

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

BERNARDO LYOH SUGAWARA MISAKA

**DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADO VERDE E
CONVENCIONAIS: ESTUDO DE CASO PARA TEMPERATURAS
DO OESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

**Alegrete
2024**

BERNARDO LYOH SUGAWARA MISAKA

**DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADO VERDE E
CONVENCIONAIS: ESTUDO DE CASO PARA TEMPERATURAS
DO OESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientadora: Fernanda Bianchi Pereira da Costa
Coorientadora: Simone Dornelles Venquiaruto

**Alegrete
2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M678d Misaka, Bernardo Lyoh Sugawara
Desempenho térmico de telhado verde e convencionais: estudo
de caso para temperaturas do oeste do estado do Rio Grande do
Sul / Bernardo Lyoh Sugawara Misaka.
147 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2024.
"Orientação: Fernanda Bianchi Pereira da Costa".

1. Sistemas de cobertura. 2. Telha Ecológica. 3. Telhado
Verde. 4. Telha Aluzinco. 5. Telha Fibrocimento. I. Título.

BERNARDO LYOH SUGAWARA MISAKA

**DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADO VERDE E
CONVENCIONAIS: ESTUDO DE CASO PARA TEMPERATURAS
DO OESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 30/10/2024

Banca examinadora:

Profª Drª Fernanda Bianchi Pereira da Costa

Orientadora

(Unipampa)

Profª Drª Simone Dornelles Venquiaruto

Coorientadora

(Unipampa)

Prof. Dr. Felipe Denardin Costa

(Unipampa)

Profª Drª. Luciani Somensi Lorenzi
(UFRGS)



Assinado eletronicamente por **FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA , PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/10/2024, às 14:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FELIPE DENARDIN COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/11/2024, às 10:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Luciani Somensi Lorenzi, Usuário Externo**, em 05/11/2024, às 10:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/11/2024, às 10:31, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1563704** e o código CRC **22AA3CF7**.

Dedico este trabalho a meus familiares e amigos que sempre me apoiam e me incentivam a crescer. Dedico também a todos os mestres que dividiram sua sabedoria comigo e tornaram este trabalho possível.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pela minha vida, por me proteger e dar forças ao longo da minha jornada.

A meu pai Isamu Misaka e minha mãe Márcia Yasuko S. Misaka, por me proporcionarem a chance de chegar onde estou, por sempre me apoiarem e me aconselharem durante a minha vida e por sempre me incentivarem a continuar e a não desistir, me desejando o melhor da vida.

A meu irmão que sempre me deseja o melhor da vida. Sou a pessoa mais sortuda do mundo por ter crescido ao seu lado. Não importa o que aconteça, eu sei que, no fim das contas, sempre poderei contar com você!

A minha namorada Gabriely A. Moreira que sempre me apoiou e incentivou a continuar e não desistir, me desejando o melhor da vida.

Aos amigos no Vale do Aço, aos amigos que conheci no Rio Grande do Sul e aos amigos e colegas que conheci graças a UNIPAMPA. Um agradecimento especial aos amigos Matheus Machado Costa, Marcelo Lima Petrocelli, Mayara Aparecida Panosso e Rafael Fumaco Tambara, por todos os momentos que compartilhei e pela grande ajuda para a realização deste trabalho. Sou muito grato por termos compartilhado parte de nossa jornada juntos.

Agradeço a Profa. Dra. Fernanda Bianchi Pereira da Costa, por aceitar me orientar neste trabalho, pela confiança depositada na minha proposta de projeto e pelas valiosas contribuições dadas durante todo o processo.

A Profa. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto, por aceitar me coorientar neste trabalho, pelo auxílio durante a realização do programa experimental e pela dedicação ao me guiar durante toda a realização deste trabalho.

Ao Prof. Me. Celso Nobre da Fonseca e ao Técnico Thales Santos Lima, pelo auxílio durante a realização do programa experimental e a organização de ideias para este trabalho e pela grande dedicação para a realização deste projeto que se tornou essencial para a sua conclusão concluído..

Aos professores e mestres que passaram em minha vida e decidiram compartilhar o conhecimento deles comigo.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Felipe Denardin Costa e a Profa. Dra. Luciani Somensi Lorenzi, por todo o apoio e contribuições para comigo e para este trabalho.

Desejo muita saúde, sucesso e tudo de bom para todos.

RESUMO

Com o desenvolvimento das cidades e o crescimento da população, a demanda pela utilização de métodos de condicionamento térmico vem crescendo consideravelmente, sendo que a maior parte destes métodos consome energia elétrica, como é o caso de ar condicionado e ventiladores. Para reduzir o uso destes métodos e contribuir para a cultura de sustentabilidade, diversos métodos de condicionamento passivo que não consomem energia elétrica são pesquisados e desenvolvidos. Dentro da engenharia civil, uma forma de contribuir com a sustentabilidade é através do levantamento de edificações com uso de componentes que auxiliem no conforto térmico dos usuários. Neste contexto, a cobertura é considerada como uma das estruturas mais importantes de serem analisadas, devido a alta contribuição com a transmissão de calor do exterior para o interior das edificações, fato explicado pelo contato direto com a radiação UV durante todo o período do dia. Deste modo, o estudo do desempenho térmico de diferentes componentes para a cobertura é de suma importância, juntamente com as ações das intempéries. Baseado no que foi exposto, esta pesquisa propõe testar o desempenho térmico de quatro tipos de coberturas distintas em relação a ação de intempéries como a ação dos ventos e eventos de precipitação na cidade de Alegrete/RS no período de verão. Para tanto, foram montadas quatro células-teste, sendo duas contendo coberturas que pontuam ecologicamente (telhado verde e a telha ecológica) e outras duas células-teste contendo coberturas convencionais (telha aluzinco e fibrocimento). Concluiu-se com a pesquisa que o telhado verde apresentou o melhor desempenho térmico entre as coberturas analisadas, contribuindo para a diminuição da temperatura superficial e interna da célula-teste. A Telha Ecológica e Fibrocimento apresentaram desempenho semelhante, destacando-se a Telha de Fibrocimento pelo custo mais acessível e a Telha Ecológica por proporcionar maior conforto térmico no interior da célula-teste, além de fomentar questões de sustentabilidade pela sua manufatura.

Palavras-chave: Sistemas de cobertura. Telha Ecológica. Telhado Verde. Telha Aluzinco. Telha Fibrocimento. Conforto térmico.

ABSTRACT

As cities develop and populations grow, the demand for thermal conditioning methods has increased significantly. Most of these methods rely on electrical energy, such as air conditioning and fans. To mitigate this reliance and promote sustainability, various passive thermal conditioning methods that do not consume electricity are being researched and developed. In civil engineering, one way to enhance sustainability is through constructing buildings with components that improve users' thermal comfort. Within this framework, roofs are crucial to analyze due to their significant impact on heat transfer from the outside to the inside of buildings, largely because of direct exposure to UV radiation throughout the day. Consequently, studying the thermal performance of different roofing materials is essential, particularly concerning weather influences. This research aims to evaluate the thermal performance of four distinct roof types under weather conditions, including wind and precipitation, in the city of Alegrete, RS, during summer. Four test cells were established: two with ecologically rated roofs (green roof and ecological tile) and two with conventional roofs (aluzinc tile and fiber cement). The findings indicate that the green roof exhibited the best thermal performance, effectively reducing both surface and internal temperatures in the test cell. The ecological tile and fiber cement showed similar performance, with fiber cement being more cost-effective, while the ecological tile provided enhanced thermal comfort and supported sustainability through its production process.

Keywords: Roofing Systems. Ecological Tile. Green Roof. Aluzinc Tile. Fiber cement Tile. Thermal Comfort.

LISTA DE FIGURAS

1	Atmosfera urbana.....	25
2	Esquema de efeito das ilhas de calor urbanas.....	26
3	Isopleta da velocidade básica V_0 (m/s).....	34
4	Esquema de transferência de calor na cobertura.....	36
5	Organograma do programa experimental	58
6	Localização do município de Alegrete no estado do Rio Grande do Sul	59
7	Zoneamento bioclimático brasileiro	60
8	Zoneamento bioclimático 2	61
9	Carta bioclimática da cidade de Ponta Grossa (PR)	62
10	Percurso do Sol na UNIPAMPA – Campus de Alegrete – RS.....	63
11	Localização Unipampa no município de Alegrete/RS.....	64
12	Local de implantação do projeto Imagem do <i>Google Earth</i> (a), Posicionamento das células-teste (b)	64
13	Componente das telhas em chapa: Telha fibrocimento (a); Telha de aluzinco (b) e Telha ecológica (c).....	66
14	Estrutura do telhado verde	68
15	Camadas do Telhado Verde utilizado	70
16	Representação gráfica da célula-teste para telhas em chapas: Janela (a); Porta (b)	71
17	Representação gráfica da célula-teste para telhado verde: Janela (a); Porta (b).....	71
18	Montagem das bases (a) Remoção do material orgânico (b) Posicionamento da brita e armadura (c) Concretagem das bases (d) Processo de cura das bases de concreto	72
19	Levantamento das alvenarias (a) Alinhamento (b) Levantamento (c) Paredes levantadas.....	73
20	Células-teste: fachada principal e sistemas de cobertura (a) Telhado Verde (b) Telha Ecológica (c) Telha Aluzinco (d) Telha Fibrocimento.....	73
21	Telhado Verde finalizado	74
22	Equipamentos e sensores utilizados Termistor (a), Anemômetro (b), Arduino (c) e Placa (d)	75
23	Localização dos sensores nos protótipos	77
24	Foto do posicionamento dos sensores (a) Camada Interior (b) Camada Inferior (c) Camada Superior.....	78
25	Histograma de precipitação Q-CP	90
26	Temperaturas e velocidade do vento Q-SP (a), Q-SP* (b), Q-CP (c) e F-SP (d).....	91
27	Temperaturas medianas das células-teste (a) Telhado Verde, (b) Telha Ecológica, (c) Telha Aluzinco e (d) Telha Fibrocimento.....	94
28	Temperaturas do dia Q-SP das células-teste (a) Telhado Verde, (b) Telha Ecológica, (c) Telha Aluzinco e (d) Telha Fibrocimento.....	98
29	Temperaturas Q-SP* das células-teste (a) Telhado Verde, (b) Telha Ecológica, (c) Telha Aluzinco e (d) Telha Fibrocimento.....	102
30	Temperatura Interior Q-SP* células-teste.....	103
31	Temperaturas Q-CP das células-teste (a) Telhado Verde, (b) Telha Ecológica, (c) Telha Aluzinco e (d) Telha Fibrocimento.....	106
32	Porcentagem de transmissão de calor da telha ecológica nas situações Q-SP, Q-SP* e Q-CP.....	108

33	Temperaturas F-SP das células-teste (a) Telhado Verde, (b) Telha Ecológica, (c) Telha Aluzinco e (d) Telha Fibrocimento.....	110
34	Síntese comparativa das coberturas	114
35	Camada superior com vegetação x sem vegetação (a) Camada superior, (b) Camada superior distribuição.....	116
36	Camada drenagem com vegetação x sem vegetação (a) Camada drenagem, (b) Camada drenagem distribuição	116
37	Camada interior com vegetação x sem vegetação (a) Camada interior, (b) Camada interior distribuição	117
C.1	Temperatura interior mediana verão	145
C.2	Temperatura interior mediana Q-SP	145
C.3	Temperatura interior mediana Q-SP*	146
C.4	Temperatura interior mediana Q-CP.....	146
C.5	Temperatura interior mediana F-SP	147

LISTA DE TABELAS

1	Critérios de cobertura quanto a transmitância térmica (U).....	39
2	Resultados, transmitância térmica e resistência térmica.....	40
3	Identificadores.....	40
4	Valores convencionais de resistências superficiais	43
5	Pesquisa de Nadia Balved e Thalita Giglio	48
6	Pesquisa de Caren Michels, Saulo Güths e Luana Castro da Silva	50
7	Pesquisa de Peter Gunn, Burak H. Gunay e Paul J. Van Geel	51
8	Pesquisa de Mario Maiolo et al.	52
9	Pesquisa de Lucas Rafael Liberato Borges et al.	53
10	Pesquisa de Eduardo Haefliger Boff et al.	55
11	Pesquisa de Yang et al.	56
12	Pesquisa de Lopes-Cabeza et al.	56
13	Tipos de vedações externas para a zona bioclimática 2.....	62
14	Dados para cálculo da Transmitância térmica da Telha Ecológica.....	82
15	Dados para cálculo da Transmitância térmica da Telha Fibrocimento	83
16	Dados para cálculo da Transmitância térmica da Telha Aluzinco	84
17	Dados para cálculo da Transmitância térmica do Telhado Verde	85
18	Valores de Transmitância térmica.....	85
19	Teste de normalidade Shapiro-Wilk com dados completos Parte 1.....	87
20	Teste de normalidade Shapiro-Wilk com dados completos Parte 2.....	87
21	Datas e descrição de evento	89
22	Maior, menor, mediana e diferença de temperatura no verão.....	92
23	Maior, menor, mediana e diferença de temperatura em Q-SP	97
24	Comparativo Telha Ecológica e Fibrocimento entre situação Q-SP e Q-CP..	100
25	Maior, menor, mediana e diferença de temperatura em Q-SP*	101
26	Maior, menor, mediana e diferença de temperatura em Q-CP.....	104
27	Diferença de temperatura na camada superior no evento de precipitação.....	107
28	Maior, menor, mediana e diferença de temperatura em F-SP.....	110
29	Diferença de temperatura entre as camadas superior e inferior em F-SP.....	112
30	Diferença de temperatura entre as camadas superior e inferior em Q-SP*	112
31	Temperaturas Telhado Verde com vegetação x sem vegetação	115
B.1	Temperatura média no verão.....	135
B.2	Dados A sem chuva parte 01	136
B.3	Dados A sem chuva parte 02	137
B.4	Dados B parte 01	138
B.5	Dados B parte 02	139
B.6	Diferença de temperatura entre camada superior e inferior da Telha Ecológica	140
B.7	Dados C com chuva parte 1	141
B.8	Dados C com chuva parte 2	142
B.9	Dados D parte 01	143
B.10	Dados D parte 02	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEN	Comité Europeu de Normatização
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
EPE	Empresa de pesquisa energética
EIRE	Exploração Integrada de Recursos Energéticos
EN	European Standardization
IEI	International energy initiative Brasil
ISO	International Organization for Standardization
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
NBR	Norma Brasileira
UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa
PA	Pará
PVC	Policloreto de polivinila
PR	Paraná
RS	Rio Grande do Sul
SC	Santa Catarina
SINIR+	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos
TMTO	Telha metálica ondulada
TS	Technical specification

SUMÁRIO

1 Introdução	15
1.1 Objetivos	18
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	19
1.2 Delimitações da pesquisa.....	19
2 Revisão da literatura	21
2.1 Consumo energético das edificações	21
2.1.1 Efeito das ilhas de calor urbanas.....	23
2.1.2 Conforto térmico nas edificações.....	27
2.2 Desempenho das edificações – sistema de coberturas.....	30
2.2.1 Sistemas de cobertura	32
2.2.2 Estanqueidade dos sistemas de coberturas em relação a água da chuva	33
2.2.3 Transferência de calor nas coberturas.....	33
2.2.4 Transmitância térmica das cobertura	38
2.2.4.1 Princípios do procedimento de cálculo simplificado da transmitância térmica e resistências térmicas.....	41
2.2.4.2 Procedimento de cálculo simplificado da transmitância térmica	41
2.2.4.3 Procedimento de cálculo simplificado da resistência térmica	41
2.2.4.4 Procedimento de cálculo simplificado da resistência térmica total.....	42
2.2.4.5 Resistências superficiais para o cálculo simplificado.....	43
2.2.4.6 Correção da transmitância térmica para o cálculo simplificado	43
2.2.5 Pesquisas relacionadas	45
3 Materiais e métodos	58
3.1 Etapa 1 – Definição do local para a instalação das células teste	58
3.1.1 Dados bioclimáticos do município de Alegrete	59
3.1.2 Orientação solar do município de Alegrete	62
3.1.3 Características do local de instalação	63
3.2 Etapa 2 – Execução das células teste	65
3.2.1 Caracterização dos sistemas de coberturas	65
3.2.1.1 Cobertura para chapas ou painéis	66
3.2.1.2 Cobertura verde	68
3.2.2 Confeção das células-teste	70
3.3 Etapa 3 – Instalação e testagem dos sensores e equipamentos.....	75
3.3.1 Sensores e equipamentos	75
3.3.2 Programação e instalação do sistema de coleta de dados	77
3.3.3 Testagem dos sensores e equipamentos	79
3.4 Etapa 4 – Coleta e análise de dados.....	80
3.4.1 Coleta de dados	81
3.4.2 Análise dos dados	81
3.4.2.1 Cálculo da Transmitância térmica	81

3.4.2.2	Teste de normalidade Shapiro-Wilk	85
4	Resultados e discussão	89
4.1	Análise da temperatura dos dias de verão.....	90
4.2	Análise dos dias significativos	96
4.2.1	Análise de um dia quente no verão sem precipitação (Q-SP).....	96
4.2.2	Análise de um dia quente no verão sem precipitação com as menores velocidades de vento (Q-SP*)	100
4.2.3	Análise de um dia quente no verão com precipitação (Q-CP).....	103
4.2.4	Análise do dia mais frio registrado sem precipitação (F-SP)	109
4.2.5	Síntese comparativa entre dias extremos sem precipitação (Q-SP* e F-SP)	112
4.2.6	Análise comparativa entre Telhado verde com substrato e com vegetação.....	115
5	Conclusão	118
6	Sugestões para trabalhos futuros	121
	Referências	122
	APÊNDICE A – Código arduíno	128
	APÊNDICE B – Tabelas das células-teste	134
	APÊNDICE C – Gráficos temperatura interior	145

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a cultura da sustentabilidade vem se desenvolvendo de forma constante no Brasil, fato que pode ser justificado pelo crescimento do número de edificações certificadas como LEED¹. Este selo envolve desde novas construções e grandes reformas a até empreendimentos já existentes (manutenção e operação), avaliando principalmente a eficiência energética e a geração de resíduos (GBS Brasil, 2019).

Pensar em eficiência energética é fundamental para o estágio atual do mundo, principalmente devido a diversas crises (climática, energética e consequentemente econômica) que vem sendo enfrentada por todos. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (2023a), na balança energética de 2022, o Brasil teve uma geração de energia elétrica de 677,2TWh (Terawatt-hora) e um consumo de 586,1TWh (Terawatt-hora), apresentando em 2022 um consumo de aproximadamente 86,55% de toda sua energia elétrica. No ano de 2021 este consumo foi de 84,33%, mostrando que de 2021 para 2022 ocorreu um aumento de aproximadamente 2%. Parte deste aumento, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2023a) ocorreu no setor residencial e comercial, mesmo com o aumento do uso de energia oriunda de microgerações de painéis solares.

