheirismo e momentos de diversão durante toda trajetória do curso;

Aos amigos do Instituto Aggeu Magalhães, pelo apoio e incentivo durante essa jornada, em especial ao Prof. Ulisses Montarroyos pelos ensinamentos estatísticos;

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro da pesquisa através do Processo APQ-0888-3.07/15;

A todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho acontecesse.

Minha eterna gratidão!

RESUMO

No âmbito das construções sustentáveis, vê-se, cada vez mais, a incorporação de tecnologias ambientais e os telhados ecológicos se inserem por contribuir na redução das ilhas de calor e do escoamento pluvial. Esta pesquisa visa avaliar o desempenho térmico e hidrológico de diferentes tipologias de telhados ecológicos (verde e marrom) em clima tropical úmido. A pesquisa se iniciou com a construção da Unidade Experimental com cinco Células-Teste (CTs), área de coberta de 1,00m2, e altura total de 2,75m. Foram utilizados: grama Esmeralda, cacto Coroa-de-Frade e argila expandida, configurando os dois grupos comparativos (com e sem cobertura vegetal). No interior de cada CT foram instalados medidores automáticos de temperatura e umidade. Os dados foram monitorados por 9 meses e calculados (temperatura média das paredes - TMP, dos tetos - TMT, e do ambiente - TMA; umidade relativa média do ar - URM; e temperatura e umidade externas). Foram avaliadas a influência das estações do ano e dos horários do dia e a trajetória de crescimento e decrescimento da temperatura a cada hora, assim como a interferência da precipitação sobre as temperaturas interna e externa. Nos meses com temperaturas mais altas, a grama demonstrou maior eficiência na diminuição da TMP (-0,29ºC), e a argila se destacou na TMT (-1,27ºC) e na TMA (-0,66ºC), já o cacto foi mais eficiente no aumento da UR (4,7%). Nos meses com temperaturas mais baixas, a argila apresentou os melhores resultados para todas as variáveis. Sobre os horários do dia, o melhor resultado para TMP foi o da grama (-0,48 ºC), enquanto para TMT (-2,13ºC) e TMA (-2,21ºC) foi o da argila, ambas no horário das 16:00 às 23:59h. Em todos os estratos, o cacto apresentou os melhores resultados para URM. Sobre a trajetória de crescimento ou decrescimento, a grama apresentou menores variações das temperaturas e umidade no cenário I (8:00 às 15:59h, menor aumento médio da temperatura); e a argila no cenário II (16:00 às 7:59h, maior redução média da temperatura). Nos resultados da interferência da precipitação nas temperaturas interna e externa, ficou evidente que quanto maior a precipitação, menor a temperatura, sendo que, para o período de estudo, a correlação negativa foi de -0,27. Para o desempenho hidrológico, o experimento que durou 3 horas compreendeu: enchimento do reservatório, aspersão por 5 minutos, controle de entrada/saída de água. Para as variáveis retenção da água, retardo no escoamento, e velocidade de escoamento, o cacto apresentou os melhores resultados, com destaque para a capacidade de retenção nos cenários seco (A) 96% e saturado (B) 62%. Esta pesquisa comprova a eficiência térmica e hidrológica dos telhados ecológicos em relação ao convencional contribuindo para difusão da técnica em clima tropical úmido.

Palavras-chave: telhados verdes; argila expandida; capacidade de retenção; conforto térmico.

ABSTRACT

In the context of sustainable constructions, the incorporation of environmental technologies is increasingly seen and ecological roofs are inserted as they contribute to the reduction of heat islands and rainwater runoff. This research aims to evaluate the thermal and hydrological performance of different types of ecological roofs (green and brown) in a humid tropical climate. The research started with the construction of the Experimental Unit with five Test Cells (CTs), covered area of 1.00 m^2, and total height of 2.75 m. The following were used: Esmeralda grass, Coroa-de-Frade cactus and expanded clay, configuring the two comparative groups (with and without vegetation cover). Inside each CT, automatic temperature and humidity meters were installed. The data were monitored for 9 months and calculated (mean temperature of the walls - TMP, of the ceilings - TMT, and of the environment - TMA; mean relative humidity of the air - URM; and outside temperature and humidity). The influence of the seasons and times of the day and the trajectory of increase and decrease of the temperature each hour was evaluated, as well as the interference of precipitation on the internal and external temperatures. In the months with higher temperatures, the grass showed greater efficiency in decreasing the TMP (-0.29ºC), and the clay stood out in the TMT (-1.27ºC) and in the TMA (-0.66ºC), whereas the cactus was more efficient in increasing RH (4.7%). In the months with lower temperatures, clay presented the best results for all variables. Regarding the time of day, the best result for TMP was that of grass (-0.48ºC), while for TMT (-2.13ºC) and TMA (-2.21ºC) it was that of clay, both at 4 pm. :00 to 23:59h. In all strata, the cactus presented the best results for URM. On the growth or decrease trajectory, the grass presented smaller variations in temperatures and humidity in scenario I (8:00 to 15:59h, lower average temperature increase); and clay in scenario II (4:00 pm to 7:59 am, greater average temperature reduction). In the results of precipitation interference in internal and external temperatures, it was evident that the greater the precipitation, the lower the temperature, and for the study period, the negative correlation was -0.27. For hydrological performance, the experiment that lasted 3 hours comprised: filling the reservoir, sprinkling for 5 minutes, control of water inlet/outlet. For the variables water retention, flow delay, and flow velocity, the cactus presented the best results, with emphasis on the retention capacity in the dry (A) 96% and saturated (B) 62% scenarios. This research proves the thermal and hydrological efficiency of ecological roofs in relation to the conventional one, contributing to the diffusion of the technique in a humid tropical climate.

Keywords: green roofs; expanded clay; retention capacity; thermal comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Millennium Park (maior telhado verde do mundo) 26
Figura 2 - Telhado marrom, Laban Dance Centre – Londres 28
Figura 3 - Telhado solar (painéis fotovoltaicos) do Palácio Solar – Curitiba..... 30
Figura 4 - Primeira telha fotovoltaica brasileira 31
Figura 5 - Construções brancas da costa do Mediterrâneo..... 33
Figura 6 - Telhado com diferentes cores de telha PET..... 35
Figura 7 - Telhado com telha Tetra Pak..... 36
Figura 8 - Fluxograma das ações e etapas/análises da pesquisa..... 55
Figura 9 - Localização da área de estudo..... 56
Figura 10 - Localização da UETER..... 59
Figura 11 - Bases existentes aproveitadas para construção dos protótipos..... 59
Figura 12 - Projeto dos protótipos..... 60
Figura 13 - Arranjo das Células-Teste que compõe a UETER..... 60
Figura 14 - Etapas da construção do primeiro protótipo..... 61
Figura 15 - Etapas da construção dos demais protótipos..... 62
Figura 16 - Etapas de execução da impermeabilização da coberta..... 64
Figura 17 - Etapas da execução do teste de estanqueidade..... 64
Figura 18 - Incidência de sombra nas Células-Teste..... 65
Figura 19 - Planta de distribuição das coberturas na UETER..... 66
Figura 20 - Esquema das camadas das coberturas das Células-Teste CT 01,CT 03 e CT 05..... 66
Figura 21 - Instalação de manta geotêxtil MacDrain® J..... 67
Figura 22 - Aplicação da argila expandida Cinexpan..... 68
Figura 23 - Colocação do substrato..... 69
Figura 24 - Plantio da grama Esmeralda..... 70
Figura 25 - Plantio do cacto Coroa-de-Frade 71
Figura 26 - Manutenção das Células-Teste..... 71
Figura 27 - Medidores utilizados no interior das Células-Teste..... 72
Figura 28 - Planta de locação dos equipamentos..... 74
Figura 29 - Locação dos medidores no interior dos protótipos..... 75
Figura 30 - Estação Meteorológica Automática – INMET/Curado..... 78

Figura 31 - Projeto do arranjo experimental de precipitação..... 79
Figura 32 - Instalação dos aspersores..... 81
Figura 33 - Preparo da montagem do sistema hidráulico..... 81
Figura 34 - Montagem do sistema hidráulico..... 82
Figura 35 - Arranjo experimental de precipitação..... 82
Figura 36 - Equipamentos de medição – hidrômetro e manômetro..... 83
Figura 37 - Experimento de checagem de uniformidade de vazão..... 83
Figura 38 - Temperatura média das paredes, nos períodos de teste, nas Células-Teste..... 87
Figura 39 - Temperatura média do teto, nos períodos de teste, nas Células-Teste..... 87
Figura 40 - Temperatura média do ambiente, nos períodos de teste, nas Células-Teste..... 88
Figura 41 - Umidade relativa média do ar, nos períodos de teste, nas Células-Teste..... 88
Figura 42 - Esquema de distribuição das coberturas das Células-Teste da UETER..... 89
Figura 43 - Variação da temperatura externa (ºC), por mês, de julho/2018 a julho/2019..... 90
Figura 44 - Variação da temperatura externa (ºC), por hora, de julho/2018 a julho/2019..... 91
Figura 45 - Temperatura externa (ºC), por hora, de julho/2018 a julho/2019..... 91
Figura 46 - Variação da umidade relativa externa do ar (%), por mês, de julho/2018 a julho/2019..... 92
Figura 47 - Variação da umidade relativa externa do ar (%), por hora, de julho/2018 a julho/2019..... 92
Figura 48 - Umidade relativa externa do ar (%), por hora, de julho/2018 a julho/2019..... 93
Figura 49 - Temperatura média das paredes, de outubro/2018 a julho/2019 nas Células-Teste..... 97
Figura 50 - Temperatura média do teto, de outubro/2018 a julho/2019 nas Células-Teste..... 98

Figura 51 - Temperatura média do ambiente, de outubro/2018 a julho/2019 nas Células-Teste..... 99
Figura 52 - Umidade relativa do ar, de outubro/2018 a julho/2019 nas Células-Teste..... 99
Figura 53 - Médias da temperatura das paredes, temperatura do teto e temperatura do ambiente, no horário II.1 (0:00 às 7:59h), de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste..... 103
Figura 54 - Médias da temperatura das paredes, temperatura do teto e temperatura do ambiente, no horário de II.2 (8:00 às 15:59h), de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste..... 104
Figura 55 - Médias da temperatura das paredes, temperatura do teto e temperatura do ambiente, no horário de II.3 (16:00 às 23:59h), de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste..... 105
Figura 56 - Médias da umidade relativa do ar, horários II.1 (de 0:00 às 7:59h), II.2 (de 8:00 às 15:59h) e II.3 (de 16:00 às 23:59h), de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste..... 106
Figura 57 - Trajetórias da variação média a cada hora do dia (coeficiente β) da temperatura média das paredes, horários III.1 (de 8:00 às 15:59h), e III.2 (de 16:00 às 7:59h), nas Células-Teste..... 109
Figura 58 - Trajetórias da variação média a cada hora do dia (coeficiente β) da temperatura média do teto, horários III.1 (de 8:00 às 15:59h), e III.2 (de 16:00 às 7:59h), nas Células-Teste..... 109
Figura 59 - Trajetórias da variação média a cada hora do dia (coeficiente β) da temperatura média do ambiente, horários III.1 (de 8:00 às 15:59h), e III.2 (de 16:00 às 7:59h), nas Células-Teste..... 109
Figura 60 - Trajetórias da variação média a cada hora do dia (coeficiente β) da umidade relativa do ar, horários III.1 (de 8:00 às 15:59h), e III.2 (de 16:00 às 7:59h), nas Células-Teste..... 110
Figura 61 - Médias mensais de precipitação, mm, de outubro/2018 a julho/2019, no local da UETER..... 111
Figura 62 - Precipitação (mm) na temperatura externa (ºC) da UETER, de outubro/2018 a julho/2019..... 114

Figura 63 - Precipitação (mm) na temperatura interna (ºC) das Células-Teste, de outubro/2018 a julho/2019..... 114
Figura 64 - Precipitação (mm) e temperatura externa (ºC) da estação Curado – código 82900 em julho/2019..... 115
Figura 65 - Precipitação (mm) e temperatura interna (ºC) das Células-Teste em julho/2019..... 115
Figura 66 - Correlação da precipitação média mensal com a temperatura interna média diária, de julho/2018 a agosto/2019..... 116

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Percentuais de descontos do IPTU verde de acordo com municípios brasileiros..... 46

Quadro 2 - Tipos de técnicas de amostragem..... 50

Quadro 3 - Tipos de gráficos..... 51

Quadro 4 - Tipos de medidas da estatística..... 52

Quadro 5 - Variáveis monitoradas em Pernambuco..... 77

Quadro 6 - Coberturas com melhor desempenho, por variável, para os dias com temperaturas mais altas e mais baixas 100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados climatológicos mensais da série histórica (1960 a 1990), para Recife-PE..... 57

Tabela 2 - Localização normatizada dos sensores de temperatura..... 74

Tabela 3 - Valores de intensidade de precipitação pela equação IDF Recife..... 45

Tabela 4 - Comparação das médias da temperatura das paredes, temperatura do teto, temperatura do ambiente e umidade relativa do ar, nos períodos de teste, nas Células-Teste..... 86

Tabela 5 - Valores de temperatura e umidade relativa do ar (externos), de julho/2018 a julho/2019..... 90

Tabela 6 - Médias mensais da temperatura das paredes, temperatura do teto, temperatura do ambiente e umidade relativa do ar, de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste..... 94

Tabela 7 - Médias da temperatura das paredes, da temperatura do teto e da temperatura do ambiente, considerando os horários estratificados, nas Células-Teste..... 101

Tabela 8 - Variação média a cada hora do dia (coeficiente β) da temperatura das paredes, temperatura do teto, temperatura do ambiente e umidade relativa do ar, horários III.1 (de 8:00 às 15:59h), e III.2 (de 16:00 às 7:59h), nas Células-Teste..... 108

Tabela 9 - Dados do experimento para realização do balanço hídrico nas Células-Teste..... 112

Tabela 10 - Médias da precipitação, temperatura externa e temperatura interna de outubro/2018 a julho/2019..... 113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	antes de Cristo
ANA	Agencia Nacional de Águas e Saneamento Básico
Aneel	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	Analise de Variância
Apac	Agencia Pernambucana de Águas e Clima
ºC	Graus Celsius
CFCH	Centro de Filosofia e Ciências Humanas
CIB	Conselho Internacional da Construção
CO^2	Dióxido de Carbono
cm	Centímetros
Copel	Companhia Paranaense de Energia
CR	*Cool Roof* (Cobertura fria)
CT	Célula-Teste
CTCA	Câmara Técnica de Compensação Ambiental
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
dp	Desvio padrão
EMA	Estação Meteorológica Automática
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMC	Estação Meteorológica Convencional
Fiocruz	Fundação Osvaldo Cruz
GAE	Gestão Ambiental do Empreendimento
GBC	*Green Building Council* (Conselho da Construção Ecológica)
GBCB	*Green Building Council Brasil* (Conselho da Construção Ecológica no Brasil)
GEE	*General Estimating Equation* (Equação de Estimativa Geral)
GR	*Green Roof* (Cobertura verde)
h	Hora
HQE	*High Environmental Quality* (Alta Qualidade Ambiental)
IAM	Instituto Aggeu Magalhães
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade, Duração e Frequência

INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPTU	Imposto Predial e Territorial Urbano
ISO	*International Organization for Standardization* (Organização Internacional para Padronização)
Itep	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
k	Quilo
kg/m^2	Quilograma por metro quadrado
kg/m^3	Quilograma por metro cúbico
kW	Quilowatts
kWh	Quilowatts hora
kWp	Quilowatts de pico
l/s	Litros por segundo
LEED	*Leadership in Energy and Enviromental Desing* (Liderança em Energia e Design Ambiental)
m	Metro
m^2	Metro quadrado
mca	Metros de coluna de água
m^3/h	Metro cúbico por hora
mm	Milímetro
mm/h	Milímetro por hora
mm/s	Mililitros por segundo
MWh/ano	Megawatt hora por ano
nº	Número
NBR	Norma Brasileira
NWC	*National Weather Center* (Centro Meteorológico Nacional)
ONG	Organização não governamental
PET	Polietileno tereftalato
PVC	Policloreto de vinila
QAE	Qualidade Ambiental do Edifício
RMR	Região Metropolitana do Recife
RPA	Região Político Administrativa
SGE	Sistema de Gestão do Empreendimento

SR	*Simple Roof* (Cobertura simples)
Sudene	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
TMA	Temperatura média do ambiente
TMP	Temperatura média das paredes
TMT	Temperatura média do teto
UC	Unidade consumidora
UETER	Unidade Experimental de Telhados Ecológicos no Recife
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UHI	*Urban Heat Island* (Ilha de Calor Urbano)
URM	Umidade relativa média do ar
USB	*Universal Serial Bus* (porta serial universal)
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	19
1.1	**Hipótese da Tese**	21
1.2	**Objetivos**	21
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos específicos	21
1.2	**Estrutura da Tese**	22
2	**REFERENCIAL TEÓRICO**	23
2.1	**Telhados ecológicos**	23
2.1.1	Telhados verdes ou vivos	24
2.1.2	Telhados marrons ou biodiversos	27
2.1.3	Telhados solares	29
2.1.4	Telhados brancos ou frios	31
2.1.5	Telhados com telhas ecológicas	34
2.1.5.1	*Telhas ecológicas de garrafa PET*	34
2.1.5.2	*Telhas ecológicas de embalagens Tetra Pak*	36
2.1.5.3	*Telhas ecológicas de fibra vegetal*	38
2.2	**Desempenho térmico de telhados ecológicos**	39
2.3	**Desempenho hidrológico de telhados ecológicos**	42
2.4	**Legislação e incentivos de utilização de telhados ecológicos no Brasil**	45
2.4.1	Legislação	45
2.4.2	IPTU verde	46
2.4.3	Certificações e selos de sustentabilidade	47
2.5	**Estatística aplicada**	49
2.5.1	Coleta, amostra e apuração de dados	49
2.5.2	Representação gráfica	51
2.5.3	Medidas resumo	52
2.5.4	Análise e interpretação de dados	53
3	**MATERIAIS E MÉTODOS**	55
3.1	**Caracterização do local da pesquisa**	56
3.2	**Execução da Unidade Experimental de Telhados Ecológicos**	58
3.2.1	Descrição do sistema construtivo	59
3.2.2	Execução da impermeabilização e do teste de estanqueidade	63

3.2.3 Seleção dos materiais e tipos de coberturas 65
3.2.3.1 Manta geotêxtil 66
3.2.3.2 Argila expandida 67
3.2.3.3 Substrato convencional 68
3.2.3.4 Vegetação (grama Esmeralda e cacto Coroa-de-Frade) 69
3.2.3.5 Manutenção 71
3.3 Monitoramento da temperatura e umidade interna **72**
3.3.1 Medidores 72
3.3.2 Descrição da instalação dos medidores 73
3.3.3 Análise Estatística 75
3.4 Monitoramento das variáveis climáticas externas 77
3.5 Realização do balanço hídrico 78
3.5.1 Descrição do arranjo experimental 79
3.5.2 Montagem do sistema hidráulico 80
3.5.3 Calibração do arranjo experimental de precipitação 83
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 86
4.1 Desempenho térmico 86
4.1.1 Teste dos equipamentos e desempenho térmico das Células-Teste sem cobertura 86
4.1.2 Análise da temperatura e umidade externas 89
4.1.3 Análise da temperatura e umidade internas 93
4.1.3.1 Etapa I - Análise da variação mensal 94
4.1.3.2 Etapa II - Análise da variação em função dos horários do dia 101
4.1.3.3 Etapa III - Análise da trajetória de crescimento e decrescimento no intervalo de uma hora 107
4.2 Desempenho Hidrológico (Análise do balanço hídrico) 110
4.3 Relação entre precipitação e temperatura 113
5 CONCLUSÕES 117
6 TRABALHOS FUTUROS 120
REFERÊNCIAS 121

1 INTRODUÇÃO

O despertar para o conceito de "desenvolvimento sustentável" provocou grandes mudanças nos processos de produção dos mais variados setores, inclusive no setor da construção civil. O Conselho Internacional da Construção (CIB) considera a indústria da construção como o setor de atividades humanas que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva, gerando consideráveis transformações no meio ambiente. A urbanização, decorrente do crescimento populacional, gerou modificações nas paisagens das cidades e impactos ambientais relacionados à impermeabilização do solo e à escassez de áreas verdes, que resultam, dentre outros efeitos, em inundações e elevadas temperaturas. A necessidade de construções sustentáveis, com incorporação de tecnologias ambientais para minimizar os impactos ao meio ambiente e maximizar a qualidade de vida das pessoas se tornou essencial de ser pensada. Clark, Adriaens e Talbolt (2008) mencionaram que telhados ecológicos são apresentados como uma tecnologia que tem o potencial de ajudar a mitigar os complexos e multifacetados problemas ambientais de centros urbanos. Neste cenário, para as questões levantadas, os telhados ecológicos assumem importante papel ao agregar inúmeros benefícios aos edifícios, e em larga escala, de acordo com Konasova e Vasconcellos (2016), pode ser uma ferramenta importante para reduzir os impactos das ilhas de calor, principalmente nas grandes áreas urbanas, além de contribuir com a redução do escoamento pluvial.

Referente ao desempenho térmico dos telhados ecológicos, os telhados verdes são mais adequados em regiões quentes, pois reduzem a demanda de energia para a refrigeração dos ambientes, já em climas frios, apesar de serem úteis para reduzir a demanda de energia para o arrefecimento, considerando custos de investimento e manutenção, os telhados verdes não constituem modelações energéticas convenientes. Esta condição é comprovada nos estudos de Ascione et al. (2013) onde foi realizado uma simulação numérica de diferentes tipologias de telhados verdes comparando-as com uma cobertura tradicional em várias cidades da Europa. Sendo o Brasil uma região de clima quente, essa consideração também pode ser empregada no território brasileiro. Em um outro estudo, Jim (2014) avaliou o consumo de energia devido ao emprego de telhados verdes em Hong Kong, que é uma cidade de clima tropical úmido localizada na costa sul da China, e observou notável redução na refrigeração e nos gastos com energia. O autor concluiu ainda que a escolha das espécies e a composição do substrato têm influência direta no desempenho térmico.

No que se refere à cobertura vegetal, Klein e Coffman (2015) destacaram a importância da utilização de vegetação nativa e o cuidado com a irrigação para melhor adaptação e sobrevivência das espécies. Os autores apresentaram o caso de um telhado verde experimental instalado no edifício do National Weather Center (NWC) em Norman, Oklahoma em que as espécies plantadas não eram nativas do local e tiveram grande mortalidade devido às condições climáticas extremas. Mesmo considerando outras variações climáticas, os estudos apontam benefícios dos telhados verdes sobre o desempenho térmico no interior das edificações.

Com relação aos benefícios hidrológicos, Bacovis e Nagalli (2013) apontam que telhados verdes podem contribuir plenamente para mitigar os impactos das enchentes urbanas, se adotados no planejamento urbanístico de forma coletiva, sendo uma potencial alternativa de substituição aos modelos tradicionais. Essa posição é reafirmada por Ferreira e Moruzzi (2007), quando mencionam que a principal função do telhado verde é absorver volumes de água da chuva e liberá-los em um ritmo reduzido e controlado. Os autores ainda destacam que esta tecnologia confere melhoria à qualidade do ar, à medida que atua como um filtro contra a poluição, retendo parte significativa da poeira, prevenindo contra o aumento da temperatura e contribuindo com a redução do efeito estufa pela absorção do CO2. De fato, de forma geral, a absorção da radiação pelas plantas durante o processo de fotossíntese e a espessura da cobertura verde propiciam um isolamento térmico. Bär e Tavares (2017) sugerem que futuras pesquisas busquem estudar sistemas otimizados para cada região, como substratos, vegetações e materiais drenantes que se adaptem às condições locais, e lixiviem menores concentrações de poluentes. Por fim, grande atenção deve ser voltada à análise de qualidade das águas escoadas por telhados verdes, uma vez que ainda não se sabe se a adoção destas coberturas em grandes áreas construídas poderia, ou não, vir a afetar negativamente corpos d'água próximos a essas edificações.

Nesse contexto, desde 2007, estão sendo desenvolvidos estudos pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) através do Grupo de Pesquisa coordenado pela profa. Sylvana Melo dos Santos, sobre a aplicação de telhados verdes no Semiárido e a investigação de questões acerca da tipologia e espécies de vegetação utilizadas nos telhados verdes, qualidade da água, do desempenho térmico, e do desempenho hidrológico no contexto pluviométrico. Salienta-se que devido à grande extensão territorial do Brasil e à diversidade climática de suas regiões, as pesquisas que dependem de parâmetros ambientais necessitam ser realizadas de maneira pontual para refletir a realidade local. Portanto, diante dos inúmeros benefícios destacados pela utilização de telhados verdes, esta pesquisa, pretende ampliar a área de atuação, saindo da

região do Semiárido e investigando, não só a aplicação de telhados verdes, como tipologias de telhados ecológicos, em regiões de clima tropical úmido, agregando conhecimento às pesquisas sobre este tema.

1.1 Hipótese da Tese

Telhados ecológicos contribuem para redução da temperatura interna de ambientes e contribuem para a retenção hídrica de água de chuva em áreas de clima tropical úmido?

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho dividiram-se em objetivo geral e específicos, a saber:

1.2.1 Objetivo geral

O principal objetivo desta pesquisa é identificar o desempenho térmico e hidrológico de diferentes tipologias de telhados ecológicos (verde e marrom) implementados em área de clima tropical úmido.

1.2.2 Objetivos específicos

- Implantação de infraestrutura experimental básica de telhados ecológicos (verde e marrom), em condições parcialmente controlada;
- Identificar a influência de diferentes tipologias de telhados ecológicos (verde e marrom) e variáveis climáticas (temperatura e umidade) sobre o desempenho térmico de ambientes internos;
- Identificar a variação hidrológica referente à retenção das águas pluviais, ao retardo do escoamento superficial e à velocidade de escoamento de diversas tipologias de telhados ecológicos (verde e marrom);
- Identificar a interferência da precipitação média do período de estudo no conforto térmico de ambientes internos.

1.3 Estrutura da Tese

O trabalho foi estruturado em capítulos que seguem uma sequência lógica baseada na metodologia adotada. O capítulo introdutório apresenta a contextualização, justificativa e relevância da pesquisa, assim como a hipótese da tese, os objetivos traçados e a descrição da organização deste trabalho.

O segundo capítulo busca referenciais teóricos relativos aos conceitos de: telhados ecológicos, desempenho térmico, desempenho hidrológico, além do levantamento das legislações e incentivos vigentes no Brasil e de conceitos básicos de estatística aplicada, com o objetivo de embasar o desenvolvimento da pesquisa.

O terceiro capítulo aborda os materiais e métodos adotados, iniciando com a caracterização do local da pesquisa; o detalhamento da execução da unidade experimental, que inclui a descrição do sistema construtivo, a atenção com a impermeabilização, a escolha dos materiais e tipos de coberturas e os cuidados com a manutenção. Também aborda as condições de instalação dos equipamentos de medição, da obtenção e tratamento dos dados; assim como a montagem e calibração do arranjo experimental de precipitação; e a obtenção de dados hidrológicos.

No quarto capítulo discute-se os resultados obtidos, relativos às diversas etapas de análises de desempenho térmico (teste de equipamentos, dados externos e dados internos); às análises de desempenho hidrológico e à relação da precipitação com a temperatura interna.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho realizado onde é abordado o atendimento aos objetivos propostos e as respostas relativas às questões inicialmente levantadas. No sexto capítulo são apresentadas as recomendações de estudos que podem dar continuidade à pesquisa, e por fim, são apresentadas as referências consultadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados tópicos sobre definições de telhados ecológicos, benefícios de sua aplicação relacionados ao desempenho térmico e hidrológico, legislações e incentivos existentes no Brasil para sua implementação e a importância da utilização da estatística em estudos ambientais.

2.1 Telhados ecológicos

O conceito de telhados ecológicos comumente remete a dois conflitos relacionados às definições: o primeiro sobre a utilização do termo "telhado" ou "cobertura", e o segundo sobre telhado ou cobertura "ecológico" ou "verde". Analisando as definições encontradas, considerando que telhado é a parte exterior e superior que cobre um edifício, constituída por uma estrutura em que se assentam telhas ou outros materiais. Enquanto que cobertura está associada ao ato ou efeito de cobrir qualquer elemento que seja, não necessariamente uma edificação. Portanto, o telhado é a cobertura de uma edificação que tem como principal função proteger o interior do edifício das intempéries e promover segurança e conforto aos usuários.

Com relação ao termo "ecológico" ou "verde", existem diversos tipos de telhados aliados do meio ambiente, que podem ser considerados ecológicos, seja pela utilização de tecnologias ambientais (energia solar, captação de água de chuva, etc...), seja pelo processo de produção ou de reciclagem de materiais (que reduzem o impacto da construção civil no meio ambiente) ou ainda pelos benefícios que proporcionam às edificações (conforto térmico, acústico ...). Segundo Rogers (2013), o termo "telhado verde" é usado frequentemente para descrever termos alternativos, incluindo: telhados ecológicos, telhados vivos, telhados naturais, telhados marrons ou de biodiversidade, telhados verdes espontâneos, hortas em edifícios, paisagem sobre estrutura, paisagens elevadas, telhados frios, telhados azuis, telhados de *sedum* (gênero de suculenta) e etc..., sendo necessário um debate mais amplo sobre estas definições. O autor ainda sugere que a intenção de qualquer "telhado verde" deve estar na vanguarda das reivindicações de sustentabilidade. Com isso, pode-se considerar que o telhado verde é um telhado ecológico, mas seu conceito condiciona a utilização de vegetação em sua composição. Portanto, numa visão mais ampla, se torna mais conveniente adotar o termo *"*telhados ecológicos*"* para definir os diversos tipos de telhados que têm a finalidade de contribuir para a sustentabilidade das edificações e de suas interações com o meio ambiente.

Na identificação dos principais tipos de telhados ecológicos e de acordo com suas características construtivas, propõe se a seguinte classificação: (I) telhados ecológicos compostos por material vegetal, orgânico e mineral – telhados verdes e telhados marrons; (II) telhados ecológicos compostos por materiais termo sensíveis – telhados solares (painéis ou telhas) e telhados brancos; e (III) telhados ecológicos que utilizam material reciclado na composição de suas telhas – telhas em PET , telhas em Tetra Pak e telhas em fibra vegetal. No mercado dos telhados ecológicos, os benefícios da sustentabilidade podem ser traduzidos, principalmente, como conforto térmico, economia de energia elétrica, redução das emissões de CO_2, retenção e retardo de escoamento hídrico e reciclagem.

2.1.1 Telhados verdes ou vivos

Peck *et al.* (1999) definem o telhado verde como toda estrutura de telhado ou cobertura que agrega em sua composição, uma camada de solo e outra de vegetação, uma vez que seu sistema construtivo se baseia em uma técnica de aplicação de camadas. Há indícios de que os telhados verdes são mais antigos do que se pensa e podem datar de aproximadamente 600 a.C., por exemplo, os jardins suspensos da Babilônia já apresentavam um tipo de cobertura que em muito lembra os telhados verdes conhecidos atualmente (FERRAZ, 2012). A técnica que consiste na implantação de coberturas vegetadas sobre edificações foi criada para acompanhar um desejo estético e paisagístico durante a Idade Antiga, mas ao longo do tempo acabou por incorporar novas significações em resposta às consequências geradas pela Revolução Industrial, isto é, a necessidade por práticas e políticas ambientalistas (ALMEIDA, BRITO e SANTOS, 2016). Os telhados verdes passaram a ser difundidos na Alemanha a partir da década de 60, onde foram desenvolvidos normas, manuais e materiais específicos para sua execução e se espalharam em diversos outros países. No Brasil, apesar da existência de modelos desenvolvidos por arquitetos e paisagistas durante o período modernista (a exemplo do terraço do Palácio Capanema desenhado por Burle Marx – edifício atualmente ocupado pelo Ministério da educação e Saúde), ainda pode-se considerar que existem poucos exemplares. A ausência de políticas públicas que estimulem a utilização do telhado verde, associada à necessidade de estudos voltados à diversidade do clima brasileiro e ao alto custo dos materiais, constituem entraves para difundir a técnica no Brasil há muitos anos. Porém, diante do movimento que preconiza a sustentabilidade nas cidades, diversas iniciativas vêm surgindo e mudando as perspectivas de utilização do telhado verde no Brasil.

De acordo com Kozmhinsky, Pinheiro e El-Deir (2016), a composição mais comum de um telhado verde adotada por diversos oras, pesquisadores e especialistas da área, consiste numa estrutura composta por cinco camadas: (i) vegetação; (ii) substrato; (iii) camada de filtragem; (iv) drenagem e (v) impermeabilização. Entretanto, existem outras variações na estruturação deste tipo de telhado. Santos (2016) destaca que durante a instalação de um telhado verde deverá ser levado em consideração a capacidade da carga máxima, a manutenção, a seleção da vegetação, o substrato e o orçamento, no caso de um projeto em fase de elaboração. A maioria dos autores classificam os telhados verdes de acordo com a profundidade do solo em três tipos:

I. Extensivo: possui menor apelo estético em função da limitação na escolha das plantas e ao baixo crescimento das mesmas. Possuem substratos que variam entre 6 a 20 cm e peso entre 60 a 150 kg/m^2.

II. Semi–extensivo: possibilidade de uso de grande variedade de espécies vegetais associadas à fauna local. Possuem substrato que variam de 12 a 25 cm e peso de 120 a 200 kg/m^2.

III. Intensivo: não limita a variedade de plantas, possibilita a inserção de espécimes de maior porte, oferece diferentes tipos de *habitats* e favorece a elevação da biodiversidade. Possuem substratos que variam entre 15 cm até mais de 1 m, com cargas que variam entre 180 a 500 kg/m^2. De acordo com Ribeiro e Coelho (2020), o peso de um telhado verde pode variar muito, pois a espessura do substrato e a altura da vegetação possuem variações, em função do tipo de material utilizado em sua composição.

Kozmhinsky, Pinheiro e El-Deir (2016) complementam com outras tipologias de acordo com a biodiversidade, interferência na sucessão ecológica e acessibilidade conforme descrição a seguir.

IV. Biodiversidade: (a) Monoespecífico – composto de apenas uma espécie; (b) Poliespecíficos – composto por várias espécies; (c) Nativas ou endógenas – com espécies dos ecossistemas adjacentes; e (d) Exóticas – com espécies de outras regiões similares ou que tenham sido aclimatadas.

V. Interferência na sucessão ecológica: (a) Espontâneos – se formam pelo acúmulo natural de sedimentos e/ou matéria orgânica, em lajes ou telhados que recebem sementes através de processo natural de propagação; (b) Ecológicos – criados com a proposta de implantação de espécies nativas e mais resistentes; e (c) Paisagísticos – estruturados, obedecendo critérios de estética que exigem manutenção sistemática.

VI. Acessibilidade: (a) Acessíveis – permite a circulação de pessoas com objetivo de contemplação, cultivo de hortas, lazer e outras finalidades; e (b) Inacessíveis – não têm previsão de circulação de pessoas, seja por questões estruturais, ou por possuir cobertura vegetal com finalidade exclusiva de melhorar a qualidade ambiental.

Dentre os diversos benefícios promovidos pelos telhados verdes pode-se citar a melhoria da qualidade ambiental em diferentes áreas, como a melhoria da qualidade do ar (servindo como filtro dos poluentes); a diminuição da temperatura ambiental; a diminuição da poluição sonora; a captação e a retenção das águas de chuva; a umidificação do ar nos meses mais quentes e secos do ano; o abrigo para avifauna nativa e consequente combate a pragas urbanas; o aumento da durabilidade da impermeabilização; a criação de espaços agradáveis para convivência social, a produção alimentar como temperos e hortas, além de ser um diferencial estético de visual paisagístico que proporciona aos cidadãos reações psicologicamente positivas, através desses espaços naturais verdes. Neste sentido, o telhado verde é considerado um fomentador de desenvolvimento sustentável para o meio urbano, além de um embelezador de espaços nas cidades (KOZMHINSKY, PINHEIRO e EL-DEIR, 2016).

Como exemplo de telhado verde pode-se destacar, o *Millennium Park* (Figura 1) que foi criado para revitalizar uma área de 25 hectares de terra no *Grant Park* de Chicago e incorpora avanços inovadores em design sustentável, incluindo o maior telhado verde intensivo do mundo. Por estar localizado sobre uma garagem subterrânea, não aparenta ser um telhado. Compreende uma área 20.000 m^2 maior do que o segundo maior telhado verde do mundo no Aeroporto Internacional de Frankfurt, na cidade de mesmo nome, na Alemanha. O referido parque foi inaugurado em 16 de julho de 2004 transformando um terreno baldio industrial em uma vitrine de Chicago para a arte de vanguarda, arquitetura, paisagismo, música e muito mais (NUNES, 2015).

Figura 1 - Millennium Park (maior telhado verde do mundo).

Fonte: https://sustentarqui.com.br/6-exemplos-de-telhados-verdes-em-chicago/. Acesso em 28/09/2021.

2.1.2 Telhados marrons ou biodiversos

Segundo Ishimatsu e Ito (2013), na abordagem atual dos telhados verdes, existem alguns aspectos negativos em termos de aumento da biodiversidade urbana: telhados intensivos em áreas urbanas áreas não podem contribuir com uma grande quantidade de área verde, e telhados extensivos não podem criar áreas verdes de alta qualidade. Neste cenário, surge o telhado marrom ou biodiverso que utiliza técnicas que oferecem diversos *habitats* sob uma camada extensiva de substrato, usada para criar vida selvagem com imitações de *brownfields* - terras que foram desenvolvidas para habitação ou indústria, mas foram abandonadas e recolonizadas por diferentes conjuntos ecológicos.