Além do aumento total de consumo de energia elétrica para os anos de 2021 a 2022, o relatório da Empresa de Pesquisa Energética (2023a) apresenta que no mês de janeiro/2021 o consumo energético no setor residencial apresentou um aumento de 1,8% em comparação com o mês de janeiro do ano de 2022 e no setor comercial este aumento foi de 1,4%. Comparando o relatório de junho de 2023 com o de junho de 2022, também é observado um aumento no consumo de energia elétrica tanto nos setores residenciais (aumento de 6,4%) quanto no setor comercial (aumento de 3,3%). O relatório da Empresa de Pesquisa Energética (2023b) mostra que nos períodos em que no Brasil ocorre o verão (21 de dezembro a 21 de março) e o início do inverno (21 de junho a 23 de setembro), é observado um aumento de consumo de energia elétrica para o condicionamento térmico dentro das edificações.

Para aprimorar o condicionamento térmico de uma edificação existem diversos métodos, tais como: (i) ventilação,² que corresponde a uma estratégia de resfriamento

¹Sistema internacional de certificação e orientação ambiental para edificações utilizado em mais de 160 países, e possui o intuito de incentivar a transformação dos projetos, obra e operação das edificações, sempre com foco na sustentabilidade de suas atuações (GBS Brasil, 2019).

²Substituição do ar interno (mais quente) pelo externo (mais frio). (LAMBERTS et al., 2016)

natural; (ii) resfriamento evaporativo³, que corresponde a um método que pode ser natural (uso de vegetação ou fonte de água) ou artificial (através do uso de microaspersores); (iii) a utilização da inércia térmica para resfriamento e aquecimento (através do uso de componentes construtivos com elevada capacidade térmica de forma a proporcionar pouca alteração na temperatura interna da edificação); e (iv) aquecimento e resfriamento artificial, que corresponde ao uso de ar condicionado, aquecedor e ventiladores (LAMBERTS et al., 2016). O problema de muitos destes métodos é que ao serem utilizados trazem um aumento no consumo de energia elétrica, como visto principalmente para os métodos de resfriamento durante o período de verão no Painél de Monitoramento do Consumo de Energia Elétrica disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (2023).

Para fortalecer a cultura de sustentabilidade no Brasil, um dos objetivos a serem alcançados pela construção civil é atingir a máxima eficiência energética nas edificações. A eficiência energética é definida pela *International energy initiative Brasil (2019)* como sendo uma forma de usufruir mais de um mesmo serviço energético, reduzindo o consumo de energia. Logo o aumento da eficiência energética reduz o consumo de eletricidade e a sobrecarga no sistema em determinados períodos do dia. Uma das formas de aumentar o conforto térmico das edificações e aprimorar a eficiência energética é através da utilização de meios naturais de resfriamento e aquecimento como é o caso da ventilação, resfriamento evaporativo natural e a utilização de inércia natural para resfriamento e aquecimento. Deste modo, diversos autores realizam estudos de diferentes materiais para serem utilizados na construção civil, alguns exemplos são as coberturas verdes (YANG; WANG, 2014; LITARDO et al., 2020), que contribuem principalmente para o resfriamento evaporativo natural e para a inércia natural.

Uma outra forma de condicionamento térmico natural é a utilização de materiais isolantes no envelope da edificação, mais especificamente na cobertura. Lamberts et al. (2016) explica que a cobertura é uma das estruturas que influencia fortemente na variação da temperatura interna da edificação, podendo contribuir em até 40% de toda a sua variação térmica. Lamberts et al. (2016) ainda reforça que muito dessa influência é devido a alta taxa de exposição da cobertura a radiação solar durante o dia, tornando o estudo de diferentes tipos de cobertura e materiais, de suma importância para o desempenho térmico das edificações.

Outro aspecto importante para proporcionar uma maior sustentabilidade no Brasil

³Estratégia utilizada para aumentar a umidade relativa do ar e diminuir a sua temperatura (LAMBERTS et al., 2016).

na construção civil é a escolha dos materiais utilizados para a edificação e como futuramente será realizado o seu descarte, ou seja, a geração de resíduos da construção civil. Segundo a Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), os resíduos da construção civil são os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis. Logo a escolha de componentes produzidos através da reciclagem de materiais como celulose, que é o caso da telha ecológica da Onduline, é uma alternativa que vem sendo estudado por alguns autores como Boff et al. (2022), BORGES e Macedo (2022).

Nas últimas décadas, alguns pesquisadores (GUNN; GUNAY; GEEL, 2021; BORGES; MACEDO, 2022; MAIOLO et al., 2020) tem voltado seus interesses para desenvolver projetos de pesquisas que propõem avaliar uma forma de condicionamento térmico natural para edificações localizadas em diferentes regiões climáticas. Os autores também buscam encontrar sistemas de coberturas que auxiliem na redução do consumo energético das edificações estudadas através da redução do uso de métodos de condicionamento térmico artificiais (que aumentam o consumo energético), contribuindo para a elaboração de projetos de edificações mais sustentáveis. Deste modo os autores concluem que a utilização de cobertura verde é uma das soluções para tanto reduzir o consumo energético nas edificações devido a sua capacidade de isolamento térmico e também devido a sua capacidade de mitigar o efeito das ilhas de calor que aumenta a temperatura nos centros urbanos em relação às áreas rurais.

A tendência nacional, como já relatado, é de que ocorra um aumento no consumo de energia elétrica como visto no relatório da Empresa de Pesquisa Energética (2023b), principalmente em setores residenciais e comerciais. Parte deste aumento do consumo energético, segundo Yang et al. (2020), pode estar associado ao efeito das ilhas de calor urbanas, que induzem os usuários das edificações a utilizarem métodos de resfriamentos e aquecimentos artificiais para um condicionamento térmico adequado as necessidades humanas. Sabendo disso, alguns autores (YANG; WANG, 2014; LOPEZ-CABEZA et al., 2022; GUNN; GUNAY; GEEL, 2021) realizaram pesquisas ligadas a utilização da vegetação como formas de mitigar o efeito das ilhas de calor urbanas, sendo uma das principais estruturas o telhado verde. A utilização deste tipo de estrutura é justificada pelos autores por sua alta capacidade de interceptar a radiação solar (albedo da vegetação) e ao processo de evapotranspiração do conjunto vegetação e substrato, contribuindo assim na mitigação do efeito das ilhas de calor.

Em função do exposto, se torna relevante e necessário estudar formas de reduzir

este aumento energético nas edificações. Uma maneira de fazer isso é realizando projetos de sistemas de telhado com desempenho térmico satisfatório, compatíveis com características climáticas da região da edificação. Diversos autores (LAMBERTS et al., 2016; BOFF et al., 2022; GUNN; GUNAY; GEEL, 2021) concordam que a escolha correta de materiais associados a um projeto de cobertura com desempenho satisfatório podem trazer contribuições relevantes para o conforto térmico de uma edificação. Além disso, é importante ressaltar que trabalhos atuais relacionados ao bioclima brasileiro, que comparem o desempenho térmico de diferentes coberturas, ainda é escasso, como visto por Boff et al. (2022), o que torna este trabalho relevante, pois também servirá como uma fonte de dados para futuras pesquisas.

Esta pesquisa se propõe avaliar o desempenho térmico de quatro células-teste de alvenaria confeccionados com diferentes coberturas durante o período de seis meses (agosto de 2023 a fevereiro de 2024) na cidade de Alegrete/RS. Duas (2) células-teste serão construídas com telhados com uma pegada sustentável (telhado verde e telhado com telha ecológica) e duas (2) células-teste serão confeccionados com telhados convencionais (telha fibrocimento e telha de zinco), usualmente comercializados na região. Pretende-se com o desenvolvimento desta pesquisa, obter um comparativo de caráter técnico sobre as coberturas avaliadas, para que ao final do experimento seja possível ter um embasamento científico sobre a viabilidade de uso de telhados alternativos sustentáveis para a região de Alegrete/RS.

1.1 Objetivos

Os objetivos (geral e específicos) que nortearão esta pesquisa estão especificados nos subitens 1.1.1 e 1.1.2.

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar, no período de verão, o desempenho térmico proporcionado por diferentes sistemas de telhado (telhado verde, telha ecológica, telha de fibrocimento e telha de zinco) em protótipos de alvenaria (células-testes) na cidade de Alegrete/RS.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos têm como finalidade oferecer avaliações individuais e complementares para que o objetivo geral seja alcançado. Nesta pesquisa, foram delimitados como objetivos específicos:

- Analisar as diferentes temperaturas internas das células-testes;
- Analisar desempenho térmico entre o sistema Telhado Verde e os componentes Telhas (Ecológica, Aluzinco e Fibrocimento);
- Analisar os dias críticos (Maior temperatura, menor temperatura) e sua influência nas coberturas e componentes pesquisados.

1.2 Delimitações da pesquisa

As delimitações de uma pesquisa são as restrições no projeto e/ou nos métodos que podem afetar e influenciar a interpretação dos resultados finais da pesquisa. Para este trabalho foram definidos como limitações:

- No Telhado Verde foi analisado o desempenho térmico do sistema completo, já para as telhas foi analisado o desempenho térmico do componente (material);
- Dimensões reduzidas das células-teste em relação a realidade, devido a limitações orçamentárias e baseado em estudos relacionados encontrados na literatura, mas que proporcionam uma análise aproximada da realidade, como visto no item 3.2;
- Alvenarias sem revestimento argamassado e/ou pintura, proporcionando apenas a isolamento suficiente para avaliar a influência dos sistemas de telhado no conforto térmico do indivíduo.
- Esquadrias confeccionadas com chapa de madeira, possuindo uma pequena área para proporcionar a ventilação cruzada (janela/porta) – conforme especificado no item 3.1.1;
- As esquadrias (janela/porta) permanecerão fechadas durante o período do experimento, para que as temperaturas internas não sejam interferidas por ventilações e umidade além da permitida pela ventilação cruzada;
- Ausência de forro para realizar a medição de dados dos sistemas de telhado;
- O período de tempo de coleta de dados não abrangendo todas as estações do ano

devido ao tempo de pesquisa, ocorrendo entre agosto de 2023 e fevereiro de 2024.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são descritos conceitos e embasamentos teóricos da literatura para o desenvolvimento do projeto de pesquisa. No item 2.1 será dissertado sobre o consumo energético nas edificações e como os efeitos das ilhas de calor urbanas e o conforto térmico dos usuários afetam o consumo final energético. No item 2.2, serão apresentados os requisitos normativos de desempenho térmico que os sistemas de telhado devem seguir, assim como a apresentação de estudos ligados a este projeto encontrados na literatura.

2.1 Consumo energético das edificações

No Brasil, o consumo energético não pode ser retratado na forma de uma média nacional, devido a diferença de consumo final por região. Abrahão e Souza (2021) justificaram este fato com a densidade demográfica, o consumo energético *per capita*, acesso à energia elétrica e as adaptações das tecnologias com as demandas locais de condicionamento térmico, e citaram como exemplo a região nordeste, que apresenta quase o dobro da quantidade populacional em relação a região sul e mesmo assim apresenta um consumo anual *per capita* energético 1,5 vezes inferior. Ghisi, Gosch e Lamberts (2007) também apresentaram o mesmo entendimento sobre o consumo energético no Brasil há alguns anos atrás, exemplificando que a região norte do país apresenta quase 45% de toda extensão territorial mas com apenas 8% da população total e representando apenas 5% de todo consumo energético nacional.

Nas últimas décadas está sendo observada uma tendência mundial de aumento do consumo energético nas edificações. Segundo Abrahão e Souza (2021) este aumento tende a crescer, principalmente devido a mudanças estruturais em relação ao consumo por uso final da energia elétrica. Os autores citam como exemplo, o consumo energético domiciliar entre os anos de 2005 a 2019 no Brasil. Neste período foi observado um crescimento do consumo de ar condicionado de 3 a 6 vezes em quase todas as regiões. Também foi observado que o consumo de energia para aquecimento de água (chuveiro) apresentou uma redução em quase todas as regiões, com exceção da região sul e centro-oeste. Este fato foi justificado pelos autores em função das características climáticas de cada região, demonstrando, com a pesquisa, que essas diferenças regionais afetam as necessidades de condicionamento térmico dos indivíduos.

Além das diferenças do consumo energético regional, é importante considerar

o consumo energético em função dos usos da edificação (edificações residenciais, comerciais e escritórios). Os prédios comerciais e de escritórios tem em comum o tempo de utilização, em geral das 07:00 horas até aproximadamente 18:00 horas (correspondentes as jornadas de trabalho). Diferente dos prédios residenciais, que são utilizados praticamente durante todo o período do dia. Yang et al. (2020) concluíram, ao final dos seus estudos, que os prédios residenciais e de escritórios apresentaram diferentes consumos energéticos, porém, as maiores variações foram observadas para os prédios residenciais, que apresentaram de 3% a 10% a mais de consumo energético anual.

Sabendo que o aumento do consumo energético das edificações está ligado com as demandas dos usuários para condicionamento térmico, normas como a NBR 15.220-3 2005 e a NBR 15575 2024a ganham bastante importância no desenvolvimento de projetos de edificações. Estas normas apresentam requisitos mínimos de desempenho térmico, de modo a proporcionar um conforto térmico que reduza a necessidade de métodos de condicionamento térmicos artificiais, como descrito no item 2.2, reduzindo assim o aumento do consumo energético nas edificações.

Entre os requisitos de desempenho térmico das edificações, a NBR 15.575 2024a apresenta como exigência, o desempenho térmico que as coberturas devem apresentar. As coberturas são importantes para o estudo do desempenho térmico das edificações pela sua influência em relação às temperaturas internas do prédio. Lamberts et al. (2016) reforçam que as temperaturas internas de uma edificação afetam seus usuários, que demandarão por formas de condicionamento térmico artificiais para que o conforto térmico seja alcançado, impactando, dessa forma, no consumo energético das edificações. Em função do exposto, alguns autores (Gunn, Gunay e Geel (2021), Boff et al. (2022)) reforçam sobre a importância do estudo de materiais com diferentes capacidades térmicas em diferentes climas regionais para as coberturas.

Alguns autores, como Azevedo et al. (2022), Maiolo et al. (2020), testaram a utilização de coberturas verdes em suas pesquisas e observaram uma redução do consumo energético das edificações. Azevedo et al. (2022) observaram uma redução no consumo anual de 147,22kWh, representando um total de 0,89% do consumo total em bandeira tarifária verde. Maiolo et al. (2020) observaram que durante o verão do clima mediterrâneo, os telhados verde proporcionaram redução na temperatura que variaram de 5°C a 11,3°C em relação ao telhado convencional, proporcionando assim uma redução no consumo energético destinado ao resfriamento ativo da edificação.

Diniz, Costa e Oliveira (2023) realizou um estudo de caso para reduzir o consumo

de energia elétrica destinada a condicionamento térmico de um prédio comercial, através da apresentação de propostas com soluções tecnológicas e estruturais. Concluíram que a utilização de materiais e componentes com elevada capacidade térmica proporcionam uma forma passiva de resfriamento e/ou aquecimento na edificação e contribuem para redução dos gastos de energia elétrica, além de aprimorar o conforto térmico dos usuários da edificação. Também observaram uma redução do consumo de energia para atingir o conforto térmico em diversos cômodos da edificação vistoriada, entre os quais, a sala de espera de um consultório apresentou a maior redução, de 120kW para 80kW.

Boff et al. (2022) realizaram uma revisão de diversas telhas ecológica e obtiveram que todas as telhas analisadas (Tetra Pak, PET, GePET e Vegetais) apresentaram alto desempenho térmico, podendo proporcionar assim um custo benefício a longo prazo através da redução no consumo energético quando comparadas com as telhas convencionais (fibrocimento).

Além dos materiais com elevada capacidade térmica (telhas ecológicas e telhado verde), outro aspecto importante a ser analisado e que proporciona uma redução do consumo final de energia elétrica, é o aproveitamento da ventilação natural durante o período de verão, conforme descrito por Rackes, Melo e Lamberts (2016) e recomendado pela NBR 15220-3¹ (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005). Os ventos, além de beneficiarem as temperaturas internas das edificações com os ventos cruzados, quando em conjunto com coberturas verdes, podem proporcionar uma forma de mitigar o efeito das ilhas de calor urbanas, que são responsáveis pelo aumento da temperatura nos centros urbanos, como descrito no item 2.1.1. Proporcionando assim mais uma forma de reduzir o aumento do consumo energético nas edificações, como observado por Yang e Wang (2014).

2.1.1 Efeito das ilhas de calor urbanas

As primeiras evidências do efeito de ilha de calor foram encontradas por Howard (1833), que coletou dados de temperatura em áreas rurais e urbana durante as primeiras décadas de 1800, encontrando uma variação na temperatura do ar entre o centro urbano na cidade de Londres e algumas zonas rurais aos arredores da cidade (Tottenham e Stratford). Em suas anotações, Howard descreve diversas influências importantes para o estudo do

¹Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 2 - Verão (J - Ventilação cruzada) (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005).

efeito das ilhas de calor urbanas, entre elas, influência do vento, clima regional e materiais utilizados nos centros urbanos.

O efeito das ilhas de calor atuam dentro da camada limite planetária (Figura 1) que é definida por Stull (2012) como sendo a parte da troposfera² que é influenciada diretamente pela superfície da Terra, respondendo a sua influência no intervalo de tempo de até uma (1) hora, sendo que estas influências podem ser de natureza de arrasto friccional, evaporação e transpiração, transferência de calor, emissão de poluição e modificação do fluxo induzido pelo terreno.

O efeito das ilhas de calor urbanas atua dentro da camada limite planetária (Figura 1), onde surgem duas seções com comportamentos diferentes, denominados como camada limite urbana³ e camada do dossel urbano⁴, Oke (1976) explica que a camada do dossel urbano (Figura 1), localizada dentro da camada limite urbana, é influenciada por processos em microescala, ou seja, o clima nesta camada é fortemente influenciada pela natureza dos elementos ao seu redor, principalmente pelo tipo de material e formatos geométricos enquanto que a camada limite urbana (Figura 1) é influenciada pelos processos locais ou em mesoescala, sendo afetada fortemente pela natureza da área urbana abaixo.

A Figura 1 apresenta a atmosfera urbana na forma de mesoescala onde contém a camada limite urbana (UBL - Urban Boundary Layer) e na forma de microescala onde contém a camada do dossel urbano (UCL - Urban Canopy Layer).

Os efeitos das ilhas de calor urbanas, como descrito por Yang et al. (2020), Lopez-Cabeza et al. (2022), consistem na diferença de temperatura dentro de um centro urbano, em relação as suas áreas adjacentes, como visto na Figura 2.

A Figura 2 apresenta como o efeito das ilhas de calor urbanas modificam as temperaturas dentro de um ambiente urbano em relação as suas áreas adjacentes, sendo que o pico das temperaturas ocorre em centros com alta taxa de urbanização.

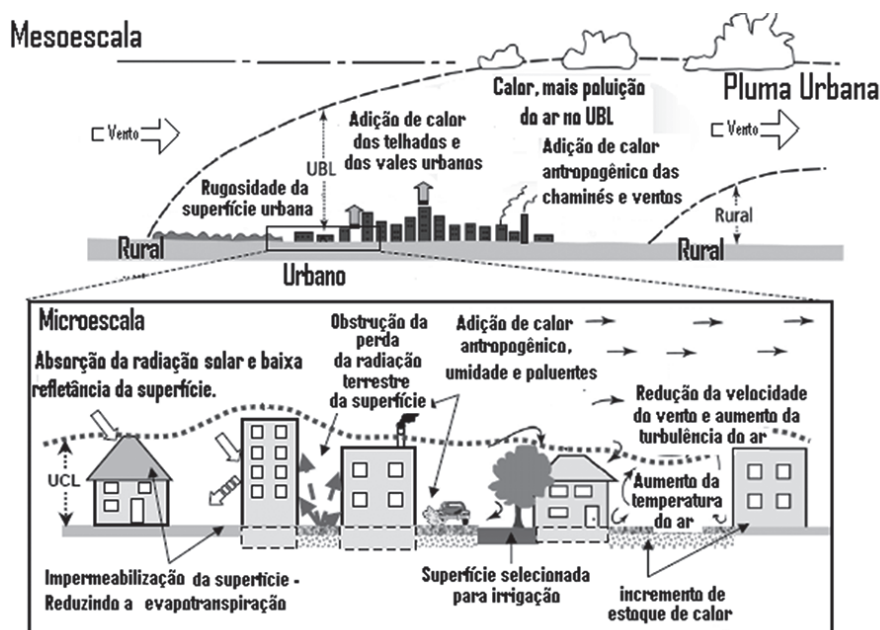
O pico de temperatura que é observado na Figura 2 é justificado por Lopez-Cabeza et al. (2022) devido aos materiais utilizados nos centros urbanos, sendo assim o efeito das ilhas de calor urbanas se manifestam com maior intensidade em áreas construídas devido a capacidade de absorção de calor das estruturas e a taxa de emissão da radiação que foi acumulada durante o período do dia. Tornando-se importante avaliar os diferentes tipos

²Camada que se encontra em contato com a superfície da Terra, onde ocorrem os fenômenos meteorológicos mais importantes, afetando diretamente a vida sobre a superfície terrestre. (ANAC, 2021)

³É a camada de ar localizada além da altura dos telhados (OKE, 1976)

⁴Consiste na camada de ar encontrada entre os elementos urbanos, abaixo da altura dos telhados (OKE, 1976)

Figura 1 – Atmosfera urbana



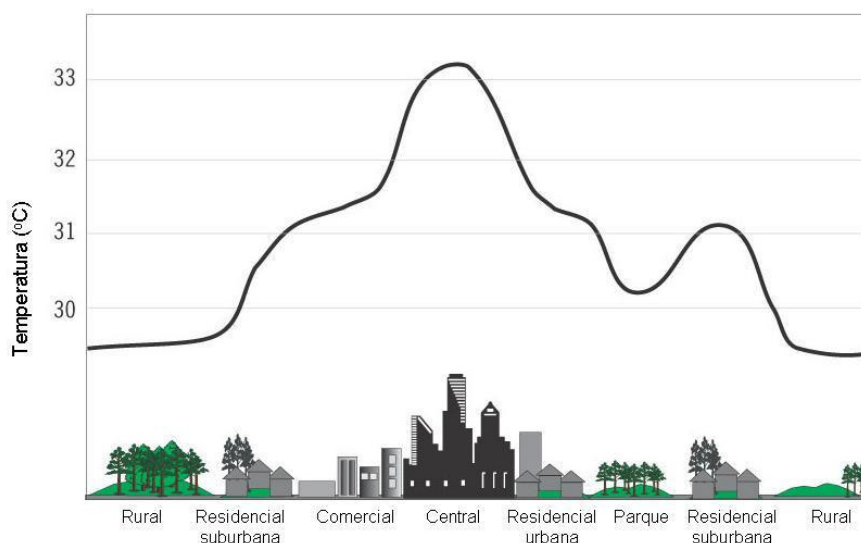
Fonte: Adaptado de Fialho (2015)

de materiais que são utilizados nas superfícies dos centros urbanos e nas edificações que fazem parte deste ambiente.

Oke (1982) cita a diferença de dispersão de calor que ocorre entre áreas rurais e urbanas, influenciados pela umidade, fluxo de vento e pela vegetação. Isso se dá pelas propriedades dos materiais e formas geométricas dos elementos constituídos em cada área. O autor explica que em uma área rural coberta com vegetação rasteira, 80 a 90% da radiação diária é repartida para o ar, sendo que em áreas urbanas essa análise é mais complexa, principalmente pelo fato de grande parte dos materiais utilizados nos centros urbanos serem impermeáveis, na qual a grande maioria destes materiais partilham a energia da radiação diária captada em calor sensível

Litardo et al. (2020) afirmam que as cidades ao adotarem o uso de áreas verdes, proporcionariam uma estratégia de mitigação contra o efeito das ilhas de calor urbano, resultando em uma redução do uso de energia para fins de resfriamento em prédios localizados em centros urbanos, sendo que as áreas verdes também podem ser aplicados diretamente para os sistemas de cobertura das edificações. Yang e Wang (2014) concluíram em seus estudos que a utilização de telhados verdes são um método efetivo de mitigar os efeitos de ilhas de calor urbano, devido a sua alta sensibilidade a turbulência causada pela ação dos ventos (carregando a umidade originada pela evapotranspiração da cobertura verde), propriedades de saturação do substrato e área de albedo (diminuindo

Figura 2 – Esquema de efeito das ilhas de calor urbanas



Fonte: Adaptado de Souza (2012)

a absorção da radiação solar pela cobertura verde). Este fato é confirmado também por Litardo et al. (2020), que sugerem ao final do estudo, algumas soluções de mitigação do efeito das ilhas de calor para regiões com climas tropicais, sendo a primeira opção as soluções de áreas verdes, e depois o aproveitamento do albedo em pavimentos e telhados.

Sabendo que o efeito das ilhas de calor urbanas afetam diretamente o consumo energético das edificações, Yang et al. (2020) afirmam que os métodos de mitigação dos efeitos das ilhas de calor se tornam mais importantes em edificações com alta taxa de utilização, fato explicado pelo consumo energético para regularização de temperatura interna das edificações. Os autores observaram que os prédios de escritório (utilizados apenas em horários comerciais) apresentaram menor taxa de consumo energético (9% a 14%) em relação aos prédios residenciais (12% a 24%), que necessitam de métodos de condicionamento térmico artificial por um maior período de tempo. Além disso, Li et al. (2019) observaram em suas pesquisas um aumento médio de 19% no consumo energético das edificações que era destinado ao sistema de resfriamento artificial.

No entanto, Yang et al. (2020) reforçam que o efeito das ilhas de calor urbano, não necessariamente, estão relacionadas ao aumento do consumo energético nas edificações, como observados pelos autores em sua pesquisa, onde durante o período noturno, as edificações apresentaram uma redução no consumo energético, destinado a condicionamento térmico artificial de aquecimento, variando de 3% a 20%. Singh e Sharston (2022) também observaram que em regiões com clima frio, os efeitos de ilhas

de calor urbano contribuíram para a redução do consumo energético durante o ano.

Litardo et al. (2020), Al-Obaidi et al. (2021), Singh e Sharston (2022) concluem que regiões com climas quentes são mais afetados pelo efeito das ilhas de calor urbanas e que as regiões com climas mais frios podem apresentar uma redução no consumo energético das edificações. Sabendo disso a utilização de sistemas de cobertura verde para algumas regiões devem ser vistas com cautela, como observados por Balvedi e Giglio (2023), Michels, Güths e Silva (2020), Gunn, Gunay e Geel (2021).

Além disso, Sen e Roesler (2020), afirmaram que pavimentos, coberturas e paredes são grandes aliados para mitigar efeitos de ilha de calor urbano. No entanto, os cânions urbanos⁵ que fazem parte dos centros urbanos, aumentam consideravelmente a intensidade dos efeitos das ilhas de calor urbanas, dependendo da sua orientação de troca de radiação e da geometria. Nunez e Oke (1977) citam que em sua pesquisa dos valores computados para o balanço energético do cânions urbanos, 60% da radiação diária acumulada é perdida para o ar em forma de calor sensível, 30% é armazenado no material que constitui os cânions e apenas 10% é consumido por processos de evaporação. Os autores também observaram que o conjunto de pavimento com alto albedo e alta difusão térmica, apresentaram baixa temperatura superficial e baixa temperatura do ar, mitigando boa parte dos efeitos das ilhas de calor que ocorriam nos cânions urbanos.

Em função do exposto, os efeitos das ilhas de calor urbanas se tornam assuntos com grande destaque, principalmente para a construção civil, que é responsável por atender as demandas de desempenho térmico dentro das edificações e nos centros urbanos, proporcionando assim conforto térmico aos habitantes da região.

2.1.2 Conforto térmico nas edificações

O conforto térmico é definido por Lamberts et al. (2016), Frota e Schiffer (2016), Fanger (1973) como sendo um conjunto de exigências que o organismo humano necessita para o seu funcionamento adequado, sendo que a quantidade de calor que é dissipada para o ambiente seja igual a quantidade de calor produzida pelo corpo. Este conjunto de exigências está ligado a troca de calor entre o corpo humano e o ambiente, sendo que a não satisfação resulta em uma sensação de desconforto causado por calor ou frio, tornando a balança térmica instável.

⁵Segundo Nunez e Oke (1977), consiste de paredes e piso (normalmente estradas) entre dois prédios adjacentes.

Frota e Schiffer (2016) afirmam que o estudo do conforto térmico é importante, pois, o ser humano ao ser exposto em temperaturas altas ou baixas reduz a sua capacidade produtiva, devido a um esforço extra do corpo para proporcionar a termorregulação, consequentemente causando uma queda na potencialidade de trabalho do indivíduo.

Logo, alcançar uma zona de conforto térmico dentro das edificações seria benéfico para o ser humano, apresentando assim um rendimento melhor em suas tarefas, como apontado por Schmidt, Rupp e Ghisi (2021), que analisaram a produtividade das pessoas em um prédio comercial, realizando atividades de escritório e concluíram que, em média, a temperatura ideal para trabalhos em escritórios estava na faixa de 23°C a 24°C. Os autores observaram também que a sensação de conforto térmico poderia variar de aproximadamente 1°C a 2°C, dependendo do sexo e do tipo de equipamento utilizado para o resfriamento (ventilador ou ar condicionado), justificando que essas variações podem ter sido causadas por limitações do trabalho (pequena quantidade de votos em algumas faixas de temperatura e devido ao fato de os votos de sensação térmica serem subjetivos).

Alguns dos motivos que geram diferentes temperaturas de satisfação térmica entre as pessoas são definidas por Lamberts et al. (2016) como situação de desconforto localizado, que consiste na exposição de parte do corpo a uma condição térmica não favorável. Os fatores de desconforto localizado mais comum são:

- A diferença de temperatura no sentido vertical (entre os pés e a cabeça), na qual a temperatura do ar tende a aumentar com a altura em relação ao piso dentro das edificações, podendo tornar a temperatura do ar na cabeça maior que no tornozelo, consequentemente podendo gerar desconforto;
- O campo assimétrico radiante, na qual a forma como a radiação térmica atinge o corpo não é uniforme devido a superfícies quentes e frias e a incidência da luz solar;
- O resfriamento convectivo local (*draft* ou corrente de ar frias), na qual correntes de ar frias indesejadas podem gerar um resfriamento localizado em partes do corpo humano, consequentemente gerando desconforto. Além disso é constatado que essas correntes de ar são considerados um dos fatores que causam mais incômodo em escritórios;
- Contato com pisos frios ou quentes que pode gerar desconforto localizado dependendo do tipo de piso a que se tem contato. Este fator é fortemente influenciado pelas características construtivas dos edifícios (principalmente devido a materiais escolhidos para o isolamento do piso, utilizado na camada de contrapiso, entre outros).

Devido às diferenças individuais referentes a sensação desconforto térmico, alguns autores (Lamberts et al. (2016), Frota e Schiffer (2016), Fanger (1973)) concordam que é impossível projetar ambientes que satisfaçam termicamente a todos, mas que é possível especificar ambientes que satisfaçam a maioria dos usuários.

Um suporte técnico adequado pode ser obtido através de normas como a ISO 7730 2005, que especificam diferentes níveis de aceitabilidade para os usuários, podendo chegar a abranger até 90% de seus ocupantes. Já a NBR 15.220 2005 (apresentado no item 3.1.1) em conjunto com a NBR 15.575 2024a (apresentado no item 2.2), também prescrevem requisitos e cálculos, que levam em consideração parâmetros de temperatura do ar, velocidade do vento e umidade do ar para avaliar o desempenho térmico dentro das edificações, de modo a proporcionar uma zona de conforto térmico aos usuários.

Sabendo da importância desses parâmetros para a análise do conforto térmico e do desempenho térmico das coberturas, Lamberts et al. (2016) determinaram e organizaram alguns parâmetros, que foram divididos em duas categorias distintas, sendo eles os parâmetros físicos (temperatura do ar, radiante média, velocidade e umidade relativa do ar) e os parâmetros pessoais (metabolismo e vestimenta) na qual:

- O metabolismo é um processo de produção de energia interna, sendo grande parte destinada a produção de calor para que o organismo humano se mantenha em equilíbrio. Logo, quando o ambiente apresenta condições térmicas inadequadas, o sistema termo-regulador é ativado, reduzindo ou aumentando a perda de calor pelo organismo. A sensação de conforto térmico é atingida quando o organismo perde o calor produzido pelo metabolismo sem recorrer a mecanismos de termo regulação;
- A vestimenta funciona como um isolante térmico, que dependendo das suas propriedades e materiais, mantém a camada de ar junto ao corpo mais aquecida ou menos aquecida, auxiliando na termo-regulação do organismo;
- Temperatura radiante média é a temperatura uniforme de um ambiente imaginário na qual a troca de calor por radiação é igual ao ambiente real não uniforme;
- Temperatura do ar é a principal variável do conforto térmico, pois a sensação de conforto térmico é baseada na diferença de temperatura entre o corpo e o ar. Além disso dependendo da diferença de temperatura entre dois pontos, pode provocar a movimentação de massa de ar, chamada convecção natural⁶;

⁶Consiste na parte quente se tornando mais leve e sobe enquanto a parte fria desce, proporcionando sensação de resfriamento do ambiente (LAMBERTS et al., 2016).

- Velocidade do ar, na qual pode ocorrer sem ação direta dos ventos, como é o caso da convecção natural ou pelo uso de meios mecânicos como os ventiladores. O deslocamento do ar aumenta os efeitos da evaporação no corpo humano, retirando a água resultante da termo-regulação que está em contato com a pele de forma mais eficiência, reduzindo assim a sensação de calor;
- Umidade relativa do ar em conjunto com a velocidade do ar, intervém na perda de calor pelo processo de evaporação. Na qual a medida que a temperatura ambiente aumenta, os processos de perda de calor por convecção e radiação se tornam mais difíceis para o organismo, desta forma ele recorre a eliminação por evapotranspiração, sendo que quanto maior a umidade relativa, menor a eficiência da evapotranspiração na remoção de calor, demonstrando assim a importância da ventilação adequada.

Os parâmetros físicos tem grande influência na análise do conforto térmico e do desempenho dos sistemas de coberturas das edificações, principalmente a temperatura do ar, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento, como visto na NBR 15.575 ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024a) e na NBR 15.220-3 2005. Dependendo da região bioclimática analisada, as normativas apresentam recomendações de diretrizes construtivas e detalhamentos de estratégias de condicionamento térmico natural em relação ao desempenho térmico das edificações para proporcionar aos usuários, maior sensação de conforto térmico. Essa zona de conforto térmico é determinada pela NBR 15220-3 (2005) como sendo uma relação entre as temperaturas médias mensais (variam entre aproximadamente 17°C e 27°C) e as porcentagens de umidade relativas (variam entre 15% e 35%). Além disso, é visto que os parâmetros pessoais são mais subjetivos e dependem da sensação térmica de cada indivíduo, como observados por Schmidt, Rupp e Ghisi (2021), Kawakubo, Sugiuchi e Arata (2023).

2.2 Desempenho das edificações – sistema de coberturas

As edificações tem importante papel de proteção e conforto para os seus usuários e para proporcionar isso, a NBR 15.575 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024a) prescreve diversos critérios que as edificações devem atender. A NBR 15.575 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024a) é dividida em seis (6) partes, sendo elas:

- Parte 1 - Requisitos gerais, que determina critérios que uma edificação deve apresentar na segurança, habitabilidade, sustentabilidade e nível de desempenho;
- Parte 2 - Requisitos para os sistemas estruturais, que estabelece critérios exigidos somente ao sistema estrutural da edificação;
- Parte 3 - Requisitos para os sistemas de piso, apresentas requisitos e critérios de desempenho que se aplica ao sistema de pisos da edificação;
- Parte 4 - Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE, que estabelece requisitos, critérios e métodos para avaliar o desempenho de sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE) de edificações ou de seus elementos;
- Parte 5 - Requisitos para os sistemas de coberturas, que determina requisitos e critérios de desempenho requeridos para os sistemas de coberturas das edificações;
- Parte 6 - Requisitos para os sistemas hidrossanitários, que apresenta requisitos e critérios de desempenho que aplicam-se ao sistema hidrossanitário da edificação.

Um dos requisitos abordados na parte 1 da respectiva norma NBR 15.575-1 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024b) é sobre o sistema de coberturas. Diversos autores, entre os quais, Lamberts et al. (2016) que reforçam sobre a importância do sistema de cobertura, uma vez que este sistema contribui desde a salubridade dos usuários até para a proteção estrutural da própria edificação. Além disso, o autor afirma que o sistema de cobertura é a parte da edificação que está mais exposta a ação de radiação solar, tornando-o responsável pela transmissão de grande parte da radiação térmica do ambiente externo para o interior da edificação.

A norma NBR 15575-5 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024b) define o sistema de cobertura como sendo um "conjunto de elementos ou componentes, dispostos no topo da construção, com as funções de assegurar estanqueidade às águas pluviais e salubridade, bem como auxiliar na proteção dos demais sistemas da edificação habitacional ou dos elementos e componentes da deterioração por agentes naturais. Em função do exposto, é necessário que a estrutura de cobertura respeite alguns requisitos de estanqueidade em relação a água da chuva, garantindo assim maior salubridade para os usuários da edificação, além de garantir também requisitos de desempenho térmico que podem ser calculados pelo critério de transmitância térmica de coberturas (Ucob). Os critérios exigidos pela NBR 15575-5 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024b) são apresentados nos subitens 2.2.2 e 2.2.4, sendo

que o subitem 2.2.3 apresenta as formas de transferência de calor que podem ocorrer nas coberturas.