Os telhados marrons ou biodiversos passaram a ser difundidos a partir da década de 80, quando o governo do Reino Unido passou a utilizar áreas de *brownfields* para construção de moradias. Esta foi uma das estratégias de maior sucesso adotada para fazer campanha para a biodiversidade urbana e conservação de *brownfields*, e um incentivo ao desenvolvimento de tecnologias favoráveis à mitigação da vida selvagem em telhados de edifícios pelos construtores de *brownfields* (LORIMER, 2008). A diferença básica entre telhado marrom e biodiverso é que, no telhado marrom, a superfície do substrato é deixada em condições para se auto vegetar através da ação do vento e da dispersão de sementes transportadas pelos pássaros e, no telhado biodiverso, sementes ou plantas são introduzidas no substrato no momento da construção. Um telhado marrom ou biodiverso tem uma estrutura mais complexa do que um telhado verde para fornecer uma gama mais diversificada de *habitats*. Isso pode incluir: plantas nativas, piscinas de água e áreas úmidas para musgos e líquenes, toras para fornecer um *habitat* para insetos e outros invertebrados, areia, pedras e pedregulhos para aumentar a gama de *habitats*, além de relevos diferenciados para fornecer diferentes níveis de paisagem (EUROPEAN COMMISSION, 2012).

Na construção típica de um telhado marrom ou biodiverso, as camadas que o compõe são semelhantes às empregadas em telhados verdes, porém a camada superior é constituída de resíduos coletados no local. A membrana impermeabilizante pode ser de qualquer tipo, desde que adequada para uso em superfícies planas. Em combinação com o substrato, a camada de drenagem que direciona a drenagem da água para fora dessa camada deve conter alta porcentagem de material reciclado. Os agregados de tamanho único também podem ser usados para formar a camada de drenagem, mas têm a desvantagem de aumentar consideravelmente o peso do telhado. O nível do substrato é normalmente de até 150 mm, o que oferece um aumento de peso médio, sendo que, geralmente, não é mais pesado do que 120 kg/m^2. Uma camada de

filtro geotêxtil (camada de separação) deve ser instalada entre a camada de drenagem e o substrato do telhado marrom para evitar que partículas finas do substrato se acumulem na camada de drenagem (HODKINSON CONSULTANCY, 2010).

Pela inexistência de vegetação (planejada), os telhados marrons ou biodiversos requerem manutenção muito baixa sem nenhuma irrigação e/ou aporte de fertilizantes. Embora não disponibilizem nenhum tipo de área de convivência, os mesmos contribuem melhorando a qualidade do ar, reduzindo o impacto visual de um (possível) telhado tradicional e auxiliando no controle do escoamento e da coleta de água da chuva, bem como pode contribuir para as características acústicas e térmicas do edifício. Em contrapartida, por conta da utilização de agregados, a capacidade de retenção de água é limitada e a qualidade da água escoada para fora do telhado, após atravessar a respectiva camada, pode ser ruim ou inadequada.

Localizado no corredor do Tâmisa em Londres, a área de *Deptford Creek* tem vários telhados marrons. O primeiro e mais famoso deles é o telhado do *Laban Dance Centre* (Figura 2). De acordo com Vollaard, Vink e Zwarte (2017), antes da reconstrução da área, os *brownfields*, com muitos detritos e tijolos, haviam se tornado o *habitat* de várias plantas raras, insetos e pássaros, incluindo o *redstart* preto. Segundo os autores, quando a área foi revitalizada e novos edifícios foram construídos, os telhados foram cobertos com concreto triturado e tijolos dos edifícios demolidos que existiam anteriormente, e a vegetação não semeada, aos poucos, foi ocupando espontaneamente a cobertura dos telhados. Vollaard, Vink e Zwarte (2017), afirmam que mais de cem espécies de plantas colonizaram o telhado do *Laban Dance Centre*, além de algumas espécies raras de insetos e pássaros (inclusive o *redstart* preto – em extinção).

Figura 2 – Telhado marrom, *Laban Dance Centre* – Londres.

Fonte: https://www.naturalcity.nl/2016/05/16/bruin-dak/ . Acesso em 29/03/2021.

2.1.3 Telhados solares

O elevado consumo de energia para climatização das edificações tem motivado a realização de muitos trabalhos de pesquisa na área de eficiência energética. Os telhados das construções, em particular, são responsáveis por uma grande parcela do consumo de energia para aquecimento ou refrigeração (GALINDO, 2015). Os sistemas fotovoltaicos utilizados em edificações e integrados à rede energética são vantajosos em em relação à geração em usinas pois evitam perdas no sistema de transmissão e distribuição. Além disso, não exigem área livre adicional, visto que são aplicados sobre as coberturas, já existentes, das edificações (SILUK, 2017).

No contexto dos sistemas fotovoltaicos, para a geração da energia, é necessário a captação dos raios solares por painéis ou telhas fotovoltaicas. Os painéis fotovoltaicos surgiram na década de 50 e já se tem bastante informações com relação ao tempo de duração (em torno de 40 anos) e da capacidade técnica de operação. De acordo com fabricantes, os painéis ocupam uma área de aproximadamente 1,60 m², e geram de 240 a 355 Watts. As telhas fotovoltaicas começaram a ser comercializadas a partir de 2005 e, por essa razão, não são localizadas informações precisas sobre sua durabilidade, bem como sua capacidade de operação durante a vida útil. Ambos sistemas necessitam de estudos para viabilização de seu uso em edificações existentes ou em novas construções.

Segundo Roncolatto *et al.* (2018), a fim de iniciar a avaliação quanto à viabilidade técnica e econômica de uma instalação de geração solar fotovoltaica em uma unidade consumidora (UC), a primeira etapa do processo consiste no levantamento inicial de informações sobre o possível local de instalação, potência a ser instalada, histórico de consumo da UC, verificação da disponibilidade de espaço no telhado, eventuais sombreamentos, dispositivos do padrão de entrada, caixa de medição e proteção. Como resultado final é possível realizar uma estimativa orçamentária da instalação. Os autores ressaltam que o projeto executivo elaborado deve contar com uma simulação através de um *software* específico para geração fotovoltaica, considerando a posição geográfica, orientação e inclinação do telhado, tipo de painel e inversor fotovoltaicos, possíveis sombreamentos e histórico de radiação solar.

Horta, Penna e Oliveira (2019), em um estudo sobre viabilidade técnica e econômica de aplicação de telhas fotovoltaicas em comparação com a tecnologia de módulos fotovoltaicos, obtiveram resultados indicando que ambos os sistemas apresentam viabilidade técnica, uma vez que as tecnologias se mostraram capazes de atender a 100% da necessidade energética

pretendida. Contudo, apenas os módulos fotovoltaicos se mostraram viáveis quando avaliados sob o viés econômico. Segundo os autores, tal fato pode estar relacionado ao elevado custo das telhas fotovoltaicas e à falta de subsídios e programas governamentais para incentivar o uso das tecnologias solares, e, consequentemente, reduzir os custos iniciais de investimento e aumentar o saldo positivo dos fluxos de caixa. Contudo, as telhas fotovoltaicas se sobressaíram no aspecto estético, harmonizando mais facilmente a cobertura das edificações ao passo que os módulos fotovoltaicos se diferenciam quanto à potência e eficiência na conversão de energia.

Inaugurado em 2019, o Palácio Solar é o maior em termos de produção de energia na cidade de Curitiba (Figura 3), em que foram implantados 439 painéis com selo Procel de eficiência energética através da chamada pública da Companhia Paranaense de Energia (Copel) para o Programa de Eficiência Energética regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O sistema fotovoltaico, com capacidade total de 144 kWp, tem capacidade de gerar 212MWh/ano, o que constitui uma economia superior a R$ 100 mil/ano considerando apenas a geração de energia fotovoltaica (COPEL,2019).

Figura 3 – Telhado solar (painéis fotovoltaicos) do Palácio Solar – Curitiba.

Fonte: http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=102435&tit=Copel-viabiliza-energia-solar-no-predio-da-Prefeitura-de-Curitiba. Acesso em 26/05/2021.

A primeira telha fotovoltaica brasileira (Figura 4) passou a ser comercializada em 2019, tendo sido produzida em concreto com células fotovoltaicas acopladas, cada telha produz 9,16 watts e tem dimensão de 36,5 por 47,5 mm. Isso garante uma capacidade de produção média mensal de 1,15 kWh/mês. As telhas já foram aprovadas pelo Inmetro, estão sendo produzidas sob demanda, e os testes realizado na Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC (REIS,2020).

Figura 4 – Primeira telha fotovoltaica brasileira.

Fonte:https://www.portal-energia.com/telhas-fotovoltaicas-eternit-testadas-universidade-santa-catarina. Acesso em 25/05/2021.

2.1.4 Telhados brancos ou frios

O uso de telhados frios é uma estratégia passiva para reduzir a carga de resfriamento das edificações e sua utilização tem potencial de mitigar o fenômeno das ilhas de calor (PAIM, MARINOSKI e GUTHS, 2020). Ao refletir mais luz solar, os telhados brancos (frios) experimentam temperaturas de superfície mais baixas e produzem menos aquecimento do ar circundante (WANG, HUANG e LI, 2020).

Na experimentação prática de Belem, Borowski e Machado (2020), com telhas de fibrocimento, verificou-se que, em dias de predomínio de sol, os habitáculos com telha branca apresentaram temperatura 2°C abaixo que a da telha cinza, sendo essa diferença menor em casos de tempo nublado ou chuvoso. Calculou-se que, por consequência da menor temperatura, sob condições ideais, uma telha branca resultaria em redução de cerca de 4,4 kWh/ano/m² em consumo elétrico com condicionador de ar, o que se traduz em economia de aproximadamente R$ 2,00/ano/m². Entretanto, segundo os autores, apesar da redução considerável na temperatura média, o retorno financeiro só é alcançado a longo prazo.

Wang, Huang e Li (2020) analisaram o desempenho termoenergético e a viabilidade econômica do uso de telhados frios, onde foram selecionados dois tipos de telhas (de fibrocimento e de cerâmica) e ambas foram analisadas na cor natural e na cor branca. O telhado frio de fibrocimento reduziu em até 60% o ganho de calor na cobertura e o telhado frio de cerâmica reduziu em até 55%. A análise econômica mostrou-se viável, para o cenário proposto, com retorno inferior a 5 anos para as telhas de fibrocimento, e inferior a 13 anos paras as telhas cerâmicas.

Baseado nos estudos do laboratório norte-americano *Lawrence Berkeley*, foi criada em 2009 pelo *Green Building Council* (GBC), entidade que promove mundialmente o uso de tecnologias sustentáveis na construção Civil, a campanha *One Degree Less* (Um grau a menos) que tem como objetivo diminuir a temperatura no interior das edificações e o aquecimento global em 1ºC com a pintura de telhados em branco. Uma dessas pesquisas foi desenvolvida por Akbari, Pomerantz e Taha (2001), com análises de temperatura nos últimos 100 anos em várias grandes cidades dos EUA, e os resultados indicaram que as temperaturas nas áreas urbanas aumentaram de 0,5ºC a 3ºC. De acordo com os autores, normalmente, a demanda por eletricidade nas cidades aumenta de 2% a 4% para cada aumento de 1ºC na temperatura, e, portanto, estima-se que 5% a 10% da demanda atual de eletricidade urbana é gasta para resfriar prédios apenas para compensar o aumento de 0,5°C a 3°C nas temperaturas urbanas.

Jacobson e Hoeve (2012) usaram um modelo que incorpora uma série de dados de satélites e estações climáticas no mundo, e que modela as relações entre várias condições ambientais. Com o emprego do modelo descobriu-se que mais telhados brancos resultam em menos calor de superfície na cidade, e que temperaturas locais mais baixas implicam em menos evaporação de água. Assim, o declínio na formação de nuvens permite que mais luz do sol chegue à superfície da Terra, levando a temperaturas mais altas no geral. Os autores afirmaram com o emprego do modelo, observou-se que grande parte da luz refletida pelos telhados pode ser absorvida por fuligem e matéria particulada, que são especialmente prevalentes em áreas urbanas. Isso pode limitar o resfriamento local e causar aquecimento em outros locais, com a dispersão das partículas. Os autores concluíram que telhados brancos podem ser úteis em climas mais quentes, mas revelam que não levariam à economia de energia em termos globais.

Estudos realizados no Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) por Shirakawa *et al.* (2010), comprovaram que pintar o telhado de branco pode provocar o efeito contrário, e desde 2007, a instituição iniciou as primeiras pesquisas em diversas regiões do Brasil sobre biodeterioração, ou seja, a deterioração de materiais de construção civil por fungos. A possível razão para ocorrência da biodeterioração é que as tintas imobiliárias comuns, à base de água, são muito suscetíveis à colonização por fungos filamentosos, conhecidos como mofo ou bolor, assim como algas e ciabobactérias. Esses microrganismos causam o escurecimento dos telhados e, consequentemente, o aumento da temperatura interna e do consumo de energia dos imóveis. O desempenho de formulações de tintas arquitetônicas, devem incluir eficiência biocida e impacto ambiental em áreas de chuvas fortes, não podendo ser avaliada com precisão sem considerar a totalidade de clima, biodiversidade, condições ambientais e microclima

Diante dessas constatações, passaram a ser desenvolvidos produtos específicos para pintura de telhados brancos, que, segundo fabricantes (Metalatex, Biotherm, Nanotermic1 entre outros) , podem reduzir em até 5ºC a temperatura interna dos ambientes. Os produtos possuem tecnologias desenvolvidas para combater a proliferação de microorganismos, propriedades térmicas e elásticas, podendo ser aplicado em telhas e lajes. Além de proteger contra efeitos nocivos que diminuem a vida útil das telhas e lajes, a solução proporciona resistência e flexibilidade para acompanhar os movimentos de expansão e contração do substrato sem trincar, garantindo durabilidade.

Ismail, Samad e Rahman (2011) destacam a necessidade de manutenção regular do telhado branco, pois o mesmo fica sujo facilmente após alguns anos de construção, e enfatizam que a superfície brilhante tem tendência a produzir reflexos, especialmente durante horas do dia. Wang, Huang e Li (2020) destacam que o telhado branco é mais eficaz quando a superfície tem menor capacidade de retenção de água, menor admitância térmica – que segundo ABNT (2003) corresponde à taxa de fluxo de calor entre a superfície interna de um elemento ou componente construtivo e o ar, por unidade de variação de temperatura - e está em locais com mais radiação solar, menos precipitação e menor velocidade do vento. As ilhas de Santorini, na Grécia, são um dos poucos lugares na Europa com clima desértico quente e em que se pode destacar a pintura em cor branca de telhados e paredes (Figura 5) como estratégia para convivência com o clima quente.

Figura 5 – Construções brancas da costa do Mediterrâneo.

Fonte: https://casa.abril.com.br/construcao/adotar-o-telhado-branco-pode-refrescar-sua-casa/. Acesso em 27/11/2021.

2.1.5 Telhados com telhas ecológicas

A construção civil é um setor que traz grandes impactos para o meio ambiente, por isso, cada vez mais soluções sustentáveis vêm sendo adotadas. Um desses exemplos é a telha ecológica, um material que pode substituir as tradicionais telhas metálicas ou de fibrocimento e contribuir de forma positiva para o meio ambiente com a economia de recursos. A telha ecológica é um tipo de telha fabricada a partir de reaproveitamento de materiais reciclados ou de resíduos de fibras naturais, sendo considerado um material ecologicamente correto, pois estimula a reciclagem ao reutilizar como matéria-prima elementos que seriam descartados em lixões e aterros sanitários. Além de ser sustentável, a telha ecológica também apresenta vantagens em relação às telhas tradicionais, tais como: leveza, isolamento térmico e acústico, durabilidade, resistência a mofos e fungos, além de não possuir toxidade. Embora apresentem diversas vantagens, também apresentam desvantagens relacionadas com a instalação, a inclinação e a qualidade, que devem ser pesquisadas junto a profissionais e fabricantes.

2.1.5.1 Telhas ecológicas de garrafa PET

Segundo Schelb (2016), as telhas de PET são produzidas através de uma mistura de resinas poliméricas e carbonato de cálcio. O autor destaca que, na sua fabricação, as garrafas são separadas de acordo com as cores e depois passam por uma máquina especial, onde há a separação do rótulo e do plástico, sendo que ambos os materiais são reutilizados. De acordo com Shelb (2016), uma vez limpas e secas, as garrafas PET são trituradas até amolecerem e ficarem pastosas, quando são formadas as telhas, que podem ser encontradas em diferentes cores, como azul, amarela e vermelha (Figura 6).

De acordo com Almeida *et al.* (2013), a telha de PET na cor marrom-cerâmica reproduz fielmente o tom das peças de barro. A utilização do PET na fabricação de telhas tornou-se um novo método de utilização em obras da construção civil, pela sua facilidade na instalação e também pelo seu custo final que chega a um valor até 50% menor que uma telha cerâmica comum, além de gerar diminuição no acúmulo de lixos e da poluição dos lençóis freáticos. Além do baixo custo, apresentam eficiência, excelente propriedade de fluxo luminoso, brilho e transparência, proporcionando considerável relação custo/benefício para aplicação junto às telhas convencionais e coberturas que necessitam transparência.

Figura 6 – Telhado com diferentes cores de telha de PET.

Fonte: https://telhasleve.com.br/?page_id=4364&paged=4. Acesso em 19/10/2021.

Um aspecto interessante como comparativo entre as telhas cerâmicas e as telhas de PET, é que as telhas de garrafas PET possuem a mesma resistência que as telhas cerâmicas, porém são bem mais leves. Isso influencia no peso da estrutura do telhado e traz economia à obra, apesar de terem um custo maior que as cerâmicas no momento de sua aquisição. As telhas de PET também têm grande durabilidade por serem fabricadas com plástico e resistem por muitos anos, diminuindo a extração e o uso de recursos naturais ao longo do tempo (SCHELB, 2016). Também não apresentam porosidades como as telhas cerâmicas, evitando assim o acúmulo de umidade e mofo, além disso, resistem a temperaturas mais altas (cerca de 85°C) comparadas às temperaturas máximas a que um telhado é exposto (média de 50°C). Composta por cristal de alta temperatura, com excepcional estabilidade térmica, a telha de PET tem a vantagem de poder ser retirada para limpeza, com sabão neutro e esponja, além de que a durabilidade do produto pode ser até cinco vezes maior.

Segundo Silva, Franciscon e Rocha (2010), quando consideradas as questões econômicas envolvidas na utilização das telhas, ou seja, custo/m^2 , a telha de cerâmica é mais barata que a telha de PET. Isso pode acontecer devido ao custo da matéria-prima, e à maior dificuldade de produção da telha de PET, pois envolve a coleta de material (a partir de firmas de recolhimento de lixo), a separação de materiais, as fases de lavagem e fundição do material e o posterior acabamento, encarecendo, assim, o produto final. Contudo, o grande diferencial da utilização das telhas de PET está no custo da estrutura relacionada com o peso da telha: a telha cerâmica é muito mais pesada que a de PET, e a estrutura para sua sustentação deve ser mais reforçada. Por outro lado, pode-se utilizar materiais muito mais baratos para a estrutura com telhas de PET, como esquadrias de alumínio, plástico, entre outros materiais. Conclui-se

que do ponto de vista econômico, a telha cerâmica teria mais vantagens, se não for considerada a estrutura de suporte, caso contrário, a telha de PET seria melhor dos pontos de vista da economia e da ecologia.

2.1.5.2 Telhas ecológicas de embalagens Tetra Pak

O conceito de sustentabilidade tem sido bastante discutido no mundo devido à proximidade, cada vez maior, do cenário de escassez de recursos naturais. As novas tecnologias possibilitam que alguns materiais possam ser reutilizados, minimizando os impactos causados ao meio ambiente. A construção civil constitui uma área que consome bastantes recursos naturais e também tem incorporado produtos reciclados nas obras, como por exemplo, as telhas ecológicas fabricadas a partir de embalagens acartonadas (MAGALHÃES, 2018), Figura 7.

Figura 7 – Telhado com telha Tetra Pak.

Fonte: *https://ecopex.com.br/telha-ecologica/*. Acesso em 19/10/2021.

De acordo com Schelb (2016), as embalagens cartonadas são constituídas por multicamadas de papel, plástico e alumínio e variam em tamanho, forma e maneira de abertura, as quais são escolhidas de acordo com o produto a ser envasado. O autor explica que, em sua constituição, o papel representa 75% em massa da embalagem, enquanto o alumínio e o plástico representam 5% e 20%, e esses materiais, dispostos em ordem determinada, passam por um processo de laminação, que consiste, simplificadamente, em realizar uma compressão sobre as folhas dos diversos constituintes. Ainda de acordo com Schelb (2016), as telhas Tetra Pak têm algumas outras qualidades como: leveza (que resulta em economia na estrutura do telhado);

impermeabilidade; resistência ao fogo e não propagação de chamas; alta resistência à flexão; não propagação do som; resistência às intempéries, como chuvas de granizo; resistência a produtos químicos; fácil fixação de pregos, parafusos e rebites; possibilidade de recebimento de pintura acrílica e de adaptação geométrica, uma vez que pode ser cortada em todas as direções, reduzindo, por isso, a geração de resíduos na obra. Outras características que podem ser destacadas são: produto ecológico, pois não tem em seu processo de transformação, nenhum tipo de efluente ou poluente atmosférico; não cancerígeno; e não agressivo à saúde de quem o produz, manuseia ou usa, pois é um material limpo e inodoro.

Numa pesquisa realizada por Silva *et al.* (2015), com o objetivo de avaliar o reaproveitamento de telhas de fibrocimento e o uso de telhas recicladas à base de embalagens Tetra Pak no conforto térmico em modelos físicos em escala reduzida, observou-se que a telha reciclada apresenta bom desempenho térmico. Assim, ratificou-se o uso de tal material na possibilidade de atenuar o índice de temperatura do globo e umidade exterior sobre o ambiente interno das edificações.

Já Aquino (2017) destaca que, além da propriedade de isolante térmico, a embalagem Tetra Pak apresenta inúmeras características, sendo asséptica e composta por camadas com diferentes materiais, que atuam como barreira, impedindo a entrada de luz, ar, água e microrganismos e também evita a saída do aroma dos alimentos da embalagem. Em seu experimento foram utilizados três diferentes tipos de telhas (a telha reciclada fabricada em material Tetra Pak, telhas de fibrocimento e telhas metálicas) aplicadas em modelos reduzidos. Verificou-se que a telha fabricada com material reciclado pode ser utilizada como aliada ao conforto térmico, em cumprimento às normas técnicas, pois apresentou em todos os horários do dia em que foi realizada a medição, valores inferiores de temperatura em seu interior quando comparada às telhas de fibrocimento e telhas metálicas. Logo, torna-se viável investir em uma cobertura com material reciclável, que acarretará em bons valores de conforto térmico, além de ser uma opção ecologicamente correta, que reduz a quantidade de embalagens Tetra Pak, que anteriormente não tinham utilidade após o seu uso. De acordo com Schelb (2016), considerando as telhas recicladas como uma forma de garantir sua segura inserção no mercado, é preciso conhecer suas características, para verificar seu desempenho em relação aos materiais convencionais, a fim de serem estabelecidos critérios e classificações adequadas.

2.1.5.3 Telhas ecológicas de fibra vegetal

As fibras naturais, como reforço de matrizes frágeis à base de materiais cimentícios, têm despertado grande interesse, por causa de seu baixo custo, disponibilidade, economia de energia e também no que se refere às questões ambientais. Os resíduos gerados pela agroindústria brasileira da fibra vegetal constituem importantes fontes de matéria-prima para a produção de componentes construtivos. Esses recursos são abundantes e disponíveis, além de representarem uma estratégia para o reaproveitamento de resíduos. O emprego dos compósitos em placas, telhas de cobertura e componentes pré-fabricados, pode representar significativa contribuição para o rápido crescimento da infraestrutura dos países em desenvolvimento (COUTTS, 2005).

Segundo estudos realizados por Savastano *et al.* (1998,1999 e 2006), no contexto da aplicação de fibras vegetais para o fibrocimento, a extrusão tem-se mostrado como um dos processos com potencial em relação ao método *Hatschek* (processo usual de fabricação de compósitos de fibrocimento que consiste na remoção da água, por sucção, de uma mistura bem diluída de fibras, cimento e aditivos até a obtenção de mantas com a espessura desejada), pelos seguintes aspectos: menor gasto de energia na produção, variedades de geometria de produtos, aplicação do conceito de gradação funcional e menor custo de implantação de linha de produção. Além disso, os compósitos extrudados de fibrocimento podem apresentar melhor desempenho mecânico e durabilidade. Os autores analisaram o processo de cultivo, extração, beneficiamento e industrialização de fibras vegetais, tendo em vista a identificação e a quantificação dos resíduos gerados. Algumas fontes foram identificadas em diversas regiões do país dentre elas: (a) bucha de campo do sisal (Bahia e Paraíba); (b) bucha de máquina da produção de fio de sisal; (c) fibras extraídas do pó residual do coco (Pernambuco, Sergipe, Ceará e interior de São Paulo); (d) rejeito de celulose de eucalipto (Espírito Santo); (e) fibra do pseudocaule da bananeira (São Paulo).

Ainda neste contexto, Rocha e John (2003) demostraram a possibilidade de se produzir materiais de construção a partir de subprodutos que poluem o meio ambiente. O uso desses resíduos permite a economia de matérias-primas convencionais, muitas vezes extraídas da natureza com riscos de degradação ambiental. Segundo os autores, a construção civil deve estar atenta aos aspectos negativos associados ao uso de matérias-primas não renováveis, o alto consumo de energia, a geração de entulho e a emissão de gases poluentes, adotando materiais substitutos considerados de maior sustentabilidade.

2.2 Desempenho térmico de telhados ecológicos

O desempenho térmico de uma edificação é responsável pelo conforto térmico que esta proporciona aos ambientes internos e está diretamente ligado às cargas térmicas absorvidas e transferidas dos materiais e elementos construtivos que a compõe. De acordo com Siqueira *et al*. (2005), uma edificação projetada para o clima no qual está inserida torna-se confortável, além de economizar energia. A avaliação do desempenho térmico de uma edificação compreende a resposta global do projeto arquitetônico proposto em relação às trocas térmicas entre o ambiente construído e o ambiente externo, onde a caracterização das condições climáticas locais é uma das etapas mais importantes. Gagliano *et al.* (2015) defendem que a redução da demanda de energia para refrigeração de ambientes, bem como a mitigação da Ilha de Calor Urbano (UHI), requerem soluções adequadas em escala predial e urbana. Em particular, os telhados de edifícios foram identificados como um possível campo de intervenção que poderia contribuir para fornecer significativa economia de energia e benefícios ambientais. Neste contexto, telhados frescos e verdes são duas soluções muito interessantes, o que pode permitir obter tanto a redução do consumo de energia quanto a melhoria da sensação de conforto no ambiente externo e interno.

O conceito de conforto térmico se refere ao estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda. A não satisfação pode ser causada pela sensação de desconforto pelo calor ou pelo frio, quando o balanço térmico não é estável, ou seja, quando há diferenças entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente (LAMBERTS *et al.*, 2016). A cobertura e as envoltórias dos edifícios desenvolvem importante papel nesse controle de temperatura interna. Sobre isso, a norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005) explicita as principais propriedades térmicas dos materiais que estes elementos construtivos devem ter e apresenta os métodos de cálculo para diversas variáveis que interfere no desempenho térmico.

Segundo Frota e Schiffer (2001), dentre as variáveis climáticas que caracterizam uma região, podem-se distinguir as que mais interferem no desempenho térmico dos espaços construídos: a oscilação diária e anual da temperatura e da umidade relativa, a quantidade da radiação solar incidente, o grau de nebulosidade do céu, a predominância de época e o sentido dos ventos, e índices pluviométricos. De forma geral, diversos estudos apontam que os telhados ecológicos têm como uma de suas principais premissas contribuir para a redução de temperatura dos ambientes internos, sendo mais eficazes, nesse sentido, do que telhados convencionais.

Santos (2016) realizou uma pesquisa experimental na zona rural de Caruaru, Agreste Pernambucano, utilizando dois tipos de telhados verdes (com Babosa e com cacto Coroa-de-Frade) e um telhado convencional (com telha cerâmica). Foram comparados os dados internos de temperatura (parede e teto) e umidade (teto) com os dados externos (radiação, velocidade dos ventos, temperatura e umidade do ar), e com normas da ABNT para edificações habitacionais e instalações de ar-condicionado, como indicativos para conforto térmico. Segundo o autor, foi comprovada a eficiência térmica do telhado verde em relação ao convencional, onde o telhado com Babosa foi mais eficiente que o telhado com Coroa-de-Frade, chegando a apresentar uma redução de até 0,9ºC em comparação ao telhado convencional. Rocha (2020) deu continuidade aos estudos de Santos (2016) e avaliou o desempenho térmico de um telhado verde ecológico de baixo custo, na mesma cidade.

Os estudos de Rocha (2020) foram conduzidos com dois protótipos, onde em um deles foi disposto um arranjo sustentável composto por garrafas PET como elemento estruturador para acomodar o substrato de terra tratada e a vegetação de Aranto (*Kalanchoe laetivirens*), escolhida em razão do seu potencial de adaptação ao clima da região, além da facilidade de manutenção, de propagação de mudas e a possibilidade de retorno socioeconômico. Foram monitorados os dados de temperatura interna dos ambientes, abaixo das duas coberturas, comprovando para o telhado verde ecológico, a minimização de até 0,8°C na média mensal, nos horários mais quentes de dias específicos, com a variação mais efetiva que os horários mais frios, se comparado aos dados do telhado de referência. Sobre os dados externos, o telhado verde ecológico resultou em melhor desempenho em diversos parâmetros, com destaque para a atenuação térmica no momento do pico máximo diário de temperatura e a amplitude térmica que chegou a evidenciar a diferença de 5,9°C entre as mesmas.

Oliveira, Soares e Santos (2016) realizaram uma análise comparativa de dados encontrados na literatura dos sistemas de cobertura compostos por telha cerâmica, telha de fibrocimento e telhado verde, em edificações localizadas no Brasil, onde foi verificado que o telhado verde se sobressaiu aos demais sistemas nos critérios térmicos analisados, mas apresentou o custo mais elevado de execução. Entretanto, o fator custo é minimizado quando os benefícios da utilização do telhado verde são considerados.

Matheus *et al.* (2016) realizaram um trabalho com três diferentes estudos de desempenho térmico com revestimentos vegetais: 1) um estudo de caso com cobertura verde na cidade de Atibaia – SP; 2) um estudo experimental com parede viva; e 3) um estudo de caso com parede verde, ambos na cidade de Campinas - SP, todos com medições comparativas e

simultâneas entre superfícies expostas e protegidas pelo verde. Os parâmetros medidos foram: temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do ar, temperatura radiante média e temperatura das superfícies internas e externas das envoltórias. Tais análises levaram à conclusão de que o uso da vegetação como elemento de proteção em coberturas e fachadas atua positivamente sobre os fluxos de calor na envoltória, representando uma importante ferramenta para o controle térmico passivo de altas temperaturas no interior das edificações.

Oliveira (2009) desenvolveu um projeto na região hidrográfica da baixada de Jacarepaguá, especificamente envolvendo a Comunidade da Vila Cascatinha, em Vargem Grande, a fim de gerar subsídios para políticas públicas em áreas de assentamentos informais. Assim, foi utilizada uma tecnologia adaptada dos telhados verdes para edificação popular (telhado de fibrocimento), com o objetivo de verificar aspectos construtivos, possíveis espécies com potencial de geração de renda, custos, efeitos no retardo do escoamento superficial das águas pluviais e outros benefícios associados a questões climáticas locais e de conforto do ambiente interno. De acordo com o autor, os resultados demonstraram, entre outros, o estabelecimento de metodologia para implantação dos telhados verdes em habitações populares, o valor dos custos e os resultados preliminares de espécies com potencial para geração de renda. Foi observada a eficiência tanto na variação térmica interna como também no externo, bem como redução da amplitude térmica interna em dia característico de verão (35,9°C), sendo capaz de reduzir a temperatura interna em cerca de 2,0°C nos períodos mais quentes do dia e cerca de 4,0°C no ambiente externo em comparação com o telhado-testemunha (sem plantio), com potencial de modificação do microclima local.

No estudo desenvolvido por Gangliano *et al.* (2015) foi realizada uma análise comparativa numérica do desempenho energético e ambiental de três tipologias de cobertura, nomeadamente uma cobertura normal (SR), uma cobertura fria (CR) e uma cobertura verde (GR). Essa análise, que foi desenvolvida através de simulações dinâmicas de energia sob clima temperado, destacou diferentes variações térmicas para os cenários de cobertura investigados, também em função do nível de isolamento térmico. Como resultado, verificou-se que, isoladamente, telhados verdes e frios proporcionam maior economia de energia do que telhados padrão. Em particular, os telhados verdes mostraram o melhor desempenho em relação à mitigação de UHI nas condições climáticas típicas do Mediterrâneo área.

Por fim, Conceição (2008) , em seu experimento, comparou telhas de cimento amianto pintadas com tinta reflexiva, telhas cerâmicas e telhas compostas de uma matriz à base de cimento, escória de alto-forno e sílica ativa, reforçadas com fibras de polpa celulósica de sisal

e concluiu que as telhas compostas de fibras vegetais apresentaram desempenho térmico semelhante as das telhas cerâmicas apontadas como referência, quanto ao conforto térmico em instalações e que a confecção das telhas compostas com fibras vegetais é segura para o trabalhador, diferentemente das telhas de cimento amianto.

2.3 Desempenho hidrológico de telhados ecológicos

O crescimento da população urbana e a consequente impermeabilização das áreas verdes têm causado diversos impactos ambientais, dentre eles as enchentes e inundações. A gestão das águas pluviais passou a ser de extrema importância para evitar maiores problemas ambientais e junto a ela a utilização de técnicas compensatórias no manejo das águas vem ganhando destaque neste cenário. Nesse contexto, os telhados ecológicos vêm sendo empregados, pois um de seus benefícios é promover o controle quali-quantitativo das águas pluviais. Destaca-se que o desempenho hidrológico de telhados ecológicos está associado apenas a telhados que possuem substratos e ou vegetação, ou seja, telhados marrons e telhados verdes, pois estas tipologias, conseguem absorver, reter e tratar as águas pluviais, atuando diretamente no escoamento superficial.

Na revisão sistemática realizada por Bär e Tavares (2017), foram abordadas as variações quantitativa e qualitativa das águas escoadas de telhados verdes no cenário brasileiro. Os autores observaram que a diversidade de abordagens e a diferença entre os componentes dos telhados verdes utilizados dificultam uma comparação adequada, bem como o agrupamento dos resultados obtidos. Entretanto, vários trabalhos referentes à capacidade de retenção de águas pluviais apresentam conclusões concordantes, como a influência da inclinação, da umidade, do período de intervalos entre precipitações e das características da precipitação. Já para os trabalhos referentes à qualidade das águas escoadas dessas coberturas, os resultados são bastante variantes e até mesmo contraditórios. Essa revisão destacou a necessidade de maiores estudos quanto ao desempenho hidrológico de telhados verdes, e sua influência em sistemas de drenagem urbana. Os autores sugerem que métodos de pesquisa padronizados poderiam auxiliar a compatibilização de resultados, e poderiam contribuir de maneira positiva na construção de uma evidência científica eficaz sobre a adaptação e o desempenho dessas coberturas em regiões brasileiras.

Com relação a estudos quantitativos, Persch (2019) investigou a variação de telhados verdes, de diferentes escalas, na redução do escoamento superficial ao longo do período de um

ano. Para isso, quatro telhados verdes extensivos, com áreas de 1 m^2, 3 m^2, 6 m^2 e 12 m^2 foram identicamente construídos, variando entre si apenas a área. Durante o monitoramento foi possível identificar volumes de precipitação escoado, a efetividade na retenção do escoamento, a influência das características de precipitação na resposta hidrológica e o estabelecimento vegetal. O telhado com área de 12 m^2 sobressaiu, dentre os demais, como o de melhor efetividade na retenção e controle de escoamento, evidenciando a hipótese de que maiores escalas de telhados verdes produzem um maior efeito na capacidade de armazenamento do escoamento pluvial e, consequentemente, na redução e no atraso na geração de escoamento superficial. Quanto às características da precipitação, a de maior influência na retenção e no escoamento, para as distintas escalas, foi o volume precipitado; outros fatores, como volume máximo precipitado em 1 h e umidade antecedente do substrato também se mostraram relevantes e direcionadores da efetividade dos telhados nas quatro escalas analisadas.

Sakagami (2016), avaliou, em termos hidrológicos, o desempenho de um telhado verde extensivo, por meio de protótipos constituídos por diferentes substratos e por simulação de chuvas, cujas intensidades foram de 52 mm/h e 127 mm/h. Foram realizadas duas baterias de ensaio, com durações de chuva de 5, 15, 30 e 60 min para cada intensidade; e intervalo de seis dias entre uma chuva e outra. O autor observou um bom desempenho em todos os três módulos, principalmente para a chuva mais rápida e intensa, havendo armazenamento de todo o volume de água de entrada. Mesmo para as demais situações, obteve-se desempenho satisfatório dos módulos, uma vez que não houve escoamento superficial, apenas sub-superficial, com tempo de retardo observado.

Tassi *et al.* (2014) avaliaram a contribuição de telhados verdes para o controle quantitativo do escoamento pluvial. Para isso, monitorou durante 17 meses um modelo experimental, com o objetivo de avaliar seu efeito sobre o escoamento pluvial, por meio da determinação do coeficiente de escoamento superficial, do volume máximo de armazenamento do telhado e do retardo na geração de escoamento ante os diferentes eventos de precipitação. Com os resultados obtidos, os autores calibraram um modelo de balanço de volumes, que foi utilizado para a realização de um prognóstico de longo período sobre a variação esperada do telhado verde. Os resultados demonstraram que foi possível reduzir, em média, 62% do escoamento superficial, promovendo um retardo no escoamento e reduzindo as vazões de pico, o que gerou o controle desejado. No entanto, a eficiência se mostrou altamente influenciada pelas condições climáticas e de umidade do solo que antecedem cada evento chuvoso.

Bacovis e Nagalli (2013) avaliaram o desempenho hidrológico de telhados verdes em comparação às coberturas convencionalmente usadas (telhas de fibrocimento, de cerâmica, aço galvanizado e lajes impermeáveis) perante eventos de chuva, a partir da realização de um experimento em escala reduzida. Foram construídos e investigados dois protótipos de mesmas dimensões, 2,2 m x 1,1 m, sendo um protótipo de telhado verde e o outro representando um telhado impermeável qualquer. Os protótipos foram submetidos a testes hidrológicos com simulações de chuva de 43,6 mm e tempo de duração de 16 min, de forma a permitir verificar a eficiência do protótipo de telhado verde na atenuação dos picos de seu hidrograma perante três situações iniciais distintas de saturação do sistema. Os autores avaliaram o desempenho hidrológico, no âmbito do escoamento superficial e da infiltração, e discutiram o funcionamento de cada protótipo. Os resultados demonstraram que a capacidade de retenção de água pluvial do telhado verde varia em função da condição de saturação do mesmo, com evidente antecipação do pico de cheia, de modo que se pode concluir que telhados verdes podem vir a contribuir para a atenuação de enchentes.