É de consenso geral que o desempenho térmico do sistema de cobertura de uma edificação influencia diretamente no conforto térmico dos usuários, que posteriormente necessitam de equipamentos de condicionamento térmico artificiais (ar condicionado, aquecedores e/ou ventiladores), aumentando conseqüentemente o consumo energético da edificação. Essa importância de analisar o sistema de cobertura é confirmado por Rawat e Singh (2022) que realizam uma revisão de diversos tipos de coberturas em diversas regiões climáticas.

2.2.1 Sistemas de cobertura

O uso de sistemas de coberturas compostos por componentes de telhas cerâmicas ou chapas (fibrocimento e zinco) são mais difundidas no mercado brasileiro principalmente devido a seu baixo custo inicial e baixo valor para mão de obra, como observado por Lima, Silva e Fontineles (2019), Soares, Oliveira e Santos (2016). No entanto, os autores concluem que apesar do baixo custo ser um fator relevante para implementação das coberturas convencionalmente utilizadas no Brasil, existem outros parâmetros que também devem ser levados em consideração na escolha de um telhado. Lima, Silva e Fontineles (2019) citam a importância de favorecer o conforto térmico dos usuários das edificações, através da escolha técnica dos materiais e sistemas de coberturas, considerando o clima da região e o melhor custo-benefício que esses sistemas possam trazer aos usuários, mesmo que a médio/longo prazo. Logo esta pesquisa procura analisar sistemas de coberturas alternativos que apresentam desempenho térmico adequado em comparação com as coberturas tradicionais, como é o caso de coberturas em chapas ecológica (telha ecológica) e a cobertura verde.

Um melhor detalhamento dos sistemas de cobertura com telhas cerâmicas, chapas e coberturas verdes são apresentados nos subitens 3.2.1, respectivamente.

2.2.2 Estanqueidade dos sistemas de coberturas em relação a água da chuva

A estanqueidade⁷ dos componentes em relação a água da chuva segundo a NBR 15575-5 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024b) é um parâmetro importante por evitar a formação de umidade e posteriormente contribuir com a redução da proliferação de fungos, insetos e micro-organismos prejudiciais a saúde humana.

Para que o sistema de cobertura não apresente insalubridade para os usuários da edificação, a NBR 15575-5 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024b) define um critério de estanqueidade em relação a água da chuva do sistema de cobertura por regiões do Brasil. O estado do Rio Grande do Sul está compreendido entre duas regiões segundo essa classificação normativa, como mostrado na Figura 3. Para as regiões IV e V, a condição normativa é que não pode ocorrer a penetração ou a infiltração de água que acarrete escoamento ou gotejamento, respeitando assim o limite de vazão de quatro litros por minuto por metro quadrado (4l/min./m²).

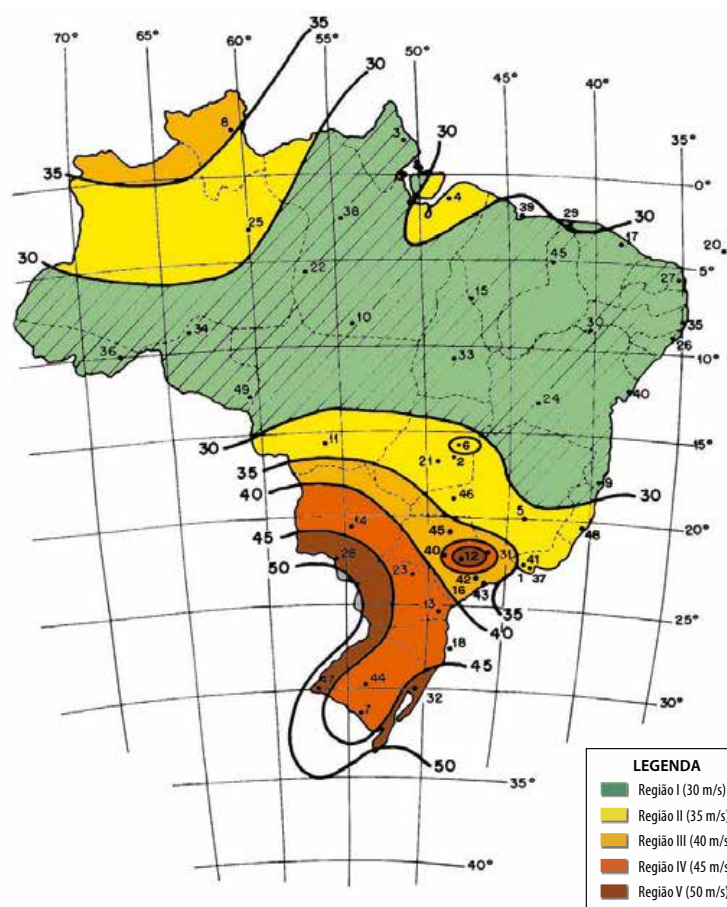
Em resumo para que o sistema de cobertura apresente estanqueidade em relação a água da chuva, é necessário que não apresente gotejamento ou escoamento e a norma estabelece que pode haver manchas em até no máximo 35% de toda a área do sistema de cobertura (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024b).

No Brasil, fabricantes de componentes para sistemas de cobertura afirmam apresentar todos os critérios exigidos na ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024a), exigindo apenas a instalação correta do sistema de cobertura para seu pleno funcionamento, como é o caso da fabricante Onduline (2019) que apresenta em seu site o passo a passo para a instalação dos seus sistemas de cobertura.

2.2.3 Transferência de calor nas coberturas

O calor é definido por Çengel e Ghajar (2012) como a forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro em consequência da diferença de temperatura entre eles. Logo, para que ocorra a transferência de calor é necessário que exista uma diferença de temperatura entre os sistemas analisados, na qual a transferência de energia ocorre do meio com maior temperatura para o de menor temperatura, cessando quando os

⁷Propriedade de um elemento (ou de um conjunto de componentes) de impedir a penetração ou passagem de fluidos através de si. A sua determinação está associada a uma pressão-limite de utilização (a que se relaciona com as condições de exposição do elemento ao fluido) (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010).

Figura 3 – Isopleta da velocidade básica V_0 (m/s)

Fonte: Adaptado de LOCK/CL Sistema de atenuação acústica - CATÁLOGO TÉCNICO (2019)

dois meios atingem a mesma temperatura.

Çengel e Ghajar (2012) define que o calor pode ser transferido de três (3) diferentes modos, sendo eles por condução, convecção e radiação, onde necessitam da existência de uma diferença de temperatura e ocorrem de uma temperatura maior para uma temperatura menor. Nas coberturas ocorre do mesmo modo, na qual Lamberts et al. (2016) cita que a transferência de calor pode ocorrer de 3 formas distintas em edificações, sendo elas através da condução, convecção e radiação, na qual é definida como:

- **Condução:** "É a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para partículas vizinhas adjacentes menos energéticas, como resultado da interação entre elas. A condução pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases"(ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Segundo Çengel e Ghajar (2012), em líquidos e gases, a condução deve-se às colisões e difusões das moléculas em movimentos aleatórios, sendo que em sólidos ela ocorre devido a combinação de vibrações das

moléculas em rede e a energia é transportada por elétrons livres. Lamberts et al. (2016) diz que nos fluidos (líquidos e gases) ocorrem fenômenos convectivos que alteram o processo original. Por esta razão, a condução refere-se principalmente aos sólidos. Poderá ser relacionada aos fluidos quando não se verificam movimentos convectivos.

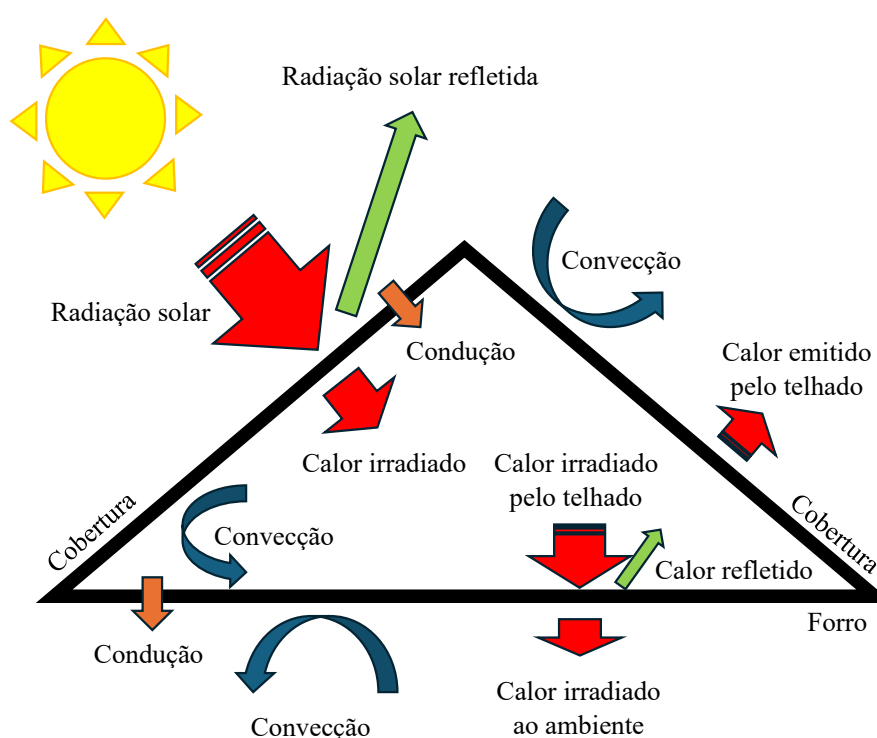
- **Convecção:** "É o modo de transferência de energia entre superfícies sólidas e a líquida ou gás adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e de movimento de um fluido"(ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Segundo Çengel e Ghajar (2012), quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção, sendo que na ausência do movimento do fluido, o processo de transferência se dá por condução, fato confirmado por Lamberts et al. (2016), que diz que o processo possui duas fases: na primeira o calor se transmite por condução, na segunda, a alteração sofrida pela temperatura do fluido modifica sua densidade provocando o movimento convectivo.
- **Radiação:** "É a energia pela matéria sobre a forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas."(ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Çengel e Ghajar (2012) cita que a transferência de calor por radiação é mais rápida (na velocidade da luz) e não sofre atenuação do vácuo, sendo a forma como a energia do sol atinge a Terra. Além disso, o autor fala que a radiação é um fenômeno volumétrico, e todos os sólidos, líquidos e gases emitem, absorvem ou transmitem radiação em diferentes graus. Fato também afirmado por Lamberts et al. (2016), que diz que a radiação ocorre mediante uma dupla transformação da energia: uma parte do calor do corpo com maior temperatura se converte em energia radiante que chega até o corpo com menor temperatura, onde é absorvida numa proporção que depende das propriedades da superfície receptora, sendo novamente transformada em calor;

Os mecanismos de transferência de calor são de suma importância no estudo do desempenho térmico das coberturas, permitindo identificar como funciona o fluxo de calor do exterior da edificação para o seu interior, afetando diretamente no conforto térmico dos usuários da edificação. Çengel e Ghajar (2012) afirma que nem todos os mecanismos de calor supracitados podem existir simultaneamente.

Alguns exemplos deste fato são vistos na Figura 4 podendo ocorrer a transferência em sólidos opacos que ocorre somente na forma de condução, como é o caso dos elementos opacos das edificações (paredes, lajes, coberturas, etc), diferentemente dos

sólidos transparentes, como elementos translúcidas da edificação (esquadrias de vidro e coberturas translúcidas), que podem transferir por condução e radiação, além disso um sólido pode apresentar transferência de calor por convecção e/ou radiação em suas superfícies expostas a um fluido ou a outras superfícies, como é o caso de elementos como paredes e coberturas que aquecem em ambientes quentes através do ganho por convecção (a partir do ar) e por radiação (do Sol ou das superfícies ao redor), sendo que o seu interior irá lentamente se aquecendo à medida que ocorre a transferência de calor por meio de condução da região com maior temperatura para a região com menor temperatura.

Figura 4 – Esquema de transferência de calor na cobertura



Fonte: Elaboração própria (2024)

Na Figura 4 é possível visualizar os mecanismos de transferência de calor que ocorrem na cobertura, contemplando a condução que ocorre na cobertura e no forro, na qual a parte mais energética do sistema (exterior da cobertura e parte superior do forro) transfere a energia para a parte adjacente vizinha menos energéticas.

Pela Figura 4, é possível visualizar também a convecção natural que ocorre no exterior e no interior da cobertura, onde na parte externa da cobertura ocorre o processo de convecção natural onde a temperatura da cobertura exposta ao ar externo é inferior a temperatura do ar adjacente. logo devido a esta exposição, a temperatura do ar adjacente esfria e a temperatura da cobertura exposta aumenta, como resultado

da condução do calor do ar adjacente para o interior da cobertura. E no interior do sistema de cobertura a convecção natural em espaço fechado ocorre apenas em caso de a cobertura apresentar uma temperatura inferior a temperatura do forro (comportamento que é visto principalmente no período noturno), caso contrário, a transferência de calor ocorre puramente através da condução. Este fato se dá devido a natureza da densidade do fluido (ar aprisionado dentro do sistema de cobertura) na qual o fluido mais aquecido tende a se deslocar para a parte superior da área fechada devido a sua menor densidade, comparada ao fluido mais resfriado.

A Figura 4 apresenta também o mecanismo de transferência de calor através da radiação devido a exposição da cobertura com a radiação solar, na qual parte da radiação solar é absorvida pela cobertura, parte é refletida e a parte restante é transmitida caso utilizado um material semitransparente. A energia que é absorvida pela cobertura é então irradiado para o interior do sistema de cobertura aquecendo componentes como o forro, que posteriormente realiza o mesmo processo de absorção, reflexão e em caso de material semitransparente, a transmissão.

Na engenharia existem diversas formas de energia, sendo que as relacionadas com a estrutura molecular de um sistema e com o grau de atividade molecular são denominadas, segundo Çengel e Ghajar (2012) como energia microscópica e a soma de todas as energias microscópicas é denominada como energia interna (U).

O calor sensível ou a energia sensível, é descrito por Çengel e Ghajar (2012) como a parte da energia interna associada com a energia cinética das moléculas, sendo que a a velocidade média e o grau de atividade das moléculas são proporcionais a temperatura. Deste modo, em altas temperaturas, o autor explica que as moléculas tem alta energia cinética, conseqüentemente o sistema apresenta alta energia interna.

Já o calor latente ou energia latente, é descrito como a energia que está associada a fase de um sistema. O autor explica que a energia interna também está associada as forças intermoleculares entre as moléculas de um sistema, sendo que essas forças são mais fortes em sólidos e mais fracas em gases. Logo, se um sistema recebe energia suficiente para romper estas ligações moleculares, o sistema se torna gasoso com maior energia interna que na fase sólida e líquida, denominando este processo como mudança de fase.

Frota e Schiffer (2016) cita que as formas de termo-regulação do organismo funcionam através dos mecanismos de transferência de calor, na qual o calor perdido para o ambiente através de condução, convecção e radiação, é denominada calor sensível, ocorrendo devido a diferença de temperatura entre o corpo e o ambiente, enquanto que o

calor perdido por evapotranspiração é denominado calor latente, envolvendo a mudança de estado (o suor passa do estado líquido para o estado gasoso em forma de vapor), contribuindo assim para a sensação de conforto térmico dentro das edificações como visto no item 2.1.2.

Além disso Lamberts et al. (2016) afirmam que uma das estruturas da edificação que mais influenciam no condicionamento térmico é a cobertura, que recebe grande parte da radiação solar durante o período do dia e dependendo do tipo de material utilizado, o calor é transmitido com mais facilidade ou dificuldade pelos mecanismos de transferência de calor para o interior das edificações e o calor armazenado durante esse período é liberado no período noturno. Logo diversos autores (LAMBERTS et al., 2016; LITARDO et al., 2020; YANG; WANG, 2014), entre outros concluem que a utilização de coberturas que proporcionam um desempenho térmico satisfatório e que também auxiliam na mitigação do efeito das ilhas de calor, como é o caso das coberturas ecológicas (telhado verde e telha ecológica), influenciam não só o conforto térmico dos usuários da edificação como também o conforto térmico dos usuários das áreas adjacentes, como visto no item 2.1.1.

2.2.4 Transmitância térmica das coberturas

Para avaliar o desempenho térmico dos sistemas de cobertura nas edificações a NBR 15575-5 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024b) determina um requisito mínimo que deve ser atendido pelos sistemas de cobertura para proporcionar aos usuários da edificação a sensação de conforto térmico. Este requisito é o parâmetro Transmitância térmica⁸ de coberturas (U_{cob}), na qual a determinação dos valores a serem avaliados é regido pela NBR 15220-2 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a).

Os valores obtidos nos cálculos da NBR 15220-2 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a), devem ser igual ou inferior ao valor limite de transmitância térmica (U) da zona bioclimática analisada, sendo este valor limite determinado pela Tabela 1. O estado do Rio Grande do Sul apresenta parte do seu território em duas zonas bioclimáticas (Zona-1 e Zona-2), conforme já demonstrado na Figura 1. Para essas zonas

⁸Transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo; neste caso, dos vidros e dos componentes opacos das paredes externas e coberturas, incluindo as resistências superficiais interna e externa, induzida pela diferença de temperatura entre dois ambientes.

bioclimáticas, o limite de transmitância térmica (U) dos sistemas decobertura não devem ultrapassar o valor de $2,30\text{W/m}^2\text{K}$.

Tabela 1 – Critérios de cobertura quanto a transmitância térmica (U)

Transmitância térmica (U) ($\text{W/m}^2\text{K}$)				
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8	
$U \leq 2,30$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3$ FV	$U \leq 1,5$ FV

α é absorvância à radiação solar da superfície externa da cobertura.

NOTA: O fator de ventilação (FV) é estabelecido na ABNT NBR 15220-2.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15220-2 (2022)

A NBR 15220-2 2022a define um método que deve ser seguido para obter os valores de transmitância térmica e resistência térmica de um componente ou elemento da edificação, sendo estes valores resumidos pela norma como resultados como visto na Tabela 2. A forma de obter os resultados é dividido em dois (2) métodos, sendo eles o método de cálculo detalhado e o método de cálculo simplificado:

- **Método de cálculo detalhado** é através da realização de uma simulação numérica em todo o elemento da edificação que é analisado, seguindo regras de modelagem dispostos na ISO 10211;
- **Método de cálculo simplificado** é um método válido para camadas térmicamente homogêneas (componente contendo apenas uma camada com um tipo de material) ou não homogêneas (componente contendo mais de uma camada com diferentes materiais), podendo conter camadas de ar de até trinta centímetros (0,3m) de espessura, fixadores metálicos e sujeito a limitações citadas no subsubitem 2.2.4.6.

A Tabela 2 demonstra a forma como devem ser apresentados os valores resultados (Transmitância térmica e resistência térmica) ao serem calculados, obedecendo ao símbolo, unidade, módulo de destino⁹, intervalo válido e variabilidade do valor. A norma julga não necessário a consideração de um intervalo de tempo específico para o cálculo pelo fato de os dados de entrada, métodos e resultados serem adequadas a condição estacionária e assume serem parâmetros independentes em situações reais.

Os valores dos dados de entrada a serem utilizados nos cálculos devem ser adaptados aos identificadores apresentados na Tabela 3, sendo que a NBR 15220-2 2022a requisita que os dados a serem colocados na entrada sejam fornecidos pelos fabricantes de

⁹Caso deseje realizar uma relação com o conjunto de normas DEE (norma que cumpre os requisitos determinados na ISO 52000-1, no CEN/TS 16628 e no CEN/TS 16629) estabelecidos pela ISO 52000-1 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a)

Tabela 2 – Resultados, transmitância térmica e resistência térmica

Descrição	Símbolo	Unidade	Módulo de destino	Intervalo válido	Valor variável
Transmitância térmica dos elementos ou componentes com fluxo de calor ascendente	U	W/m ² K	M2-5	≥ 0	Não
Transmitância térmica dos elementos ou componentes com fluxo de calor descendente	U	W/m ² K	M2-5	≥ 0	Não
Resistência térmica de componentes opacos	$R_{c,op}$	m ² .K/W	M2-5	≥ 0	Não

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15220-2 (2022)

acordo com as normas pertinentes EN, EN ISO dos produtos (na área da CEN) ou então ISO equivalente ou normas nacionais (na área da CEN).

Tabela 3 – Identificadores

Nome	Símbolo	Unidade	Valor	Faixa	Fonte	Valor variável
Área	A	m ²	-	> 0	-	Não
Espessura da camada	d	m	-	> 0	-	Não
Condutividade térmica de projeto	λ	W/(m.K)	-	0 a 200	ISO 10456	Não
Resistência superficial externa	R_{se}	m ² .K/W	0,04	-	Seção 2.2.4.5	Não
Resistência superficial interna	R_{si}	m ² .K/W	-	0,1 a 0,2	Seção 2.2.4.5	Não

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15220-2 (2022)

Para esta pesquisa foi utilizado o método simplicidade, na qual os princípios e procedimentos a serem seguidos para sua utilização são apresentados nos subítemos 2.2.4.1 a 2.2.4.6

2.2.4.1 Princípios do procedimento de cálculo simplificado da transmitância térmica e resistências térmicas

Para realizar o método de cálculo simplificado a NBR 15220-2 2022a estabelece princípios para o procedimento, sendo eles:

- Obter a resistência térmica de cada parte termicamente homogênea ou não homogênea dos elementos da edificação;
- Combinar essas resistências individuais para obter a resistência térmica total do elemento da edificação, incluindo (quando apropriado) o efeito da resistência superficial;
- Calcular a transmitância térmica, conforme o subsubitem 2.2.4.2;
- As correções devem ser aplicadas nos valores de transmitância térmica de acordo com o subsubitem 2.2.4.6 e quando a correção total exceder 3% da transmitância térmica calculada, a correção deve ser desconsiderada.

2.2.4.2 Procedimento de cálculo simplificado da transmitância térmica

A transmitância térmica pelo cálculo simplificado é dada por:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (1)$$

Na qual:

U é a transmitância térmica [W/(m².K)];

R_{tot} é a resistência térmica total determinada no subsubitem 2.2.4.4 (m².K/W).

Obs:

Como dito no subsubitem 2.2.4.1, quando necessárias, as correções devem ser realizadas;

O valor da transmitância térmica, caso apresentado como resultado final, deve ser arredondado para dois dígitos significativos.

2.2.4.3 Procedimento de cálculo simplificado da resistência térmica

A resistência térmica de um componente deve ser dada por:

$$R_{c : op} = \frac{1}{U} - R_{si} - R_{se} \quad (2)$$

Na qual: R_{cop} é a resistência térmica do componente¹⁰ ($m^2.K/W$);

R_{si} é a resistência térmica superficial interna ($m^2.K/W$);

R_{se} é a resistência térmica superficial externa ($m^2.K/W$);

U é a transmitância térmica [$W/(m^2.K)$].

Obs:

As resistências superficiais devem ser as mesmas utilizadas para calcular a transmitância térmica;

O valor da transmitância térmica, caso apresentado como resultado final, deve ser arredondado para dois dígitos significativos.

2.2.4.4 Procedimento de cálculo simplificado da resistência térmica total

A resistência térmica total é dividida em dois tipos, sendo eles em camadas homogêneas e em camadas não homogêneas. Logo, conhecendo os valores de parâmetros térmicos dos materiais seguindo as adaptações descritas na Tabela 3, a resistência térmica é obtida por:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3)$$

Na qual:

R é a resistência térmica ($m^2.K/W$);

d é a espessura da camada de material do componente analisado (m);

λ é a condutividade térmica de projeto para o material [$W/(m.k)$].

Os valores de resistência térmica utilizados para cálculos intermediários¹¹ devem ser calculados com pelo menos três (3) casas decimais.

A resistência térmica total de um componente plano de uma edificação com camadas termicamente homogêneas e perpendiculares ao fluxo de calor, devem ser calculadas por:

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (4)$$

Na qual:

R_{tot} é a resistência térmica total ($m^2.K/W$);

R_{si} é a resistência superficial interna ($m^2.K/W$);

¹⁰É a resistência térmica do componente de superfície a superfície, sem os valores de resistências superficiais (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a)

¹¹Cálculos para obter a resistência térmica total

$R_1, R_2...R_n$ é a resistência térmica de projeto para cada camada ($m^2.K/W$);

R_{se} é a resistência superficial externa ($m^2.K/W$).

Obs:

O valor da resistência térmica total, caso apresentado como resultado final, arredondar para duas (2) casas decimais.

2.2.4.5 Resistências superficiais para o cálculo simplificado

Os valores de resistência superficial a serem utilizados para os cálculos é dado pela Tabela 4. A norma aconselha que em caso de inclinações direção de fluxo de calor, das apresentadas na Tabela 4, devem ser utilizados os valores de R_{se} e R_{si} horizontal sendo o valor máximo de inclinação aceitável de 30° .

Tabela 4 – Valores convencionais de resistências superficiais

Resistência superficial $m^2.K/W$	Direção do fluxo de calor	
	Ascendente	Descendente
R_{si}	0,10	0,17
R_{se}	0,04	0,04

Nota 1: Os valores de resistência superficial se aplicam às superfícies em contato com o ar. Nenhuma resistência superficial se aplica às superfícies em contato com outro material.

Nota 2: Os valores de resistência superficial interna são calculados para $\epsilon = 0,9$ e com $hr\theta$ avaliado a 20° .

Os valores de resistência superficial externa são calculados para $\epsilon = 0,9$, $hr\theta$ avaliado a 10° , para $v = 4$ m/s.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15220-2 (2022)

2.2.4.6 Correção da transmitância térmica para o cálculo simplificado

A NBR 15220-2 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a), define que a transmitância térmica obtida pelos seus procedimento deve ser corrigida de forma a permitir o efeito de:

- Vazios de ar no isolamento;
- Fixadores mecânicos que penetram em uma camada do isolamento;
- Precipitação em telhados invertidos¹².

¹²Aquele que possui uma camada de isolamento abaixo da membrana de impermeabilização (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a).

Na qual a transmitância corrigida é dada por:

$$U_c = U + \Delta U \quad (5)$$

Na qual:

U_c é a transmitância térmica corrigida;

U é a transmitância térmica de projeto;

E a correção da transmitância térmica (ΔU) é dada por:

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (6)$$

Na qual:

ΔU_g é a correção para os vazios de ar;

ΔU_f é a correção para os fixadores mecânicos;

ΔU_r é a correção para os telhados invertidos.

Quando são utilizados fixadores mecânicos nos componentes das edificações a norma apresenta um procedimento de correção, caso já não tenha sido considerados por meio de outros métodos. Para esta pesquisa foi escolhido utilizar a correção com o procedimento aproximado, sendo ele o procedimento da NBR 15220-2 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a).

A norma afirma que quando uma camada de isolamento é penetrada por fixadores mecânicos, como é o caso de fixadores de telhado ou fixadores de painel composto, a correção da transmitância é dada por:

$$\Delta U_f = \alpha \cdot \frac{\lambda_f \cdot A_f \cdot n_f}{d_l} \cdot \left(\frac{R_l}{R_{tot}} \right)^2 \quad (7)$$

Na qual:

α é 0,8 se o fixador penetra completamente na camada de isolamento;

λ_f é a condutividade térmica do fixador [W/(m.K)];

n_f é o número de fixadores por metro quadrado (m²);

A_f é área da seção transversal de um fixador (m²);

d_l é o comprimento do fixador que penetra na camada de isolamento¹³ (m);

R_l é a resistência térmica da camada de isolamento penetrada pelos fixadores (m².K/W);

¹³comprimento dentro do componente de isolamento, sendo que caso colocado inclinado, o comprimento pode mudar

R_{tot} é a resistência térmica total do componente, ignorando qualquer ponte térmica, como obtido no subsubitem 2.2.4.4 ($m^2.K/W$).

2.2.5 Pesquisas relacionadas

No meio acadêmico muitos pesquisadores (Balvedi e Giglio (2023), Gunn, Gunay e Geel (2021), Michels, Güths e Silva (2020), entre outros), tem voltado o seu interesse para a questão da sustentabilidade na construção civil e para o estudo dos sistemas de telhados, custos e sua eficiência energética.

Balvedi e Giglio (2023) pesquisaram sobre a influência de sistemas de telhado verde no desempenho energético de edifícios e seus arredores em diferentes microclimas no Brasil. Foram realizados inúmeras simulações computacionais com valores de medições registradas para validação dos cálculos de telhado verde, listando assim diferentes parâmetros de vegetação e substrato para serem utilizados na criação de diferentes sistemas de telhado verde extensivo. Em clima temperado (Porto Alegre) os autores constataram que um baixo índice de área folicular, aliado a alta espessura de substrato e baixa transmitância térmica (U), proporcionaram uma redução no consumo de energia para climatização em 5,6% quando comparado com telhados frios (telhados trabalhados com materiais como membranas, shingle, metal, entre outros.) Em clima tropical semiúmido (Brasília), devido ao alto índice de área folicular, espessura intermediária e alta transmitância térmica, foi constatado uma economia de 4,9% de energia para climatização. Em clima equatorial (São Luís), os sistemas de telhados frios apresentaram maior redução no consumo energético (1,48%) que com telhados verdes. Os autores concluíram que os telhados verdes tem um grande impacto no desempenho energético das edificações e seus arredores, dependendo da combinação de parâmetros (principalmente as características da vegetação e espessuras do substrato) que são utilizados e o clima a que são inseridos

Michels, Güths e Silva (2020) analisaram o desempenho térmico de uma cobertura verde e de uma cobertura de telha de fibrocimento para o clima da cidade de Florianópolis (SC, Brasil), por meio de uma bancada experimental. As medidas foram realizadas por sensores de temperatura e fluxo de calor durante o período de julho e dezembro de 2017, selecionando assim estações com temperaturas quentes e amenas. O que permitiu a determinar a eficácia do telhado verde na redução de ganhos e perdas térmicas. Os autores constataram que para o período total do experimento, o telhado verde apresentou redução

dos ganhos térmicos durante o período diurno, por volta de 81% quando comparado a telha fibrocimento. Durante o período noturno as perdas térmicas foram reduzidas em aproximadamente 53%. A redução dos ganhos e perdas térmicas, segundo os autores, são atribuídas a camada de drenagem, espessura do solo e ao sombreamento e processo de evapotranspiração da vegetação. Os resultados sugerem que as coberturas verdes são uma forma interessante de melhorar o desempenho térmico das edificações em regiões subtropicais, levando assim a economia de energia utilizada para climatização. Foi constatado também que o sombreamento e o processo de evapotranspiração da vegetação contribuíram de forma significativa a temperatura superficial, reduzindo ganhos e perdas térmicas.

Gunn, Gunay e Geel (2021) realizaram uma análise comparativa de desempenho em dois sistemas distintos de telhado (cobertura térmica verde e convencional) em condições de clima temperado. Os autores objetivaram quantificar a redução total de troca de calor que o telhado verde consegue promover em relação a um telhado convencional, analisando os sistemas mensalmente durante os anos de 2016 e de 2017. Os resultados do estudo mostraram que em todas as estações, o telhado verde apresentou a maior redução da troca térmica. Os autores concluíram que o telhado verde pode reduzir significativamente a troca de calor nos telhados em climas quentes, principalmente devido a capacidade de interceptação da radiação solar pela vegetação e também devido a absorção da camada de substrato e a capacidade de evapotranspiração. Foi constatado também que a performance do telhado verde dependeu diretamente, entre outros fatores, das variações da temperatura das estações do ano e da radiação solar.

Maiolo et al. (2020) Analisaram os impactos dos diferentes tipos de telhado verde nas temperaturas máximas e mínimas do telhado e na flutuação das temperaturas no clima mediterrâneo. As análises mostraram que durante o verão e inverno, o uso de telhado verde poderia mudar a temperatura na superfície do telhado de modo a torná-lo próximo do ideal. Segundo os autores, este fato foi visto com mais intensidade no período do verão. Para Maiolo et al. (2020) foi notável o impacto das coberturas verdes em moderar as temperaturas do telhado durante o verão. Durante o inverno as coberturas verdes realizaram grande papel, moderando as ondas de frio. Os autores também concluíram que as coberturas verdes apresentaram pouca diferença na flutuação de temperatura máxima e mínima na média mensal. Segundo os autores, o experimento demonstrou que no clima mediterrâneo, a falta de camada de isolamento aprimorou a performance energética no verão, sendo um efeito benéfico mesmo que, durante o inverno, aumente um pouco a

demanda por aquecimento.

BORGES e Macedo (2022) realizaram uma análise comparativa de benefícios e custos de telhados verdes e telhas ecologicamente sustentáveis em comparação com telhados convencionais. Os autores concluíram que telhados ecológicos oferecem diversos benefícios como melhoria no desempenho térmico, durabilidade, estética e sustentabilidade. No entanto, os autores pontuam que é necessário considerar o custo inicial proporcional ao benefício que a estrutura irá proporcionar. Exemplificando que implantação de um telhado verde é aconselhado em situações em que a edificação já possua laje. Já a telha Onduline apresenta, inicialmente, custo inferior às telhas convencionais. No entanto, os autores pontuam que em consideração a sua durabilidade, a telha cerâmica possui um custo benefício superior.

Boff et al. (2022) realizaram uma revisão bibliográfica nas bases de dados da Scopus, Scielo, Web of Science (mecanismos de busca e no portal acadêmico da CAPES), identificando os principais materiais utilizados para a fabricação das telhas ecológicas e os principais parâmetros que os diferenciam das telhas convencionais. Os autores concluíram que, em geral, todas as telhas ecológicas apresentam características mecânicas melhores que as telhas convencionais, principalmente levando em consideração o alto potencial de isolamento acústico e térmico, alta resistência ao fogo, resistência a deformações e impactos. Além disso, Boff et al. (2022) pontuam como ponto positivo o fato destas telhas possuírem uma cadeia de produção atrelada ao desenvolvimento sustentável. Os autores também identificaram que a maior parte dos estudos estão ligados a telhas ecológica com Tetra Pak, principalemnte devido a capacidade de ser 100% reaproveitada e devido ao seu elevado potencial isolante térmico. No entanto, Boff et al. (2022) pontuam que as telhas ecológicas mais comercializadas no Brasil são as telhas vegetais produzidas pela Onduline (produzidas através de papel reciclado), o que as tornam leves, facilitando o manuseio.

Yang et al. (2020) investigam o impacto da ilha de calor urbana na temperatura ambiente local, de modo a refletir nas demandas de resfriamento e aquecimento das edificações. Usando dados meteorológicos coletados de 2014 a 2016, desenvolveram dados de climáticos de zonas climáticas com diferentes usos, morfologia e coberturas superficiais e seus efeitos com ilha de calor urbano. Os autores concluíram que os edifícios de escritórios apresentaram menor sensibilidade a efeitos de ilha de calor. Fato comprovado principalmente pela demanda energética para resfriamento destes edifícios, que apresentaram um aumento de 9 a 14%, enquanto que para as residências, esse

aumento foi da ordem de 12 a 24%. Os autores concluíram que o efeito da ilha de calor urbana tem um impacto significativo na demanda de energia dos edifícios em Nanjing, China. Os autores constataram também que as edificações residenciais são mais sensíveis aos efeitos da ilha de calor urbana. Além disso os autores enfatizam a importância de desenvolver dados climáticos com suas respectivas zonas locais para avaliar com precisão o efeito da ilha de calor urbana no desempenho energético das edificações.

Lopez-Cabeza et al. (2022) avaliam o impacto do albedo no conforto térmico dos usuários de um pátio em Sevilha no sul da Espanha além de fornecerem recomendações de designs de pequenos pátios para o clima da região. Os autores realizaram um estudo de caso em dois períodos distintos, antes e depois da instalação de uma fachada verde. Além disso foi realizado duas etapas de simulações, inicialmente com captura de dados para validar e calibrar o software e posteriormente o software foi utilizado para analisar diferentes configurações de albedo. Os autores obtiveram que materiais com alto albedo reduziram o conforto térmico dos usuários em até 5°C, mesmo que isso resulte em uma redução da temperatura da superfície do pátio, fato explicado pelo baixo acúmulo de calor, refletindo mais radiação solar ao ambiente adjacente. Logo os autores recomendam o uso de albedo médio nas paredes do pátio de modo a equilibrar os efeitos de absorção e refletância e no pavimento aconselham o uso de alto albedo, fazendo com que a temperatura do ar no pátio tenha uma singela redução. Além disso o estudo conclui que a fachada verde contribui de forma moderada no pátio, reduzindo a temperatura em aproximadamente 0,5°C quando comparado ao cenário sem a fachada. Os autores concluem que o albedo exerce grande impacto no conforto térmico dos usuários de um pátio pequeno no clima quente de Sevilha. Determinam que o albedo das paredes tem maior influência que os do pavimento, causando maiores variações de temperatura.

As tabelas 5 a 12 apresentam uma compilação mais detalhada dos trabalhos apresentados neste tópico.