Com relação à análise qualitativa/quantitativa, Lima (2013) avaliou o desempenho de telhados verdes no semiárido pernambucano, no que se refere à capacidade de retenção de águas pluviais com uso de vegetações e substratos distintos, caracterizando a qualidade da água escoada pelas coberturas investigadas e considerando a influência dos diferentes substratos sobre a qualidade da água escoada. O trabalho foi desenvolvido na zona rural da cidade de Caruaru-PE, Agreste Pernambucano, entre os anos de 2011 e 2013. Com os resultados obtidos, o autor afirmou que os telhados verdes apresentaram boa retenção hídrica em comparação com o telhado convencional, sendo o percentual de retenção diretamente relacionado ao conjunto solo-vegetação. No que se refere ao contexto qualitativo, o autor observou que a água que escoa das coberturas ajardinadas apresentou grandes alterações nos parâmetros estudados em comparação aos valores encontrados para o telhado controle, ratificando que estas alterações estão relacionadas aos materiais utilizados na camada de substrato, o que torna esta água não potável.

Por fim, no estudo de Oliveira (2009), verificou-se o retardo do escoamento superficial das águas pluviais, e os resultados demonstraram que a implantação dos telhados verdes é promissora no controle do escoamento superficial, podendo ser utilizado, inclusive, como parte do sistema de irrigação do próprio telhado. O autor simulou chuvas e observou uma retenção de até 56% do volume precipitado, com retardo da ocorrência do pico de até 8 minutos no telhado vegetado em relação ao telhado testemunho (convencional com telhas fibrocimento).

2.4 Legislação e incentivos de utilização de telhados ecológicos no Brasil

Considerando a Lei Federal Nº 6.938 (BRASIL, 1981) que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, como norteadora para o desenvolvimento de ações voltadas a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, é possível identificar diversas legislações vinculadas à implementação de telhados ecológicos que colaboram com o atendimento dos seus princípios.

2.4.1 Legislação

No âmbito dos telhados verdes, as primeiras leis que determinaram a obrigatoriedade da instalação de telhados verdes no Brasil foram, a Lei Municipal Nº 7.031 (GUARULHOS, 2012), seguida da Lei Estadual Nº10.047 (PARAIBA, 2013) e da Lei Municipal Nº18.112 (RECIFE, 2015), que neste último caso, também obriga a construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para rede de drenagem.

Além das leis descritas, algumas legislações incentivam a utilização de tecnologias de infraestrutura verde através da compensação ambiental em construções urbanas, como é o caso da Lei Complementar Nº 434 (PORTO ALEGRE,1999), que em seu Art. 18º cria o Programa de Implantação e Manutenção de Áreas Verdes Urbanas, envolvendo ações permanentes de implantação e manutenção de parques e praças, de disciplinamento da arborização nos passeios públicos e de criação de incentivos à arborização e ao ajardinamento em áreas privadas; da Lei Municipal Nº 5. 840 (CANOAS, 2014), que conforme Art. 1º possibilita a todos os prédios do município de Canoas-RS, sejam eles residenciais, comerciais ou públicos, projetados e construídos, prever a instalação de sistema de telhado verde sobre suas coberturas com a finalidade de compensar parcialmente a construção sobre Área Livre Obrigatória mínima necessária para o terreno; e do Decreto Municipal Nº 55.994 (SÃO PAULO, 2015), que em seu Art. 1º introduz alterações no Art. 4º do Decreto Municipal Nº 53.899 (SÃO PAULO, 2013) que regulamenta o Termo de Compromisso Ambiental, onde admite que a conversão da compensação em obras e serviços, jardins verticais e coberturas verdes, mediante decisão fundamentada do Colegiado da Câmara Técnica de Compensação Ambiental (CTCA).

2.4.2 IPTU Verde

Outro mecanismo de incentivo ao uso de telhados ecológicos, principalmente telhados verdes e telhados solares**,** é o IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano) Verde, que também recebe outros nomes, como IPTU Ambiental, IPTU Sustentável ou IPTU Ecológico. Esse tipo de imposto promove incentivos fiscais que favorecem os cidadãos que investem em boas práticas ambientais. Os descontos podem ser obtidos através de: (I) percentuais cumulativos, por meio dos quais são designadas iniciativas capazes de gerar descontos que podem se acumular até certo limite; (II) percentuais variáveis, pelo qual as porcentagens variam de acordo com uma variável particular; (III) percentual fixo, pelo qual um único percentual corresponde a uma série de ações sustentáveis que devem ser implantadas em conjunto ou individualmente; (IV) percentuais não cumulativos, onde são designadas iniciativas que atraem descontos não cumulativos, e (V) sistema de acumulação de pontos e atribuição de classes, que determina o desconto a receber. Os percentuais de desconto podem variar de 5% a 100% dependendo do município. O Quadro 1 mostra, em ordem cronológica, os percentuais de descontos dos principais municípios brasileiros a adotar o IPTU Verde.

Quadro 1 – Percentuais de descontos do IPTU verde de acordo com municípios brasileiros.

Municipio (Estado)	Legislação/ano	Desconto
Colatina (ES)	Lei Nº 4.537/1999	40% a 50%
Rio de Janeiro (RJ)	LC Nº 482/2002	10% a 20%
São Carlos (SP)	Lei Nº 13.692/2005	1% a 4%
Americana (SP)	Lei Nº 4.448/2007	10% a 20%
Campos do Jordão (SP)	Lei Nº 3.157/2008	10% a 50%
Natal (RN)	Lei Nº 301/2009	até 50%
Barretos (SP)	Lei Complementar Nº122/2009	até 10%
Ipatinga (MG)	Lei Nº 2.646/2009	3% a 5 %
São Vicente (SP)	Lei Complementar Nº 634/2010	0,3% a 1%
Guarulhos (SP)	Lei Nº 6.793/2010	3% a 5%
Sorocaba (SP)	Lei Nº 9.571 /2011	10%
Goiana (GO)	Lei Complementar Nº 235/2012	2% a 27%
Cabo Frio (RJ)	Lei Nº 2.443/2012	5% a 63%
Florianópolis (SC)	Decreto Nº12.608/2014	5%
Seropédica (RJ)	Lei Nº 526/2014	até 15%
Maringá (PR)	Lei Nº 9.860/2014	3% a 20%
Santos (SP)	Lei Complementar Nº 913/2015	1,5% a 10%
Vitória da Conquista (BA)	Lei Nº 2.157/2017	10%
Salvador (BA)	Decreto Nº 29.100/2017	10%
Distrito Federal	Lei Nº 5.965/2017	2% a15%

Mauá (SP)	Lei Nº 5.199 /2017	1% a 20%
Araraquara (SP)	Lei Complementar Nº889/2018	10% a 40%
Caruaru (PE)	Lei Complementar Nº 62 /2018	10%
Porto Velho (RO)	Lei Complementar Nº 759/2019	4% a 20%
Balneário Camboriú (SC)	Lei Nº 4.303/2019	2% a 6%
Tietê (SP)	Lei Nº 3.730/2019	10% a 50%
Teresina (PI)	Lei Complementar Nº 5.465/2019	5% a 20%

Fonte: Autora (2021).

2.4.3 Certificações e selos de sustentabilidade

Destaca-se ainda normas e programas que promovem a adoção de tecnologias de infraestrutura verde por meio de certificações/selos de sustentabilidade. Essas certificações/selos certificam produtos e serviços que levam em conta a preservação do meio ambiente, e têm sido bastante utilizadas para promover a sustentabilidade nos edifícios como um diferencial de mercado. Entre os diversos critérios adotados para obtenção dessas certificações, a utilização de telhados ecológicos é uma delas. No Brasil, além do Decreto Nº. 35.745 (RIO DE JANEIRO, 2012), que intitui o selo "Qualiverde" e dá preferência nos processos de licenciamento da obra para as edificações e projetos que incluírem tecnologias como telhados verdes, jardins verticais, entre outros, e do Decreto Nº. 29.100 (SALVADOR, 2017), que cria o Programa de Certificação Sustentável em edificações no município de Salvador, denominado "IPTU VERDE" com o objetivo de incentivar empreendimentos que contemplem ações e práticas sustentáveis destinadas à redução do consumo de recursos naturais e redução dos impactos ambientais.

Além do direito ao desconto do IPTU, outras iniciativas que estimulam a prática da utilização de telhados ecológicos como critério de sustentabilidade dos edifícios no Brasil são:

- Certificação LEED (*Leadership in Energy and Enviromental Design*): sistema internacional de certificação ambiental para edificações utilizado em mais de160 países, que visa incentivar a transformação dos projetos, das obras, da operação das edificações e espaços construídos, com foco na sustentabilidade de suas atuações. A conferência das certificações é realizada pelo *Green Building Counci*l Brasil (GBCB), que é o braço da ONG internacional no Brasil desde 2007 e visa auxiliar no desenvolvimento da indústria da construção sustentável no país. O LEED possui 4 tipologias em que são consideradas diferentes necessidades para cada tipo de empreendimento. As respectivas tipologias analisam 8 áreas: localização e transporte; espaço

sustentável; eficiência do uso da água; energia e atmosfera; materiais e recursos; qualidade ambiental interna; inovação e processos; créditos de prioridade regional (GBC BRASIL,2021).

- Certificação AQUA-HQE (Alta Qualidade Ambiental): certificação internacional da construção de alta qualidade desenvolvida a partir da certificação francesa *Démarche HQE* (*Haute Qualité Environmentale*) e aplicada no Brasil desde 2008 pela Fundação Vanzolini. Mantendo a base conceitual francesa, a certificação brasileira foi adaptada para a realidade de normas e práticas do país. No AQUA-HQE existem dois ciclos de certificação: ciclo construção, para edificações novas e ciclo operação, para edificações existentes. Em ambos os ciclos, o empreendimento é examinado e classificado através de dois referenciais técnicos: o Sistema de Gestão do Empreendimento (SGE) e a Qualidade Ambiental do Edifício (QAE), que agrupa as premissas de avaliação de desempenho ambiental da edificação em 14 categorias. Os edifícios em operação também devem seguir parâmetros dados pelo documento "Gestão Ambiental do Empreendimento" (GAE) – (VANZOLINI, 2021)
- Selo Casa Azul: criado pela Caixa Econômica Federal em 2009, este selo foi o primeiro sistema de classificação do índice de sustentabilidade de projetos habitacionais desenvolvido para a realidade brasileira. O referido selo visa reconhecer e incentivar a adoção de soluções urbanísticas e arquitetônicas de qualidade, assim como o uso racional dos recursos naturais na produção de empreendimentos a serem executados no âmbito dos programas habitacionais operacionalizados pelo banco. Sua aplicação busca também promover a conscientização de empreendedores e moradores sobre os benefícios sociais e econômicos das construções sustentáveis, considerando a redução do custo de manutenção dos edifícios e das despesas mensais de seus usuários. Possui uma avaliação dividida em 6 categorias: qualidade urbana e bem-estar; eficiência energética e conforto ambiental; gestão eficiente da água; produção sustentável; desenvolvimento social e inovação (CAIXA, 2021) .

  Selo Procel Edifica: faz parte do Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações, que foi instituído em 2003 pela Eletrobras, A criação do Programa incentiva a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais (água, luz, ventilação etc.) nas edificações, reduzindo os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente. O processo de etiquetagem é concedido na fase de projeto e após a construção do edifício. Nos edifícios comerciais, de serviços e públicos são avaliados três sistemas: envoltória, iluminação e condicionamento de ar. Nos edifícios residenciais são avaliados: a envoltória e o sistema de aquecimento de água, além dos sistemas presentes nas áreas comuns dos edifícios multifamiliares, como iluminação, elevadores, bombas centrífugas, entre outras (PROCELINFO, 2021).

2.5 Estatística aplicada

Estatística é a área do conhecimento que utiliza teorias probabilísticas para explicar eventos, estudos e experimentos; portanto, é uma ciência que se desenvolve através do uso de dados empíricos. De acordo com Poleto (2008), a estatística tem como objetivos: a obtenção, a organização e a análise de dados, e a determinação de correlações que sejam capazes de descrever o acontecimento e prever futuras ocorrências. Segundo Ferreira (2015), a estatística pode ser dividida em duas grandes áreas: a estatística descritiva (utiliza técnicas destinadas a organizar, descrever e resumir os dados, onde os mesmos apresentados por meio de gráficos e resumidos através de medidas numéricas) e a inferência estatística (onde os dados amostrais são utilizados para elaborar estimativas, testar hipóteses e fazer previsões de uma população).

O papel da estatística na investigação científica vai além de indicar a sequência de cálculos a serem realizados com os dados obtidos. No planejamento, ela auxilia na escolha das situações experimentais e na determinação da quantidade de indivíduos a serem examinados. Na análise dos dados, indica técnicas para resumir e apresentar as informações, bem como para comparar as situações experimentais. Na elaboração das conclusões, os vários métodos estatísticos permitem generalizar a partir dos resultados obtidos (CALLEGARI-JACQUES, 2004).

Aplicada à área ambiental, Carvalho (2003) informa que a preservação do meio ambiente e a busca pelo desenvolvimento sustentável motivaram a realização de um grande número de estudos ambientais, que envolvem a coleta e análise de amostras do meio ambiente que apresentam, na maioria das vezes, extensos bancos de dados. Tal banco de dados é uma preciosa fonte de informações sobre a região focalizada e pode ser usado em vários tipos de estudos ambientais. Entretanto, a disponibilização, e consequentemente o uso, destes conjuntos de dados são limitados pelas dificuldades em sua análise estatística e interpretação dos resultados analíticos publicados. Daí a importância da estatística nos estudos ambientais.

2.5.1 Coleta, amostra e apuração de dados

De acordo com Ferreira (2015) a coleta de dados pode ser feita através de estudos observacionais ou experimentos; com todos os elementos da população ou com uma parte desta população (amostra) e deve-se ter muito cuidado na forma de coletar tais dados. De forma geral, existem dois tipos de amostragem: (I) probabilística ou aleatória (quando todos os elementos da população tiverem probabilidade conhecida, e diferente de zero, de pertencer à amostra; e

(II) não probabilística ou não aleatória (quando algum elemento da população não tiver probabilidade conhecida). Também é possível ter amostragem com reposição, quando elementos são selecionados mais de uma vez; e sem reposição, quando o elemento sorteado é removido da população. As técnicas de amostragens estão sucintamente descritas no Quadro 2.

Quadro 2 – Tipos de técnicas de amostragem.

Tipo	Descrição sucinta
Técnicas de amostragem probabilística (ou aleatória)	
Aleatória simples	• Seleção dos elementos da amostra → listagem de população finita através de sorteio. • Desejável: população homogênea, sob o risco de uma amostra pouco representativa.
Estratificada	• Cenário: população heterogênea para a variável de interesse. • Seleção dos elementos da amostra → a população é dividida em estratos ou subgrupos (mais homogêneos); realiza-se a amostragem aleatória simples de cada estrato ou seleção proporcional ao número de elementos existentes em cada estrato. • Amostragem que usa uma amostra de elementos de todos os estratos.
Sistemática	• Seleção dos elementos da amostra → sistema preestabelecido (sistematicamente): ordena-se os elementos da população (em uma lista) e, após o número inicial ser selecionado aleatoriamente, os demais elementos serão selecionados em intervalos regulares que ocorrem a partir do número inicial.
Por conglomerado	• Seleção dos elementos da amostra → a população é dividida em conglomerados ou subgrupos de elementos heterogêneos; seleciona-se aleatoriamente alguns conglomerados e todos os elementos desses irão compor a amostra. • Amostragem que usa todos os elementos dos conglomerados selecionados.
Técnicas de amostragem não probabilística (ou não aleatória)	
Por conveniência	• Seleção dos elementos da amostra → os mais acessíveis, gerando informações de forma rápida e barata.
Por quota	• Seleção dos elementos da amostra → elementos retirados da população segundo quotas estabelecidas de acordo com a distribuição desses elementos na população. • Amostragem em que os elementos são selecionados por julgamento.

Baseado nas informações de: Azevedo (2016), Ferreira (2015) , Naguettini e Pinto (2007) e Poleto(2005).

Fonte: Autora (2021).

Mesmo planejando e executando bem o processo de coleta da amostra, possivelmente haverá algum erro nos resultados, nesse contexto se inserem os tipos de erro amostral e não amostral. O erro amostral é a diferença entre o resultado amostral e o verdadeiro resultado da população, que resulta da flutuação amostral devido ao acaso. O erro não amostral ocorre quando os dados amostrais são coletados, registrados ou analisados incorretamente (tal como a seleção de uma amostra tendenciosa, o registro incorreto dos dados ou o uso de um instrumento de medida defeituoso).

Após a obtenção dos dados, para apuração dos dados brutos é realizada a distribuição de frequências, que é uma tabela em que se resume grandes quantidades de dados, determinando o número de vezes, que cada dado ocorre e a porcentagem com que o mesmo aparece. De forma geral, os principais elementos na construção de uma distribuição de frequências são: (I) amplitude total, que é a diferença entre o maior e o menor valor de um conjunto de dados; (II) amplitude de classe, que é a diferença entre dois limites inferiores ou entre dois limites

superiores sucessivos, nos casos em que a distribuição tenha a mesma amplitude em todas as classes; e (III) ponto médio de classe, que é o ponto equidistante dos extremos, servindo para representar a classe nos casos de cálculos de algumas medidas.

2.5.2 Representação gráfica

De acordo com Naguettini e Pinto (2007), os gráficos estatísticos são utilizados para facilitar a compreensão do comportamento dos dados, porém existe uma considerável diversidade de gráficos disponíveis em *softwares* estatísticos e no programa de planilha eletrônica *Excel*, sendo que cada um deles têm o uso mais adequado para evitar interpretações tendenciosas e/ou equivocadas. Os principais tipos de gráficos estão sucintamente descritos no Quadro 3.

Quadro 3 – Tipos de gráficos.

Tipo	**Aplicação/Descrição sucinta.**
Gráfico de linhas	• Séries temporais, quando os dados estiverem distribuídos segundo uma variável no tempo (meses, anos, etc.).
Gráfico de barras	• Variáveis qualitativas (dados categóricos).
Gráfico de setores ou de pizza	• Variáveis qualitativas nominais (desde que o número de categorias seja pequeno). • Apropriado para visualizar a proporção que cada categoria representa do total.
Histograma	• Distribuição de frequências construída com intervalos de classes, não devendo existir espaços entre as barras.
Polígono de frequências	• Gráfico de linha de uma distribuição de frequências, em que no eixo horizontal estão os pontos médios de cada intervalo de classe e, no eixo vertical, as frequências absolutas ou relativas (como no histograma). • Intersecções do polígono com o eixo das abscissas → encontra-se o ponto médio da classe anterior à primeira e o ponto médio da classe posterior à última.
Diagrama de Pareto	• Gráfico de barras para as ocorrências das categorias de uma variável qualitativa, em que as barras são arranjadas em ordem decrescente de altura, a partir da esquerda para a direita, com a categoria que ocorre com maior frequência aparecendo em primeiro lugar. • Possibilita fácil visualização das causas/problemas mais importantes.
Diagrama de dispersão	• Utilizado para visualizar a relação entre duas variáveis quantitativas (X e Y). • Aplicado com observações simultâneas das variáveis.
Diagrama Quantis-quantis ou Diagrma Q-Q	• Utilizado para visualizar a associação entre duas variáveis (X e Y). • Constitui uma representação dos dados ordenados entre dois conjuntos com amostra de mesmo tamanho.
Diagrama box-plot ou Resumo dos cinco números.	• Valores mínimo, máximo e os quartis. • Utilizados para comparar as características de duas ou mais amostras diferentes. • Possibilita uma visão geral do valor central, da dispersão, da assimetria, das caudas e de eventuais pontos amostrais discordantes.
Diagrama ramo e folha	• Utilizado para amostras menores. • Agrupa os dados de tal modo, que há nenhuma ou pouca perda da informação contida em cada elemento amostral, realçando a presença de pontos extremos. • Idéia central → dividir cada observação classificada em duas partes: o RAMO, posta à esquerda de uma linha vertical; e a FOLHA, colocada à direita.

Baseado nas informações de: Azevedo (2016), Ferreira (2015) , Naguettini e Pinto (2007) e Poleto(2005).

Fonte: Autora (2021).

2.5.3 Medidas resumo

De acordo com Landim (2019), as medidas resumo correspondem a uma síntese do conjunto de dados observados e servem para fazer uma inferência estatística, ou seja, a partir das informações obtidas na amostra, expandir nossas conclusões para a população. Essas medidas dividem-se em: (I) medidas de tendência central ou promédios, que representam a distribuição como um todo, além de possibilitar o confronto entre distribuições; (II) medidas de dispersão, que indicam o grau de variação dos elementos de uma amostra em relação à média do conjunto; (c) medidas de separatrizes, que indicam a ordem em que os elementos se encontram; e (d) medidas de assimetria e de curtose, que identificam o nível de (as)simetria, achatamento ou alongamento da distribuição. As medidas citadas se subdividem conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Tipos de medidas da estatística.

Tipo	Descrição sucinta
Medidas de tendência central	
Média aritmética simples (Média)	Soma de todos os valores de uma variável, dividida pelo número total de observações (não disposto em distribuição de frequência).
Média ponderada	Soma ponderada dos valores de uma variável com pesos diferentes. Método apropriado para distribuição de frequência por ponto ou por intervalo.
Moda	Valor que ocorre com maior frequência entre os dados.
Mediana	Medida de posição. Encontra-se exatamente no centro de um conjunto de dados.
Medidas de dispersão	
Amplitude	Diferença entre os valores máximo e mínimo dos dados.
Desvio médio absoluto	Média aritmética dos valores absolutos dos desvios em relação à média.
Desvio padrão amostral	Raiz quadrada da média dos quadrados dos desvios em relação à média.
Variância amostral	Média dos quadrados dos desvios.
Coeficiente de variação	Número adimensional positivo a ser aplicado quando as médias são diferentes de zero e as observações são sempre positivas.
Medidas de separatrizes ou ordenamento	
Quartis	Dividem a distribuição em quatro partes iguais, quanto ao número de elementos.
Decis	Dividem a distribuição em dez partes iguais, quanto ao número de elementos.
Percentis ou centis	Dividem a distribuição em cem partes iguais, quanto ao número de elementos.
Medidas de assimetria e de curtose	
Assimetria	Grau de desvio/afastamento da simetria de uma distribuição. • Curva simétrica → média, mediana e moda coincidem num mesmo ponto, de ordenada máxima, havendo um perfeito equilíbrio na distribuição. • Curva assimétrica → o equilíbrio não acontece, e a curva é enviesada para a direita ou para a esquerda.
Curtose	Grau de achatamento, de uma distribuição, em relação à distribuição normal. Possibilidades: (a) mesocúrtica → distribuição é normal; (b) leptocúrtica → distribuição é mais pontiaguda que a normal; e (c) platicúrtica → distribuição é mais achatada que a normal.

Baseado nas informações de: Azevedo (2016), Ferreira (2015), Naguettini e Pinto (2007) e Landim (2019)

Fonte: Autora (2021).

2.5.4 Análise e interpretação de dados

A correlação é uma técnica estatística que permite verificar a existência de relação entre duas variáveis quantitativas: uma, chamada variável Y (dependente ou resposta), e a outra, chamada variável X (independente ou explanatória). Se for identificado uma relação linear entre as variáveis X e Y, pode-se determinar a equação de regressão da reta de regressão que melhor modela os dados, possibilitando a determinação do valor de uma variável em resposta a um valor fixo da variável independente. A determinação da equação de regressão é possível com o emprego da técnica de regressão linear simples, tendo como instrumento de análise o diagrama de dispersão das variáveis envolvidas. A intensidade da correlação entre as variáveis é determinada utilizando o coeficiente de correlação linear (r), que é um número adimensional, e pode assumir os valores mínimo e máximo de, respectivamente, -1 e 1, situação considerada como uma relação linear perfeita, ou seja, todos os pares (x, y) se encontram sobre uma linha reta.

Testar uma hipótese é recolher evidências nos dados amostrais, que justifiquem a rejeição ou a não rejeição de uma certa afirmação, tendo-se em conta as probabilidades de serem tomadas decisões incorretas. Na formulação da hipótese a ser testada, considera-se dois cenários:

- Hipótese nula (Ho), que expressa uma igualdade;
- Hipótese alternativa (H1), que é dada por uma desigualdade.

Para evitar que se rejeite a hipótese nula quando essa é verdadeira ou que não se rejeite quando é falsa, é comum se especificar previamente o nível de significância (fixado em 0,01 ou 0,05), utilizando-se o método do valor p ou o método tradicional, que visa remover o grau de subjetividade associado à tomada de decisão intrínseca a um teste de hipótese.

De acordo com Assis, Sousa e Linhares (2020), os testes de hipóteses podem ser classificados em paramétricos, quando os dados amostrais tiverem sido extraídos de uma população normal, cujo modelo distributivo é conhecido ou previamente especificado; ou não paramétricos, quando não necessitam da especificação prévia do modelo distributivo da população, da qual foram extraídos os dados amostrais.

Os principais tipos de testes paramétricos são: (I) Teste t, que podem ser aplicados para duas amostras independentes, para duas amostras emparelhadas e para uma só amostra; e o (II) ANOVA (Análise de variância), que é usado para testar diferenças entre diversas situações e para duas ou mais variáveis, pois o Teste t só pode ser usado para testar diferenças entre duas

situações para uma variável. Com relação aos tipos de teste não paramétricos estes possuem uma quantidade bem maior e são utilizados de acordo com cada situação a ser investigada.

Como os testes paramétricos pressupõem a normalidade em amostras, pode ser necessário testar se a amostra tem uma distribuição normal e, para isso, um dos testes mais conhecidos é o Teste de *Kolmogorov-Smirnov*, que é aplicado quando a distribuição indicada na hipótese nula está completamente especificada. Os testes de aderência avaliam se a distância da distribuição dos dados observados é significativa em relação a uma distribuição de referência. Também se utiliza a correção de *Bonferroni*, nos testes posteriores da análise de variância (ANOVA), para corrigir os valores de testes de hipóteses, quando conduzimos vários testes consecutivos e assim evitar falsos positivos.

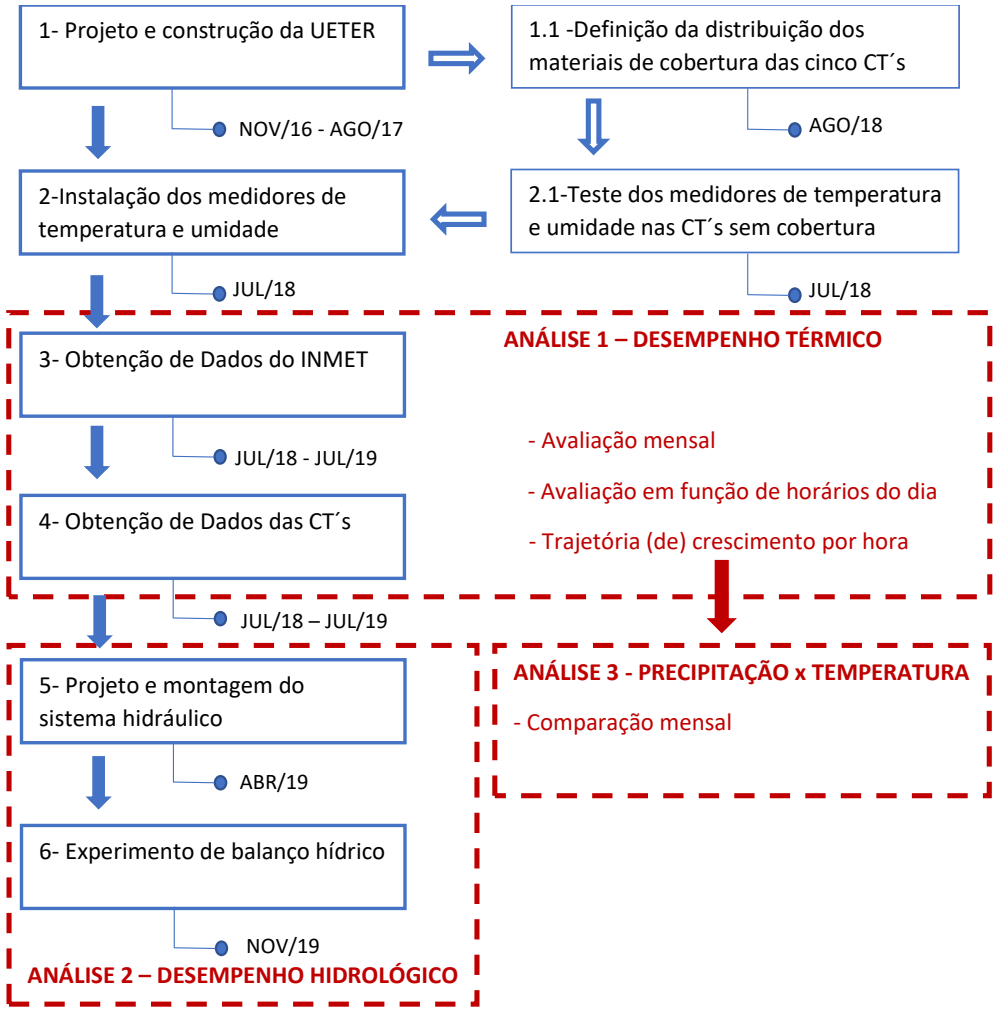
Ainda pode-se dispor de técnicas de regressão denominadas semi paramétricas, como é o caso da equação de estimativa generalizada (GEE), que é usada para estimar os parâmetros de um modelo linear generalizado com uma possível correlação desconhecida entre os resultados. As estimativas de parâmetros do GEE são consistentes mesmo quando a estrutura de covariância é mal especificada, em condições de regularidade moderada. E de técnicas semelhantes à regressão múltipla, como a análise de trajetórias, que permite investigar padrões de efeito dentro de um sistema de variáveis, servindo para testar modelos previamente conjeturados e estudados ou para experimentar novas concessões.

De acordo com Ferreira (2015), apesar do grande auxílio fornecido pelos pacotes estatísticos e pelas planilhas eletrônicas, é necessário ter um conhecimento teórico sólido para saber qual técnica estatística utilizar para resolver um determinado problema, além de saber analisar e interpretar os resultados obtidos. A avaliação estatística requer uma grande quantidade de cálculos exatos e os *softwares* evitam erros comuns referentes, não somente aos cálculos, mas à própria coleta de dados. Dentre diversos *softwares* citamos o Stata - sua versão 1.0 foi desenvolvida em C e lançada em 1985, originalmente implementada na plataforma DOS por William Gould, atualmente é aprimorado por uma equipe de profissionais, porém sua versão mais atual é a 17. De acordo com Montarroyos (2019), o Stata pode realizar tarefas simples como calcular média, desvio padrão, testes de hipótese, intervalos de confiança, até estatísticas mais complexas como análise de variância, regressão linear múltipla, regressão não-linear, regressão logística, etc. Também utiliza linguagem avançada e tem recursos para trabalhar através da internet como quase nenhum outro pacote estatístico. É possível trabalhar com um arquivo de dados que esteja num servidor do outro lado do planeta, bem como baixar dados e procedimentos sem custo adicional. A versão 17 é a mais atual (STATA, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi delineada inicialmente para verificar o desempenho térmico de telhados ecológicos, envolvendo a instalação de medidores para fazer o monitoramento e a formação de um banco de dados para realização de analises da variação de trajetória (analise 1). Posteriormente verificou-se a possibilidade de enriquecimento do projeto através da complementação da infraestrutura, com a montagem de um arranjo experimental para simulação de balanço hídrico e verificação do desempenho hidrológico dos telhados já implementados (analise 2). Por fim, percebeu-se a necessidade de associação dos desempenhos térmicos e hidrológicos, através dos dados já obtidos, e verificação a interferência da precipitação sobre a temperatura. A Figura 8 demonstra as etapas percorridas e o grupo de informações necessárias para cada analise realizada.

Figura 8 – Fluxograma das ações e etapas/análises da pesquisa.



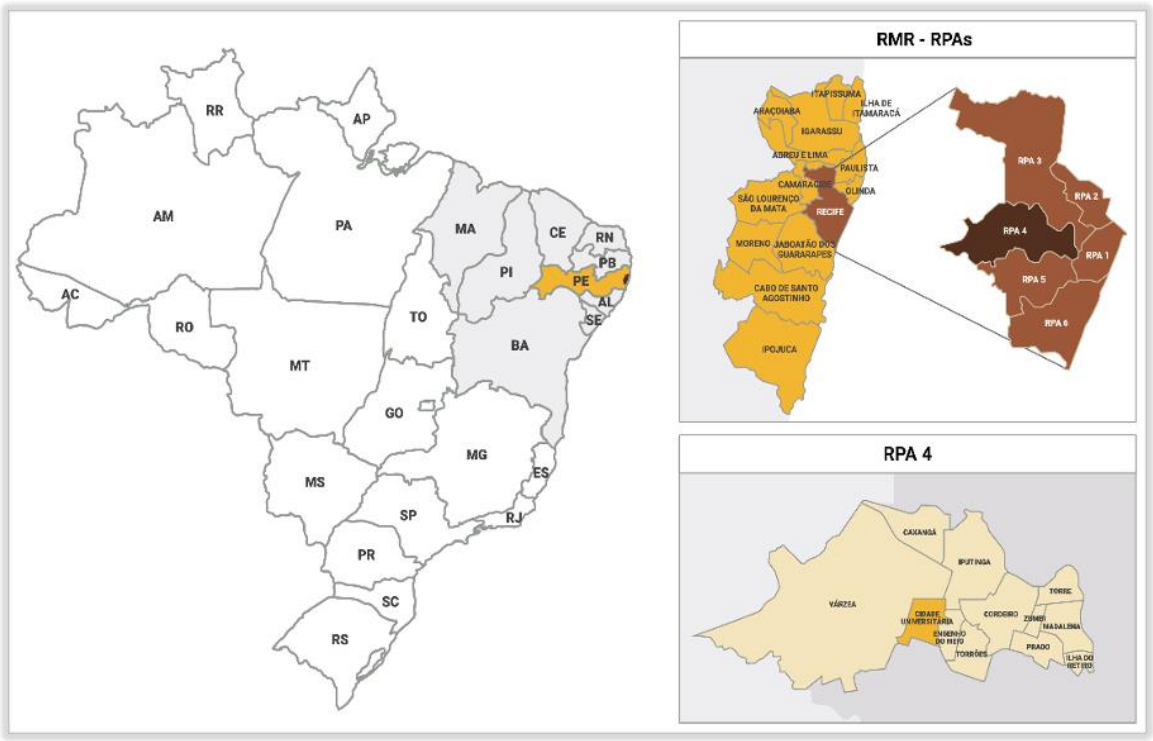
Legenda: UETER = Unidade Experimental de Telhados Ecológicos no Recife | CT = Célula-Teste | INMET = instituto Nacional de Meteorologia

Fonte: Autora (2022).

3.1 Caracterização do local da pesquisa

O estudo foi realizado no *campus* Joaquim Amazonas da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), localizado no bairro da Cidade Universitária, cidade do Recife, estado de Pernambuco. A Cidade Universitária integra a 4ª Região Político Administrativa do Recife (RPA-4), da Região Metropolitana do Recife (RMR), a Oeste da cidade, que é formada por 12 bairros (Figura 9) e limita-se com os bairros do Engenho do Meio, Iputinga, Várzea e Curado. Como o nome indica, o bairro surgiu em torno do *campus* da UFPE, cuja construção teve início em 1948.

Figura 9 – Localização da área de estudo.



Fonte: Autora (2018).

Segundo dados do censo demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Cidade Universitária é um dos bairros menos populosos do Recife com apenas 818 habitantes. O bairro ocupa uma área de 162 hectares e, além da estrutura da UFPE, abriga o prédio do Instituto Aggeu Magalhães (IAM), unidade da Fundação Osvaldo Cruz em Pernambuco e o prédio da extinta Sudene – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste, além de uma pequena comunidade de 222 domicílios (IBGE, 2010).

O local está inserido numa zona de clima tropical úmido, com baixas amplitudes térmicas e precipitações abundantes ao longo do ano. As precipitações acontecem sob a forma de chuvas, que podem vir acompanhadas de raios e trovoadas e serem de forte intensidade. De

acordo com dados da série histórica de 1960 a 1990 (Tabelas 1A e 1B) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o índice pluviométrico acumulado anual, considerando os valores médios mensais, é superior a 2.400 mm, sendo os maiores valores mensais concentrados entre março e julho, e o mês de julho o de maior precipitação. A temperatura média anual é de 25,5 °C (máxima mensal de 30,2°C e mínima mensal de 20,6°C), o tempo médio anual de insolação é de 2.550 horas/ano, com umidade relativa do ar de 79,8% (média anual).

Tabela 1A – Dados climatológicos mensais da série histórica (1960 a 1990), para Recife-PE.

Variável / Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Temperatura máxima absoluta (ºC)	34,70	34,30	35,10	33,50	33,00	31,90
Temperatura máxima média (ºC)	30,20	30,20	30,00	29,70	28,90	27,90
Temperatura média (ºC)	26,50	26,50	26,40	25,90	25,20	24,50
Temperatura mínima média (ºC)	22,40	22,60	22,70	22,60	21,90	21,60
Temperatura mínima absoluta (ºC)	16,80	17,80	17,90	17,10	16,90	17,10
Precipitação (mm)	108,20	148,20	256,90	337,60	318,50	377,90
Dias com precipitação (≥ 1mm)	10,00	11,00	16,00	18,00	20,00	21,00
Umidade relativa (%)	73,00	77,00	80,00	84,00	85,00	85,00
Horas de sol (h)	246,30	210,80	203,90	185,20	186,30	168,30
Variável / Mês	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Out**	**Nov**	**Dez**
Temperatura máxima absoluta (ºC)	33,10	32,20	32,70	33,10	32,40	34,50
Temperatura máxima média (ºC)	27,30	27,50	28,10	29,00	30,10	30,20
Temperatura média (ºC)	23,90	23,90	24,60	25,50	26,10	26,40
Temperatura mínima média (ºC)	21,10	20,60	20,70	21,40	21,90	22,20
Temperatura mínima absoluta (ºC)	16,00	15,00	15,00	16,00	16,70	16,40
Precipitação (mm)	388,10	204,80	122,00	63,00	35,70	56,80
Dias com precipitação (≥ 1mm)	22,00	17,00	13,00	9,00	6,00	8,00
Umidade relativa (%)	85,00	85,00	78,00	76,00	74,00	75,00
Horas de sol (h)	157,60	207,10	216,60	247,30	265,80	255,20

Observação: Estação Curado – código 82900.
Fonte: Adaptado de INMET (2019).