Tabela 5: Pesquisa de Nadia Balved e Thalita Giglio

Autores: Nadia Balved e Thalita Giglio
Ano: 2023
Local: Londrina/PR - Brasil
Pesquisa: Influência dos sistemas de telhado verde na performance energética das edificações e aos seus arredores

Continued on next page

Tabela 5: Pesquisa de Nadia Balved e Thalita Giglio (Continued)

<p>Objetivos: Analisar a influência que os sistemas de telhado verde exercem na performance energética das edificações e ao terreno adjacente, em diferentes climas brasileiros;</p> <p>Identificar uma combinação ideal de parâmetros de telhado verde, proporcionando economia de energia e melhoria na qualidade do ar.</p>
<p>Metodologia: Foram realizadas inúmeras simulações computacionais com valores de medições registradas para validação dos cálculos de telhado verde, listando assim parâmetros de vegetação e substrato para serem utilizados na criação de diferentes sistemas de telhado verde extensivo.</p> <p>Ao final as diferentes combinações foram analisadas, identificando assim o melhor telhado verde para cada clima com base nos benefícios que cada uma proporciona para a edificação e aos seus arredores.</p>
<p>Resultados: Em clima temperado (Porto Alegre) os autores constataram que um baixo índice de área folicular, aliado a alta espessura de substrato e baixa transmitância térmica (U) proporcionaram uma redução no consumo de energia para climatização em 5,6% quando comparado com telhados frios (telhados trabalhados com materiais como membranas, shingle, metal, entre outros), além de aumentar a evapotranspiração liberado no ambiente externo, aumentando a umidade relativa e reduzindo a temperatura do ar externa.</p> <p>Em clima tropical semiúmido (Brasília), devido ao alto índice de área folicular, espessura intermediária e alta transmitância térmica, foi constatado uma economia de 4,9% de energia para climatização da edificação.</p> <p>Em clima equatorial (São Luís), sistemas de telhados frios apresentaram maior redução no consumo energético que com telhados verdes, sendo de 1,48%, indicando que sistemas com baixa massa térmica (Massa térmica é a capacidade de um material de absorver, armazenar e liberar calor (Chris Reardon, Caitlin McGee and Geoff Milne, 2013)) são mais favoráveis a climas com baixa variação de temperatura.</p>
<p>Conclusão: Os autores concluem que os telhados verdes tem um grande impacto no desempenho energético das edificações e seus arredores e dependem da combinação de parâmetros (principalmente as características da vegetação e espessuras do substrato) que são utilizados e o clima a que são inseridos.</p>

Fonte: Balvedi e Giglio (2023)

Tabela 6: Pesquisa de Caren Michels, Saulo Güths e Luana Castro da Silva

Autores: Caren Michels, Saulo Güths e Luana Castro da Silva
Ano: 2020
Local: Curitiba/PR - Brasil
Pesquisa: Desempenho térmico de uma cobertura verde testada em bancada experimental
Objetivos: Analisar o desempenho térmico de uma cobertura verde e de uma cobertura com telha de fibrocimento para o clima da cidade de Florianópolis (SC, Brasil) por meio de uma bancada experimental.
Metodologia: Em uma bancada experimental localizado em Florianópolis/SC - Brasil, foi realizado uma comparação do desempenho térmico entre uma cobertura verde e uma cobertura com fibrocimento, ambas contendo uma laje de concreto. As medidas foram realizadas por sensores de temperatura e fluxo de calor durante o período de julho e dezembro de 2017, selecionando assim estações com temperaturas quentes e amenas. Possibilitando assim determinar a eficácia do telhado verde na redução de ganhos e perdas térmicas.
Resultados: Os autores constataram que para o período total do experimento, o telhado verde apresentou redução dos ganhos térmicos durante o período diurno, por volta de 81% quando comparado a telha fibrocimento e durante o período noturno as perdas térmicas foram reduzidas em aproximadamente 53%. A redução dos ganhos e perdas térmicas são atribuídas, de acordo com os autores, a camada de drenagem, espessura do solo, ao sombreamento da vegetação e ao processo de evapotranspiração da vegetação.
Conclusão: Os resultados sugerem que as coberturas verdes são uma forma de melhorar o desempenho térmico das edificações em regiões subtropicais, levando assim a economia de energia utilizada para climatização. Foi constatado também que o sombreamento e o processo de evapotranspiração da vegetação contribuíram de forma significativa a temperatura superficial, reduzindo ganhos e perdas térmicas.

Fonte: Michels, Güths e Silva (2020)

Tabela 7: Pesquisa de Peter Gunn, Burak H. Gunay e Paul J. Van Geel

Autores: Peter Gunn, Burak H. Gunay e Paul J. Van Geel
Ano: 2021
Local: Copenhage - Dinamarca
Pesquisa: Uma análise comparativa de vários anos do desempenho térmico de coberturas verdes e convencionais sob condições climáticas temperadas
<p>Objetivos: Quantificar a redução total de troca de calor que o telhado verde promove em relação a um telhado convencional, analisando mensalmente durante os anos de 2016 e 2017;</p> <p>Analisar as diferenças de clima em Ottawa durante as estações e interpretar como essas diferenças regularizam o fluxo de calor para cada telhado.</p>
<p>Metodologia: A troca de calor é calculada e analisada em uma cobertura verde e uma cobertura convencional na universidade de Carleton durante dois anos. Os termopares foram posicionados no teto da sala (logo abaixo do sistema de cobertura), acima do sistema de drenagem e os sensores de umidade, temperatura do ar e de radiação de ondas curtas foram instalados acima do telhado verde.</p> <p>Com a captura de perdas e ganhos de calor ocorrendo de hora em hora, os valores foram computados todo mês e convertidos em valores mensais cumulativos, determinando assim a performance térmica dos telhados.</p>
<p>Resultados: Analisando os resultados em todas as estações o telhado verde apresentou a maior redução de troca térmica, sendo que a menor redução é acometida na estação do outono, sendo de 7,7% e a maior redução ocorreu durante o verão, com 56,4%. Os autores afirmam que durante o verão, alguns fatores que auxiliaram na redução da troca de calor no telhado verde foi a alta taxa de sombreamento da vegetação, absorção da camada de substrato e posteriormente a evapotranspiração, fator que não ocorre muito durante o inverno devido a baixa taxa de sombreamento a cobertura de neve, aumentando na capacidade de troca de calor do telhado.</p>

Continued on next page

Tabela 7: Pesquisa de Peter Gunn, Burak H. Gunay e Paul J. Van Geel (Continued)

Conclusão: Os autores concluem que o telhado verde pode reduzir significativamente a troca de calor nos telhados em climas quentes, principalmente devido a capacidade de interceptação da radiação solar pela vegetação, a absorção da camada de substrato e a capacidade de evapotranspiração. Foi constatado também que o performance do telhado verde depende muito das variações da temperatura das estações, radiação solar e da cobertura de neve, podendo provocar alteração na capacidade de troca de calor.

Fonte: Gunn, Gunay e Geel (2021)

Tabela 8: Pesquisa de Mario Maiolo et al.

Autores: Mario Maiolo et al.
Ano: 2020
Local: Basiléia - Suíça
Pesquisa: O papel das coberturas verdes extensivas na redução do consumo energético dos edifícios no clima mediterrânico
Objetivos: Analisar os impactos dos diferentes tipos de telhado verde nas temperaturas máximas e mínimas do telhado e a flutuação das temperaturas; Investigar as vantagens e desvantagens de se utilizar diferentes camadas de isolamento no clima mediterrâneo; Identificar os parâmetros que afetam o desempenho dos telhados verdes.
Metodologia: Baseado em dados experimentais coletados em 2016 na Universidade de Calabria no sul da Itália, o estudo comparou as temperaturas de um telhado convencional com outros três (3) tipos de telhados verdes. Os dados foram coletados em intervalos de minutos em telhados extensivos, assim futuramente foi analisado o impacto das diferentes espessuras das coberturas.

Continued on next page

Tabela 8: Pesquisa de Mario Maiolo et al. (Continued)

<p>Resultados: As análises mostram que durante o verão e inverno, o uso de telhado verde poderia mudar a temperatura na superfície do telhado de modo a torná-lo próximo do ideal, fato visto com mais frequência no período do verão.</p> <p>O impacto das coberturas verdes em moderar as temperaturas do telhado durante o verão são destaque, no entanto durante o inverno é visto que realizaram grande papel moderando as ondas de frio. É visto também que as coberturas verdes apresentam pouca diferença na variação de temperatura máxima e mínima na média mensal.</p> <p>O experimento demonstra que no clima mediterrâneo, a falta de camada de isolamento aprimora a performance energética no verão, sendo um efeito benéfico mesmo que durante o inverno aumente um pouco a demanda por aquecimento. Além disso, não utilizando uma camada de isolamento o efeito de evapotranspiração auxilia no resfriamento passivo da estrutura.</p>
<p>Conclusão: Os autores concluem que os telhados verdes tem impacto positivo na moderação da temperatura superficial do telhado, principalmente no verão, logo fazendo com que a temperatura interna da edificação tenha melhores condições de conforto.</p> <p>Mesmo com a falta de uma camada de isolamento, os autores julgam positivamente o desempenho térmico da estrutura do telhado, principalmente no verão, mesmo tornando ligeiramente pior o desempenho no inverno. Além disso os autores identificaram que os parâmetros de clima, irrigação e os materiais e espessuras do telhados influenciam fortemente o desempenho térmico dos telhados.</p>

Fonte: Maiolo et al. (2020)

Tabela 9: Pesquisa de Lucas Rafael Liberato Borges et al.

Autores: Lucas Rafael Liberato Borges et al.
Ano: 2022
Local: Ponta Grossa/PR - Brasil
Pesquisa: Telhados verdes e telhas ecologicamente sustentáveis: Análise comparativa de benefícios e custos em comparação com telhados convencionais

Continued on next page

Tabela 9: Pesquisa de Lucas Rafael Liberato Borges et al. (Continued)

<p>Objetivos: Analisar os custos diretos de material e mão de obra associados ao uso de telhados verdes e telhas ecologicamente sustentáveis como soluções sustentáveis na construção civil e compará-los com sistemas de cobertura convencionais;</p> <p>Determinar se o custo-benefício da implementação de telhados ecologicamente sustentáveis compensam seu investimento inicial em comparação com os sistemas de cobertura convencionais.</p>
<p>Metodologia: Utilizou-se um método comparativo para analisar as semelhanças e diferenças entre os telhados estudados, afim de descobrir se o custo-benefício ao executar telhados verdes ou as telhas ecologicamente sustentáveis compensam, ao invés dos sistemas construtivos de telhado convencionais. O orçamento foi analisado afim de determinar os custos diretos de material e mão de obra associados a cada sistema de cobertura.</p>
<p>Resultados: Ao comparar as telhas Onduline, os autores constataram que elas apresentam vantagens como peças grandes e leves, menor gasto com sistema estrutural, pouca absorção acústica, térmica e de umidade, além de apresentarem selo verde, garantindo a não agressão de florestas tropicais em sua confecção.</p> <p>Realizando um levantamento quantitativo e de custos para implantação de todos os telhados para uma mesma área de telhado, foi obtido pelos autores que o telhado verde apresentou o maior custo para implantação, sendo de R\$ 12.567,17 reais, e o telhado com telha Onduline apresentou o menor custo de implantação, apresentando um total de R\$ 3.613,73 reais, sendo por volta de R\$ 1.500,00 reais mais barato que os telhados convencionais.</p>
<p>Conclusão: Os autores concluem que telhados ecológicos oferecem diversos benefícios como melhoria no desempenho térmico, durabilidade, estética e sustentável. No entanto é necessário também que apresentem um custo inicial proporcional ao benefício que a estrutura irá proporcionar, por isso a implantação de um telhado verde é aconselhado em situações em que a edificação já possua laje. Já a telha Onduline apresenta custo mais inferior inicialmente que as telhas convencionais, no entanto levando em consideração a sua durabilidade, a telha cerâmica ainda possui custo benefício superior.</p>

Fonte: BORGES e Macedo (2022)

Tabela 10: Pesquisa de Eduardo Haefliger Boff et al.

Autores: Eduardo Haefliger Boff et al.
Ano: 2022
Local: Marabá/PA - Brasil
Pesquisa: Desempenho de diferentes tipos de telhas ecológicas
Objetivos: Por meio de uma revisão bibliográfica, identificar os principais materiais que são utilizados para a fabricação das telhas ecológicas, bem como avaliar o desempenho dessas telhas quando comparadas às telhas convencionais.
Metodologia: Realização de uma revisão bibliográfica nas bases de dados da Scopus, Scielo, Web of Science, mecanismos de busca e no portal acadêmico da CAPES. Identificando os principais materiais utilizados para a fabricação das telhas ecológicas e os principais parâmetros que os diferenciam das telhas convencionais.
Resultados: O artigo mostra que em geral todas as telhas ecológicas apresentam características mecânicas melhores que os convencionais principalmente levando em consideração o alto potencial de isolamento acústico e térmico, alta resistência ao fogo, resistência a deformações e impactos, além de possuírem uma cadeia de produção atrelada ao desenvolvimento sustentável. Os autores identificaram que a maior parte dos estudos estão ligados a telhas ecológica com Tetra Pak, principalmente devido a capacidade de ser 100% reaproveitada e devido ao seu elevado potencial isolante térmico. No entanto as telhas ecológicas mais comercializadas são as telhas vegetais produzidas pela Onduline, produzidas através de papel reciclado, tornando-as leves, logo apresentam facilidade no manuseio.
Conclusão: Os autores concluem que as telhas ecológicas apresentaram melhores características mecânicas como a absorção de água, desempenho térmico, carga de ruptura à flexão e impacto de corpo duro, sendo uma alternativa para o mercado, uma vez que ainda possui maior leveza, diminuindo os custos com as estruturas de sustentação. No entanto afirmam que os estudos ligados a estas telhas, em relação aos parâmetros de desempenho, são muito poucas, dificultando a exploração do potencial de custo-benefício que essas telhas podem trazer para o mercado da construção civil.

Fonte: Boff et al. (2022)

Tabela 11: Pesquisa de Yang et al.

Autores: Yang et al.
Ano: 2020
Local: Nanjing - China
Pesquisa: Impacto da ilha de calor urbana na demanda energética em edifícios: Zona climática local em Nanjing
Objetivos: Investigar o impacto da ilha de calor urbana na temperatura ambiente local, de modo a refletir nas demandas de resfriamento e aquecimento das edificações.
Metodologia: O estudo usa dados meteorológicos coletados de 2014 a 2016 para desenvolver dados de climáticos de zonas climáticas com diferentes usos, morfologia e coberturas superficiais. O desempenho térmico das edificações residenciais e escritórios foram modeladas em software de simulação, sendo analisados em condições com o efeito da ilha de calor urbana. Deste modo os autores conseguiram determinar o impacto da ilha de calor urbana na demanda energética dos edifícios em cada zona.
Resultados: Como resultado os autores obtiveram que os edifícios de escritórios apresentaram menor sensibilidade a efeitos de ilha de calor, fato comprovado principalmente pela demanda energética para resfriamento de edifícios, onde as residências aumentaram de 12 a 24%, enquanto os escritórios tiveram aumento de 9 a 14%. Além disso foi visto pelos autores que o aumento da demanda por resfriamento é maior na zona com prédios compactos com médio porte.
Conclusão: Os autores concluíram que o efeito da ilha de calor urbana tem um impacto significativo na demanda de energia dos edifícios em Nanjing, China, na qual as edificações residenciais são mais sensíveis aos efeitos da ilha de calor urbana. Além disso os autores enfatizam a importância de desenvolver dados climáticos com suas respectivas zonas locais para avaliar com precisão o efeito da ilha de calor urbana no desempenho energético das edificações.

Fonte: Yang et al. (2020)

Tabela 12: Pesquisa de Lopes-Cabeza et al.

Autores: Lopes-Cabeza et al.

Continued on next page

Tabela 12: Pesquisa de Lopes-Cabeza et al. (Continued)

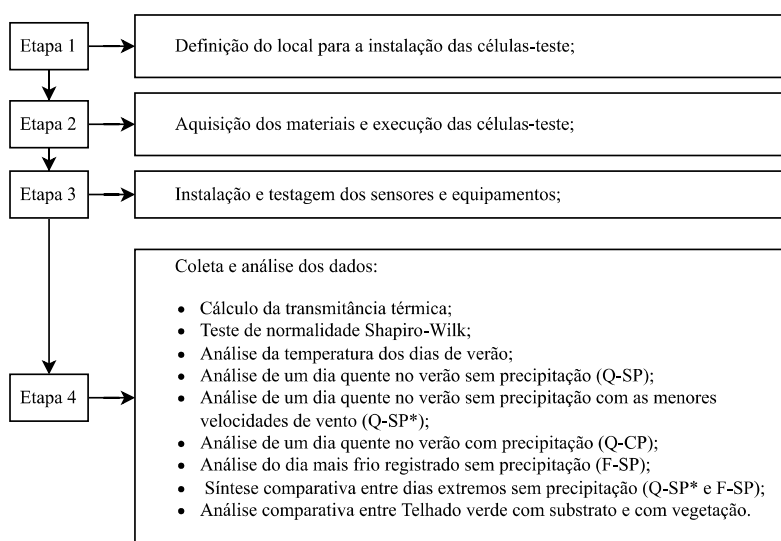
Ano: 2022
Local: Sevilha - Espanha
Pesquisa: Influência do albedo no microclima e no conforto térmico de pátios sob condições de clima quente de verão no mediterrâneo
Objetivos: Avaliar o impacto do albedo no conforto térmico dos usuários de um pátio em Sevilha no sul da Espanha; Fornecer recomendação de designs de pequenos pátios para este clima específico.
Metodologia: Os autores realizaram um estudo de caso, selecionando um pátio com geometria e proporções simples, comumente encontrado na região e a monitoração dele foi feita em dois períodos distintos, inicialmente antes da estrutura receber uma reforma com uma fachada verde e posteriormente depois da instalação da fachada verde. Além disso foi realizado duas etapas de simulações, inicialmente com captura de dados para validar e calibrar o software e posteriormente o software foi utilizado para analisar diferentes configurações de albedo afim de determinar o designe ótimo para o pátio.
Resultados: Os autores obtiveram que materiais com alto albedo reduziram o conforto térmico dos usuários em até 5°C, mesmo que isso resulte em uma redução da temperatura da superfície do pátio, fato explicado pelo baixo acumulo de calor, refletindo mais radiação solar ao ambiente adjacente. Logo os autores recomendam o uso de albedo médio nas paredes do pátio de modo a equilibrar os efeitos de absorção e refletância e no pavimento aconselham o uso de alto albedo, fazendo com que a temperatura do ar no pátio tenha uma singela redução. Além disso o estudo conclui que a fachada verde contribui de forma moderada no pátio, reduzindo a temperatura em aproximadamente 0,5°C quando comparado ao cenário sem a fachada.
Conclusão: Os autores concluem que o albedo exerce grande impacto no conforto térmico dos usuários de um pátio pequeno no clima quente de Sevilha. Determinam que o albedo das paredes tem maior influência que os do pavimento, causando maiores variações de temperatura, logo recomendam que para nas paredes sejam usados albedos médios e para os pavimentos, alto albedo.

Fonte: Lopez-Cabeza et al. (2022)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os materiais e equipamentos utilizados para a confecção das células-teste e os métodos de pesquisa empregados para a coleta, tratamento e apresentação de dados. O projeto está organizado em quatro (4) etapas distintas como apresentado na Figura 5 e foi desenvolvido em um campo aberto dentro da UNIPAMPA no campus Alegrete/RS.

Figura 5 – Organograma do programa experimental



Fonte: Elaboração própria (2024)

Na Etapa 1 do programa experimental foi feito a definição do local físico para a instalação das células-teste. Na Etapa 2 foram selecionados e adquiridos todos os materiais para a confecção das células-teste e realizada a sua execução. Nesta etapa também foi realizado o levantamento e a aquisição dos sensores e dos equipamentos necessários para a coleta e armazenamento dos dados. Na Etapa 3 foi instalado e realizado a testagem dos sensores utilizados para a pesquisa. A Etapa 4 correspondeu a coleta, tratamento, análise dos dados e discussão dos resultados.

3.1 Etapa 1 – Definição do local para a instalação das células teste

Este item apresenta as características bioclimáticas do município de Alegrete/RS, a orientação solar na região e a as características do local de implantação.

A definição do local para a implantação do projeto é de suma importância para

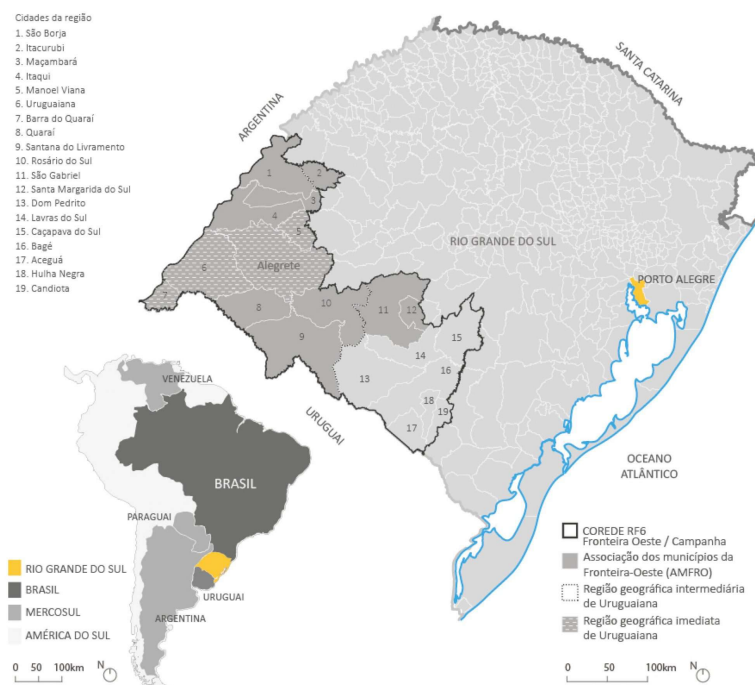
o bom desenvolvimento da pesquisa. Após instalados, as células-testes também servirão para outros estudos de pesquisa, deste modo, precisavam ser fixadas em um local que não prejudicassem o funcionamento do campus.

Neste trabalho foram seguidos alguns critérios para a escolha do local de implantação das células-testes, como o aproveitamento máximo da fonte solar durante o período de recolhimento de dados, a segurança dos equipamentos e sensores (reduzindo chances de dano e furto) e a autorização da diretoria do campus Alegrete.

3.1.1 Dados bioclimáticos do município de Alegrete

Alegrete é um município da fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul que está localizado a aproximadamente quatrocentos e noventa quilômetros (490Km) da capital, Porto Alegre, como apresentado na Figura 6. Está localizado nas coordenadas com latitude $29^{\circ}46'59''$ Sul e longitude $55^{\circ}47'31''$ Oeste a aproximadamente cem metros (100m) acima do nível do mar.

Figura 6 – Localização do município de Alegrete no estado do Rio Grande do Sul

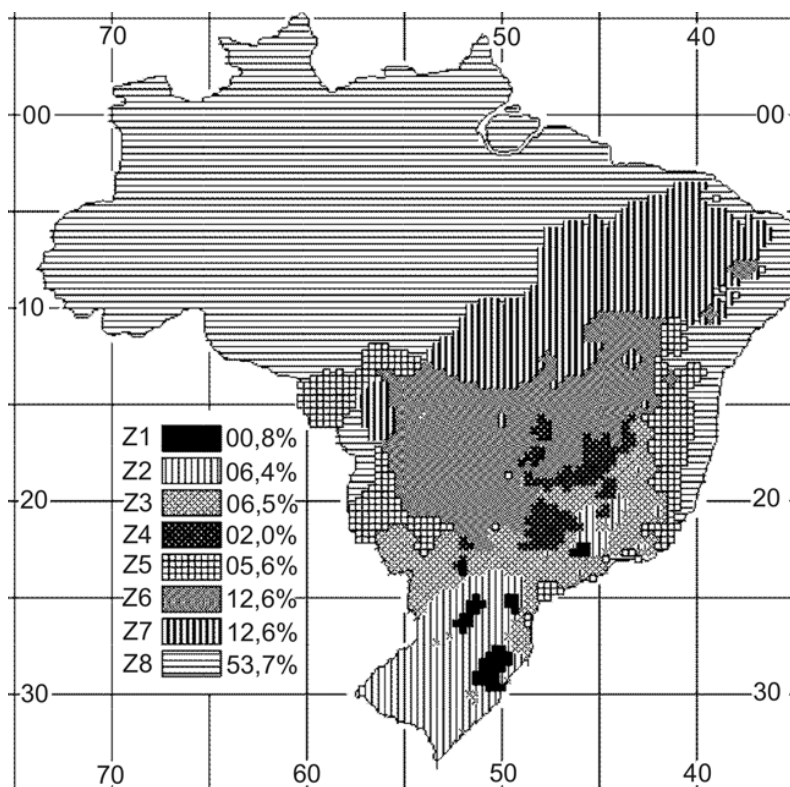


Fonte: Adaptado de 3C Arquitetura e Urbanismo (2019)

A NBR 15220 ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) divide o Brasil em 8 diferentes zonas bioclimáticas como visto na Figura 7. Z1 (Zona bioclimática

1) representa 0,8% de toda a extensão territorial, Z2 (Zona bioclimática 2) representa 6,4%, Z3 (Zona bioclimática 3) representa 6,5%, Z4 (Zona bioclimática 4) representa 2%, Z5 (Zona bioclimática 5) representa 5,6%, Z6 (Zona bioclimática 6) representa 12,6%, Z7 (Zona bioclimática 7) representa 12,6% e Z8 (Zona bioclimática 8) representa 53,7% aproximadamente.

Figura 7 – Zoneamento bioclimático brasileiro



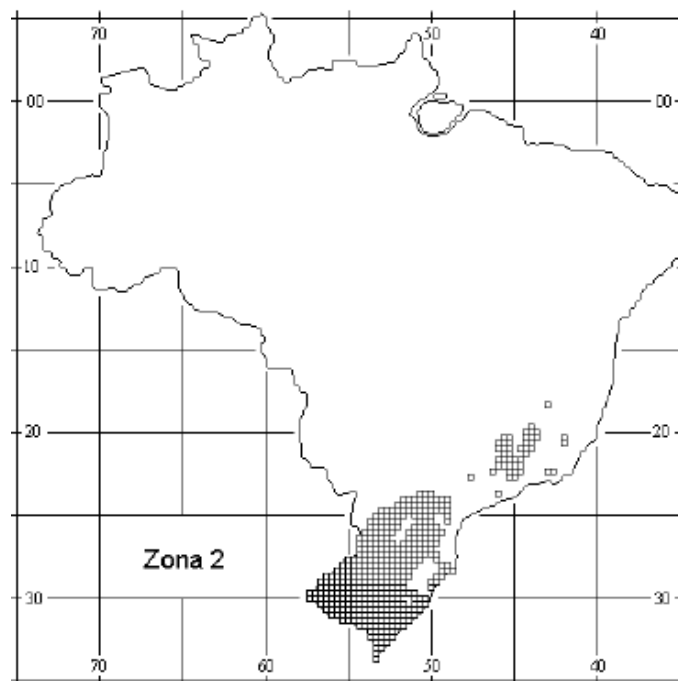
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15220-3 (2005)

A subdivisão das zonas bioclimáticas são importantes devido a extensão territorial nacional e a diversidade de climas entre regiões, como visto por Abrahão e Souza (2021) e Ghisi, Gosch e Lamberts (2007). Portanto para cada zona, a norma apresenta diretrizes construtivas e estratégias de condicionamento térmico passivo, com parâmetros como o tamanho das aberturas para ventilação, proteção para as aberturas, vedações e estratégias de condicionamento térmico passivo. O município de Alegrete está localizado na zona bioclimática 2 (Figura 8).

Na Figura 8, é possível visualizar que a zona 2 (Z2) onde o município de Alegrete e grande parte do estado do Rio Grande do Sul se localiza se estende por aproximadamente 6,4% de todo o território nacional.

Seguindo a NBR 15220-3 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas,

Figura 8 – Zoneamento bioclimático 2



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15220-3 (2005)

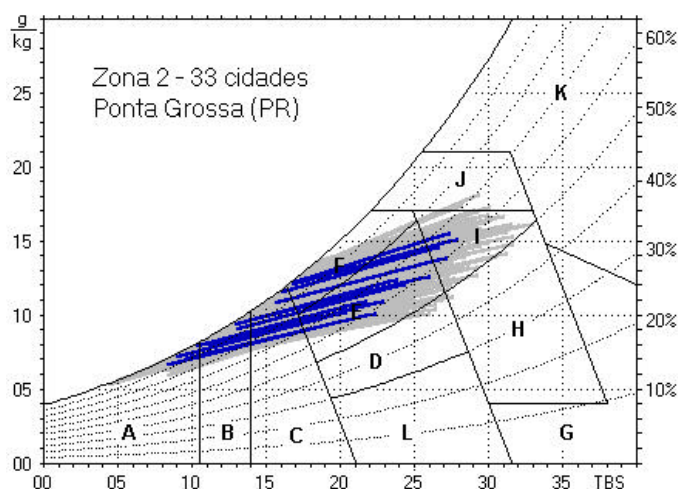
2005), a cidade de Ponta Grossa, localizada no estado do Paraná, representa e é base comparativa para todos os outros municípios da zona bioclimática 2. Tendo conhecimento disso a norma apresenta diretrizes que devem ser atendidas através da carta bioclimática de cidade de Ponta Grossa apresentado na Figura 9. Analisando a carta bioclimática da cidade de Ponta Grossa (PR) é possível visualizar que o município de Alegrete deve atender a estratégias que as zonas A, B, C, E¹ e F necessitam, sendo que:

- A – Zona de aquecimento artificial (calefação);
- B – Zona de aquecimento solar da edificação;
- C – Zona de massa térmica para aquecimento;
- E – Zona de conforto térmico;
- F – Zona de desumidificação (renovação do ar).

Para atender as necessidades de desempenho térmico das edificações na região da zona bioclimática 2 a norma apresenta recomendações de estratégias a serem adotadas para obter um condicionamento térmico passivo na edificação, sendo elas apresentadas na Tabela 13. Assim, a norma sugere que durante o período de verão as edificações

¹Sinalizado como conforto térmico, remete que não é necessário a adoção de nenhuma estratégia por já estar atingindo o desempenho térmico adequado para a zona bioclimática. (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005)

Figura 9 – Carta bioclimática da cidade de Ponta Grossa (PR)



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15220-3 (2005)

apresentem aberturas para proporcionar uma ventilação cruzada dentro da edificação. Durante o inverno, as aberturas devem proporcionar o máximo de aproveitamento da fonte solar, além da edificação apresentar vedações internas que tenham alta capacidade térmica. A norma também alerta que o condicionamento passivo sugerido na Tabela 13 durante a estação de inverno, não será suficiente, logo será necessário uma fonte de condicionamento térmico ativo (aquecedores).

Tabela 13 – Tipos de vedações externas para a zona bioclimática 2

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	(J) Ventilação cruzada
Inverno	(B) Aquecimento solar da edificação (C) Vedações internas pesadas (inércia térmica)
<p>Nota: O condicionamento passivo será insuficiente durante o período mais frio do ano. Os códigos J, B e C são os mesmos adotados na metodologia utilizada para definir o Zoneamento Bioclimático do Brasil (Ver anexo B da ABNT NBR 15220-3/2005).</p>	

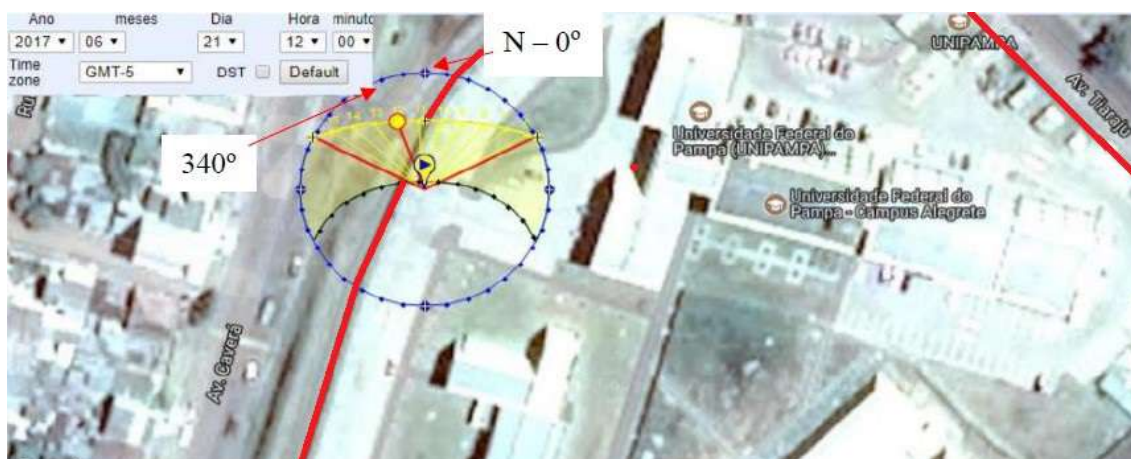
Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15220-3 (2005)

3.1.2 Orientação solar do município de Alegrete

Para o município de Alegrete, o professor Dr. José Wagner Maciel Kaehler, do grupo de pesquisa EIRE, seguindo orientações do CRESESB realizou um estudo para

obter o máximo de aproveitamento solar em todos os dez (10) campi da UNIPAMPA. Os pesquisadores concluíram nos seus estudos, que para a cidade de Alegrete uma correção de aproximadamente -24° em relação ao norte magnético, como visto na Figura 10 é necessária. Esta correção promove a maior média da irradiação diária ao longo do ano por m^2 , descrita pelo autor Kaehler (2017) como sendo de aproximadamente $5,24 \text{ kWh}/m^2 \cdot \text{dia}$.

Figura 10 – Percurso do Sol na UNIPAMPA – Campus de Alegrete – RS



Fonte: Adaptado de Kaehler (2017)

3.1.3 Características do local de instalação

O estudo ocorreu na cidade de Alegrete/RS (Figura 11), na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), em área de campo aberto. A Figura 11 indica a área que a UNIPAMPA ocupa dentro do município (representada pela hachura verde), e também indica a localização das células-teste (representadas pelo marcador vermelho dentro da área do campus).

O local escolhido para a instalação das células-teste, mostrado no marcador da Figura 11 é apresentado em detalhes na Figura 12, sendo que as células-teste se encontram próximos aos prédios de laboratórios da Engenharia Agrícola (1) e da Engenharia Mecânica (2), porém sem interferência de sombreamento.

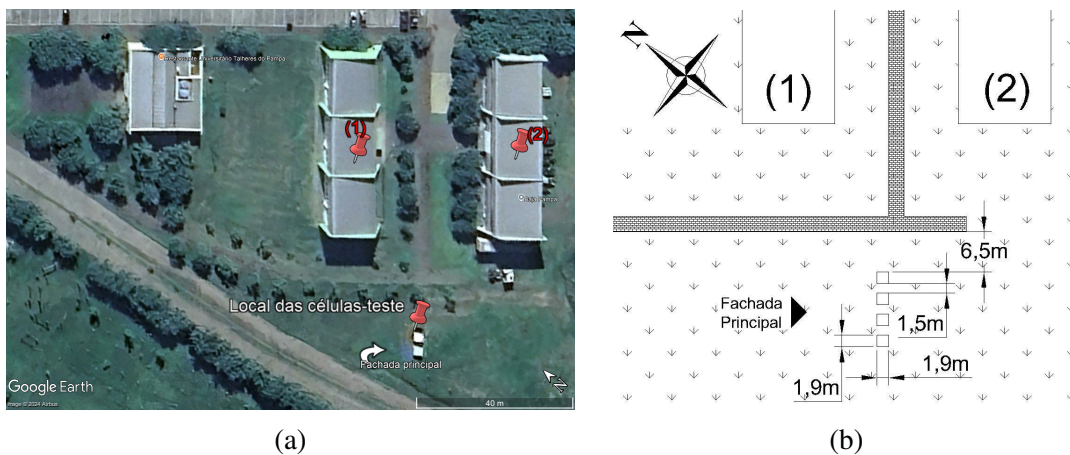
A Figura 12 apresenta em detalhes o local de implantação das células-teste, onde Figura 12 – (a) apresenta uma foto aérea com as marcações dos laboratórios da Engenharia Agrícola (1) e da Engenharia Mecânica (2) e a marcação do local de implantação. A Figura 12 – (b) apresenta um esboço do posicionamento das células-teste em relação aos

Figura 11 – Localização Unipampa no município de Alegrete/RS



Fonte: Retirado de *Google Earth* (2023)

Figura 12 – Local de implantação do projeto Imagem do *Google Earth* (a), Posicionamento das células-teste (b)



Fonte: Registros de pesquisa (2024)

prédios laboratoriais, possuindo um espaçamento entre cada protótipo de um metro e cinquenta centímetros (1,5m) de modo a não ocorrer interferência entre eles.

As células-teste foram demarcadas para apresentarem o plano inclinado da cobertura alinhada ao norte verdadeiro, como foi descrito no subitem 3.1.2. A correção do alinhamento permite que no período de inverno seja obtido a maior fonte de radiação solar para a célula-teste. Para a cidade de Alegrete o ângulo de correção como sendo de aproximadamente $\delta = -24^\circ$, em relação ao norte magnético, conforme já explanado no subitem 3.1.2. O processo de execução é mais detalhado no item 3.2.