Tabela 1B – Dados climatológicos anuais da série histórica (1960 a 1990), para Recife-PE.

Variável / Mês	Ano	Ano (acumulado)
Temperatura máxima absoluta (ºC)	33,38	
Temperatura máxima média (ºC)	29,09	
Temperatura média (ºC)	25,45	
Temperatura mínima média (ºC)	21,81	
Temperatura mínima absoluta (ºC)	16,56	
Precipitação (mm)	201,48	2.417,60
Dias com precipitação (≥ 1mm)	14,25	171,00
Umidade relativa (%)	79,75	
Horas de sol (h)	212,53	2.555,70

Observação: Estação Curado – código 82900.
Fonte: Adaptado de INMET (2019).

O *campus* da UFPE possui a nascente do Riacho do Cavouco que é um afluente do rio Capibaribe, principal rio de Pernambuco. O riacho possui uma extensão de 6.000 m e largura variável de 2 a 15 m e, no *campus*, percorre um trecho que vai do Centro de Tecnologia e Geociências até o Hospital das Clínicas, recebendo um aporte de carga poluidora de efluentes das próprias edificações. Com um relevo praticamente plano e com altitude média de 16 m acima do nível do mar, o *campus* da UFPE abriga a maior concentração urbana de baobás (árvore considerada o maior colosso vegetal do mundo) do Brasil. São 20 exemplares distribuídos em ruas, avenidas e pátios internos de prédios da UFPE. Além destes, a região é cercada pelas Unidades de Conservação de Mata Atlântica da Várzea e do Curado. A vegetação do *campus* é composta por gramas, forrações, herbáceas, arbustos, árvores, palmeiras e algumas espécies nativas da região (Plano Diretor UFPE, 2015).

No que se refere ao uso e ocupação do solo, o terreno de 1.615.850 m^2 do *campus* da UFPE tem área construída de aproximadamente 384.540 m^2, apresenta características de um grande parque, com áreas verdes e proporcionando lazer aos estudantes, funcionários e a população do entorno. Os edifícios existentes no interior da área do *campus* possuem, na grande maioria, tipologia plana (térreo e pavimento superior), com alguns exemplares verticais, como o Centro de Tecnologia e Geociências (CTG), com 6 andares e o Centro de Filosofia e Ciências Humanas (CFCH), com 15 andares. Apesar da diversidade de tipos de telhados, nenhum edifício do *campus* possui telhado ecológico.

3.2 Execução da Unidade Experimental de Telhados Ecológicos (UETER)

Para este estudo foram construídos cinco protótipos, com laje impermeabilizada (chamada de Célula-Teste), que possibilita a sobreposição de camadas, para investigação do desempenho da estrutura. Os cinco protótipos compõem a UETER (Unidade Experimental de Telhados Ecológicos do *campus* Recife), que está localizada no terreno do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG), ao lado do Laboratório de Hidráulica, conforme esquematizado na Figura 10. O terreno já possuía cinco bases existentes (Figura 11), construídas no âmbito de outro projeto, que foram recuperadas e aproveitadas como bases para os protótipos implantados nesta pesquisa. De acordo com orientação solar, o sol nasce na lateral direita da célula-teste 01 e se põe na lateral esquerda da célula-teste 05.

Figura 10 – Localização da UETER.

Legenda: Localização da Unidade Experimental de Telhados Ecológicos do *campus* Recife (UETER).

Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

Figura 11 – Bases existentes aproveitadas para construção dos protótipos.

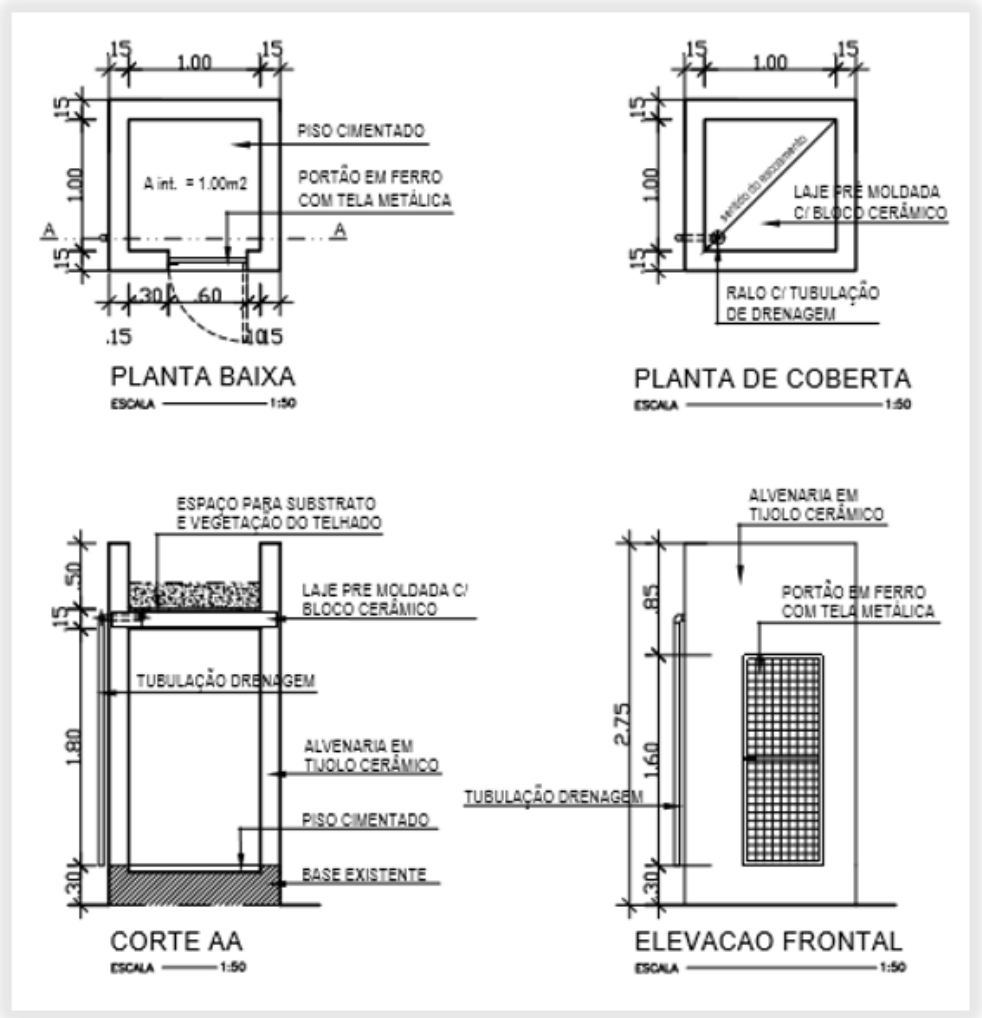
Fonte: Autora (2018).

3.2.1 Descrição do sistema construtivo

Os protótipos foram projetados para possuir 1,00 m^2 de área útil de piso e de coberta, portanto, considerando as alvenarias de 0,15 m, suas medidas externas totalizaram 1,30 m de comprimento x 1,30 m de largura. A altura totalizou 2,75 m, incluindo 0,30 m de base, 1,80 m de pé direito, 0,15 m de laje e 0,50 m de platibanda, conforme Figura 12. Em função das bases

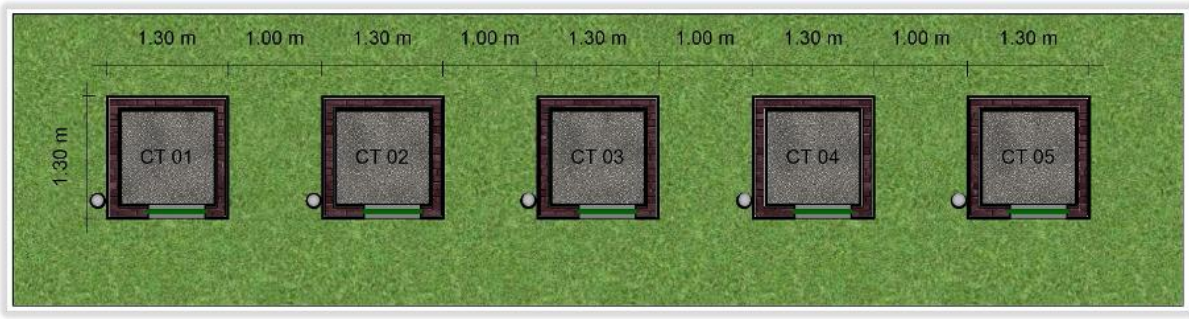
já existentes, as construções ficaram distanciadas aproximadamente 1,00 m entre si (Figura 13), visando permitir a circulação de ar entre os protótipos, evitando o compartilhamento de paredes, e, consequentemente, a transferência de calor. Sobre as bases foram, então, construídos os protótipos (Figuras 14 e 15) de estudo.

Figura 12 – Projeto dos protótipos.



Fonte: Autora (2017).

Figura 13 – Arranjo das Células-Teste que compõem a UETER.



*Dimensões em metros. Legenda: CT = Célula-Teste. Fonte: Autora (2018).

Figura 14 – Etapas da construção do primeiro protótipo.

(a) Execução da alvenaria.

(b)Execução da laje e chapisco.

(b) Locação do primeiro protótipo.

(c) Acabamento.

Fonte: Autora (2017).

Figura 15 – Etapas da construção dos demais protótipos.
(a) Execução das alvenarias e do chapisco.

(b) Protótipos finalizados.

Fonte: Autora (2017).

O sistema construtivo de cada protótipo foi escolhido em função de ser uma técnica bastante difundida na região e consiste basicamente em alvenaria de tijolos cerâmicos e laje pré-moldada com blocos cerâmicos. Foi utilizada uma esquadria na fachada (portão) para se ter a garantia de ventilação e acesso ao interior do ambiente. Os serviços realizados durante a execução dos protótipos foram: capinação do terreno, recuperação das bases existentes, elevação das alvenarias com colocação das vergas dos portões, execução das lajes pré-moldadas com bloco cerâmico, execução das platibandas, instalação dos ralos e das tubulações de drenagem, chapisco, acabamentos (emboço/reboco, contrapiso, capeamento da laje com impermeabilizante na argamassa, pintura com cal), instalação dos portões, reforço na impermeabilização da laje e teste de estanqueidade.

As construções foram iniciadas em novembro de 2016, quando foi construída uma primeira unidade (Figura 14) visando definir o quantitativo e o custo precisos de material e mão de obra para a construção dos demais protótipos. Em agosto de 2017 foram realizadas as obras de construção dos demais protótipos, seguindo o mesmo padrão do primeiro (Figura 15a). Em seguida, foram instalados portões telados para ventilar o ambiente interno e assegurar os equipamentos de medição de temperatura e umidade dos ambientes. Os portões receberam uma placa de aço na parte superior para minimizar a visibilidade dos equipamentos (Figura 15b).

3.2.2 Execução da impermeabilização e do teste de estanqueidade

Após a execução de toda estrutura, foi dada atenção especial à impermeabilização das cobertas para eliminar qualquer possibilidade de infiltração que pudesse danificar a coberta e interferir nos resultados da umidade do ambiente interno. Portanto, além da argamassa de revestimento da laje ter recebido o aditivo líquido Vedacit (impermeabilizante para concretos e argamassas, que age por hidrofugação do sistema capilar e permite a respiração dos materiais), posteriormente foram aplicadas 4 demãos de impermeabilizante Sika Top-100 (impermeabilizante, bicomponente, à base de cimento, areias selecionadas e resina acrílica para uso em concreto, argamassa ou alvenaria com excelente aderência e impermeabilidade). As demãos foram executadas em sentido diagonal, alternados perpendicularmente, conforme recomendação do fabricante e também abrangeu uma faixa de aproximadamente 20 cm da platibanda. (Figura 16).

Para verificar a eficácia da impermeabilização, foi realizado teste de estanqueidade, conforme a NBR 15.575-3 (ABNT, 2013), que dispõe sobre o desempenho de edificações habitacionais e estabelece que, a face inferior da laje de coberta e os encontros com as paredes e pisos adjacentes devem permanecer secos quando submetidos à lâmina d'água de no mínimo 10 mm, durante 72 horas. De acordo com o estabelecido pela Norma, as descidas dos ralos foram tamponadas e foi colocado uma lâmina de água de aproximadamente 15 cm em cada laje (Figura 17), que foi mantida por 72 horas. Ao final das 72 horas foi constatada a inexistência de vazamentos, tornando a laje apta a receber o material de cobertura que compreende as demais camadas inerentes aos telhados ecológicos.

Figura 16 – Etapas de execução da impermeabilização da coberta.

(a) Aplicação do impermeabilizante na laje.

(b) Conclusão da etapa com as lajes impermeabilizadas.

(c) Aplicação do impermeabilizante na platibanda.

Fonte: Autora (2017).

Figura 17 – Etapas da execução do teste de estanqueidade.

(a) Tamponamento da descida.

(b) Enchimento da laje com água.

(c) Monitoramento da altura da lâmina d'água.

Fonte: Autora (2017).

3.2.3 Seleção dos materiais e tipos de coberturas

Nesta etapa, foram definidos os materiais construtivos e as espécies vegetais empregados na pesquisa. Considerando a disponibilidade das cinco Células-Teste (Figura 5), e a disposição das mesmas foram definidas as coberturas de cada uma delas. No que se refere à disposição, logo no início da construção, observou-se a incidência de sombra, devido à projeção da edificação vizinha e da vegetação do entorno, em duas Células-Teste da UETER, CT 01 e CT 02 da Figura 13, durante um período do dia (Figura 18).

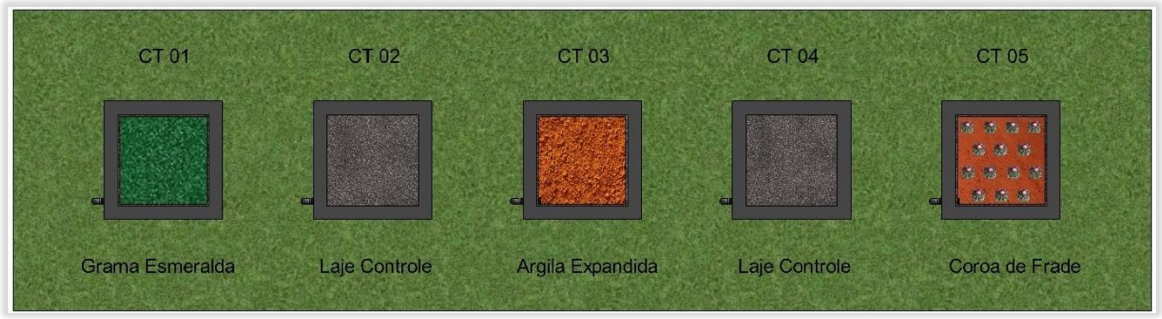
Figura 18 – Incidência de sombra nas Células-Teste.

Fonte: Autora (2017).

Diante desse cenário, optou-se por utilizar apenas uma das duas Células-Teste que está na sombra, em parte do dia, como um tipo de telhado verde (CT 01) e a outra Célula-Teste, como um telhado de referência (laje controle) com apenas a laje (CT 02). Considerando que para investigação do desempenho das coberturas ecológicas, é fundamental que o telhado de referência esteja exposto às mesmas condições que as coberturas ecológicas, optou-se por empregar uma das três Células-Teste restantes (sem ocorrência de sombra) como telhado de referência e nas outras duas Células-Teste (também sem ocorrência de sombra) como telhados ecológicos, em que se optou pela implantação de um telhado verde e de um telhado marrom.

Como um dos objetivos deste estudo é avaliar o desempenho térmico dos telhados ecológicos nas células- testes, antes da colocação das coberturas, foram realizados testes iniciais dos medidores de temperatura e umidade interna, no interior do protótipos, visando identificar a interferência da sombra (já detectada) sobre os valores medidos com esses instrumentos. Essa ação subsidiou a distribuição das coberturas investigadas dentre as Células-Teste construídas (Figura 19).

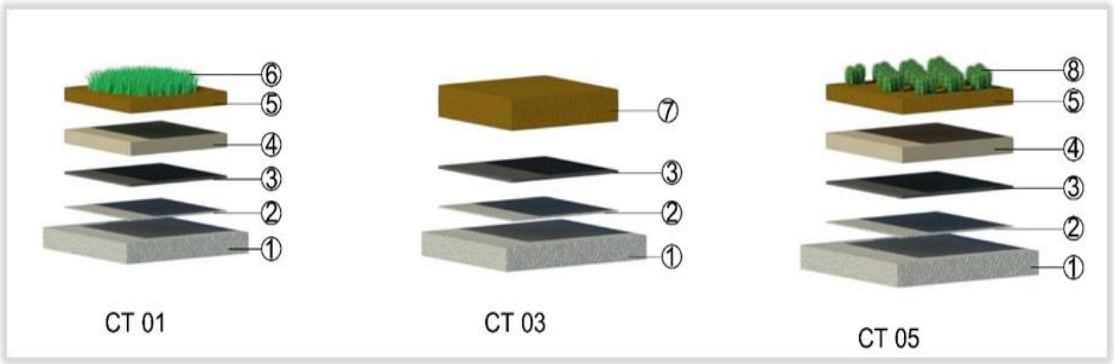
Figura 19 – Planta de distribuição das coberturas na UETER.



Legenda: CT = Célula-Teste. Fonte: Autora (2018).

Para seleção das vegetações a serem utilizadas nos dois telhados verdes, optou-se por espécies já investigadas pelo Grupo de Pesquisa, a grama Esmeralda e o cacto Coroa-de-Frade. No caso do telhado marrom, o material selecionado para cobertura foi a argila expandida. As Células-Teste que receberam telhados ecológicos, também receberam manta geotêxtil e as que receberam cobertura vegetal (grama Esmeralda e cacto Coroa-de-Frade) além da manta, receberam substrato de areia e terra vegetal (Figura 20).

Figura 20 – Esquema das camadas das coberturas das Células-Teste CT 01, CT 03 e CT 05.



Legenda: CT = Célula-Teste | 1 = laje pré-moldada | 2 = impermeabilização | 3 = manta geotêxtil | 4 = areia | 5 = terra vegetal | 6 = grama Esmeralda | 7 = argila expandida | 8 = cacto Coroa-de-Frade.
Fonte: Autora (2018).

3.2.3.1 Manta geotêxtil

Após conferida a eficácia da impermeabilização, foi instalado o geocomposto para drenagem MacDrain® J (Figura 21) nas Células-Teste que receberam os telhados ecológicos (CT 01, CT 03 e CT 05). De acordo com o fabricante, o material é formado pela associação de um filtro geotêxtil a um núcleo drenante de pequena espessura, onde sua capacidade de vazão é sensivelmente reduzida para favorecer a manutenção da umidade natural do solo, sem

ocasionar danos as raízes das plantas. Portanto, este material foi selecionado por realizar as funções de filtragem (impedindo o carreamento de partículas do substrato) e drenagem (drenando as águas infiltradas para a saída do sistema), e devido ao peso reduzido, evitando sobrecarga na estrutura.

O material adquirido no âmbito de um projeto anterior e, devido às dimensões das peças disponíveis, foi necessário realizar alguns cortes e emendas para acomodá-lo em toda a área da laje (1,00 m x 1,00 m) e da platibanda das três unidades que receberam substrato e vegetação (Figura 21a). As partes que foram emendadas, mantiveram uma faixa de aproximadamente 0,10 m de largura, apenas da camada filtrante, para que fossem coladas em sobreposição. A colagem das partes da manta, entre si, foi realizada com cola quente de silicone, aplicada em pistolas. Já a colagem da manta na laje e na platibanda foi realizada com cola de contato (Figura 21b). Foi dada atenção especial aos encontros das lajes com as platibandas e entre platibandas, para evitar pontos vulneráveis à infiltração. Estes encontros também receberam sobreposição da parte filtrante (Figura 21c).

Figura 21 – Instalação da manta geotêxtil MacDrain® J.

(a) Colagem do material. (b) Colagem na laje/platibanda. (c) Acabamento dos cantos.

Fonte: Autora (2018).

3.2.3.2 Argila expandida

A Célula-Teste (CT 03) recebeu uma camada de 20 cm de argila expandida tipo 3222 da Cinexpan (Figura 22). A altura da camada foi definida em função da altura final das demais composições de telhado verde (substrato e vegetação) e da especificação do fabricante para a finalidade pretendida. A argila expandida é um material cerâmico leve com um núcleo alveolar produzido pela queima de argila natural a temperaturas de 1100 - 1200°C, possui formato

arredondado, densidade média de 350 kg/m³, e variadas granulometrias que definem os diversos tipos de aplicação. De acordo com o fabricante, quando utilizada como substrato para plantas, apresenta vantagens específicas em relação aos substratos convencionais, tais como: custos reduzidos com a plantação, mais eficiência na produção, resistência ao ataque químico e agrotóxicos, menor consumo de água, melhor aproveitamento do espaço físico e a possibilidade de realizar plantios em solos não produtivos. Apesar das inúmeras vantagens descritas, salienta-se que para esse estudo, a argila expandida foi selecionada por apresentar peso leve, elevada permeabilidade e durabilidade, além de excelentes propriedades de isolamento térmico.

Figura 22 – Aplicação da argila expandida Cinexpan.
(a) Material ensacado. (b) Material aplicado sobre a laje da CT.

Fonte: Autora (2018).

3.2.3.3 Substrato convencional

As espécies vegetais escolhidas foram plantadas sobre substrato convencional constituído, de baixo para cima, Figura 23, por uma camada com altura de 0,10 m de areia fina (granulometria entre 0,06 mm e 0,20 mm) e outra camada com altura de 0,10 m de terra vegetal (adicionada de pó de carvão, calcário dolomítico, pó de côco e adubo orgânico), indicadas pelo fabricante para o plantio de hortaliças, de grama e de plantas ornamentais.

Figura 23 – Colocação do substrato.

(a) Camada de areia. (b) Terra vegetal ensacada. (c) Substrato aplicado.

Fonte: Autora (2018).

3.2.3.4 Vegetação (grama Esmeralda e cacto Coroa-de-Frade)

Na escolha da vegetação optou-se por trabalhar com espécies de pequeno porte para telhados extensivos. Para seleção das espécies os principais critérios considerados foram: resistência e adaptação ao clima local (períodos com altas temperaturas e outros com chuvas abundantes), capacidade de absorção de água e retardo do escoamento (balanço hídrico) e facilidade de manutenção. Portanto, apesar de não serem espécies nativas da região, foram plantadas a grama Esmeralda (*Zoysia Japônica*) na CT 01 e o cacto Coroa-de-Frade (*Melocactus Zehntneri*) na CT 05 por atenderem aos critérios estabelecidos.

A grama Esmeralda (*Zoysia Japônica*) é uma espécie de gramínea pertencente à família *Poaceae,* originária do Japão, cuja altura varia de 10 a 15 cm, sendo suas folhas estreitas e pequenas, dispostas em hastes curtas e densas, formando um perfeito tapete quando ceifada com frequência (LORENZI e SOUZA, 2001 *apud* GEROLINETO, 2008). De acordo com Oliveira *et al.* (2018), possui ampla adaptação às condições brasileiras, podendo ser usada de Norte a Sul, em regiões litorâneas ou nos Planaltos. Os autores destacaram que, devido à boa capacidade de resistência ao pisoteio foi, durante muitos anos, a espécie utilizada nos principais gramados de futebol do Brasil. Além disso, adapta-se em diferentes tipos de solo, desde arenosos a argilosos, exceto nos solos com baixa capacidade de drenagem, desenvolvendo-se bem em áreas de plena insolação, tolerando um mínimo de sombreamento. O plantio da grama Esmeralda foi realizado através do assentamento de tapetes pré-fabricados medindo aproximadamente 62,5 x 40,0 cm, tendo sido necessário utilizar quatro unidades para cobrir a área de 1 m^2 (Figura 24).

Figura 24 – Plantio da grama Esmeralda.
(a) Tapetes da grama Esmeralda. (b) Grama Esmeralda plantada.

Fonte: Autora (2018).

Além de atender aos critérios pré-estabelecidos já descritos, o cacto Coroa-de-Frade foi selecionado para aprofundar os estudos já realizados por outros membros deste Grupo de Pesquisa (FARIAS, 2012; LIMA, 2013; SILVA, 2017), na Unidade Experimental de Telhados Verdes (UETV), na cidade de Caruaru - PE, com a intenção de avaliar seu desempenho em clima tropical úmido. O cacto Coroa-de-Frade da espécie *Melocactus Zehntneri*, pertence à subfamília *Cactoideae* e é encontrado, como vegetação nativa em algumas cidades do Nordeste do Brasil, além do estado do Tocantins. Ocorre em vários tipos de vegetação, como na caatinga, campos rochosos, floresta decídua, vegetação em solo arenoso e dunas costeiras. No bioma caatinga, possui importante papel como alimento alternativo para o sertanejo, fauna local e ruminantes em períodos de secas prolongadas. As cactáceas do gênero *Melocactus* apresentam cladódios suculentos, com costelas verticais onde se localizam as aréolas e os espinhos. Na fase adulta, há o desenvolvimento de uma estrutura discoide no ápice da planta, chamada cefálio, responsável pela proteção de flores e frutos em desenvolvimento (EMBRAPA, 2018).

Para esse estudo, foi realizado o plantio da Coroa-de-Frade da espécie *Melocactus Zehntneri*, disponibilizando a área de 0,0625m^2 para cada muda, sendo necessário intercalar as mudas visando o melhor desenvolvimento das raízes. Dessa forma, numa área de 1,00 m^2 foram utilizadas 14 mudas do cacto Coroa-de-Frade (Figura 25).

Figura 25 – Plantio do cacto Coroa-de-Frade.
(a) Mudas a serem plantadas. (b) Mudas plantadas na Célula-Teste.

Fonte: Autora (2018).

3.2.3.5 Manutenção

Com relação à manutenção das Células-Teste (plantas, infraestrutura e acesso) foram realizadas várias ações durante a pesquisa. Para isso, foi estabelecido um cronograma de manutenção da vegetação, que contemplava a irrigação, a limpeza de folhagens secas das árvores do entorno e das espécies invasoras na Célula-Teste com cacto Coroa-de-Frade (Figura 26a). Com relação à irrigação, a grama Esmeralda foi irrigada diariamente no início da manhã ou no final da tarde, exceto nos finais de semana, feriados e dias de chuva, e, mesmo assim, nos meses com temperaturas mais altas (de dezembro de 2018 a março de 2019), a mesma desidratou (Figura 26b). O cacto Coroa-de-Frade foi irrigado semanalmente e não teve problemas com as altas temperaturas. A irrigação das Células-Teste era realizada manualmente, sendo a água transportada em baldes. Também foi realizada a capinação do terreno por diversas vezes (pois a vegetação em volta dos protótipos crescia muito rápido e abrigava algumas espécies de repteis e roedores), bem como a limpeza interna das unidades.

Figura 26 – Manutenção das Células-Teste.
(a) Espécies invasoras no cacto Coroa-de-Frade. (b) Grama Esmeralda desidratada

Fonte: Autora (2018).

3.3 Monitoramento da temperatura e umidade interna

O monitoramento da temperatura e da umidade no interior das Células-Teste foi realizado através de medidores automáticos, cujos modelos foram escolhidos em função de já terem sido utilizados em estudos anteriores deste Grupo de Pesquisa

3.3.1 Medidores

Foram utilizadas 9 (nove) unidades do modelo iMINI (*datallogger* de temperatura) nas paredes (Figura 27a) e 3 (três) unidades do modelo IP-747RH (medidor de temperatura e umidade) nos tetos (Figura 27b). Além dos equipamentos já disponíveis, foram adquiridos mais 6 (seis) medidores iMINI e 2 (dois) medidores IP-747RH, totalizando 20 (vinte) unidades de medidores. Os medidores já disponíveis foram enviados para nova calibração, sendo novamente aprovados para uso, e os novos medidores já vieram devidamente calibrados.

Figura 27– Medidores utilizados no interior das Células-Teste.
(a) iMINI. (b) IP-747RH.

Fonte: Autora (2018).

O iMINI é um equipamento projetado para armazenamento de dados de temperatura, e utilizado em aplicações onde requer monitoramento de um ambiente sensível à temperatura (indústria médica, alimentícia, estudos científicos, geofísicos, transporte, etc.) num determinado período de tempo. Possibilita a visualização em seu mostrador digital de cristal

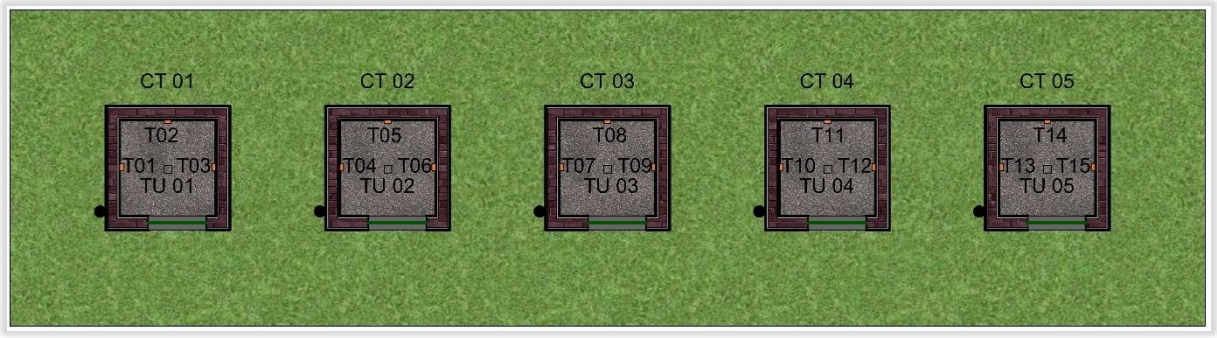
líquido: da temperatura ambiente instantânea, da temperatura máxima, da temperatura mínima e da média das temperaturas. A faixa de leitura do iMINI compreende os limites de temperatura de -40°C até +80°C, com diversas possibilidades de programação, possui memória de 8K resultando em capacidade de armazenamento total de até 7.806 medições por ciclo de programação, com intervalos a partir de 5 segundos até 17 horas e com precisão de ±0,3ºC a ±0,5ºC. O *software* utilizado pelo iMINI é chamado de *Console Plus*, e possibilita o armazenamento de todas as leituras de temperatura de forma segura e criptografada, sendo que essas podem ser descarregadas por meio de conexão USB, quando podem ser visualizadas em forma de gráficos, tabelas, dados estatísticos preliminares dos resultados e histograma (IMPAC, 2019).

O medidor IP-747RH é um termohigrógrafo eletrônico, pois permite um completo registro das variações de umidade e de temperatura, e é utilizado em aplicações onde requer monitoramento de um ambiente sensível à temperatura e à umidade. O IP-747RH possui um microprocessador conectado a um mostrador de cristal líquido multifuncional, permitindo selecionar e visualizar os dados de umidade e de temperatura, bem como os valores máximos e mínimos de ambos (umidade e temperatura), e as informações sobre data, hora e número de medições já registradas na memória. O IP-747RH é destinado à medição de valores de umidade relativa do ar numa faixa de 0% a 100% e valores de temperatura num intervalo de -40ºC a 70ºC, possui dois modos de programação e capacidade de armazenar até 32.700 medições, com intervalos de medição que podem variar de 1 segundo até 24 horas. O coletor de dados pode ser programado para operar no modo circular (quando a memória está cheia o equipamento descarta as medidas mais antigas para gravação de um novo registro) ou no modo coleta simples (registro para com o uso total da memória). A precisão na medição da umidade varia de ± 3 a 5%, e da temperatura de ±1 a 2ºC. Também possui um *software* que recebe os dados via cabo USB e visualiza em forma de gráficos ou planilhas, que podem ser impressos ou exportados no formato de planilhas eletrônicas (IMPAC, 2019).

3.3.2 Descrição da instalação dos medidores

Os medidores de temperatura e de umidade foram instalados no interior (teto e três das quatro paredes) de cada Célula-Teste (Figura 28), sendo: 5 (cinco) medidores IP-747RH (temperatura e umidade) nos tetos e 15 (quinze) medidores iMINI (temperatura) nas paredes.

Figura 28 – Planta de locação dos equipamentos.



Legenda: CT = Célula-Teste | T = medidor de temperatura | TU = medidor de temperatura e umidade.
Fonte: Autora (2018).

A altura de instalação dos medidores iMINI nas paredes seguiu as orientações da ISO/DIS 7726/98, que define padrões e orienta sobre as medições dos parâmetros físicos de ambientes térmicos, tanto para ambientes moderados com análise de conforto térmico (classe C), como ambientes extremos com análise de *stress* térmico (classe S). Essas medições podem ser realizadas em ambientes homogêneos (variações menores que 5% nos valores das variáveis físicas no espaço ao redor da pessoa) ou heterogêneos (variações superiores a 5% nos valores das variáveis físicas no espaço ao redor da pessoa). Portanto, considerando que os medidores devem estar posicionados nas alturas onde normalmente se executam as atividades no ambiente, a altura utilizada foi a de 1,10 m, que considera o nível da cabeça de uma pessoa sentada e o nível do abdômen de uma pessoa em pé (Tabela 2).

Tabela 2 - Localização normatizada dos sensores de temperatura.

Localização dos sensores	Coeficiente ponderado para cálculos das variáveis				Alturas recomendadas (m)	
	Ambientes homogêneos		Ambientes heterogêneos			
	Classe C	Classe S	Classe C	Classe S	Sentado	Em pé
Nível da cabeça			1	1	1,1	1,7
Nível do abdômen	1	1	1	2	0,6	1,1
Nível do tornozelo			1	1	0,1	0,1

Fonte: Adaptado da ISO/DIS 7726/98.

Antes da instalação, os medidores foram devidamente identificados para não haver troca de informações no momento da retirada e da recolocação para descarregamento dos dados (Figura 29a). A fixação dos medidores foi realizada com o emprego de suportes (IP-747RH) e de ganchos (iMINI) (Figura 29b).

Figura 29 – Locação dos medidores no interior dos protótipos.
(a) Identificação dos medidores. (b) Posição dos medidores nas paredes e teto.

Fonte: Autora (2018).

Foi utilizada caderneta de campo para realizar as anotações referentes ao manuseio dos medidores, informando datas e horários de retirada e recolocação, eventuais falhas e substituições dos equipamentos (quando necessário) e demais ocorrências. Mesmo com capacidade de armazenamento superior ao necessário, os dados foram descarregados mensalmente, para não correr o risco, de uma eventual falha do equipamento, e consequente perdas significativas de medições.

3.3.3 Análise Estatística

Os valores de temperatura e de umidade foram registrados a cada 30 minutos ao longo de um ano (de agosto de 2018 a julho de 2019) para avaliar a interferência de cada tipologia de cobertura no conforto térmico do ambiente interno neste período de tempo. Com a programação estabelecida, a previsão de obtenção de dados foi de 1.200 medições diárias e 438.000 medições anuais. Além dessas, foram acrescentadas as medições de temperatura e umidade externa, do banco de dados do INMET, que são medidas a cada uma hora, totalizando mais 17.520 medições ao longo do período. Isso gerou um banco de dados com aproximadamente 455.520 medições e inúmeras possibilidades de análises.

Para processamento dos dados foi necessário, primeiramente, a compilação dos mesmos em um único arquivo de planilha eletrônica, pois os dados eram descarregados em fichários individuais de cada equipamento utilizado. Nessa etapa também foram realizados os preenchimentos de falhas, e como os meses de agosto e de setembro, período de acomodação

dos equipamentos, existiram muitas falhas, optou-se em descartar esses meses das análises dos resultados. Diante da considerável quantidade de dados, conforme exposto, para realizar a análise dos mesmos foi utilizado um *software* de estatística. Assim sendo, optou-se pelo uso do *software* Stata versão 14, que é um programa de estatística empregado, geralmente, para análise econométrica.

Uma vez coletados os dados internos das Células-Teste, a etapa seguinte foi inserir os mesmos em planilha eletrônica no Stata. Para o mesmo período foram organizados os dados das variáveis externas, disponibilizadas pelo INMET, que tem registros em intervalos de uma hora. Assim sendo, visando o pareamento dos dados dos instrumentos utilizados com as informações constantes no banco do INMET, foi necessário adequar os dados coletados nesta pesquisa em intervalos de uma hora. Nessa adequação, para mínima perda de informações, foram calculadas as médias aritméticas dos dados registrados a cada hora. Foi aplicado um teste *t de Student* com as amostras pareadas, sendo as unidades de pareamento: dia e horário. Também houve a necessidade do cálculo das variáveis utilizadas como comparação entre as Células-Teste:

- Temperatura média das paredes (TMP): média aritmética das medições de temperatura dos 3 medidores instalados nas paredes para um determinado intervalo de tempo (definido de acordo com as estratificações das análises);
- Temperatura média do ambiente (TMA): média aritmética das medições de temperatura dos 3 sensores instalados nas paredes e do sensor instalado no teto para um determinado intervalo de tempo (definido de acordo com as estratificações das análises);
- Temperatura média do teto (TMT): média aritmética das medições de temperatura do sensor instalado no teto para um determinado intervalo de tempo (definido de acordo com as estratificações das análises);
- Umidade relativa média do ar (URM): média aritmética das medições de umidade do sensor instalado no teto para um determinado intervalo de tempo (definido de acordo com as estratificações das análises).

Com o banco de dados formatado no Stata, foi realizada a análise da variação da temperatura e da umidade das Células-Teste, em que, inicialmente, foram calculadas as médias diárias de acordo com a estratificação adotada, e a hipótese de normalidade foi testada pelo teste de *Komogorov-Smirnov*. Observou-se que, em todas as medidas, nos diferentes estratos, a distribuição dos dados foi normal.

Na comparação das médias das variáveis entre as Células-Teste, foi aplicada a análise de variância, tendo o *Bonferroni* como pós-teste. Também foi utilizado o modelo GEE (*General Estimating Equation*), adequado para desenhos de estudos longitudinais com medidas repetidas balanceadas (todas as Células-Teste têm medidas repetidas com os mesmos intervalos de tempo), para estimar o crescimento ou decréscimo médio da temperatura a cada hora, haja visto que em diferentes intervalos de hora há variações diferentes de aumento e redução da temperatura ao longo do dia, atendendo ao pressuposto de linearidade do modelo.

3.4 Monitoramento das variáveis climáticas externas

Em Pernambuco, o monitoramento do clima é realizado pela APAC (Agência Pernambucana de Águas e Clima) e por instituições parceiras, como: INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), ITEP (Instituto de Tecnologia de Pernambuco) e Defesa Civil. Normalmente a medição das variáveis é realizada a cada intervalo de uma hora e de acordo com os dados da Quadro 5.

Quadro 5 – Variáveis monitoradas no Estado de Pernambuco.

Parâmetro	Unidade	Intervalo			Outras informações
		Inst.	Máx.	Mín.	
Data	d/m/a	-	-	-	-
Hora	h	-	-	-	-
Temperaura	ºC	X	X	X	-
Umidade	%	X	X	X	-
Ponto de orvalho	ºC	X	X	X	-
Pressão	hPa	X	X	X	-
Velocidade do Vento	m/s	-	-	-	Também direção e rajadas.
Radiação	kJ/m²	-	-	-	-
Precipitação	Mm	-	-	-	-

Legenda: Inst. = instantâneo | Máx. = máximo | Mín. = mínimo. Fonte: Autora (2018).

A medição dessas variáveis é realizada por dois tipos de estação meteorológica: (I) Estação Meteorológica Convencional (EMC), composta de vários medidores isolados que registram continuamente os parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc), que são lidos e anotados por um observador a cada intervalo de tempo e este os envia a um centro coletor por um meio de comunicação qualquer; e (II) Estação Meteorológica Automática (EMA), composta de uma unidade de memória central (*datallogger*), ligada a vários medidores de parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc.), que integra os valores

observados minuto a minuto e os disponibiliza automaticamente a cada hora. Neste estudo, optou-se em utilizar os dados da estação meteorológica automática do INMET (Recife - A301), do período de julho de 2018 a julho de 2019, para fins de aquisição das variáveis climáticas e determinação das séries históricas necessárias (Figura 30).

Figura 30 – Estação Meteorológica Automática – INMET/Curado.

Fonte: INMET (2019).

A estação A301 está localizada no bairro do Curado (Latitude: -8.059280º e Longitude: -34.959239º), possui altitude de 11 m e funciona desde dezembro de 2004. Essa estação foi selecionada em função da proximidade com o local de estudo, menos de 2 km, e da disponibilidade das informações.

3.5 Realização do balanço hídrico

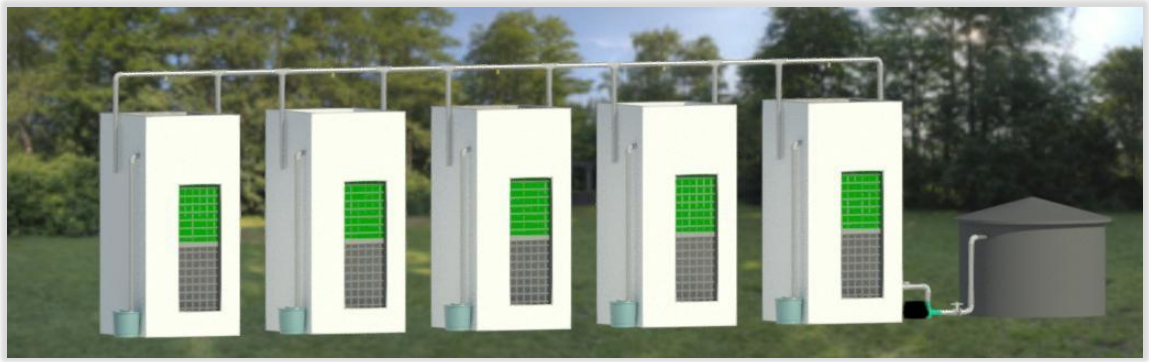
Para controle dos volumes de entrada e medição dos volumes de saída de água das Células-Teste foi projetado, confeccionado e implantado um arranjo experimental composto de um sistema hidráulico e equipamentos de controle e medição das variáveis. De forma análoga ao que acontece no âmbito de um balanço hídrico na escala da bacia hidrográfica, ao se considerar a cobertura da Célula-Teste como a superfície da bacia, os volumes de entrada correspondem aos volumes precipitados e os volumes de saída escoados das coberturas das Células-Teste correspondem aos volumes no exultório. A diferença entre essas duas quantidades corresponde ao volume armazenado no interior dos limites físicos existentes em ambos os casos, da bacia hidrográfica e da Célula-Teste.

3.5.1 Descrição do arranjo experimental

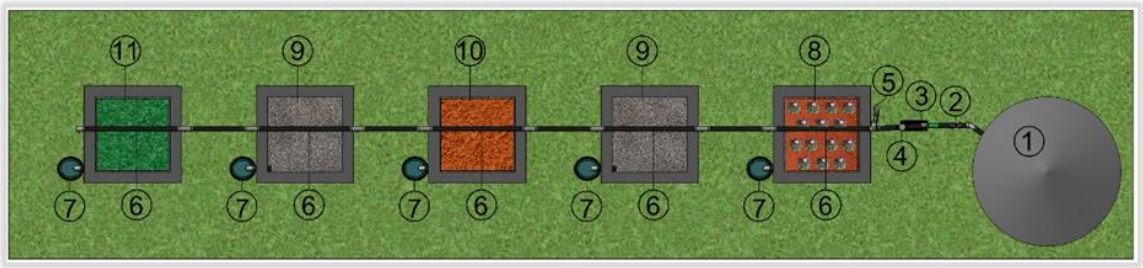
O sistema hidráulico começou a ser montado em abril de 2019 e é composto por um aspersor sobre o centro de cada uma das 5 (cinco) Células-Teste e os 5 (cinco) aspersores são interligados por uma tubulação de PVC de 25 m de comprimento. Para realização do experimento, foi utilizada água armazenada em um reservatório de 500 L, e equipamentos instalados na tubulação de entrada. A outra extremidade da tubulação de PVC foi tamponada para minimizar a perda de água no sistema. As descidas de drenagem dos topos das Células-Teste direcionaram a água para os reservatórios de coleta apoiados sobre o solo (Figura 31).

Figura 31 – Projeto do arranjo experimental de precipitação.

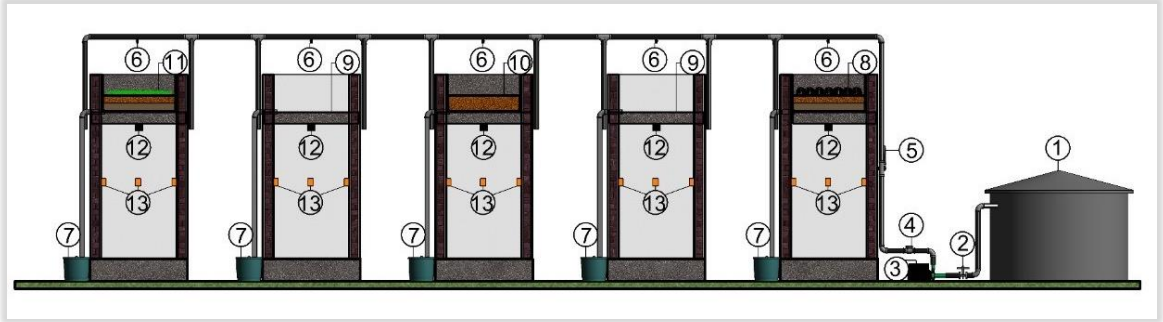
(a) Perspectiva.



(b) Vista superior.



(c) Corte esquemático.



Legenda: 1 = Reservatório de abastecimento | 2 = Registro de passagem | 3 = Bomba hidráulica | 4 = Hidrômetro | 5 = Manômetro | 6 = Aspersores | 7 = Reservatórios de coleta | 8 = Telhado verde com cacto Coroa-de-Frade | 9 = Lajes de controle | 10 = Telhado marrom com argila expandida | 11 = Telhado verde com grama Esmeralda | 12 = Medidores de temperatura e umidade (teto) | 13 = Medidores de temperatura (paredes). Fonte: Autora (2018).

Com a realização do experimento, as variáveis medidas e os respectivos equipamentos utilizados foram: nível do reservatório de abastecimento com régua, volume de entrada com hidrômetro, variação da pressão de entrada com manômetro, tempo de duração com cronômetro, tempo inicial e final de escoamento com cronômetro, e volume de escoamento com reservatório graduado. A intensidade da precipitação foi definida pela equação de chuvas intensas. Neste estudo, considerando o tempo reduzido entre a entrada e a saída de água do sistema, não foram considerados os efeitos da evapotranspiração e algumas variáveis obtidas foram aplicadas em cálculos para determinação de outras variáveis necessárias.

3.5.2 Montagem do sistema hidráulico

Para escolha da de forma lançamento da água sobre as coberturas das Células-Teste foram analisados alguns tipos de aspersores, de *sprinklers* e de bicos pulverizadores agrícolas disponíveis no mercado. Optou-se pelo uso do aspersor Sempre Verde 360º da Fabrimar, em função do custo mais acessível, da facilidade de compra e do tipo de aplicação. De acordo com o fabricante, estes aspersores são indicados para sistemas fixos de irrigação de gramados, viveiros, jardins, canteiros, estufas e de culturas mais sensíveis, por aplicarem uma precipitação uniforme, de longo alcance e com diâmetros de gotas reduzidos. Os respectivos aspersores também possuem um parafuso para controle de vazão e conexão de ½". Para atender ao propósito pretendido nesta pesquisa, verter a água sobre a cobertura da Célula-Teste de forma semelhante ao que acontece em um evento pluviométrico real (no sentido vertical de cima para baixo), os aspersores foram instalados nas tubulações suspensas sobre as Células-Teste com jato direcionado para baixo. A altura dos aspersores foi regulada para que o diâmetro do jato abrangesse toda a área do telhado (1,00 m^2), sem deixar que o jato ultrapassasse os limites da platibanda, evitando assim a perda da água (Figura 32). Toda tubulação de PVC foi medida, cortada e as conexões previamente coladas, para garantir estanqueidade, com adesivo para tubo de PCV (Figura 33), com montagem e fixação posterior nas alvenarias através de tubulações verticais, também em tubo de PVC de 25 mm, com braçadeiras metálicas (Figura 34).

No experimento foi utilizado água de um poço localizado perto da UETER, armazenado em um reservatório de 500 L (Figura 35a). Na saída do reservatório foi instalado um registro de gaveta (Figura 35b) para controle da vazão de entrada da bomba com potência de 0,55 kW, altura manométrica mínima de 2 mca e máxima de 27 mca e vazão mínima de 0,7 m^3/h e máxima de 3,0 m^3/h. Após a bomba, foi instalado um hidrômetro com vazão máxima de 1,5m^3/h

e pressão de serviço de 10Bar para medir a vazão de entrada (Figura 36a) e em seguida um manômetro para medir a pressão, com medição mínima de 0 mca e máxima de 40 mca (Figura 36b).

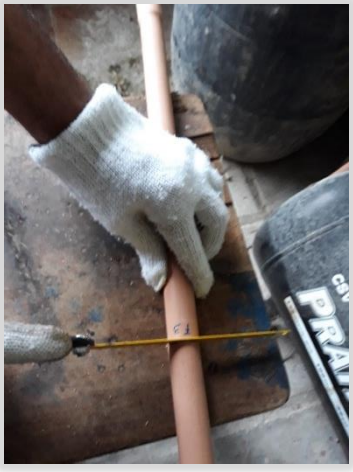
Figura 32 – Instalação dos aspersores.

(a) Aspersor sempre Verde 360º. (b) Posição do aspersor.

Fonte: Autora (2019).

Figura 33 – Preparo da montagem do sistema hidráulico.

(a) Medição da tubulação. (b) Corte da tubulação. (c) Colagem das conexões.



Fonte: Autora (2019).

Figura 34 – Montagem do sistema hidráulico.

(a) Pré-montagem.

(b) Montagem da tubulação.

(c) Tubulação instalada.

Fonte: Autora (2019).

Figura 35 – Arranjo experimental de precipitação.

(a) Abastecimento de água.

(b) Registro e bomba.

Fonte: Autora (2019).

Figura 36 – Equipamentos de medição: hidrômetro e manômetro.
(a) Hidrômetro. (b) Manômetro.

Fonte: Autora (2019).

3.5.3 Calibração do arranjo experimental de precipitação

Após a instalação do arranjo experimental, foi avaliado se a vazão em todos os telhados estava uniforme para diferentes medições de pressão. Para tal, foram utilizados recipientes com volumes graduados, e medido o tempo com o cronômetro durante 2 minutos (Figura 37). Nesta ocasião também foi verificado se todos os equipamentos estavam funcionando satisfatoriamente.

Figura 37 - Experimento de checagem de uniformidade de vazão.

Fonte: Autora (2019).

A pressão de entrada foi controlada através de um registro de gaveta. Os equipamentos instalados neste sistema, hidrômetro e manômetro, foram empregados na medição da vazão de entrada no sistema e da respectiva pressão.

Numa primeira tentativa manteve-se todos os aspersores abertos e foram medidos os volumes aspergidos sobre as Células-Teste com os reservatórios graduados, durante o tempo estabelecido. Os volumes de água dentro dos reservatórios graduados apresentaram diferenças significativas de aproximadamente 500 mL. Assim sendo, o experimento foi repetido com o objetivo de regularizar a vazão aspergida através de ajustes, realizados a cada tentativa, nos parafusos dos aspersores e a diferença entre os volumes acumulados nos reservatórios graduados continuou existindo.

Foi realizada uma segunda repetição como tentativa de regulação dos parafusos dos aspersores. Nesse caso, apenas um dos aspersores ficou aberto e os demais tamponados. Utilizando o mesmo tempo, buscou-se obter a mesma regulagem da vazão (registro) e da pressão (manômetro) para todos os pontos. Em cada repetição, o reservatório foi reabastecido para manter o mesmo nível e minimizar a interferência na pressão. Dessa maneira, os volumes coletados ficaram mais próximos entre si. Porém, ainda assim, houve grande variação na pressão e menor variação na vazão.

Com esse ajuste, converteu-se a vazão em intensidade de precipitação, obtendo-se pares de dados que possibilitaram a definição da relação entre as duas variáveis consideradas a partir de regressão linear simples. Sendo assim, foi possível controlar a intensidade do evento chuvoso empregado. Aplicando a Equação IDF de Recife obteve-se as intensidades máximas anuais (mm/h) das precipitações locais para diferentes tempos de retorno e diferentes durações, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de intensidade de precipitação pela equação IDF Recife.

Duração (minutos)	**Tempo de retorno (anos)**			
	2	**3**	**5**	**10**
5	139,5	149,3	162,6	182,5
10	112,3	120,2	130,9	147
15	95,6	102,3	111,5	125,1
30	69	73,8	80,4	90,3
60	47,4	50,8	55,3	62,1
120	31,7	33,9	36,9	41,4

Fonte: Gomes (2019).

Após a calibração do sistema, foram realizadas duas repetições para obtenção das variáveis e determinação do balanço hídrico. Sobre as repetições, uma delas foi realizada com o solo seco e outra, com o solo saturado. No caso da argila, como não existe substrato, foi considerada a argila seca e molhada. Esperou-se um período de estiagem para que o solo ficasse o mais seco possível. A precipitação utilizada foi a de 182,5 mm com 5 min, e tempo de retorno de 10 anos, ou seja, a chuva intensa máxima que o sistema pode suportar é próxima à média de precipitação do período de estudo que foi de 196 mm. Como o objetivo deste experimento é comparar quais das coberturas possuem maior eficiência na retenção de água e consequente retardo no escoamento superficial, este, foi feito apenas nas Células-Teste CT 01(grama Esmeralda), CT 03 (argila expandida) e CT 05 (cacto Coroa-de-Frade).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos através da metodologia adotada estão descritos a seguir.

4.1 Desempenho térmico

Com o banco de dados obtido através do monitoramento dos medidores de temperatura e umidade instalados no interior das Células-Teste, e os dados fornecidos pelo INMET, foi possível extrair os resultados relativos ao desempenho térmico das tipologias de telhados adotadas e avaliar a influência das estações do ano e dos horários do dia e a trajetória de crescimento e decrescimento da temperatura a cada hora, assim como a interferência da precipitação sobre as temperaturas interna e externa.

4.1.1 Teste dos equipamentos e desempenho térmico das Células-Teste sem coberturas

Simultaneamente à escolha dos materiais e espécies de vegetação a serem colocados nas coberturas, foram realizados os testes iniciais dos medidores de temperatura e umidade, para verificação do funcionamento dos equipamentos de medição e do desempenho térmico inicial das Células-Teste, ainda sem as coberturas. Essa etapa aconteceu no período de 13 a 20 de julho de 2018, e os resultados preliminares mostraram que as Células-Teste não estavam tendo o mesmo desempenho térmico. Os equipamentos foram, então, dispostos em novos arranjos e monitorados no período de 23 a 30 de julho de 2018, sendo que os resultados não apresentaram diferenças significativas em relação ao período anterior (Tabela 4).

Tabela 4 - Comparação das médias da temperatura das paredes, temperatura do teto, temperatura do ambiente e umidade relativa do ar, nos períodos de teste, nas Células-Teste.

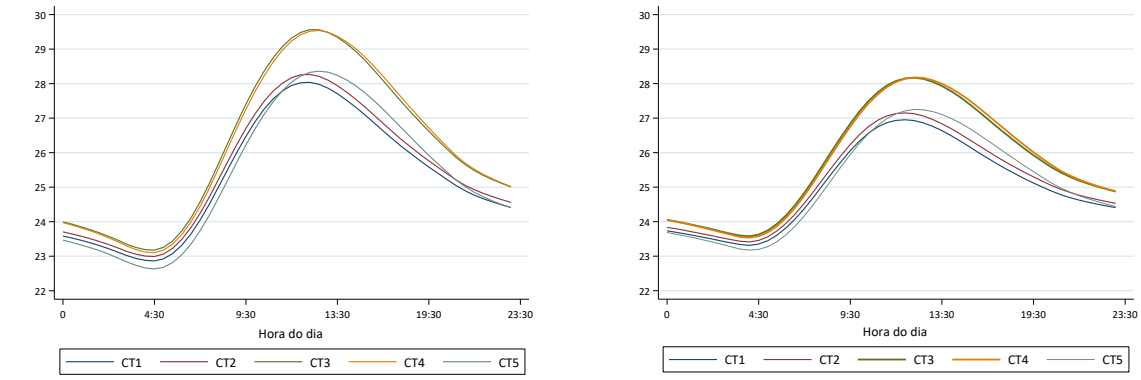
Célula-Teste	Temperatura das paredes (ºC) (média ± dp)	Temperatura do teto (ºC) (média ± dp)	Temperatura do ambiente (ºC) (média ± dp)	Umidade relativa do ar (%) (média ± dp)
Período de 13 a 20 de julho				
CT 01	25,4 ±2,1	26,4 ±2,0	25,9 ±2,1	70,4 ±9,5
CT 02	25,6 ±2,2	26,3 ±2,2	25,9 ±2,1	69,8 ±9,2
CT 03	26,3 ±2,6	27,0 ±2,8	26,7 ±2,6	66,6 ±9,4
CT 04	26,3 ±2,6	26,9 ±2,9	26,6 ±2,6	67,2 ±10,2
CT 05	25,5 ±2,3	26,6 ±3,5	26,0 ±2,9	71,8 ±12,0
Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 03, CT 02 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 03 CT 02 x CT 03	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 03, CT 02 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 03, CT 02 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05

Período de 24 a 31 de julho				
CT 01	25,1 ±1,7	25,9 ±1,8	25,5 ±1,7	76,7 ±9,2
CT 02	25,2 ±1,8	25,8 ±1,9	25,5 ±1,8	76,1 ±9,0
CT 03	25,8 ±2,5	26,3 ±2,4	26,1 ±2,1	73,0 ±9,8
CT 04	25,8 ±2,2	26,2 ±2,5	26,0 ±2,2	73,5 ±10,2
CT 05	25,2 ±1,8	26,0 ±2,9	25,6 ±2,3	77,1 ±10,8
Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 03, CT 02 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 02 x CT 03	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 03, CT 02 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 03, CT 02 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05

Observação: temperatura média das paredes = TMP | temperatura média do teto = TMT | temperatura média do ambiente = TMA | umidade relativa média do ar = URM.
Fonte: Autora (2020).

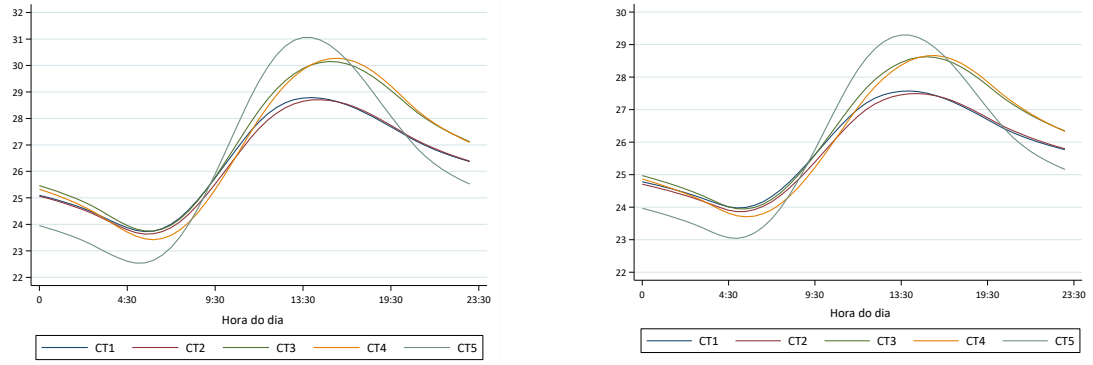
Em ambos os períodos, observou-se que as células CT 01, CT 02 e CT 05 tiveram variações de temperatura semelhantes na temperatura média das paredes (TMP), Figuras 38a e 38b. Com relação a temperatura média do teto (TMT), Figura 39a e 39b, e a temperatura média do ambiente (TMA), Figuras 40a e 40b, as variações foram semelhantes entre CT 01 e CT02, e entre a CT 03 e CT 04, enquanto a CT 05 apresentou uma variação diferenciada.

Figura 38 - Temperatura média das paredes, nos períodos de teste, nas Células-Teste.
(a) Período: 13 a 20/07/2018. (b) Período: 24 a 31/07/2018.



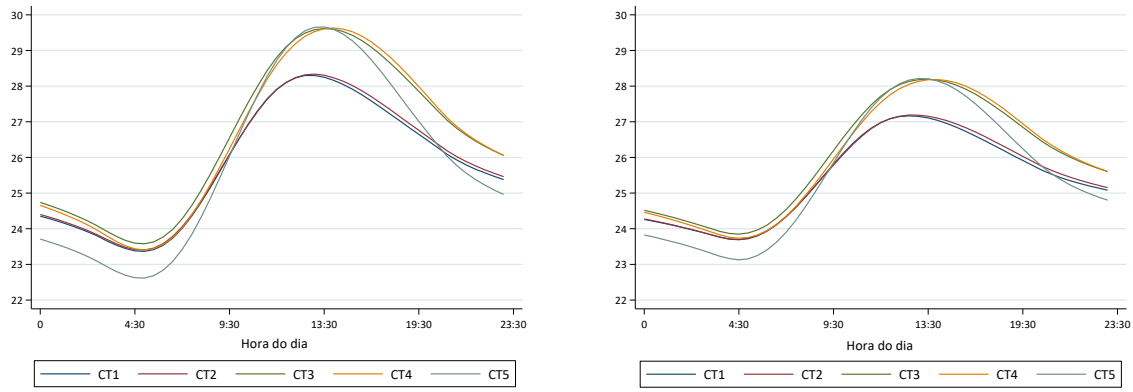
Observação: Temperatura média das paredes = TMP. Fonte: Autora (2020).

Figura 39 – Temperatura média do teto, nos períodos de teste, nas Células-Teste.
(a) Período: 13 a 20/07/2018. (b) Período: 24 a 31/07/2018.



Observação: Temperatura média do teto = TMT. Fonte: Autora (2020).

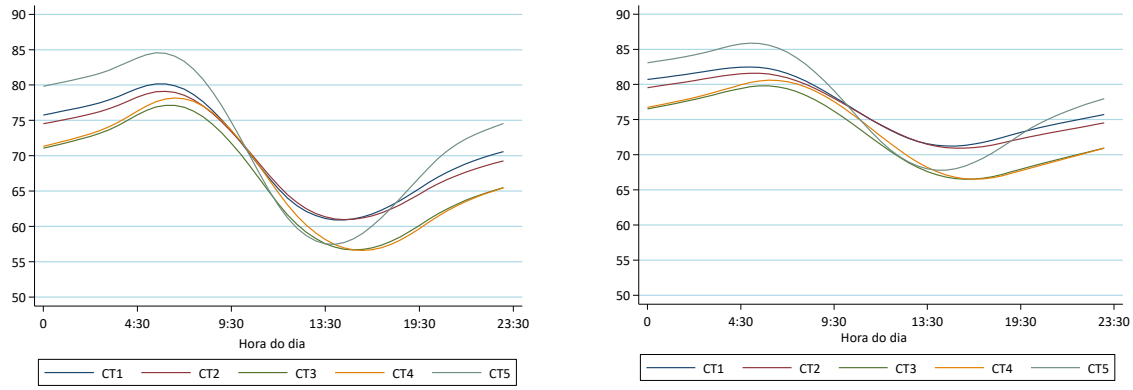
Figura 40 – Temperatura média do ambiente, nos períodos de teste, nas Células-Teste.
(a) Período: 13 a 20/07/2018. (b) Período: 24 a 31/07/2018.



Observação: Temperatura média do ambiente = TMA. Fonte: Autora (2020).

Com relação a variação da umidade relativa média do ar (URM), Figuras 41a e 41b, as células CT 01, CT 02 tiveram valores superiores aos das células CT 03 e CT 04. Como a CT 05 teve uma variação bem próxima ao da CT 01 e CT 02 com relação à TMP, porém apresentou uma variação diferenciada em relação às demais variáveis, próximo da CT 01 e CT 02 nos horários com temperaturas mais altas e da CT 03 e CT 04 nos horários com temperatura mais baixas na TMT e TMA e inverso com relação à URM, verificou-se que, numericamente, diante da diferença de variação das médias apresentadas pela CT 05 em ambos os períodos, sua variação se aproxima mais da CT 01 e CT 02 e não apresenta diferenças estatisticamente significantes.

Figura 41 – Umidade relativa média do ar, nos períodos de teste, nas Células-Teste.
(a) Período: 13 a 20/07/2018. (b) Período: 24 a 31/07/2018.

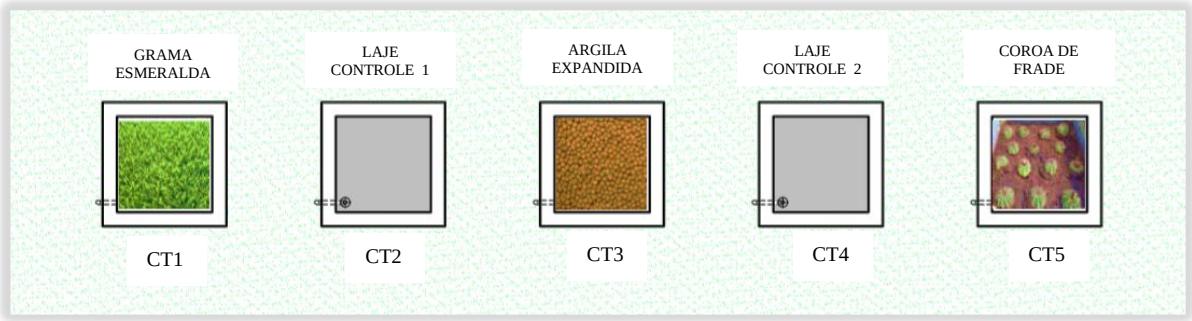


Observação: Umidade relativa média do ar = URM. Fonte: Autora (2020).

A diferença de desempenho térmico entre as Células-Teste pode ter ocorrido em função do sombreamento por elementos do entorno (árvores e edifícios) em cada unidade e/ou ainda em função da primeira unidade (CT 05) ter sido construída antes que às demais, possuindo um tempo de maturação dos materiais construtivos diferenciado. Em função desses resultados foi estabelecida a distribuição da natureza (convencional, substrato e vegetação, e argila expandida) das coberturas das Células-Teste que compõem a UETER (Figura 42). Assim, foram estabelecidos dois grupos (I e II) comparativos com a seguinte composição:

- Grupo I: Células-Teste CT 01, CT 02 e CT 05, onde a CT 01 e CT 05, receberam cobertura vegetal e foram comparadas entre si e com a laje controle 1 (CT 02);
- Grupo II: Células-Teste CT 03 e CT 04, onde a CT 03 recebeu cobertura em material com bom desempenho térmico e foi comparada com a laje controle 2 (CT 04).

Figura 42 – Esquema de distribuição das coberturas das Células-Teste da UETER.



Fonte: Autora (2018).

4.1.2 Análise da temperatura e umidade externas

De acordo com os dados obtidos do INMET (Tabela 5), estação Curado – Recife, considerando o período de julho de 2018 a julho de 2019, onde os meses de julho foram computados duplamente (2018 e 2019) para abranger o período de levantamento de dados de campo, numa primeira análise, observou-se que a temperatura externa média diária no local da UETER variou de acordo com os meses do ano, tendo o mês de março/2019 as temperaturas mais altas e os meses de julho de 2018 e 2019 as temperaturas mais baixas (Figura 43). A temperatura externa média diária do período foi de 25,5ºC, sendo a máxima média diária de 28,6ºC e mínima média diária de 22,4ºC, com uma amplitude de 6,2ºC, como mostra a Figura 44. A variação da temperatura externa com a hora do dia pode ser observada na Figura 45.

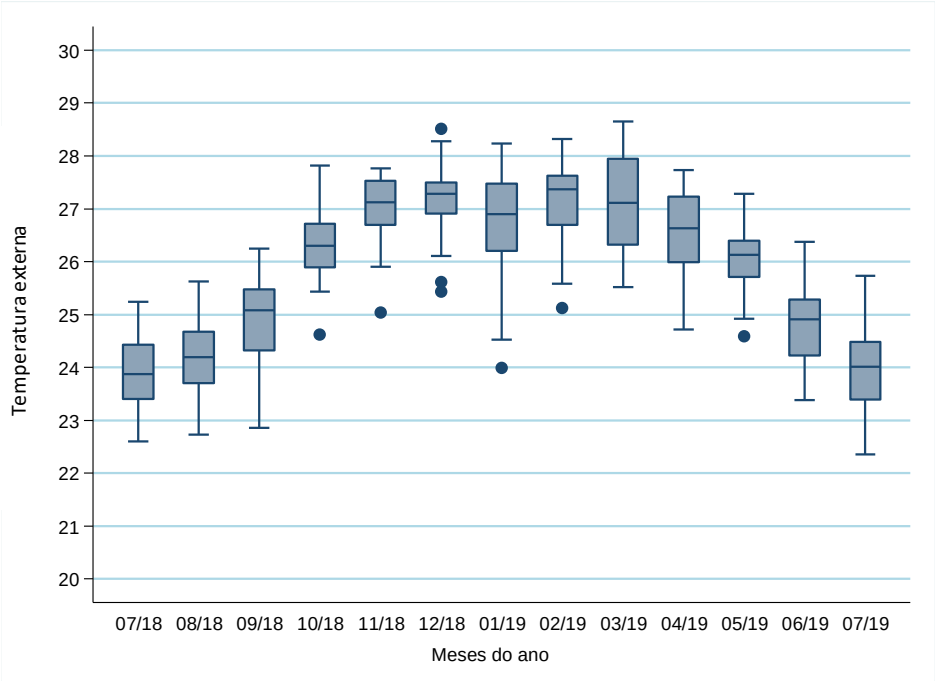
Tabela 5 – Valores de temperatura e umidade relativa do ar (externos), de julho/2018 a julho/2019

Mês	Temperatura externa (ºC) (média ± dp)	Umidade relativa do ar (%) (média ± dp)
Julho de 2018	23,8 ± 0,6	79,7 ± 4,8
Agosto de 2018	24,2 ± 0,7	78,2 ± 3,6
Setembro de 2018	24,9 ± 0,8	76,1 ± 4,0
Outubro de 2018	26,3 ± 0,6	70,6 ± 2,8
Novembro de 2018	27,0 ± 0,6	70,6 ± 5,2
Dezembro de 2018	27,1 ± 0,7	70,8 ± 3,8
Janeiro de 2019	26,7 ± 1,0	75,0 ± 5,3
Fevereiro de 2019	27,1 ± 0,8	78,4 ± 5,0
Março de 2019	27,1 ± 0,9	78,7 ± 5,0
Abril de 2019	26,5 ± 0,8	81,6 ± 4,3
Maio de 2019	26,0 ± 0,6	82,1 ± 4,1
Junho de 2019	24,8 ± 0,8	81,9 ± 4,6
Julho de 2019	23,9 ± 0,7	84,4 ± 3,7

Legenda: dp = desvio padrão

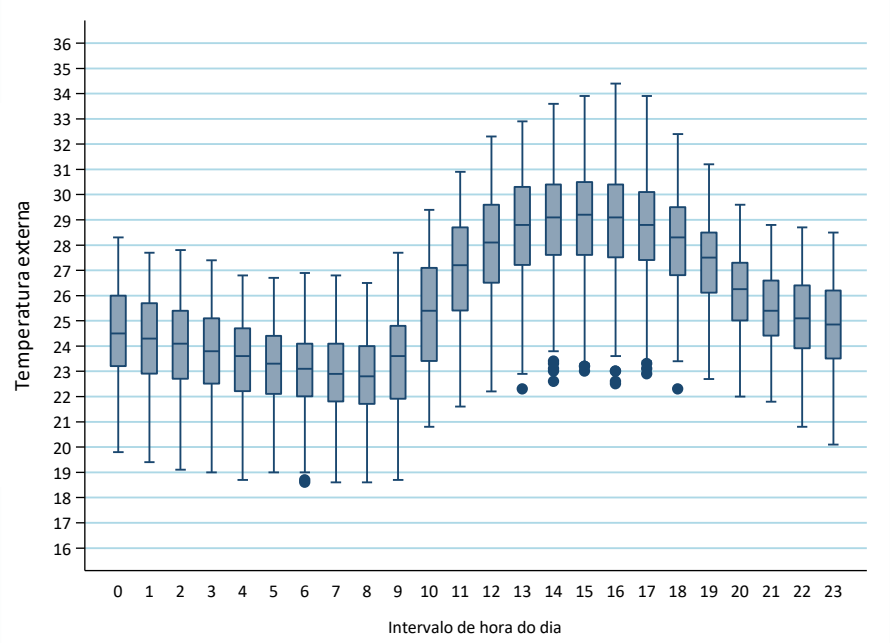
Fonte: Autora (2020).

Figura 43 – Variação da temperatura externa (ºC), por mês, de julho/2018 a julho/2019.



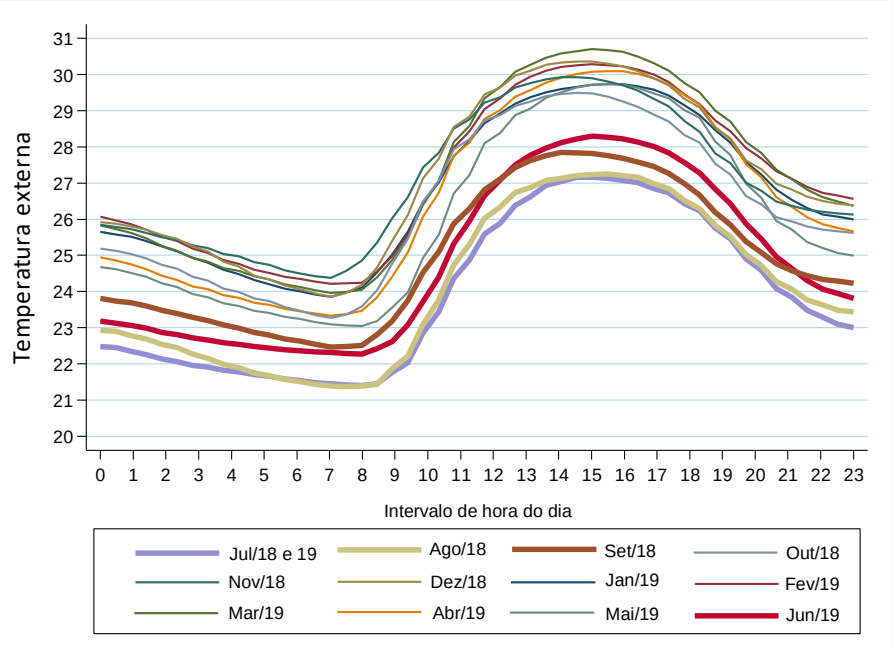
Fonte: Autora (2020).

Figura 44 – Variação da temperatura externa (ºC), por hora, de julho/2018 a julho/2019.



Fonte: Autora (2020).

Figura 45 - Temperatura externa (ºC), por hora, de julho/2018 a julho/2019.

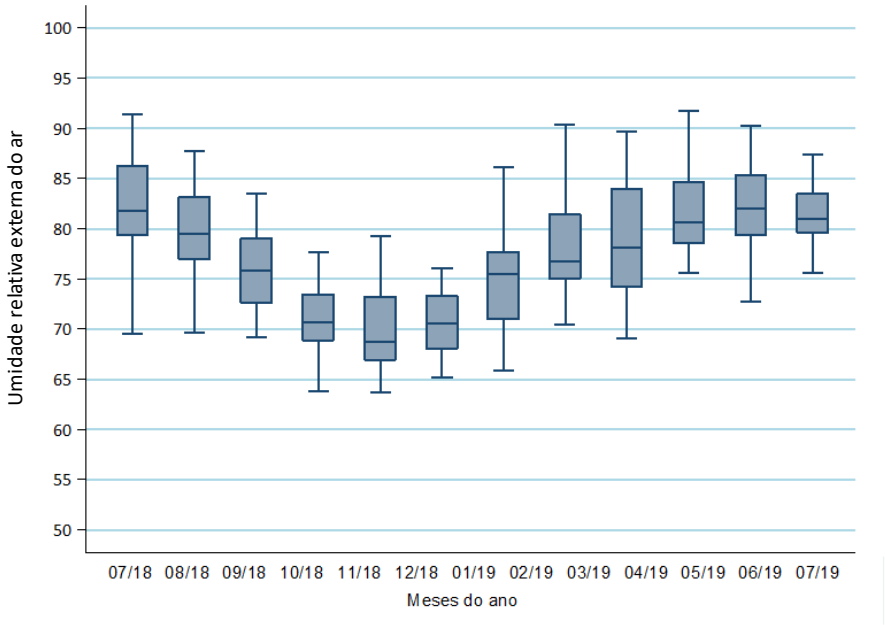


Fonte: Autora (2020).

Assim como a temperatura externa, a umidade relativa externa do ar variou ao longo do período, tendo os meses de outubro/18 a dezembro/18 com as menores médias durante todo o dia (Figura 46). A umidade relativa externa média diária foi de 77,8%, sendo a máxima média diária de 92,5% e a mínima média diária de 63,7%, com uma variação (máxima – mínima) de

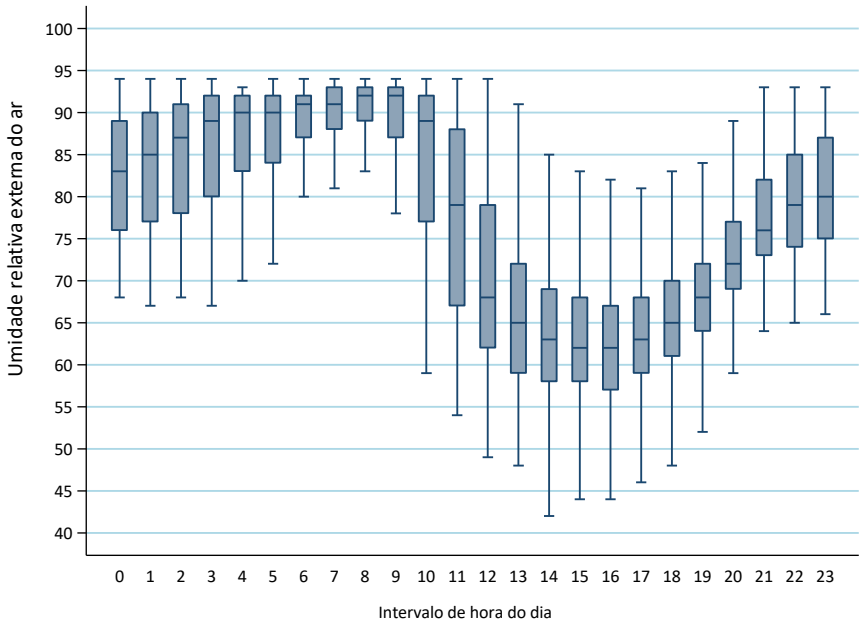
28,8%. Durante o período, a umidade relativa externa apresentou maior pico entre 6 e 8h da manhã e menor valor entre 12 e 18h, conforme Figura 47. A variação da umidade relativa externa com a hora do dia pode ser verificada na Figura 48.

Figura 46 - Variação da umidade relativa externa do ar (%), por mês, de julho/2018 a julho/2019.



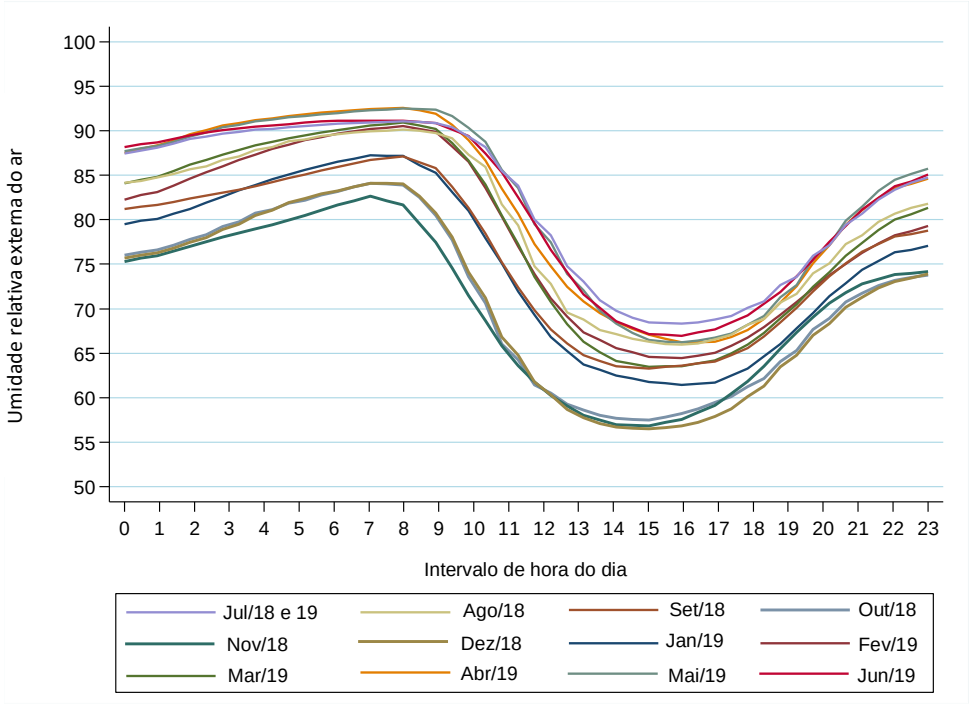
Fonte: Autora (2020).

Figura 47 - Variação da umidade relativa externa do ar (%), por hora, de julho/2018 a julho/2019.



Fonte: Autora (2020).

Figura 48 - Umidade relativa externa do ar (%), por hora, de julho/2018 a julho/2019.



Fonte: Autora (2020).

4.1.3 Análise da temperatura e umidade internas

Em virtude da grande quantidade de dados obtida (quase 450 mil, dados de campo e dados do INMET) e diante das inúmeras possibilidades de análises que este banco de dados possibilita, a análise da temperatura e da umidade externas norteou a definição da estratificação a ser adotada para as análises das temperaturas e umidades do ambiente interno das Células-Teste. Também foi levado em consideração, estratificações com a utilização da maior quantidade de dados possíveis. Assim, a análise dos dados foi realizada em três etapas:

- Etapa I – Análise da variação da temperatura e da umidade internas mensal durante o período de outubro de 2018 a julho de 2019;
- Etapa II – Análise da variação da temperatura e umidade internas em função dos horários do dia, estratificada com o objetivo de diminuir a variação nas variáveis estatísticas apresentadas (TMP, TMA, TMT e URM). Assim sendo, os horários de análise definidos foram obtidos dividindo o período de 24 horas em três partes: II.1) de 0:00 a 7:59h, II.2) de 8:00 às 15:59h, e II.3) de 16:00 às 23:59h;
- Etapa III – Análise da trajetória da variação de crescimento ou decréscimo médio a cada hora para as variáveis (TMP, TMA, TMT e URM) de cada Célula-Teste. Assim sendo, os horários de análise definidos foram obtidos dividindo o período de 24 horas em duas partes: III.1) de 8:00 às 15:59h, e III.2) de 16:00 às 7:59h.

4.1.3.1 Etapa I - Análise da variação mensal

Com os dados de temperatura e umidade relativa internas (ambiente interior das Células-Teste), de outubro de 2018 a agosto de 2019, foram extraídas as médias mensais por variável medida por Célula-Teste (Tabela 6).

Tabela 6 - Médias mensais da temperatura das paredes, temperatura do teto, temperatura do ambiente e umidade relativa do ar, de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste (continua – 1/3).

Célula-Teste	Temperatura das paredes (ºC) (média ± dp)	Temperatura do teto (ºC) (média ± dp)	Temperatura do ambiente (ºC) (média ± dp)	Umidade relativa do ar (%) (média ± dp)
Outubro de 2018				
CT 01 (grama Esmeralda)	27,8 ± 0,7	28,1 ± 0,7	27,9 ± 0,7	70,0 ± 3,2
CT 02 (laje controle 1)	28,0 ± 0,7	29,0± 0,9	28,5 ± 0,8	66,2 ± 3,4
CT 03 (argila expandida)	28,6 ± 0,8	28,7± 1,0	28,7 ± 0,9	66,0 ± 3,5
CT 04 (laje controle 2)	28,8 ± 0,8	29,9± 1,1	29,3 ± 1,0	62,7± 3,8
CT 05 (Coroa-de-Frade)	27,8 ± 0,8	28,0 ± 0,9	27,9 ± 0,8	71,3 ± 3,3
INMET	26,3 ± 0,6	26,3 ± 0,6	26,3 ± 0,6	70,6 ± 2,8
Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 03, CT 02 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 02, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 04, CT 02 x CT 05 CT 03 x CT 04, CT 03 x CT 05 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 04, CT 03 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 02, CT 01 x CT 03 CT 02 x CT 04, CT 02 x CT 04 CT 02 x CT 05, CT 03 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05
Novembro de 2018				
CT 01 (grama Esmeralda)	28,2 ± 0,7	28,4 ± 0,7	28,3 ± 0,7	70,3 ± 4,9
CT 02 (laje controle 1)	28,3 ± 0,8	29,1 ± 1,0	28,7 ± 0,9	67,1 ± 5,5
CT 03 (argila expandida)	29,0 ± 0,9	28,9 ± 0,9	29,0 ± 0,9	67,0 ± 5,2
CT 04 (laje controle 2)	29,2 ± 0,9	30,1 ± 1,3	29,6 ± 1,1	63,6 ± 6,1
CT 05 (Coroa-de-Frade)	28,4 ± 0,7	28,7 ± 0,8	28,5 ± 0,8	69,7 ± 4,9
INMET	27,0 ± 0,6	27,0 ± 0,6	27,0 ± 0,6	70,6 ± 5,2
Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 03, CT 02 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 04 CT 03 x CT 04, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 04 CT 03 x CT 04, CT 05 x CT 04	CT 01 x CT 04, CT 05 x CT 04
Dezembro de 2018				
CT 01 (grama Esmeralda)	28,4 ± 0,6	28,6 ± 0,6	28,5 ± 0,6	70,5 ± 3,5
CT 02 (laje controle 1)	28,5 ± 0,6	29,4 ± 0,7	29,0 ± 0,6	66,7 ± 3,7
CT 03 (argila expandida)	29,4 ± 0,7	29,3 ± 0,8	29,3 ± 0,7	66,5 ± 3,9
CT 04 (laje controle 2)	29,6 ± 0,7	30,6 ± 1,0	30,1 ± 0,8	62,6 ± 4,1
CT 05 (Coroa-de-Frade)	28,5 ± 0,6	28,9 ± 0,7	28,7 ± 0,6	70,5 ± 3,1
INMET	27,1 ± 0,7	27,1 ± 0,7	27,1 ± 0,7	70,8 ± 3,8
Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 03, CT 02 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 02, CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 04 CT 02 x CT 05, CT 03 x CT 04 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 02, CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 04 CT 02 x CT 05, CT 03 x CT 04 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 02, CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 04 CT 02 x CT 05, CT 03 x CT 04 CT 04 x CT 05

Observação: temperatura média das paredes = TMP | temperatura média do teto = TMT | temperatura média do ambiente = TMA | umidade relativa média do ar = URM | dp = desvio-padrão. Fonte: Autora (2020).

Tabela 6 - Médias mensais da temperatura das paredes, temperatura do teto, temperatura do ambiente e umidade relativa do ar, de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste (continua – 2/3).

Célula-Teste	Temperatura das paredes (ºC) (média ± dp)	Temperatura do teto (ºC) (média ± dp)	Temperatura do ambiente (ºC) (média ± dp)	Umidade relativa do ar (%) (média ± dp)
Janeiro de 2019				
CT 01 (grama Esmeralda)	27,6 ± 1,2	27,9 ± 0,9	27,7 ± 1,0	75,4 ± 4,5
CT 02 (laje controle 1)	27,9 ± 1,0	28,6 ± 1,1	28,2 ± 1,1	71,6 ± 5,1
CT 03 (argila expandida)	28,6 ± 1,1	28,5 ± 1,1	28,5 ± 1,1	71,3 ± 4,8
CT 04 (laje controle 2)	28,7 ± 1,1	29,2± 1,4	29,0 ± 1,3	68,8± 5,7
CT 05 (Coroa-de-Frade)	27,7 ± 1,2	28,1 ± 1,0	27,9 ± 1,1	75,2 ± 4,6
INMET	26,7 ± 1,0	26,7 ± 1,0	26,7 ± 1,0	75,0 ± 5,3
Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 04, CT 03 x CT 05 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 02, CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 05 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05
Fevereiro de 2019				
CT 01 (grama Esmeralda)	28,2 ± 0,9	28,5 ± 1,0	28,4 ± 0,9	78,8 ± 4,9
CT 02 (laje controle 1)	28,5 ± 1,0	29,4 ± 1,4	29,0 ± 1,2	74,9 ± 5,8
CT 03 (argila expandida)	29,2 ± 1,2	28,1 ± 1,1	29,1 ± 1,1	75,0 ± 5,2
CT 04 (laje controle 2)	29,4 ± 1,2	30,4 ± 1,7	29,9 ± 1,5	70,9 ± 6,5
CT 05 (Coroa-de-Frade)	28,4 ± 0,9	28,6 ± 1,1	28,5 ± 1,0	80,4 ± 4,1
INMET	27,1 ± 0,8	27,1 ± 0,8	27,1 ± 0,8	78,4 ± 5,0
Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 02 x CT 04, CT 03 x CT 05 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 03 x CT 04 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 04 CT 05 x CT 04	CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 04 CT 03 x CT 04, CT 03 x CT 05 CT 04 x CT 05
Março de 2019				
CT 01 (grama Esmeralda)	28,0 ± 2,0	28,7 ± 1,2	28,5 ± 1,2	78,1 ± 5,4
CT 02 (laje controle 1)	28,6 ± 1,2	29,6 ± 1,6	29,1 ± 1,4	74,5 ± 6,3
CT 03 (argila expandida)	29,1 ± 1,3	29,1 ± 1,3	29,1 ± 1,3	75,0 ± 5,7
CT 04 (laje controle 2)	29,3 ± 1,4	30,3 ± 1,8	29,8 ± 1,6	70,9 ± 6,7
CT 05 (Coroa-de-Frade)	28,4 ± 1,2	28,7 ± 1,2	28,5 ± 1,2	79,9 ± 4,6
INMET	27,1 ± 0,9	27,1 ± 0,9	27,1 ± 0,9	78,7 ± 5,0
Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04	CT 01 x CT 04, CT 03 x CT 04 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 05 CT 03 x CT 04, CT 03 x CT 05
Abril de 2019				
CT 01 (grama Esmeralda)	27,5 ± 1,0	28,0 ± 1,0	27,7 ± 1,0	81,0 ± 4,4
CT 02 (laje controle 1)	27,9 ± 1,1	28,8 ± 1,4	28,3 ± 1,2	77,5 ± 5,7
CT 03 (argila expandida)	28,4 ± 1,2	28,4 ± 1,2	28,4 ± 1,2	78,2 ± 5,0
CT 04 (laje controle 2)	28,6 ± 1,2	29,4 ± 1,7	29,0 ± 1,5	74,7 ± 6,4
CT 05 (Coroa-de-Frade)	27,6 ± 1,0	27,9 ± 1,0	27,7 ± 1,0	84,4 ± 3,5
INMET	26,5 ± 0,8	26,5 ± 0,8	26,5 ± 0,8	81,6 ± 4,3
Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 03 x CT 04 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 05 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05

Observação: temperatura média das paredes = TMP | temperatura média do teto = TMT | temperatura média do ambiente = TMA | umidade relativa média do ar = URM | dp = desvio-padrão. Fonte: Autora (2020).

Tabela 6 - Médias mensais da temperatura das paredes, temperatura do teto, temperatura do ambiente e umidade relativa do ar, de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste (conclusão – 3/3).

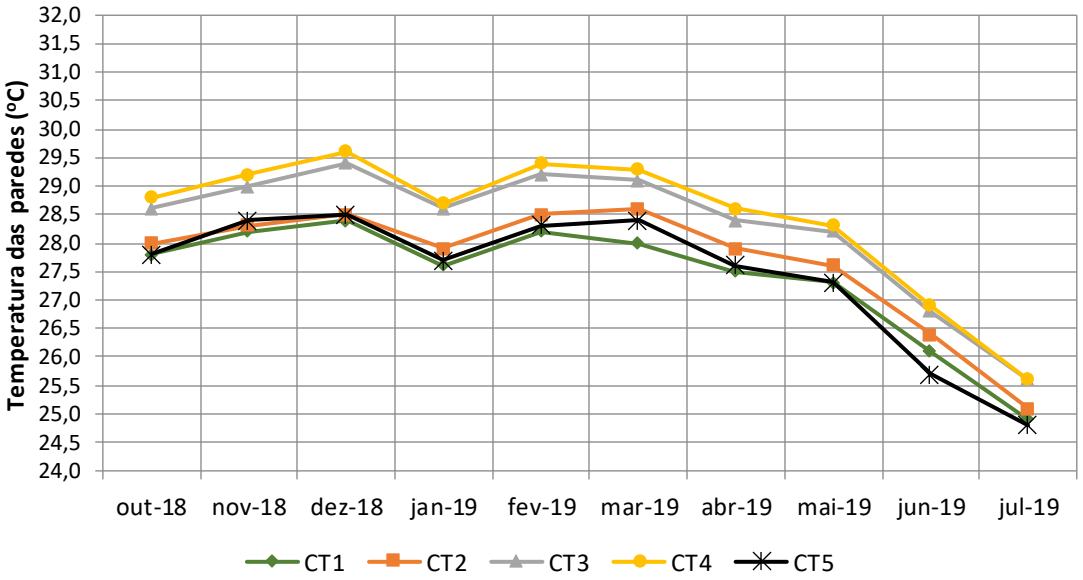
Célula-Teste	Temperatura das paredes (ºC) (média ± dp)	Temperatura do teto (ºC) (média ± dp)	Temperatura do ambiente (ºC) (média ± dp)	Umidade relativa do ar (%) (média ± dp)
Maio de 2019				
CT 01 (grama Esmeralda)	27,3 ± 1,0	27,8 ± 0,9	27,5 ± 0,9	79,0 ± 6,7
CT 02 (laje controle 1)	27,6 ± 1,0	28,5 ± 1,3	28,0 ± 1,1	76,0 ± 7,1
CT 03 (argila expandida)	28,2 ± 1,0	28,3 ± 1,1	28,3 ± 1,1	75,6 ± 6,6
CT 04 (laje controle 2)	28,3 ± 1,1	28,9± 1,5	28,6 ± 1,3	73,5 ± 7,4
CT 05 (Coroa-de-Frade)	27,3 ± 0,9	27,5 ± 0,9	27,4 ± 0,9	82,8 ± 5,8
INMET	26,0 ± 0,6	26,0 ± 0,6	26,0 ± 0,6	82,1 ± 4,1
Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 05 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 03 x CT 05 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 05 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05
Junho de 2019				
CT 01 (grama Esmeralda)	26,1 ± 1,0	26,4 ± 1,0	26,2 ± 1,0	79,7 ± 5,7
CT 02 (laje controle 1)	26,4 ± 1,0	27,1 ± 1,2	26,7 ± 1,1	76,6 ± 6,6
CT 03 (argila expandida)	26,8 ± 1,1	26,7 ± 1,1	26,8 ± 1,1	77,3 ± 6,2
CT 04 (laje controle 2)	26,9 ± 1,2	27,3 ± 1,4	27,1 ± 1,3	75,7 ± 7,0
CT 05 (Coroa-de-Frade)	25,7 ± 1,1	25,9 ± 1,1	25,8 ± 1,1	86,7 ± 5,6
INMET	24,8 ± 0,8	24,8 ± 0,8	24,8 ± 0,8	81,9 ± 4,6
Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$)	CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 05 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 02 x CT 05 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 05, CT 02 x CT 05 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05
Julho de 2019				
CT 01 (grama Esmeralda)	24,9 ± 1,0	25,2 ± 1,1	25,1 ± 1,1	84,1 ± 5,7
CT 02 (laje controle 1)	25,1 ± 1,2	25,8 ± 1,4	25,5 ± 1,3	81,3 ± 6,7
CT 03 (argila expandida)	25,6 ± 1,3	25,6 ± 1,4	25,6 ± 1,4	81,7 ± 6,5
CT 04 (laje controle 2)	25,6 ± 1,3	26,1 ± 1,6	25,9 ± 1,5	79,8 ± 7,1
CT 05 (Coroa-de-Frade)	24,8 ± 1,2	25,0 ± 1,3	24,9 ± 1,2	89,6 ± 5,6
INMET	23,9 ± 0,7	23,9 ± 0,7	23,9 ± 0,7	84,4 ± 3,7
Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$)		CT 04 x CT 05	CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 05, CT 02 x CT 05 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05

Observação: temperatura média das paredes = TMP | temperatura média do teto = TMT | temperatura média do ambiente = TMA | umidade relativa média do ar = URM | dp = desvio-padrão. Fonte: Autora (2020).

Observou-se, no Grupo I (CT 01 x CT 02 x CT 05), variações diferentes nos meses com temperaturas mais altas (outubro/2018 a abril/2018) em relação aos meses com temperaturas mais baixas (maio/2019 a julho/2019). Já no Grupo II (CT 03 x CT 04), a variação se manteve constante em todos os meses do ano. No Grupo I, com relação à TMP (Figura 49), nos meses com temperaturas mais altas, a cobertura com grama Esmeralda (CT 01), comparada com a laje controle 1 (CT 02), reduziu em 0,29ºC a temperatura média das paredes, enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade (CT 05) reduziu em 0,13ºC. Já nos meses mais com temperaturas mais baixas, a cobertura com grama Esmeralda reduziu em 0,26ºC a temperatura média das paredes,

enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade reduziu em 0,43ºC. No Grupo II, nos meses com temperaturas mais altas, a argila expandida (CT 03), em relação à laje controle 2 (CT 04), reduziu em 0,19ºC a TMP e, nos meses com temperaturas mais baixas, em 0,07 ºC. Comparando-se todos os resultados, conclui-se que a cobertura com grama Esmeralda possui maior eficiência na redução da TMP diante de temperaturas mais altas, enquanto a cobertura com argila expandida mostra melhores resultados diante de temperaturas mais frias. Todos os valores encontrados com relação a TMP não possuem diferenças estatisticamente significativa.

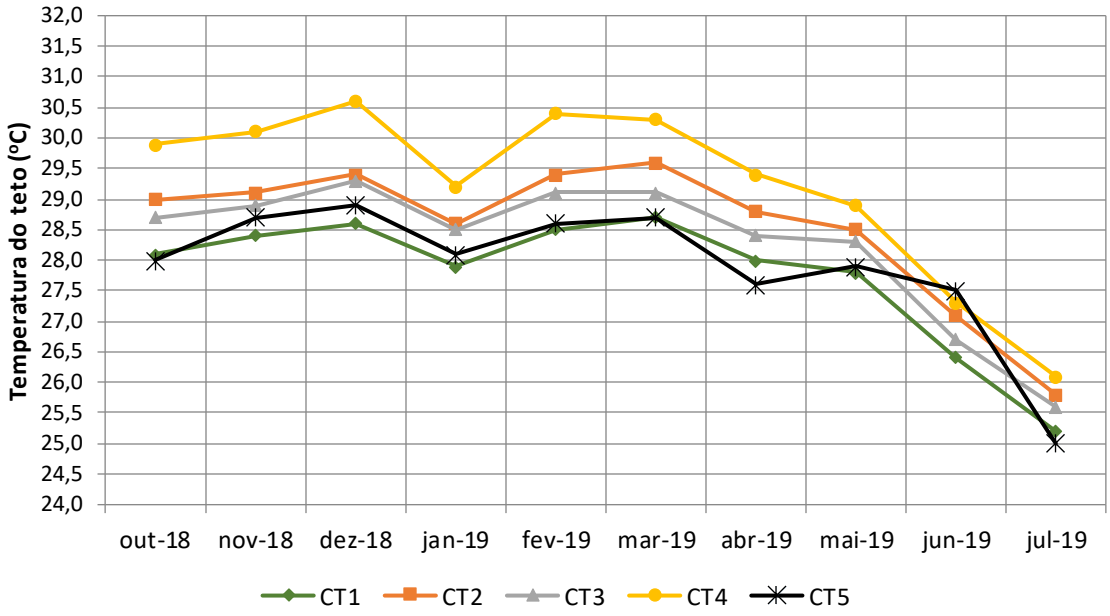
Figura 49 - Temperatura média das paredes, de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste.



Observação: temperatura média das paredes = TMP. Fonte: Autora (2020).

No Grupo I, com relação à TMT (Figura 50), nos meses com temperaturas mais altas, a cobertura com grama Esmeralda, comparada com a laje controle 1, reduziu em 0,81ºC a temperatura média dos tetos, enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade reduziu em 0,71ºC. Já nos meses com temperaturas mais baixas , a cobertura com grama Esmeralda reduziu em 0,67ºC a temperatura média dos tetos, enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade reduziu em 1,00ºC. No Grupo II, nos meses com temperaturas mais altas, a argila expandida, em relação à laje controle 2, reduziu em 1,27ºC a TMT e, nos meses com temperaturas mais baixas, em 0,57ºC. Comparando-se todos os resultados, conclui-se que a argila expandida possui maior eficiência na redução da TMT tanto nas temperaturas mais altas, como diante de temperaturas mais frias. Porém só houveram diferenças estatisticamente significantes nos valores encontrados com relação a TMT para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2018 e março e abril de 2019.

Figura 50 - Temperatura média do teto, de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste.



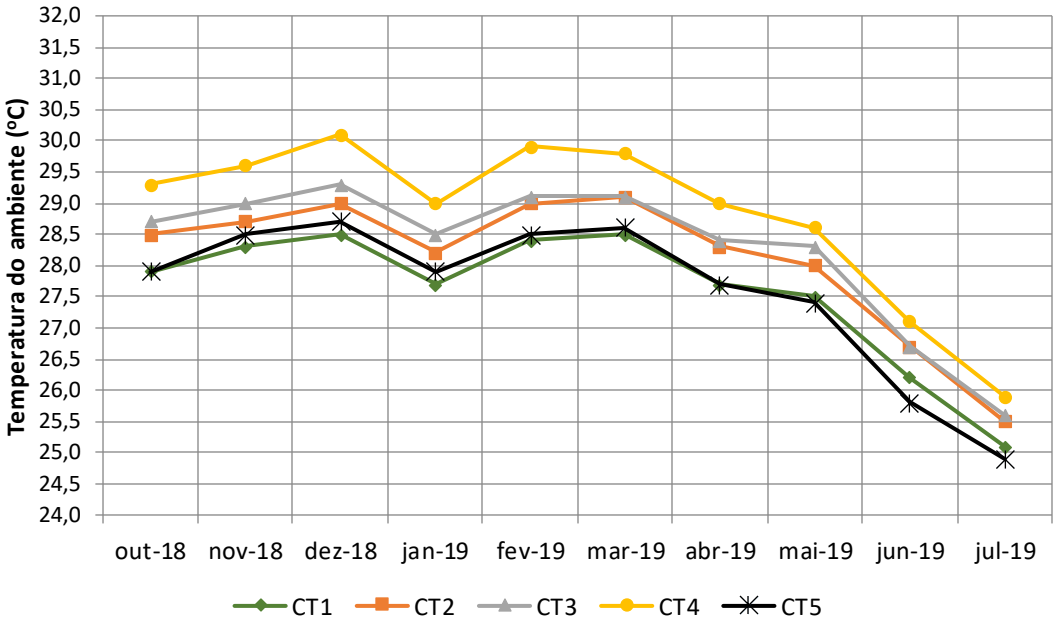
Observação: temperatura média do teto = TMT. Fonte: Autora (2020).

No Grupo I, com relação à TMA (Figura 51), nos meses com temperaturas mais altas, a cobertura com grama Esmeralda, comparada com a laje controle 1, reduziu em 0,54ºC a temperatura média do ambiente, enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade reduziu em 0,44ºC. Já nos meses com temperaturas mais baixas, a cobertura com grama Esmeralda reduziu em 0,47ºC a temperatura média do ambiente, enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade reduziu em 0,70ºC. No Grupo II, nos meses com temperaturas mais altas, a argila expandida, em relação à laje controle 2, reduziu em 0,66ºC a TMA e, nos meses com temperaturas mais baixas, em 0,30ºC. Comparando-se todos os resultados, conclui-se que a argila expandida possui maior eficiência na redução da TMA tanto nas temperaturas mais altas, como diante de temperaturas mais frias. Porém todos os valores encontrados com relação a TMA (exceto outubro, novembro e dezembro de 2018) não possuem diferenças estatisticamente significativa.

No Grupo I, com relação à URM (Figura 52), nos meses com temperaturas mais altas, a cobertura com grama Esmeralda, comparada com a laje controle 1, aumentou em 3,66% a umidade média do ambiente, enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade aumentou em 4,70%. Já nos meses com temperaturas mais baixas, a cobertura com grama Esmeralda aumentou em 2,97% a umidade média do ambiente, enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade aumentou 8,40%. No Grupo II, nos meses com temperaturas mais altas, a argila expandida, em relação à laje controle 2, aumentou em 3,54% a URM e, nos meses com temperaturas mais baixas, em 1,87%. Comparando-se todos os resultados, conclui-se que a cobertura com grama Esmeralda possui maior eficiência no aumento da URM diante de temperaturas mais altas, enquanto a

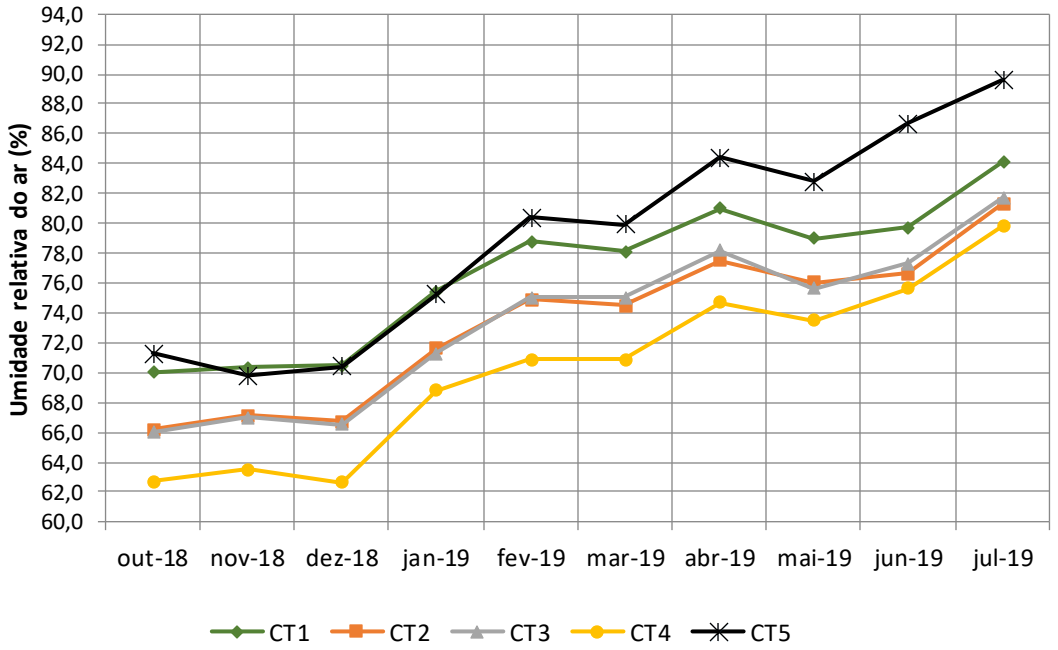
cobertura com argila expandida mostra melhores resultados diante de temperaturas mais frias. Porém todos os valores encontrados com relação a URM (exceto novembro de 2018 e fevereiro de 2019) não possuem diferenças estatisticamente significativa.

Figura 51 - Temperatura média do ambiente, de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste.



Observação: temperatura média do ambiente = TMA. Fonte: Autora (2020).

Figura 52 - Umidade relativa do ar, de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste.



Observação: umidade relativa média do ar = URM. Fonte: Autora (2020).

O Quadro 6 resume a variação de cada cobertura em função da temperatura analisada (parede, teto, ambiente) e umidade do ar, destacando os melhores desempenhos. Para entendimento sobre o que é considerado nesta pesquisa, no que se refere à análise da variação mensal, como "melhor desempenho", apresenta-se a seguir a lógica adotada considerando os valores médios da variável em análise (temperatura ou umidade relativa do ar) para um determinado período de tempo:

- Em dias com temperaturas mais altas: a cobertura considerada de melhor desempenho é a que apresenta os menores valores de temperatura (das paredes, do teto, e do ambiente) e os maiores valores de umidade quando se compara com os respectivos valores obtidos para a Célula-Teste sem cobertura adicional acima da laje (laje controle).
- Em dias com temperaturas mais frias: a cobertura considerada de melhor desempenho é a que apresenta os maiores valores de temperatura (das paredes, do teto, e do ambiente) e os menores valores de umidade quando se compara com os respectivos valores obtidos para a Célula-Teste de referência (laje controle).

Quadro 6 – Coberturas com melhor desempenho, por variável para os dias com temperaturas mais alta e mais baixa.

Característica do dia	Temperatura			Umidade relativa do ar (%)
	Das paredes (ºC)	Do teto (ºC)	Do ambiente (ºC)	
Temp. altas	Grama Esmeralda	Argila expandida	Argila Expandida	Coroa-de-Frade
Temp. baixas	Argila expandida	Argila expandida	Argila expandida	Argila expandida

Fonte: Autora (2020).

4.1.3.2 Etapa II - Análise da variação em função dos horários do dia

Na comparação da temperatura e umidade internas (interior das Células-Teste), de acordo com os horários do dia, foram calculadas as médias diárias conforme os estratos dos horários pré-definidos: II.1) de 0:00 a 7:59h, II.2) de 8:00 às 15:59h, e II.3) de 16:00 às 23:59h. De acordo com os resultados da Tabela 7, no estrato de horário II.1 **de 0:00 às 7:59h,** observa-se que a cobertura com grama Esmeralda (CT 01) e com Coroa-de-Frade (CT 05), em relação à laje controle 1 (CT 02), apresentaram maiores reduções em relação a TMP, porém sem diferença estatisticamente significante ($p < 0,05$). Essa variação também foi observada quando comparadas as temperaturas médias do ambiente (TMA). Na avaliação da temperatura do teto (TMT), não houve diferença estatisticamente significante entre as Células-Teste com grama Esmeralda (CT 01) e com Coroa-de-Frade (CT 05), nem entre a argila expandida (CT 03) e a laje controle 2 (CT 04), havendo apenas diferença entre a Célula-Teste com Coroa-de-Frade (CT 05) e a laje controle 1 (CT 02). Resultado semelhante foi observado, com as maiores temperaturas durante o dia, no estrato de horário II.2 **de 8:00 às 15:59h,** quando as Células-Teste com grama Esmeralda (CT 01) e com Coroa-de-Frade (CT 05) obtiveram as menores médias de temperatura, tendo diferença estatisticamente significante ($p < 0,05$) em relação às demais células. Essa variação também foi observada quando comparadas as temperaturas médias das paredes e as temperaturas médias do ambiente. Já no estrato de horário II.3 de **16:00 às 23:59h,** observa-se que as Células-Teste com grama Esmeralda (CT 01) e com Coroa-de-Frade (CT 05), assim como nos demais estratos do dia, obtiveram as menores médias de temperatura de paredes, de teto e de ambiente, tendo diferença estatisticamente significante ($p < 0,05$) tanto entre as lajes controle (CT 02 e CT 04), assim como quando comparado com a argila expandida (CT 03).

Tabela 7 - Médias da temperatura das paredes, da temperatura do teto e da temperatura do ambiente, considerando os horários estratificados, nas Células-Teste.

Célula-Teste	Temperatura das paredes (média ± dp)	Temperatura do teto (média ± dp)	Temperatura do ambiente (média ± dp)	Umidade relativa do ar (%) (média ± dp)
De 0:00 às 7:59h				
CT 01 (grama Esmeralda)	25,66 ±1,39	26,39 ±1,36	26,02 ±1,35	80,98 ±6,15
CT 02 (laje controle 1)	25,91 ±1,38	26,71 ±1,58	26,31 ±1,46	77,71 ±6,92
CT 03 (argila expandida)	26,08 ±1,39	26,61 ±1,47	26,34 ±1,42	77,63 ±6,82
CT 04 (laje controle 2)	26,13 ±1,44	26,70 ±1,72	26,42 ±1,56	76,01 ±7,59
CT 05 (Coroa-de-Frade)	25,64 ±1,42	26,29 ±1,53	25,97 ±1,47	82,90 ±7,68
INMET	24,14 ±1,43	24,14 ±1,43	24,14 ±1,43	85,86 ±6,19

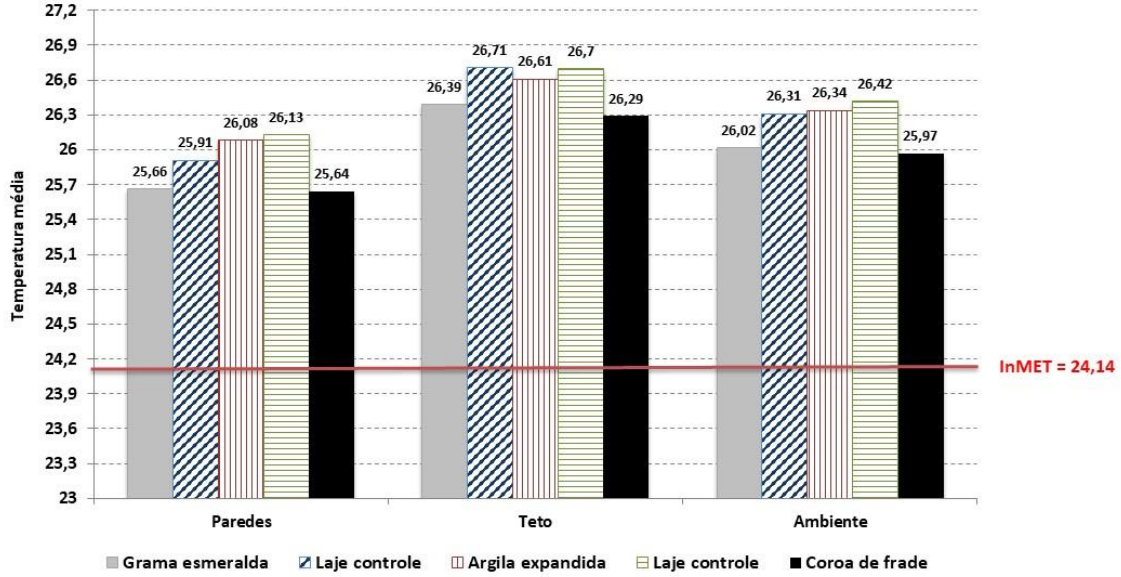
Diferença entre as Célula-Teste ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	**CT 02 x CT 05**, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 **CT 02 x CT 05**, CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 02, CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04, CT 01 x CT 05 CT 03 x CT 04, CT 05 x CT 02 CT 05 x CT 03, CT 05 x CT 04
Diferença com o INMET ($p < 0,05$)	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste
De 8:00 às 15:59h				
CT 01 (grama Esmeralda)	28,98 ±1,67	28,88 ±1,55	28,93 ±1,61	73,56 ±8,36
CT 02 (laje controle 1)	28,98 ±1,60	29,03 ±1,64	29,01 ±1,61	72,78 ±8,53
CT 03 (argila expandida)	29,84 ±1,83	29,23 ±1,68	29,54 ±1,73	71,64 ±8,32
CT 04 (laje controle 2)	29,87 ±1,91	29,79 ±2,02	29,83 ±1,95	70,30 ±9,07
CT 05 (Coroa-de-Frade)	28,74 ±1,72	28,59 ±1,66	28,67 ±1,68	76,56 ±8,83
INMET	27,24 ±1,48	27,24 ±1,48	27,24 ±1,48	75,10 ±8,42
Diferença entre as Célula-Teste ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 03 x CT 02, CT 03 x CT 05 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 03 CT 02 x CT 05, CT 03 x CT 05 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 03 x CT 02, CT 03 x CT 05 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 04, CT 01 x CT 05 CT 02 x CT 03, CT 05 x CT 02 CT 05 x CT 03, CT 05 x CT 04
Diferença com o INMET ($p < 0,05$)	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste
De 16:00 às 23:59h				
CT 01 (grama Esmeralda)	27,67 ±1,52	27,96 ±1,52	27,80 ±1,54	75,49 ±7,35
CT 02 (laje controle 1)	28,15 ±1,62	29,76 ±2,13	28,95 ±1,87	69,28 ±8,67
CT 03 (argila expandida)	28,95 ±1,85	28,89 ±1,89	28,92 ±1,86	70,78 ±8,39
CT 04 (laje controle 2)	29,24 ±1,94	31,02 ±2,72	30,13 ±2,31	64,71 ±9,93
CT 05 (Coroa-de-Frade)	27,97 ±1,72	28,26 ±1,82	28,10 ±1,78	77,73 ±9,13
INMET	27,40 ±1,42	27,40 ±1,42	27,40 ±1,42	71,46 ±7,41
Diferença entre as Célula-Teste ($p < 0,05$)	CT 01 x CT 02, CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 03 CT 03 x CT 05, CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 02, CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 03 CT 02 x CT 05, CT 03 x CT 05 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 02, CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04, CT 02 x CT 03 CT 02 x CT 05, CT 03 x CT 05 CT 04 x CT 05	CT 01 x CT 02, CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04, CT 01 x CT 05 CT 03 x CT 04, CT 05 x CT 02 CT 05 x CT 03, CT 05 x CT 04
Diferença com o INMET ($p < 0,05$)	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste

Observação: temperatura média das paredes = TMP | temperatura média do teto = TMT | temperatura média do ambiente = TMA | umidade relativa média do ar = URM | dp = desvio-padrão. Fonte: Autora (2020).

Sobre o desempenho observado no horário II.1 (de 0:00 a 7:59h), os resultados estão apresentados na Figura 53. Considerando a temperatura média das paredes (TMP), em relação à laje controle 1 (CT 02), a cobertura com grama Esmeralda (CT 01) reduziu a temperatura em 0,25ºC enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade reduziu a temperatura em 0,27ºC. Já a argila expandida, em relação à laje controle 2 (CT 04), reduziu em apenas 0,05ºC. Analisando a temperatura dos tetos (TMT), em relação à laje controle 1 (CT 02), a cobertura com grama Esmeralda (CT 01) reduziu a temperatura em 0,32ºC enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade

reduziu a temperatura em 0,42ºC. Já a argila expandida, em relação à laje controle 2 (CT 04), reduziu a temperatura em apenas 0,09ºC. No que se refere à temperatura média do ambiente (TMA), a redução de temperatura, em relação à laje controle 1 (CT 02), das Células-Teste com grama Esmeralda (CT 01) e com Coroa-de-Frade (CT 05) foi de 0,29ºC e 0,34ºC, respectivamente, e na comparação da argila expandida (CT 03) com a laje controle 2 (CT 04) a redução foi de 0,08ºC. Conclui-se que no horário de 0:00 às 7:59h, a cobertura com Coroa-de-Frade foi mais eficiente na redução de todas as temperaturas avaliadas apresentando diferenças estatisticamente significantes apenas na TMT e TMA.

Figura 53 – Médias da temperatura das paredes, temperatura do teto e temperatura do ambiente, no horário II.1 (de 0:00 às 7:59h), de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste.

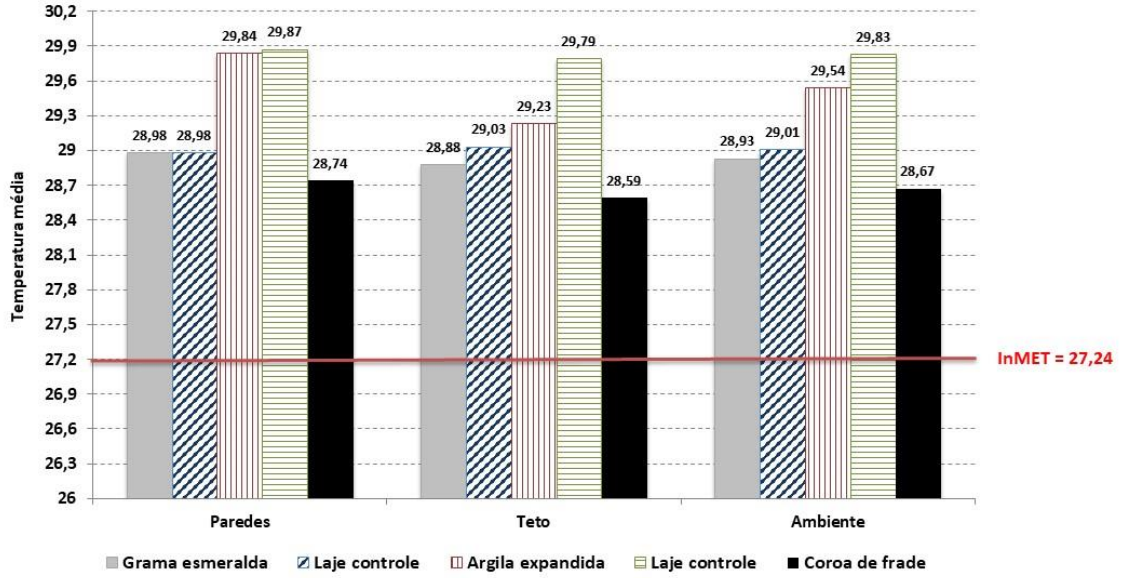


Observação: temperatura média das paredes = TMP | temperatura média do teto = TMT | temperatura média do ambiente = TMA. Fonte: Autora (2020).

Sobre o desempenho observado no horário II.2 (de 8:00 às15:59h), os resultados estão apresentados na Figura 54. Considerando a temperatura média das paredes (TMP), em relação à laje controle 1 (CT 02), a cobertura com grama Esmeralda (CT 01) não apresentou redução e a cobertura com Coroa-de-Frade reduziu a temperatura em 0,24ºC. Já a argila expandida, em relação à laje controle 2 (CT 04), reduziu em apenas 0,03ºC. Analisando a temperatura dos tetos (TMT), em relação à laje controle 1 (CT 02), a cobertura com grama Esmeralda (CT 01) reduziu a temperatura em 0,15ºC enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade reduziu a temperatura em 0,44ºC. Já a argila expandida, em relação à laje controle 2 (CT 04), reduziu a temperatura em 0,56ºC, mostrando-se bastante eficiente neste horário do dia e apresentando diferença estatisticamente significante. No que se refere à temperatura média do ambiente, a redução de

temperatura das Células-Teste com grama Esmeralda (CT 01) e com Coroa-de-Frade (CT 05), em relação à laje controle 1 (CT 02), foi de 0,08ºC e 0,34ºC, respectivamente, e na comparação da argila expandida (CT 03) com a laje controle 2 (CT 04), a redução foi de 0,29ºC. Conclui-se que, no horário de 8:00 às15:59h, a cobertura com Coroa-de-Frade foi mais eficiente na redução da TMP e da TMA enquanto a argila apresentou melhores resultados para a TMT.

Figura 54 - Médias da temperatura das paredes, temperatura do teto e temperatura do ambiente, no horário II.2 (de 8:00 às 15:59h), de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste.

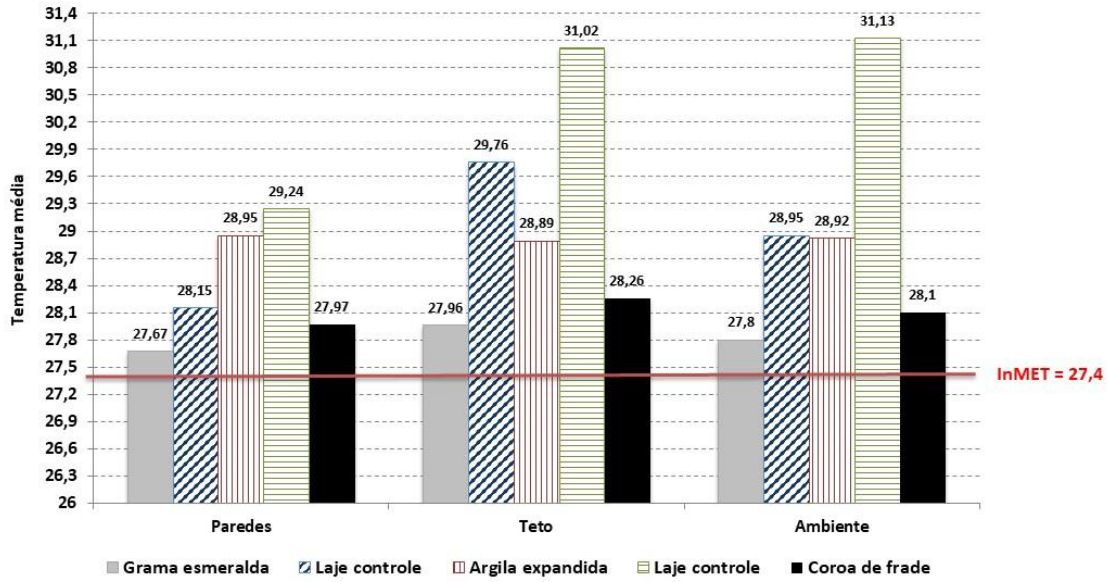


Observação: temperatura média das paredes = TMP | temperatura média do teto = TMT | temperatura média do ambiente = TMA. Fonte: Autora (2020).

Sobre o desempenho observado no horário II.3 (de 16:00 às 23:59h), os resultados estão apresentados na Figura 55. Considerando a temperatura média das paredes (TMP), em relação em relação à laje controle 1 (CT 02), a cobertura com grama Esmeralda (CT 01) reduziu a temperatura em 0,48ºC, enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade (CT 05) reduziu a temperatura em 0,18ºC. Já a redução da argila expandida em relação à laje de controle 2 (CT 04) foi de 0,29ºC. No que se refere à temperatura dos tetos (TMT), em relação à laje controle 1 (CT 02), a cobertura com grama Esmeralda (CT 01) reduziu significativamente a temperatura em 1,80ºC enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade reduziu a temperatura em 1,50ºC, ambas demostrando-se bastante eficientes nesse horário do dia. A argila expandida (CT 03) também mostrou-se bastante eficiente, reduzindo a temperatura em 2,13ºC em relação à laje controle 2 (CT 04). Analisando a temperatura média do ambiente (TMA), em relação à laje controle 1 (CT 02), a redução de temperatura das Células-Teste com grama Esmeralda (CT 01) e com Coroa-de-Frade (CT 05) foi de 1,15ºC e 0,85ºC, respectivamente, e na comparação da argila

expandida (CT 03) com a laje de controle 2 (CT 04), a redução foi de 2,21ºC. Conclui-se que no horário de 16:00 às 23:59h, a cobertura com grama Esmeralda foi mais eficiente na redução da TMP e enquanto a argila apresentou melhores resultados para a TMT e TMA, todas com diferenças estatisticamente significante.

Figura 55 - Médias da temperatura das paredes, temperatura do teto e temperatura do ambiente, no horário II.3 (de 16:00 às 23:59h), de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste.



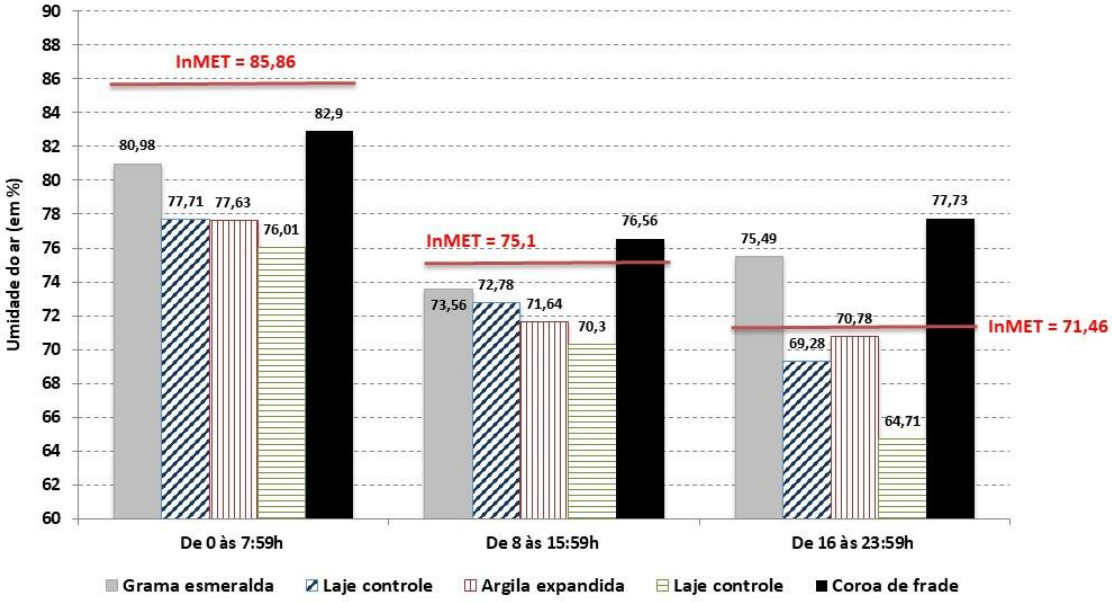
Observação: temperatura média das paredes = TMP | temperatura média do teto = TMT | temperatura média do ambiente = TMA. Fonte: Autora (2020).

Nos três estratos de horários (II.1, II.2 e II.3), ao se comparar os valores da temperatura externa, medida pelo INMET, com os valores das temperaturas internas às Células-Teste (paredes, teto e ambiente), foram observadas diferenças estatisticamente significantes ($p < 0,05$). Os valores obtidos das temperaturas internas às Células-Teste foram acima da média do INMET, como ilustrado nas Figuras 53,54 e 55.

Na Figura 56, considerando a umidade relativa do ar, no horário II.1 (de 0:00 as 7:59h), em relação à laje controle 1 (CT 02), a cobertura com grama Esmeralda (CT 01) apresentou aumento de 3,27% e a cobertura com Coroa-de-Frade aumentou 5,19%. Já a argila expandida, em relação à laje controle 2 (CT 04), aumentou apenas1,62%. Analisando a variação no horário II.2 (de 8:00 as 15:59h), em relação à laje controle 1 (CT 02), a cobertura com grama Esmeralda (CT 01) aumentou a umidade relativa do ar em 0,78% enquanto a cobertura com Coroa-de-Frade aumentou 3,78%. Já a argila expandida, em relação à laje controle 2 (CT 04), aumentou a umidade relativa do ar em 1,34%. No horário II.3 (de 16:00 as 23:59h), em relação à laje controle 1, a cobertura com grama Esmeralda (CT 01) e com Coroa-de-Frade (CT 05)

aumentaram a umidade relativa do ar em 6,21% e 8,45%, respectivamente, e na comparação da argila expandida (CT 03) com a laje controle 2 (CT 04), o aumento foi de 6,07%. Conclui-se que, em todos os estratos de hora considerados, a cobertura com Coroa-de-Frade (CT 05) apresentou maiores médias de umidade relativa do ar com diferenças estatisticamente significantes. Vale destacar que, nos horários com temperaturas mais altas do dia, II.2 e II.3 (de 8:00 às 15:59h e de 16:00 às 23:59h), a umidade relativa do ar medida no interior da Célula-Teste de cobertura com Coroa-de-Frade teve maior média quando comparada aos dados do INMET.

Figura 56 - Médias da umidade relativa do ar, horários II.1 (de 0:00 às 7:59h), II.2 (de 8:00 às 15:59h) e II.3 (de 16:00 às 23:59h), de outubro/2018 a julho/2019, nas Células-Teste.



Observação: umidade relativa média do ar = URM. Fonte: Autora (2020).

4.1.3.3 Etapa III - Análise da trajetória de (de)crescimento no intervalo de uma hora

Essa etapa visa comparar a variação de (de)crescimento médio horário para as variáveis de cada Célula-Teste, verificando o pressuposto de linearidade do modelo utilizado. Para isso, foram utilizados os dados do INMET (Figuras 44 e 47) e considerados os horários de análise: III.1) de 8:00 às 15:59h, e III.2) de 16:00 às 7:59h. Na Tabela 8 estão os valores da variação média (coeficiente β) das variáveis consideradas (temperatura e umidade relativa do ar), correspondendo β positivo ao aumento e β negativo à redução. É considerado, nesta pesquisa, sobre a trajetória de (de)crescimento no intervalo de uma hora, como "melhor desempenho":

- Horário III.1 (de 8:00 às 15:59h): menor aumento médio da temperatura e menor redução média da umidade relativa do ar;

  Horário III.2 (de 16:00 às 7:59h): maior redução média da temperatura e maior aumento médio da umidade relativa do ar.

No que se refere ao horário II.1 (de 8:00 às 15:59h), **sobre os dados de temperatura**, observa-se na Tabela 8 que a cobertura com menor média de aumento da temperatura das paredes foi a com grama Esmeralda (CT 01), com aumento médio de 0,44ºC da temperatura a cada hora no período, tendo diferença estatisticamente significante quando comparada às demais Células-Teste. Todas as Células-Teste tiveram diferença significativa na redução da TMP quando comparadas aos dados do INMET. No que se refere à temperatura do teto, a cobertura com grama Esmeralda e com Coroa-de-Frade tiveram os menores aumentos médios da temperatura a cada hora do período, de 0,39ºC e 0,42ºC respectivamente, tendo diferença estatisticamente significante quando comparadas com as demais Células-Teste. Não houve diferença estatisticamente significante entre a cobertura com grama Esmeralda (CT 01) e a com Coroa-de-Frade (CT 05). Exceto a Célula-Teste CT 04, laje controle 2, todas as outras tiveram diferença significativa na redução da TMT quando comparadas aos dados do INMET. Quanto à temperatura média do ambiente, a Célula-Teste com menor aumento da temperatura, a cada hora, no período, foi a grama Esmeralda, com aumento médio de 0,41ºC , tendo diferença estatisticamente significante quando comparada às demais Células-Teste. Todas as Células-Teste tiveram diferença significativa na redução da TMA quando comparadas aos dados do INMET (Figuras 57a, 58a e 59a).

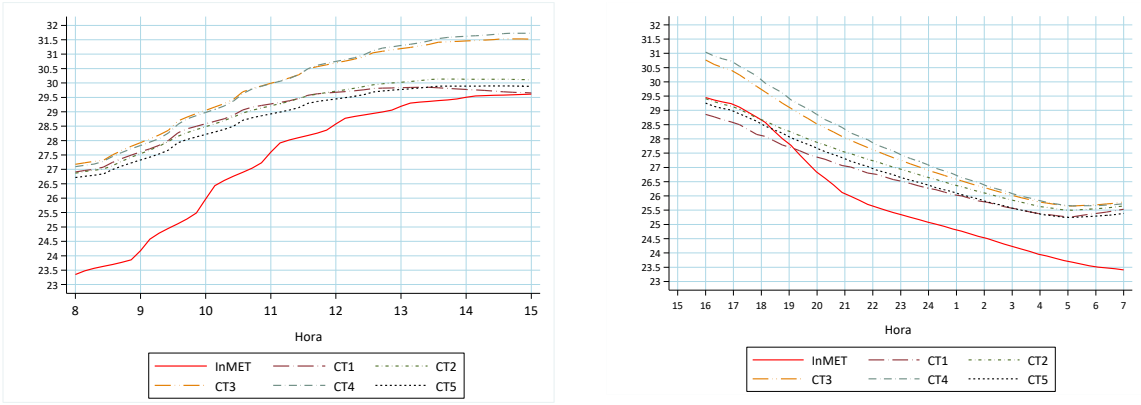
Tabela 8 - Variação média a cada hora do dia (coeficiente β) da temperatura (paredes, teto, ambiente) e umidade relativa do ar, horários III.1 (de 8:00 às 15:59h), e III.2 (de 16:00 às 7:59h), nas Células-Teste.

Célula-Teste	Coeficiente β (IC 95%)	Coeficiente β (IC 95%)	Coeficiente β (IC 95%)	Coeficiente β (IC 95%)
	Paredes	**Teto**	**Ambiente**	**Umidade**
Horário de 8:00 as 15:59h				
CT 01 (grama Esmeralda)	0,44 (0,42 – 0,45)	0,39 (0,37 – 0,40)	0,41 (0,40 – 0,43)	-1,80 (-1,86 a -1,74)
CT 02 (laje controle 1)	0,52 (0,50 – 0,53)	0,65 (0,64 – 0,66)	0,58 (0,57 – 0,60)	-2,37 (-2,43 a -2,32)
CT 03 (argila expandida)	0,70 (0,68 – 0,72)	0,54 (0,53 - 0,55)	0,62 (0,60 – 0,63)	-2,04 (-2,10 a -1,98)
CT 04 (laje controle 2)	0,75 (0,73 – 0,77)	0,97 (0,96 – 0,99)	0,86 (0,85 – 0,88)	-3,16 (-3,21 a -3,10)
CT 05 (Coroa-de-Frade)	0,51 (0,50 – 0,52)	0,42 (0,41 – 0,44)	0,47 (0,46 – 0,48)	-1,70 (-1,75 a -1,65)
INMET	0,98 (0,96 – 1,01)	0,98 (0,96 – 1,01)	0,98 (0,96 – 1,01)	-4,33 (-4,45 a -4,22)
Diferença entre os coeficientes β das Células-Teste (p < 0,05)	CT 01 x CT 02 CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04 CT 01 x CT 05 CT 03 x CT 02 CT 05 x CT 03 CT 05 x CT 04	CT 01 x CT 02 CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04 CT 03 x CT 02 CT 03 x CT 04 CT 05 x CT 02 CT 05 x CT 03 CT 05 x CT 04	CT 01 x CT 02 CT 01 x CT 03, CT 01 x CT 04 CT 01 x CT 05 CT 03 x CT 04 CT 05 x CT 02 CT 05 x CT 03 CT 05 x CT 04	CT 01 x CT 02 CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04 CT 03 x CT 04 CT 03 x CT 02 CT 03 x CT 04 CT 05 x CT 04
Diferença do coeficiente β de cada Célula-Teste com o coeficiente β do INMET (p < 0,05)	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste, exceto a CT 04	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste
Horário de 16:00 as 7:59h				
CT 01 (grama Esmeralda)	-0,24 (-0,25 a -0,24)	-0,19 (-0,20 a -0,19)	-0,22 (-0,22 a -0,21)	0,71 (0,69 – 0,73)
CT 02 (laje controle 1)	-0,27 (-0,21 a -0,27)	-0,36 (-0,34 a -0,36)	-0,32 (0,32 a -0,31)	1,05 (1,02 – 1,07)
CT 03 (argila expandida)	-0,35 (0,36 a -0,35)	-0,28 (-0,28 a -0,28)	-0,32 (-0,32 a -0,31)	0,87 (0,85 – 0,89)
CT 04 (laje controle 2)	-0,38 (-0,39 a -0,38)	-0,53 (-0,50 a -0,52)	-0,45 (-0,46 a -0,45)	1,41 (1,39 – 1,44)
CT 05 (Coroa-de-Frade)	-0,28 (-0,29 a -0,28)	-0,24(-0,24 a -0,23)	-0,26 (-0,26 a -0,25)	0,67 (0,65 – 0,69)
INMET	-0,42 (-0,42 a -0,41)	-0,42 (-0,42 a -0,41)	-0,42 (-0,42 a -0,41)	1,84 (1,80 – 1,87)
Diferença entre os coeficientes β das Células-Teste (p < 0,05)	CT 01 x CT 02 CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04 CT 01 x CT 05 CT 03 x CT 02 CT 03 x CT 05 CT 05 x CT 04	CT 01 x CT 02 CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04 CT 01 x CT 05 CT 03 x CT 04 CT 03 x CT 05 CT 05 x CT 02 CT 05 x CT 04	CT 01 x CT 02 CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04 CT 01 x CT 05 CT 03 x CT 04 CT 03 x CT 05 CT 05 x CT 02 CT 05 x CT 04	CT 01 x CT 02 CT 01 x CT 03 CT 01 x CT 04 CT 03 x CT 02 CT 03 x CT 04 CT 05 x CT 04 CT 05 x CT 02
Diferença do coeficiente β de cada Célula-Teste com o coeficiente β do INMET (p < 0,05)	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste	Todas as Célula-Teste

Observação: temperatura média das paredes = TMP | temperatura média do teto = TMT | temperatura média do ambiente = TMA | umidade relativa média do ar = URM. Fonte: Autora (2021).

Figura 57 – Trajetórias da variação média a cada hora do dia (coeficiente β) da temperatura média das paredes, horários III.1 (de 8:00 às 15:59h), e III.2 (de 16:00 às 7:59h), nas Células-Teste.

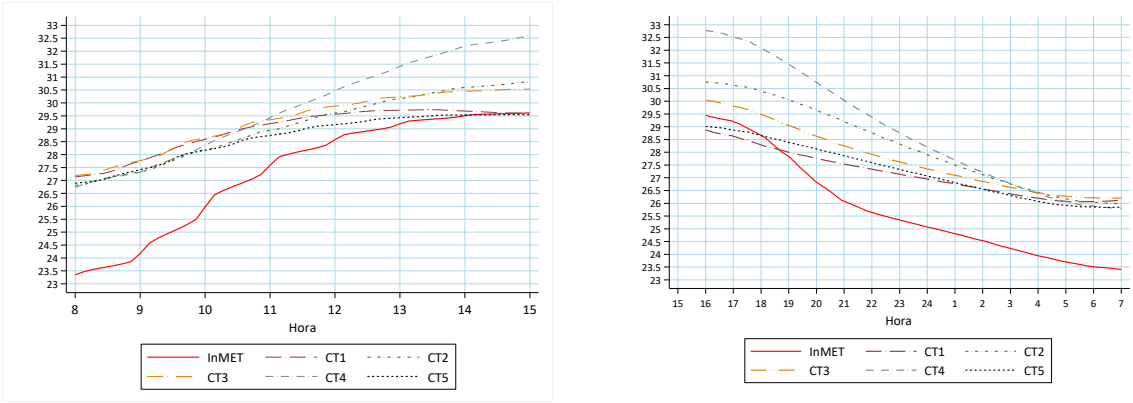
(a) Horário III.1 (de 8:00 às 15:59h). (b) Horário III.2 (de 16:00 às 7:59h).



Observação: temperatura média das paredes = TMP. Fonte: Autora (2021).

Figura 58 – Trajetórias da variação média a cada hora do dia (coeficiente β) da temperatura média do teto, horários III.1 (de 8:00 às 15:59h), e III.2 (de 16:00 às 7:59h), nas Células-Teste.

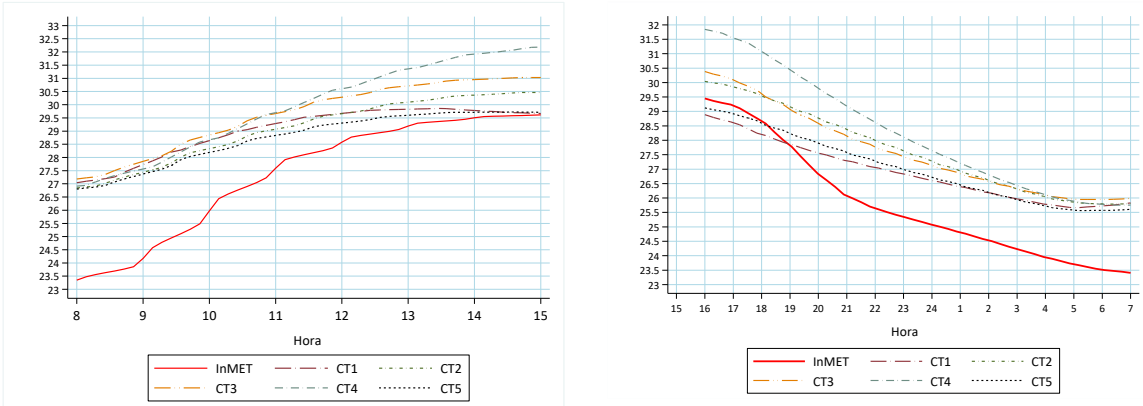
(a) Horário III.1 (de 8:00 às 15:59h). (b) Horário III.2 (de 16:00 às 7:59h).



Observação: temperatura média do teto = TMT. Fonte: Autora (2021).

Figura 59 – Trajetórias da variação média a cada hora do dia (coeficiente β) da temperatura média do ambiente, horários III.1 (de 8:00 às 15:59h), e III.2 (de 16:00 às 7:59h), nas Células-Teste.

(a) Horário III.1 (de 8:00 às 15:59h). (b) Horário III.2 (de 16:00 às 7:59h).



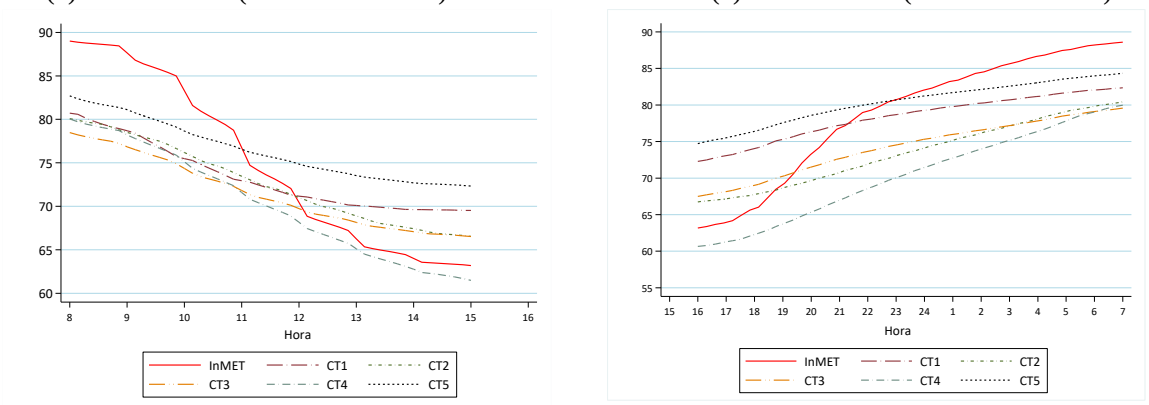
Observação: temperatura média do ambiente = TMA. Fonte: Autora (2021).

No que se refere ao horário II.2 (de 16:00 às 7:59h), Tabela 8, **sobre os dados de temperatura**, para as três medidas (paredes, teto e ambiente), a argila expandida foi a que apresentou maior redução na média da temperatura ao longo do período. Isso pode ser explicado pelo fato de a temperatura no período anterior estar mais elevada que nas Células-Teste com grama Esmeralda (CT 01) e com Coroa-de-Frade (CT 05). Todas as Células-Teste tiveram diferença significativa quando comparadas aos dados do INMET. Conclui-se que a variação de temperatura, ao longo do dia, da argila expandida é maior que as coberturas vegetais investigadas, que conseguem manter variações menores (Figuras 57b, 58b e 59b).

Com relação à **umidade relativa do ar,** no que se refere ao horário II.1 (de 8:00 às 15:59h), a cobertura com grama Esmeralda e a com Coroa-de-Frade tiveram as menores médias de redução da umidade a cada hora do dia, com valores iguais a -1,80% e -1,70%, respectivamente, tendo diferença estatisticamente significante quando comparadas às demais Células-Teste. No que se refere ao horário II.2 (de 16:00 às 7:59h) , a argila expandida teve a maior média de aumento a cada hora do dia de 1,41%. Em ambos os horários, todas as Células-Teste tiveram diferenças significativas quando comparadas aos dados do INMET (Figura 60).

Figura 60 - Trajetórias da variação média a cada hora do dia (coeficiente β) da umidade relativa do ar, horários III.1 (de 8:00 às 15:59h), e III.2 (de 16:00 às 7:59h), nas Células-Teste.

(a) Horário III.1 (de 8:00 às 15:59h). (b) Horário III.2 (de 16:00 às 7:59h).



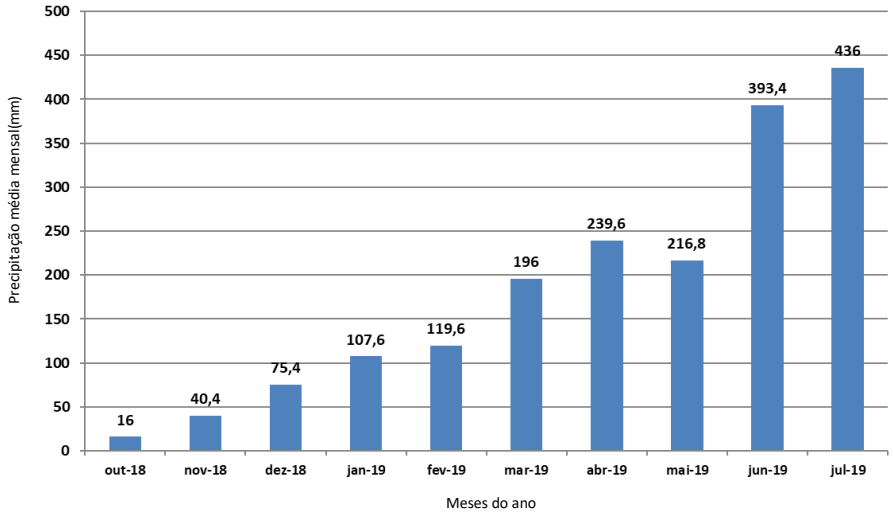
. Fonte: Autora (2021).

4.2 Desempenho Hidrológico (Análise do balanço hídrico)

Com a realização do experimento de aspersão da água sobre as coberturas, simulando a chuva, foram coletados os dados para realização do balanço hídrico. Para definição da vazão de água aspergida sobre as coberturas, considerou-se os valores de precipitação no período de outubro de 2018 a julho de 2019. Assim sendo, com base nos dados do INMET, tem-se: média no período analisado de 196 mm; mês com menor volume mensal de chuvas, outubro de 2018;

e mês com maior volume de chuvas, julho de 2019. Observa-se na Figura 61 que a partir de março de 2019 a precipitação média atingiu cerca de 200 mm, superando esta marca nos meses subsequentes, ou seja, no período entre outubro de 2018 e fevereiro e 2019 a média mensal de chuvas ficou abaixo de 196 mm, e no período de março de 2019 a julho de 2019, ficou acima do valor determinado a partir dos dados do INMET (196 mm). Assim, a intensidade da precipitação utilizada durante o experimento foi de 182,50 mm, próximo da média encontrada.

Figura 61 - Médias mensais de precipitação, mm, de outubro/2018 a julho/2019, no local da UETER.



Fonte: Autora (2020).

O experimento para realização do balanço hídrico nas Células-Teste foi realizado no dia 21/11/2019, iniciando às 10h e terminando às 13h. As condições iniciais adotadas foram: nível do reservatório sempre cheio, simulação de precipitação durante 5 minutos, ensaio com solo seco e ensaio com solo saturado apenas nas células que possuem cobertura (CT 01, CT 03 e CT 05). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 9.

Iniciando a análise pela operação do sistema hidráulico montado, observou-se a necessidade de reformulações em sua infraestrutura para melhor controle da variação da pressão de entrada (quanto maior a variação da pressão, maior o volume de entrada), portanto os dados apresentados podem ser aprimorados em estudos posteriores.

Considerando os volumes de entrada, foi percebido que esses tiveram variações representativas, 4,5 L no ensaio de solo seco e 2,1 L no de solo molhado. Isso se deve à dificuldade de controle da pressão de entrada do sistema. Portanto, para efeitos de cálculo do balanço hídrico, foram considerados o volume de entrada e o volume de saída até o término do escoamento. No ensaio de solo seco, os percentuais de retenção foram de 91% para a cobertura com grama Esmeralda, de 59% para a argila expandida e de 96% para a cobertura com Coroa-

de-Frade, já no ensaio de solo saturado, os percentuais foram de 20%, 23% e 62%, respectivamente. Os valores foram calculados em percentuais devido à variação dos volumes de entrada do sistema. Conclui-se, neste caso, que, tanto para solo seco como para solo saturado, a cobertura com Coroa-de-Frade apresentou melhor eficiência na retenção de água.

Tabela 9 – Dados do experimento para realização do balanço hídrico nas Células-Teste.

Variável	Grama Esmeralda	Argila expandida	Coroa-de-Frade
Solo seco			
Volume de entrada (L)	26,5	23,0	22,0
• Leitura hidrômetro inicial (L)	807589,5	807527,7	807456,8
• Leitura hidrômetro final (L)	807616,0	807550,7	807478,8
Variação da pressão de entrada (mca)	3,9	1,3	1
• Manômetro mínimo (mca)	8,6	8,8	8,9
• Manômetro máximo (mca)	12,5	10,1	9,9
Duração – cronômetro (hh:mm:ss)	0:07:53	0:05:14	0:05:03
• Tempo inicial de escoamento (hh:mm:ss)	0:03:56	0:01:32	0:03:52
• Tempo final de escoamento (hh:mm:ss)	0:11:49	0:06:46	0:08:55
Volume de escoamento (após 5min)	2,500	9,500	0,950
Solo saturado			
Volume de entrada (L)	25,0	22,9	24,5
• Leitura hidrômetro inicial (L)	807618,0	807552,4	807480,0
• Leitura hidrômetro final (L)	807643,0	807575,3	807504,5
Variação da pressão de entrada (mca)	3,3	1,6	2,8
• Manômetro mínimo (mca)	9,5	8,4	8,5
• Manômetro máximo (mca)	12,8	10,0	11,3
Duração – cronômetro (hh:mm:ss)	0:10:00	0:11:01	0:09:55
• Tempo inicial de escoamento (hh:mm:ss)	0:01:00	0:00:46	0:01:27
• Tempo final de escoamento (hh:mm:ss)	0:11:00	0:11:47	0:11:22
Volume de escoamento (após 5min)	20,000	17,500	9,250

Fonte: Autora (2019).

Com relação ao retardo do escoamento, quando o solo está seco, a cobertura com grama Esmeralda e a cobertura com Coroa-de-Frade apresentaram variações bem próximas para início do escoamento, 3’56” e 3’52” respectivamente, porém quando se trata de solo saturado, a cobertura com Coroa-de-Frade apresenta maior retardo no tempo de escoamento (1’27”). Na análise da velocidade do escoamento, os resultados para solo seco foram de 5,28 mL/s para a cobertura com grama Esmeralda, de 30,25 mL/s para a argila expandida e de 3,13 mL/s para a cobertura com Coroa-de-Frade. Os resultados para solo saturado foram 33,33 mL/s, 26,47 mL/s e 15,54 mL/s, respectivamente. Percebe-se que a cobertura com grama Esmeralda e a cobertura com Coroa-de-Frade possuem baixas velocidades de escoamento quando o solo está seco,

aumentando quando o solo está saturado. Já a argila expandida apresentou comportamento invertido, mostrando uma redução na velocidade quando está saturada. Conclui-se que, para todas variáveis analisadas (retenção da água, retardo no escoamento, e velocidade de escoamento), a cobertura com Coroa-de-Frade apresentou os melhores resultados.

4.3 Relação entre precipitação e temperatura

Nesta fase das análises busca-se verificar se há interferência da precipitação nas temperaturas interna e externa, evidenciando como a retenção hídrica atua no contexto da drenagem urbana, incorporando o benefício do conforto térmico através da saturação do solo. Para isso, considerando a precipitação média mensal, no período, determinada a partir dos dados do INMET, de 196 mm, sendo o mês de outubro de 2018 o de menor volume mensal de chuvas e o mês de julho de 2019 com maior volume, assim como observado na Figura 61 e na Tabela 10, os dados foram estratificados, tendo sido considerado na análise comparativa, os valores diários. Não foi possível realizar a comparação através de dados horários, pois os dados de precipitação são diários. No que se refere à temperatura interna, os valores apresentados na Tabela 10 foram obtidos através das médias dos valores registrados nos sensores no interior das Células-Teste com cobertura (CT 01, CT 03 e CT 05), desconsiderando as lajes de controle 1 e 2 por não possuírem propriedades de retenção hídrica. Observando os gráficos das Figuras 62 e 63, fica evidente que quanto maior a precipitação, menor a temperatura.

Tabela 10 – Médias de precipitação, e temperaturas externa e interna, de outubro/2018 a julho/2019.

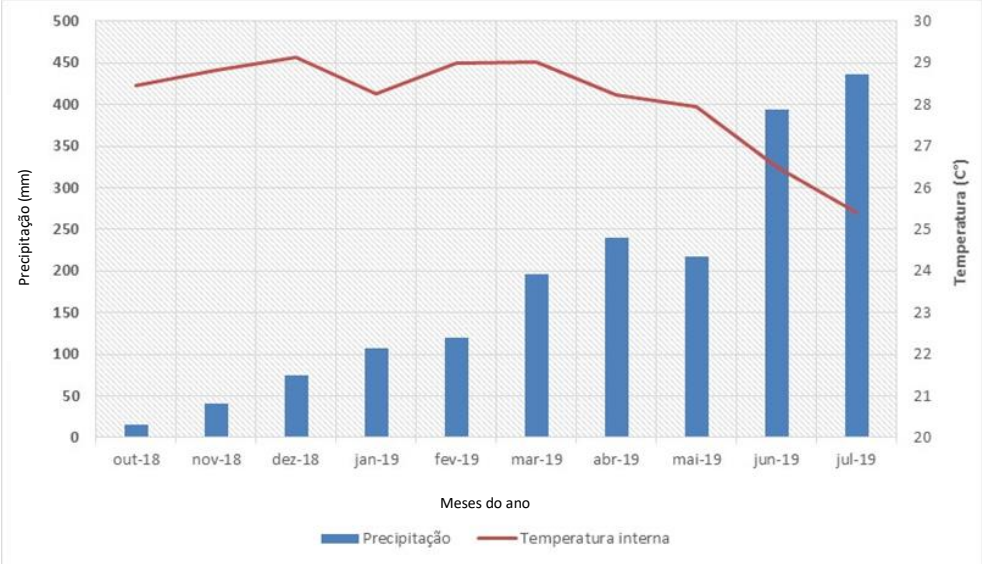
Mês/Ano	Precipitação (mm)	Temperatura	
		Externa (ºC)	Interna (ºC)
Outubro/2018	**16,00**	26,30	28,50
Novembro/2018	40,40	27,00	28,80
Dezembro/2018	75,40	27,10	29,10
Janeiro/2019	107,60	26,70	28,30
Fevereiro/2019	119,60	27,10	29,00
Março/2019	196,00	27,10	29,00
Abril/2019	239,60	26,50	28,20
Maio/2019	216,80	26,00	28,00
Junho/2019	393,40	24,80	26,50
Julho/2019	**436,00**	23,90	25,40

Fonte: Autora (2020).

Figura 62 – Precipitação (mm) e temperatura externa (ºC) da UETER de outubro/2018 a julho/2019.

Fonte: Autora (2021).

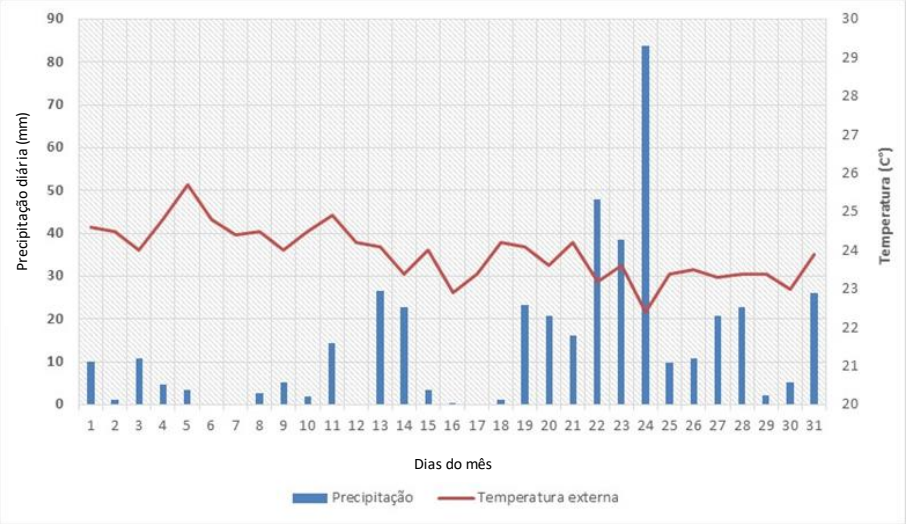
Figura 63– Precipitação (mm) e temperatura interna (ºC) das Células-Teste, de outubro/2018 a julho/2019.



Fonte: Autora (2021).

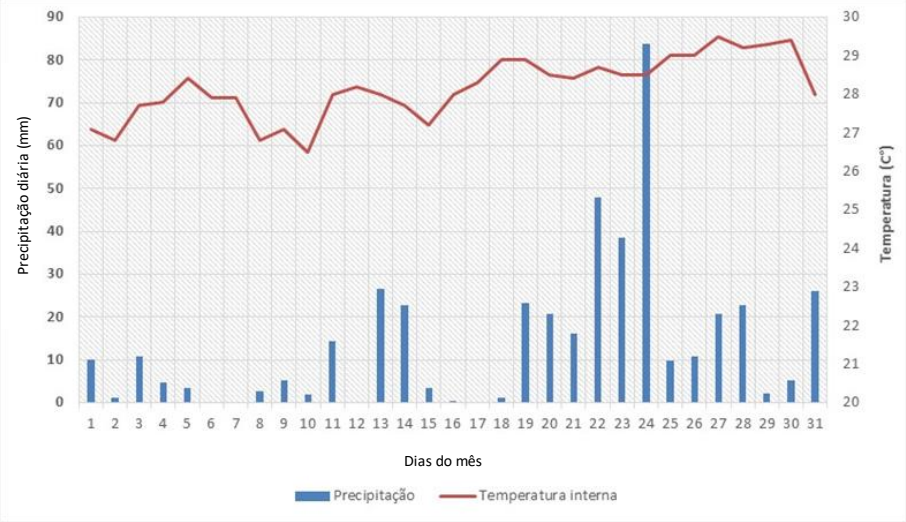
No espectro dos dados diários, sendo o mês de julho de 2019 o mais chuvoso, observa-se que a variação da temperatura externa (Figura 64) varia de acordo com a precipitação, onde após períodos de chuva a temperatura tende a baixar, onde ainda podemos destacar o dia 24 que teve o maior volume de chuva e a menor temperatura durante todo o mês. O mesmo não acontece com a temperatura interna (Figura 65) onde a menor temperatura do mês ocorreu no dia 10, que obteve baixa precipitação.

Figura 64 – Precipitação (mm) e temperatura externa (ºC) da estação Curado – código 82900 em julho/2019.



Fonte: Autora (2021).

Figura 65 – Precipitação (mm) e temperatura interna (ºC) das Células-Teste em julho/2019.

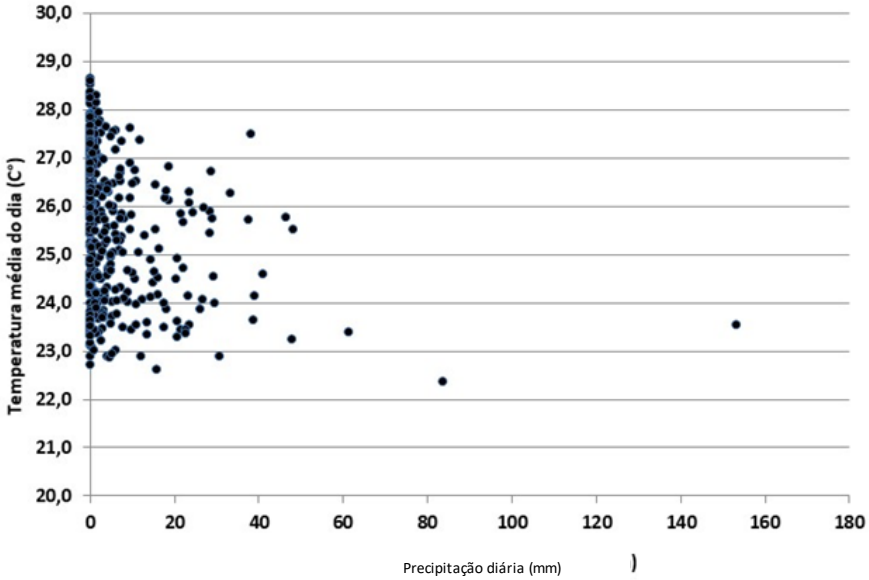


Fonte: Autora (2021).

Na análise complementar da correlação da precipitação de chuva com a variação da temperatura interna nos protótipos, foi considerada a soma diária de chuva (dados do INMET) e a média diária da temperatura interna (dados de campo). Correlacionar duas variáveis não significa que uma é causa da outra. A causalidade é definida a partir da escolha de variáveis de um mesmo processo e para verificar na prática a relação de causa e efeito é necessário analisar numericamente, através do cálculo do coeficiente de correlação; e graficamente, através do diagrama de dispersão. Analisando a relação da variação do volume de chuva diário com a temperatura interna, encontrou-se uma correlação negativa (enquanto uma variável aumenta a

outra diminui) de -0,27 o que demonstra uma pequena interferência na redução da temperatura interna no dia com o aumento do volume pluviométrico. A Figura 66 também demostra que o período analisado obteve, na maioria dos dias, médias pluviométricas inferior a 20mm e uma amplitude térmica média de 5ºC, variando de 23ºC a 28ºC o que demostra uma reduzida causalidade da precipitação sobre a temperatura. Conclui-se que para identificar uma correlação mais precisa, é necessário analisar os dados de um período maior.

Figura 66 - Correlação da precipitação média diária com a temperatura interna média diária, de julho/2018 a agosto/2019.



Fonte: Autora (2021).

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa abordou o desempenho de diferentes coberturas em comparação à laje impermeabilizada sob os aspectos do desempenho térmico e hidrológico. Com o planejamento e a construção dos protótipos, realizados no âmbito desta pesquisa, ficou evidente a importância dos aspectos arquitetônicos, bem como a escolha dos materiais, na observância dos desempenhos térmico e hidrológico pretendidos.

As definições obtidas para um telhado ecológico incluem tipologias que contribuem para a sustentabilidade do edifício e suas interações com o meio ambiente. A utilização de tecnologias ambientais, de processos de produção ou reciclagem de materiais e de benefícios gerados ao ambiente construído é o que faz um telhado ser ecológico. Dentre os diversos benefícios que os telhados ecológicos podem proporcionar, foram escolhidos o conforto térmico, por se relacionar com o consumo de energia e as ilhas de calor; e a retenção de água pluvial, pela ligação que tem com o retardo do escoamento superficial e com as enchentes; ambos problemas dos grandes centros urbanos.

Na análise do conforto térmico dos ambientes internos, a escolha das variáveis e a correta medição foram de suma importância para estruturação do banco de dados, uma vez que foram monitorados por dez meses (de outubro/2018 a julho/2019). A escolha do programa estatístico e definição da estratificação em meses, dias e horários, refinaram os dados e aprofundaram os resultados. Considerando que a temperatura média do ambiente reflete a média de todas as temperaturas aferidas, nos meses com temperaturas mais altas, a argila expandida se destacou apresentando uma redução de 0,66ºC enquanto que nos meses com temperaturas mais baixas, a cobertura com Coroa-de-Frade apresentou melhores resultados para todas as temperaturas com uma redução de 0,70ºC na temperatura média do ambiente. Com relação ao aumento da umidade, a cobertura com Coroa-de-Frade foi mais eficiente tanto nos meses com temperaturas mais altas (4,7%) como nos meses com temperaturas mais baixas (8,40%).

Na análise considerando os horários do dia, a cobertura com Coroa-de-Frade foi mais eficiente na redução de todas as temperaturas de 0:00 às 7:59h (temperatura decrescente) e na redução da temperatura média do ambiente no horário de 8 às 15:59h (temperatura crescente). Já no horário de 16:00 às 23:59h (temperatura decrescente), a cobertura com argila expandida apresentou melhor desempenho na redução da temperatura média do ambiente (2,21ºC). Em todos os estratos, a cobertura com Coroa-de-Frade apresentou maiores médias de umidade, com destaque para o horário das 16:00 às 23:59h com 8,45%. Diante desses resultados, observou-se

que nos períodos com temperaturas decrescentes obteve-se diferentes respostas. Então, pode-se sugerir que a cobertura com Coroa-de-Frade responde melhor quando o decréscimo de temperatura é mais suave enquanto que a argila expandida responde melhor à quedas de temperaturas mais acentuadas. Sobre a trajetória de (de)crescimento, nos dois cenários analisados: (I) 8:00 às 15:59h, menor aumento médio da temperatura; e (II) 16:00 às 7:59h, maior redução média da temperatura; a cobertura com grama Esmeralda apresentou menores variações das temperaturas enquanto a cobertura com cacto apresentou melhores resultados nas variações da umidade.

Verifica-se que para cada situação e variável analisada, um tipo de telhado ecológico oferece melhor resposta. Considerando as variáveis de temperatura média das paredes e temperatura do teto os resultados tiveram maior oscilação entre os tipos de telhados ecológicos aplicados. De modo geral, evidencia-se que a cobertura com Coroa-de-Frade possui melhor desempenho no aumento da umidade, a cobertura com argila expandida responde melhor em temperaturas mais altas e a cobertura com grama Esmeralda atua melhor no controle da variação de temperatura. Portanto, são muitas as variáveis a levar em consideração no momento da utilização de um telhado ecológico e o objetivo a que se pretende de sua aplicação no edifício.

Com relação a variação hidrológica, foi comprovado a eficácia da aplicação dos telhados ecológicos na retenção das águas pluviais, no retardo do escoamento superficial e na velocidade de escoamento. A cobertura com Coroa-de-Frade apresentou os melhores resultados para todas variáveis analisadas tanto no cenário seco como no saturado, induzindo a se pensar que espécies com raízes profundas e que com maior poder de absorção de água são mais eficazes neste quesito. Na análise da velocidade do escoamento, percebeu-se que os telhados vegetados (com grama e cacto) reduzem as velocidades de escoamento quando o solo está seco e aumentam quando o solo está saturado. Já o telhado com material poroso (argila expandida) apresentou um comportamento invertido, mostrando uma redução na velocidade de escoamento quando saturado, esse efeito pode ser atribuído ao atrito com a superfície. Apesar dos telhados verdes possuírem destaque dentre os diversos telhados ecológicos, foi importante a utilização de outra tipologia (argila expandida) para verificar e comparar a eficiência de outros materiais.

Todos os dados obtidos podem servir como indicadores para utilização em modelos computacionais de simulação de mapas térmicos e drenagem urbana, conferindo os efeitos da aplicação dos telhados ecológicos em larga escala. Com isso é possível contribuir com informações para implementação da Lei Municipal Nº18.112 (RECIFE, 2015), que dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações da cidade do Recife, através da adoção

de telhados verdes e de construção de reservatórios de acúmulo ou retardo do escoamento de águas pluviais.

Por fim, conclui-se que telhados ecológicos funcionam como amortecedor de temperatura interna de ambientes e contribuem para a retenção hídrica de água de chuva e que a pesquisa realizada atendeu aos objetivos propostos e identificou um amplo campo de pesquisa sobre a aplicação de telhados ecológicos, como tecnologia ambiental de promoção a sustentabilidade das edificações e das relações com o meio ambiente.

6 TRABALHOS FUTUROS

A estruturação desta pesquisa foi pensada de forma a possibilitar o desenvolvimento de diversas outras pesquisas. O modelo das Células-Teste e de seus componentes permite a aplicação e o estudo de diversos tipos de telhados ecológicos e de suas interferências na edificação e no meio ambiente. Além de novos estudos de desempenho térmico e hidrológico com outros tipos de telhados ecológicos, sugere-se estudos relativos à: aprofundamento dos estudos de simulação de chuva e verificação de balanço hídrico; estudos de qualidade da água de escoamento e possibilidade de reutilização para rega; acompanhamento da integridade da estrutura da edificação, relacionada com infiltrações e necessidade de manutenções; estudos de viabilidade técnico econômica relacionadas a sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado; estudo de variáveis relacionadas ao conforto acústico; correlacionar os dados obtidos nos estudos desta unidade experimental com locais de mesmo clima; extrair indicadores que possam ser utilizados em estudos de modelagem computacional para verificação dos impactos da aplicação dos telhados ecológicos em larga escala. Relativo ao banco de dados obtido durante o desenvolvimento desta pesquisa sugere-se ainda: estudos de correlação de diferentes variáveis (radiação, velocidade vento x temperatura e umidade) e estudos individualizados das temperaturas das paredes de acordo com a orientação solar. Por fim, identifica-se a possibilidade de estudos adicionais sobre fachadas ecológicas. De acordo com o exposto, podemos observar que a contribuição desta pesquisa vai muito além do que já foi feito e abre um grande campo para pesquisas que venham evidenciar as vantagens e desvantagens dos telhados ecológicos.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto 02:135.07-001 Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades**, 7 p., 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações – Métodos de cálculo da transmitância térmica**, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações, 34 p., 2005.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-3: **Edificações habitacionais — Desempenho Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos**, 42p., 2013.

AKBARI , H.; POMERANTZ, M.; TAHA,H.. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. **Solar Energy**, 70 (3): 295–310, 2001.

ALMEIDA, I. S.; COSTA, I. M. D.; RIBEIRO, M. M. O.; HEINRICH, M.; MOREIRA, Q.; ARAÚJO, P. J. P.; LEITE, M. S.. Reciclagem de Garrafas PET para Fabricação de Telhas. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT**, 1(3): 83–90, 2013.

ALMEIDA, S. P.C.; BRITO, G. P.; SANTOS, S. M.. Revisão Histórica dos Telhados Verdes: da Mesopotâmia aos dias atuais **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 2 (1): 042-051, 2018.

AQUINO, A. F. S.. **Avaliação térmica em telhas com material reciclado para serem utilizadas em construções rurais**. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Alegrete-RS, 35 p., 2017.

ASCIONE, F.; BIANCO, N.; ROSSI, F.; TURNI, G.; VANOLI, G. P.. Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? **Applied Energy,** 104: 845–859, 2013.

AZEVEDO, P. R. M.. **Introdução à estatística** [recurso eletrônico] - 3. ed. - Natal, RN : Editora UFRN, 235p., 2016.

BACOVIS, T. M.; NAGALLI, A.. Avaliação do desempenho hidrológico de protótipo de telhado verde extensivo. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, 11 (Supl. 1): S35-S42, 2013.

BÄR, B. V.; TAVARES, S. F.. Estado da arte do comportamento hidrológico de telhados verdes no brasil: uma revisão sistemática. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, 8 (4): 257-271, 2017.

BRASIL. **Lei Nº. 6.938**, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília-DF, de 31 de agosto de 1981.

BELEM, A. L. G.; BOROWSKI, B.; MACHADO, M. M.. Globalização e consumo: um estudo dos telhados brancos como alternativa socioambiental. **Sustainability in Debate**, 11 (1): 144-163, 2020.

CAIXA. Caixa Econômica Federal, 2021. Selo Casa Azul Caixa. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/sustentabilidade/negocios-sustentaveis/selo-casa-azul-caixa. Acesso em 17/12/2021.

CALLEGARI-JACQUES, S. M.. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 255 p., 2004.

CANOAS. **Lei Municipal Nº 5.840** de 27 de maio de 2014. Dispõe sobre a criação de telhados verdes e seus critérios técnicos especificados nesta lei e dá outras providências. Canoas – RS. Diário Oficial de Canoas, 2014.

CARVALHO, M. A. G.. **Métodos Estatísticos para Análise de Dados de Monitoração Ambiental**. Tese (Doutorado), Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Aplicações, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo – SP, 134 p., 2003.

CLARK, C.; ADRIAENS, P.; TALBOLT, F. B.. Green Roof Valuation: A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits. **Environmental Science & Technology**, [S.I.], 42 (6): 2155-216, 2008.

CONCEIÇÃO, M. N.; ALVES, S. P.; TELATIN JÚNIOR, A.; SILVA, I. J. O.; PIEDADE, S. M. S.; SAVASTANO JÚNIOR, H.; TONOLI, G.. Desempenho de telhas de escória de alto forno e fibras vegetais em protótipos de galpões. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 12 (5): 536–539, 2008.

COPEL viabiliza energia solar no prédio da Prefeitura de Curitiba. Prefeitura de Curitiba, 2021. Disponível em: http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=102435&tit=Copel-viabiliza-energia-solar-no-predio-da-Prefeitura-de-Curitiba. Acesso em 26/05/2021.

COUTTS, R. S. P.. A review of Australian research into natural fibre cement composites. **Cement and Concrete Composites**, 27 (5): 518-526, 2005.

EUROPEAN COMMISSION. **9. Green and Brown Roofs**, 18 p., 2012. Disponível em: http://www.elios-ec.eu/sites/default/files/pdf/Case-Study-9-Green-or-Brown-roofs.pdf. Acesso em: 07 de abril de 2021.

FERRAZ, I. L.. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo-SP, 133 f., 2012.

FERREIRA, C. A.; MORUZZI, R. B.. Considerações sobre a Aplicação do Telhado Verde para Captação de Água de Chuva em Sistemas de Aproveitamento para Fins não Potáveis. IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, **Anais..**, Campo Grande – MS, 10 p., 2007.

FERREIRA, V.. **Estatística básica**. Rio de Janeiro: SESES, 184 p., 2015.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R.. **Manual de conforto térmico**. 5ª ed. São Paulo: Studio Nobel, 244 p.,2001.

GAGLIANO, A.; DETOMMASO, M.; NOCERA, F.; EVOLA, G.. A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. **Building and Environment**, 90: 71-81, 2015.

GALINDO, A. S.. **Eficiência energética de telhados no Brasil**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Recife-PE, 135 f., 2015.

GBC BRASIL. Green Building Council Brasil, 2021. Certificações. Disponível em: https://www.gbcbrasil.org.br/certificações/. Acesso em 12/11/2021.

GEROLINETO, E.. **Desenvolvimento da Grama Esmeralda (*Zoysia Japonica Steud*) sob dois Manejos de Irrigação**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" - UNESP, Jaboticabal-SP, 51 f., 2008.

GUARULHOS. **Lei Municipal Nº 7.031** de 17 de abril de 2012. Dispõe sobre a instalação do "Telhado Verde" nos locais que especifica, e dá outras providências. Guarulhos, SP. Diário Oficial de Guarulhos, 2012.

HODKINSON CONSULTANCY. **Biodiversity benefits of brown roofs**. 2010. Disponível em: https://www.hodkinsonconsultancy.com/biodiversity-benefits-of-brown-roofs/. Acesso em: 08 de deembro de 2021.

HORTA, R. A. S.; PENNA, R. M.; OLIVEIRA, R. D.. Viabilidade técnica e econômica de telhas fotovoltaicas aplicadas a uma residência unifamiliar em Belo Horizonte-MG. XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, João Pessoa-PB, **Anais..**, 12 p., 2019.

ISHIMATSU, K.; ITO, K.. Brown/biodiverse roofs: a conservation action for threatened brownfields to support urban biodiversity. **Landscape and Ecological Engineering**, 9: 299-304, 2013.

ISMAIL, A.; SAMAD, M. H. A.; RAHMAN, A. M. A.. The Investigation of Green Roof and White Roof Cooling Potential on Single Storey Residential Building in the Malaysian Climate. **World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Architectural and Environmental Engineering**, 5 (4): 168-176, 2011.

JACOBSON, M. Z.; HOEVE, J. E. T.. Effects of Urban Surfaces and White Roofs on Global and Regional Climate. **Journal of Climate**, 25 (3): 1028-1044, 2012.

JIM, C.Y.. Air-conditioning energy consumption due to green roofs with different building thermal insulation. **Applied Energy,** 128: 49–59, 2014.

KLEIN, P. M.; COFFMAN, R.. Establishment and performance of an experimental green roof under extreme climatic conditions. **Science of the Total Environment,** 512–513: 82–93, 2015.

KONASOVA, S.; VASCONCELLOS, V. M. N.. Telhados verdes como contribuição para amenização de ilhas de calor em clima tropical quente úmido: um estudo comparativo em Copacabana, na cidade do Rio de Janeiro. Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, João Pessoa-PB, **Anais..,** - 11p., 2016.

KOZMHINSKY, M.; PINHEIRO, S. M. G.; EL-DEIR , S. G.. **Telhados verdes: uma iniciativa sustentável**. Editora Universitária da UFRPE. Recife-PE, 65 p., 2016.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; ABREU, A. L. P.; CARLO, J. C.; BATISTA, J. O.; MARINOSKI, D. L.; NARANJO, A.; DUARTE, V. C. P.. **Desempenho térmico de edificações: Apostila do curso de Engenharia Civil**, ECV 5161. 7ª edição. Florianópolis: UFSC, 239 p., 2016. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161_v2016.pdf. Acesso em: 08 de dezembro de 2021.

LIMA, G. C. O.. **Avaliação do desempenho de telhados verdes: capacidade de retenção hídrica e qualidade da água escoada**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Caruaru – PE, 128 f., 2013.

LORIMER J.. Living roofs and brownfield wildlife: towards a fluid biogeography of UK nature conservation. **Environment and Planning A**, 40:2042–2060, 2008.

MAGALHÃES, R. J.. **Desempenho térmico de telhas: um estudo comparativo entre telhas ecológicas e telhas de fibrocimento**. Trabalho de Conclusão de Curso - Publicação ENC. PF-001A/07, Curso de Engenharia Civil, Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia-GO, 53 p., 2018.

MATHEUS, C.; CAETANO, F. D. N.; MORELLI, D. D. O.; LABAKI, L. C.. Desempenho térmico de envoltórias vegetada sem edificações no sudeste brasileiro. **Ambiente Construído**, 16 (1): 71-81, 2016.

MONTARROYOS, Ulisses. Estatística conhecendo o Stata. Apostila de aula. 130p.2019.

NUNES, C. 6 exemplos de telhados verdes em Chicago. Sustentaqui, 2015. Disponível em: https://sustentarqui.com.br/6-exemplos-de-telhados-verdes-em-chicago/. Acesso em 28/09/2021.

OLIVEIRA, E. W. N.. **Telhados verdes para habitações de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro-RJ, 86 f., 2009.

OLIVEIRA, N. B.; OLIVEIRA, J. F. V.; SANTOS, P. L. F.; GAZOLA, R. P. D.; CASTILHO, R. M. M.. **Avaliação do Estado Nutricional de Três Gramados Ornamentais em Ilha Solteira–SP: Um Estudo de Caso**. Revista LABVERDE, 9 (1): 96-119, 2018.

OLIVEIRA, P. L.; SOARES, R. G.; SANTOS, S. X.. Desempenho térmico das edificações: estudo comparativo entre o telhado verde e outros tipos de coberturas. **Revista Petra**, 2 (1): 36-55, 2016.

PAIM, M. P.; MARINOSKI, D. L.; GUTHS, S.. Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados frios em uma residência unifamiliar. XVII Congresso Ibérico y XIII Congresso Ibericoamericano de Energia Solar, Lisboa, Portugal, **Anais..**, 1107-1114, 2020.

PARAÍBA. **Lei Estadual nº 10.047**, de 09 de julho de 2013. Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do "telhado verde" nos locais que especifica, e dá outras providências. João Pessoa, PB. Diário Oficial do Estado da Paraíba, 2013.

PECK, S. W.; CALLAGHAN, C.; KUHN, M. E.; BASS, B.. **Greenbacks from green roofs: Forging a new industry in Canada.** Canada Mortgage and Housing Corporation, Ottawa, Canada, 78 p., 1999.

PERSCH, C. G.. **Efeito de Escala em Telhados Verdes Extensivos**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria UFSM, Santa Maria - RS, 147 f., 2019.

POLETO, C.. **Estatística ambiental**. Porto Alegre - RS: Escola Técnica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 49 p., 2008.

PORTO ALEGRE. **Lei Complementar Nº 434** de 01 de dezembro de 1999. Dispõe sobre o desenvolvimento urbano no município de porto alegre, institui o plano diretor de desenvolvimento urbano ambiental de porto alegre e dá outras providências. Porto Alegre – RS. Diário Oficial de Porto Alegre, 1999.

PROCELINFO. Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética, 2021. Página inicial. Disponível em: http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={8E03DCDE-FAE6-470C-90CB-922E4DD0542C}. Acesso em17/12/2021

RECIFE. **Lei municipal nº18.112** de 15 de janeiro de 2015. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. Recife, PE: Diário Oficial de Pernambuco, 2015.

REIS, P.. **Telhas solares fotovoltaicas da Eternit testadas na Universidade de Santa Catarina**. UFSC, 2020. Disponível em: https://www.portal-energia.com/telhas-fotovoltaicas-eternit-testadas-universidade-santa-catarina. Acesso em 25/05/2021.

RIBEIRO, M. S.; COELHO, T. T.. **Telhado verde. Desenvolvimento de um software para cálculo de peso e retenção de água pluvial.** Monografia (Curso de Engenharia Civil), Faculdade Doctum, Juiz de Fora-MG, 53f., 2020.
RIO DE JANEIRO. **Decreto Municipal Nº. 35.745**, que cria a qualificação QUALIVERDE e estabelece critérios para sua obtenção. Rio de Janeiro – RJ, 06 de junho de 2012.

ROCHA, J. C.; JOHN, V. M.. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional - Coletânea HABITARE**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ANTAC, Porto Alegre – RS, Volume 4: 272 p., 2003.

ROCHA, R. S. T. M.. **Desempenho térmico de telhado verde ecológico de baixo custo em clima semiárido**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Caruaru-PE,133 f., 2020.

ROGERS. J.. Green, brown or grey: green roofs as 'sustainable' infrastructure. **Sustainable Development and Planning**, 173: 323-333, 2013.

RONCOLATTO A. R.; TANIGUCHI, F. K.; HAX, G. R. T.; PEREIRA, R. M. R.; ARCHILLI, G. B.; SOUZA, T. F. B.. Projeto Telhados Solares – Metodologia para elaboração de projetos, montagem e inspeção de instalações fotovoltaicas. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado-RS, **Anais..**, 10 p., 2018.

SALVADOR. **Decreto Municipal Nº. 29.100**, que regulamenta o art. 5º da Lei nº 8.474, de 02 de outubro de 2013, e institui o Programa de Certificação Sustentável "IPTU VERDE" em edificações no Município de Salvador, que estabelece benefícios fiscais aos participantes do programa, assim como o art. 5º da Lei 8.723 de 22 de dezembro de 2014 e dá outras providências. Salvador – BA, de 06 de novembro de 2017.

SANTOS, G. C.. **Desempenho térmico de telhados verdes no agreste pernambucano**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Caruaru-PE, 95 f., 2016.

SÃO PAULO. **Decreto Nº 55.994** de 10 de março de 2015. Introduz alterações no artigo 4º do Decreto Nº 53.889, de 8 de maio de 2013, que regulamenta o Termo de Compromisso Ambiental - TCA. São Paulo – SP. Diário Oficial de São Paulo, 2015.

SAVASTANO JÚNIOR., H.; NOLASCO, A. M.; LUZ, P. H. C.. Identificação e caracterização de resíduos agroindustriais, para uso na construção civil. VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Qualidade no Processo Construtivo, Florianópolis-SC, **Anais..**, 885-982, 1998.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; AGOPYAN, V.; NOLASCO, A. M.; PIMENTEL, L.. Plant fibre reinforced cement components for roofing. **Construction and Building Materials**, 13 (8): 433-8, 1999.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; MALDONADO, Y. J. S.; JOHN, V. M.; DIAS, C. M. R.. The potential of extrusion process for building fiber cement materials using FGM concept. Multiscale and Functionally Graded Materials Conference, Hononolu, Hawaii, **Anais..**, 2006.

SAKAGAMI, T. A.. **Desempenho hidrológico de telhado verde extensivo**. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista "Julio De Mesquita Filho", Rio Claro – SP, 43 p., 2016.

SCHELB, C. G.. **Avaliação de Tipologias Construtivas nos Critérios de Sustentabilidade - Estudo de Casos –Telhas**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PPG-FAU, Universidade de Brasília-DF, 137 p., 2016.

SHIRAKAWA, M. A.; TAVARES, R. G.; GAYLARDE, C. C.; TAQUEDA, M. E. S.; LOH, K.; JOHN, V. M.. Climate as the most important factor determining anti-fungal biocide performance in paint films. **Science of the Total Environment**, 408 (23): 5878-5886, 2010.

SILUK, A. R.. **Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos aplicados à edificação**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria-RS, 134 p., 2017.

SILVA, K. C. P.; CAMPOS, A. T.; JUNIOR, T. Y.; CECCHIN, D.; LOURENÇONI. D.; FERREIRA, J. C.. Reaproveitamento de resíduos de embalagens Tetra Pak-® em coberturas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental Campina Grande. 19 (1): 58–63, 2015.

SILVA, L. J. D.; FRANCISCON, M. S. C.; ROCHA, R. C.. Utilização de Telhas de PET Reciclado na Construção Civil. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, 6 (1): 44-49, 2010.

SIQUEIRA, T. C. P. A.; AKUTSU, M.; LOPES, J. I. E.; SOUZA, H. A.. Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações. **Rem: Revista Escola de Minas**, 58 (2): 133-138, 2005.

STATA. Stata versão 17, 2021. Página inicial. Disponível em: https://www.stata-brasil.com/software/stata.html/?utm_medium=adwords&utm_campaign=statabrazil&utm_source=software&gclid=Cj0KCQjw-LOEBhDCARIsABrC0Tmf06WGSd3OgiXlERaVwHpKMx4FUbGSaFSioMB2ph1-sAYQsLkdPDwaAlx0EALw_wcB. Acesso em 10/12/2021.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. S.; PICCILLI, D. G. A.; PERSCH, C. G.. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, 14 (1): 139-154, 2014.

VANZOLINI. Fundação Vanzolini, 2021. Certificação AQUA-HQE. Disponível em: https://vanzolini.org.br/produto/aqua-hqe. Acesso em 12/11/2021.

VOLLAARD, P.; VINK, J.; ZWARTE, N.. **Making Urban Nature**. NAi Booksellers, Rotterdam, 320 p., 2017.

WANG, L.; HUANG, M.; LI, D.. Where are white roofs more effective in cooling the surface? **Geophysical Research Letters**, 47: e2020GL087853, 2020.