3.2 Etapa 2 – Execução das células teste

Após a definição do local de implantação do projeto foi dado o início a segunda etapa do programa experimental. Primeiramente, foram definidas as características das células-teste (materiais, dimensões) e a quantidade de células-teste que foram executadas. Para que os objetivos da pesquisa fossem alcançados, foi determinado que seriam confeccionados quatro células-teste de alvenaria e que cada células-teste receberia um distinto sistema de cobertura (cobertura verde, cobertura com telha ecológica, cobertura com telha de fibrocimento e cobertura com telha de zinco). Para a cobertura com o telhado verde foi definido o sistema extensivo, com plantas de menor crescimento (como gramíneas e arbustos baixos). Esta escolha é justificada devido a facilidade de realizar a manutenção, maior facilidade para realizar a montagem do sistema de cobertura e redução da necessidade de uma estrutura de sustentação mais robusta.

As células-teste foram confeccionadas em alvenaria e foram projetadas para ocuparem um espaço total de um metro e cinquenta centímetros (1,5m) por um metro e cinquenta centímetros (1,5m), totalizando um total de dois metros quadrados e vinte e cinco centímetros quadrados (2,25m²). As dimensões escolhidas são embasadas em pesquisas realizadas por outros autores, como Rêgo et al. (2016) e Oliveira e Knies (2021). A justificativa pelas dimensões utilizadas nas células-teste não são esclarecidas pelos autores em seus artigos, no entanto para a pesquisa a justificativa para as dimensões utilizadas se dão a representar o máximo da realidade, dentro do limite orçamentário da pesquisa.

Os subitens a seguir apresentam de forma detalhada os procedimentos executados nesta etapa do programa experimental.

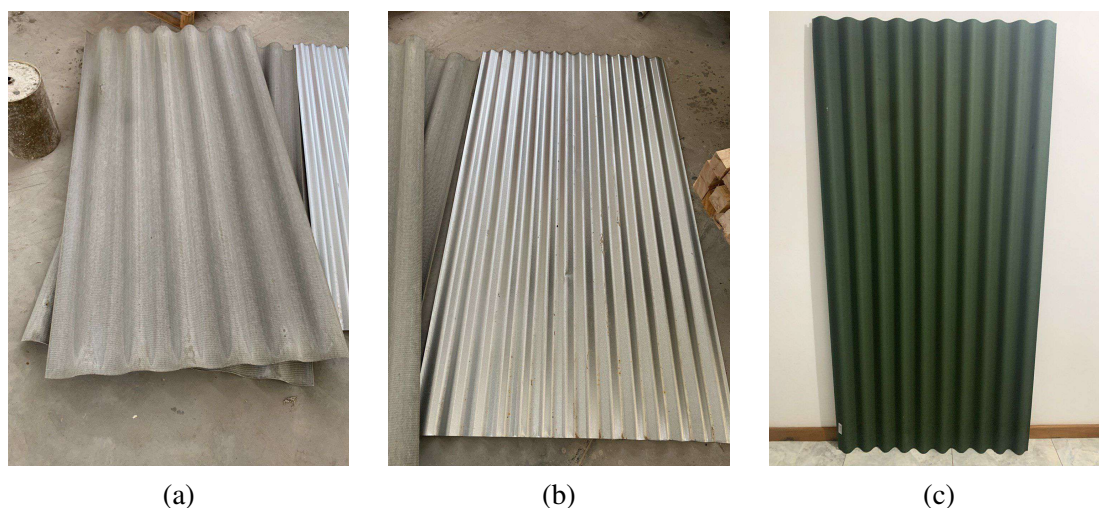
3.2.1 Caracterização dos sistemas de coberturas

Este item apresenta os componentes e a estrutura dos sistemas de coberturas de chapas/painéis (fibrocimento, zinco e ecológica) e o sistema de cobertura verde, selecionados para este estudo.

3.2.1.1 Cobertura para chapas ou painéis

Nacionalmente, os tipos de telhas em chapas ou painéis mais utilizados são as de fibrocimento (Figura 13 – (a)) e metálicas (Figura 13 – (b)) devido a facilidade de se encontrar no mercado local e de instalar, na qual diversos fabricantes apresentam seus próprios manuais para a instalação, de forma a proporcionar pleno funcionamento dos componentes como é o caso da Brasilit Saint-Gobain (2021), Kingspan (20–), Eternit (20–). Além das telhas mais convencionalmente utilizadas, existem ainda as telhas ecológicas (Figura 13 – (c)), que se destacam devido a sua alta capacidade de reduzir desconforto térmico e acústico segundo sua fabricante Onduline (20–), que também apresenta o seu próprio manual de instalação.

Figura 13 – Componente das telhas em chapa: Telha fibrocimento (a); Telha de aluzinco (b) e Telha ecológica (c)



Fonte: Registros de pesquisa (2024)

A Brasilit, uma das marcas produtoras de telha fibrocimento no Brasil apresenta em seu guia de instalação que as telhas da linha ondulada com seis milímetros (6mm) de espessura, como a utilizada neste projeto de pesquisa, devem apresentar uma inclinação mínima de cinco graus (5°) ou 8,7% e vão livre máximo entre as telhas de um metro e sessenta e nove centímetros (1,69m) com balanço livre máximo de quarenta centímetros (40cm) (Brasilit Saint-Gobain, 2021).

A telha de fibrocimento (Figura 13 – (a)) apresenta uma dimensão de dois metros e vinte centímetros (2,2m) por um metro e dez centímetros (1,1m). Possui condutividade térmica (λ) de 0,35W/(m.K) de acordo com a fabricante e apresenta como características principais elevada resistência a ação de agentes químicos neutros ou alcalinos. Além

disso, são imunes a processos de corrosão e oxidação. Segundo Zini e Campos (2022), a telha de fibrocimento é uma das coberturas mais utilizadas na construção civil no Brasil devido a sua leveza e baixo custo.

A Eternit, elaborou um catálogo com algumas especificações a serem seguidas para a instalação das telhas metálica ondulada 17 (TMTO-17), na qual exige uma inclinação mínima de 5% e vão mínimo de um metro e dez centímetros (1,1m) (Eternit, 20–).

A telha de zinco (Figura 13 – (b)) apresenta dimensões de dois metros e vinte centímetros (2,2m) por um metro (1m). Segundo a NBR ISO 10456 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022b), deve apresentar uma condutividade térmica (λ) de 110W/(m.K).

Segundo dados apresentados pelo Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (2019), a construção civil é responsável por grande parte do material descartado no Brasil. Logo, a indústria da construção tem grande responsabilidade em buscar soluções mais sustentáveis e incentivar os consumidores a utilizarem materiais com uma pegada mais ecológica. Um bom exemplo disso, são as telhas ecológicas das empresas Onduline, Eco Preserve e IBAPLAC. Boff et al. (2022) reforça que dependendo da situação, este tipo de telha pode apresentar um melhor custo benefício. Os autores ainda alertam sobre a pequena demanda de estudos relacionados a telha ecológica no Brasil, principalmente em relação a telha ecológica mais consumida no mercado da construção civil, fabricada pela empresa Onduline, vista na Figura 13 – (c).

A fabricante Onduline, responsável pela produção majoritária das telhas ecológicas no Brasil apresenta também um guia com o processo de instalação das suas telhas, na qual exige para a telha clássica (utilizada para o projeto de pesquisa) inclinação mínima de dez graus (10°) ou 18% e espaçamento máximo de quarenta e seis centímetros (46cm) entre os eixos das ripas, sendo que o balanço pode ser personalizado, dependendo apenas da extensão da estrutura de madeiramento (Onduline, 20–).

A telha ecológica (Figura 13 – (c)) pode ser encontrada no mercado com diversos tipos de materiais reciclados, como tubos de pasta de dente, tetra pak e celulose, como informado por Boff et al. (2022), dando assim uma pegada sustentável e ecológica como remete o nome do produto.

De acordo com a Onduline (uma das fabricante da telha no Brasil), as dimensões da telha ecológica são de dois metros e vinte centímetros (2,2m) por um metro e dez centímetros (1,1m) e alguns dos diferenciais da telha se dão em relação a seu desempenho

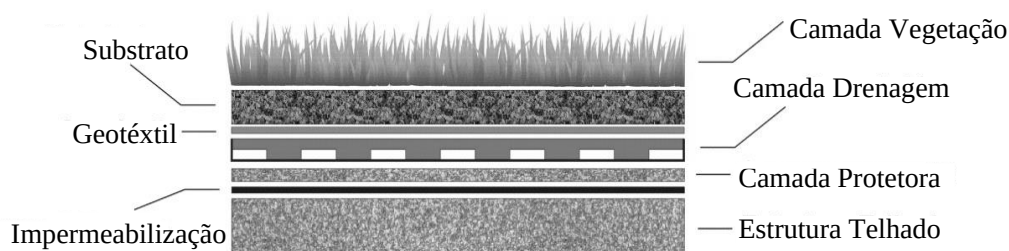
térmico, como por exemplo, o fato da mesma ser 2°C mais fria que as telhas de fibrocimento de 5 mm e proporcionar maior conforto térmico em relação às telhas de PVC e fibrocimento. No entanto, o fabricante não disponibiliza o coeficiente de condutividade térmica da telha (λ). Alguns autores, como é o caso de Yusof, Afifi e Said (2020), Shahrin e Yusof (2018) que utilizaram em suas pesquisas um coeficiente de 0,066W/(m.K).

As coberturas para chapas ou painéis, compostos por telhas fibrocimento, zinco, ecológico ou sanduíche, necessitam de uma estrutura de suporte mais simples (Tesoura e terças) devido a leveza dos componentes. Logo, o sistema estrutural para suporte das coberturas em chapas ou painéis são mais simplificados que o utilizado para sistemas de coberturas cerâmicas, que devido ao peso dos componentes, exigem a utilização de uma estrutura mais robusta. O sistema estrutural de sustentação desses tipos de coberturas consiste na utilização de materiais metálicos ou madeira.

3.2.1.2 Cobertura verde

As coberturas verdes são conhecidas como telhados que possuem parte ou a sua totalidade coberta por uma camada de vegetação. O sistema possui uma estrutura composta por camadas de base estrutural, membrana impermeabilizante, camada protetora contra crescimento de raízes da vegetação, camada de drenagem, tecido permeável (geotêxtil), substrato e a camada de vegetação (CASTLETONA V. STOVINB; DAVISONB, 2010; SAADATIAN et al., 2013; HERNÁNDEZ; SIMÁ; CHÉ-PAN, 2023). A Figura 14 ilustra o sistema de telhado verde.

Figura 14 – Estrutura do telhado verde



Fonte: Adaptado de Tassi et al. (2014)

A Figura 14 apresenta de forma detalhada as diferentes camadas que compõe a cobertura verde, sendo que:

- **Camada Vegetação:** Além de uma função estética, é responsável pela regularização vazão das águas de chuva e auxilia na mitigação dos efeitos de ilha

de calor através do processo de evapotranspiração Scolaro e Ghisi (2022), Yang et al. (2020);

- **Substrato:** Tem a função de prover nutrientes, retenção de água e performance termal para a cobertura Scolaro e Ghisi (2022), Yang e Wang (2014), Castletona V. Stovinb e Davisonb (2010);
- **Geotêxtil:** Como o nome sugere tem a função de permitir a passagem de água apenas, impedindo assim a passagem de partículas finas que venham a prejudicar o sistema de drenagem Scolaro e Ghisi (2022), Baldessar (2012);
- **Camada drenagem:** É responsável por reter água para a vegetação e canalizar o excesso para fora do sistema de cobertura, além de proporcionar ventilação para o substrato e para a vegetação;
- **Camada Protetora:** Tem a função de proteger o sistema estrutural da cobertura e a membrana impermeável contra a ação da água e das raízes (SCOLARO; GHISI, 2022);
- **Impermeabilização:** Possui a função de impedir a influência da água no sistema estrutural da cobertura verde;
- **Estrutura Telhado:** É o sistema estrutural responsável pela sustentação de toda a cobertura verde sendo dimensionado de acordo com o tipo de cobertura escolhido, podendo ser extensivo, intensivo ou semi-intensivo.

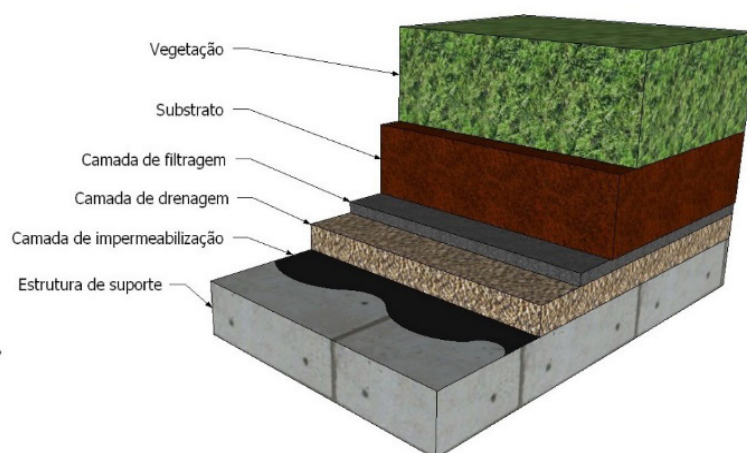
As coberturas verdes geralmente são vistas na literatura subdivididas em dois (2) tipos, sendo eles extensivo e intensivo, no entanto em alguns casos é visto um sistema híbrido denominado semi-intensivo². O sistema de cobertura extensivo consiste em uma estrutura composta por uma camada de substrato não superior a vinte centímetros (20cm) de espessura e peso entre 60 e 150 kg/m², suportando então uma flora vegetal de pequeno porte (HERNÁNDEZ; SIMÁ; CHÉ-PAN, 2023). Sendo assim é considerado a estrutura de mais baixo custo quando comparado com os outros sistemas, a qual foi adotada neste trabalho.

O sistema de cobertura intensivo é composto por camadas de substrato que ultrapassam a espessura de vinte centímetros (20cm) e o peso de 300 kg/m², logo sendo capaz de suporta uma gama maior de flora vegetal e possibilitando o uso recreativo para o telhado, necessitando assim de uma manutenção mais intensa e uma estrutura mais robusta (HERNÁNDEZ; SIMÁ; CHÉ-PAN, 2023).

²Sistemas com portes de vegetação limitado e intensidade de manutenção variando de acordo com o designe escolhido (HERNÁNDEZ; SIMÁ; CHÉ-PAN, 2023; SCOLARO; GHISI, 2022).

A grama escolhida para o projeto de pesquisa foi uma gramínea forrageira (*Cynodon Dactylon*) existente nos gramados da UNIPAMPA campus – Alegrete/RS. A sua escolha se justifica pelo fato de ser uma gramínia local da região, e já está adaptada ao ambiente e ao clima de Alegrete, facilitando a manutenção e a eficiência dos dados coletados durante o período do experimento. A Figura 15 apresenta o sistema de telhado verde usado nesta pesquisa, no qual foi utilizado terra adubada vegetal na camada de substrato (10 cm), manta jeans na camada de filtragem, argila expandida na camada de drenagem (5 cm) e, por fim, manta asfáltica para a camada de impermeabilização (0,2 cm).

Figura 15 – Camadas do Telhado Verde utilizado



Fonte: Adaptado de Neto et al. (2021)

3.2.2 Confeção das células-teste

A Figura 16 representa a célula-teste com cobertura em telhas (fibrocimento, zinco e ecológica). A dimensão da célula-teste é de um metro e cinquenta centímetros de largura (1,5m) por um metro e cinquenta centímetros de comprimento (1,5m) e um metro e sessenta centímetros (1,6m) de altura total e um metro e vinte centímetros (1,2m) de altura mínima. As alturas permitiram uma inclinação de 25% para os telhados, respeitando assim o mínimo exigido pelos fabricantes das telhas utilizadas na pesquisa e também respeitando o processo de instalação normativo recomendado pelos fabricantes.

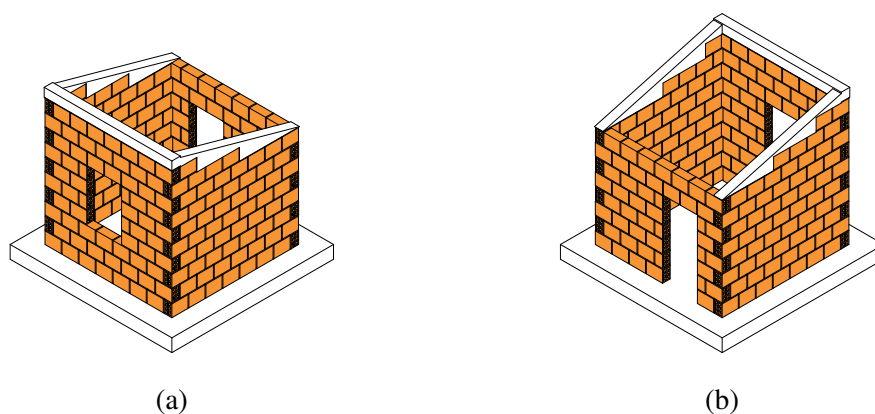
A Figura 17 mostra a representação da célula-teste com cobertura verde que possui um metro e cinquenta centímetros de largura (1,5m) por um metro e cinquenta centímetros

de comprimento (1,5m) e um metro e cinquenta e cinco centímetros (1,55m) de altura.

Para reproduzir as aberturas exigidas pela NBR 15220-3³ (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005), foram confeccionadas esquadrias em escala reduzida (aproximadamente 0,5, ou seja, reduzidas a metade das dimensões originais).

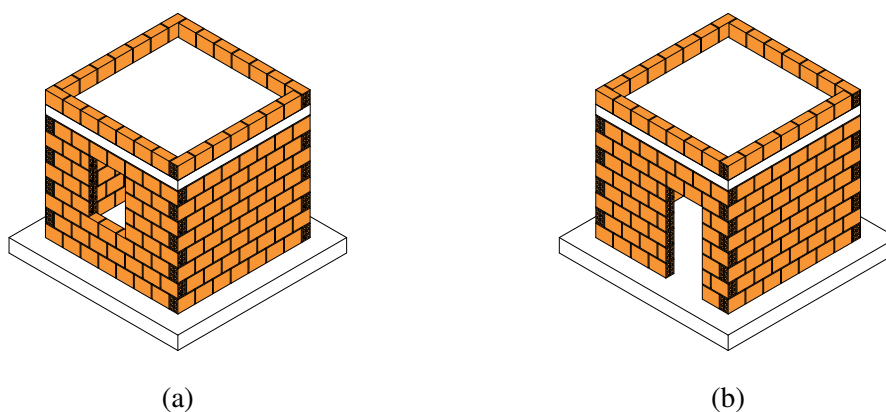
Assim, a janela das Figuras 16 e 17, em (a), apresentam largura de quarenta centímetros (0,4m) por sessenta centímetros de altura (0,6m), com peitoril a quarenta e cinco centímetros (0,45m) da base. A porta das Figuras 16 e 17, em (b), apresentam largura de quarenta centímetros (0,4m) por noventa centímetros (0,9m) de altura.

Figura 16 – Representação gráfica da célula-teste para telhas em chapas: Janela (a); Porta (b)



Fonte: Registros de pesquisa (2024)

Figura 17 – Representação gráfica da célula-teste para telhado verde: Janela (a); Porta (b)



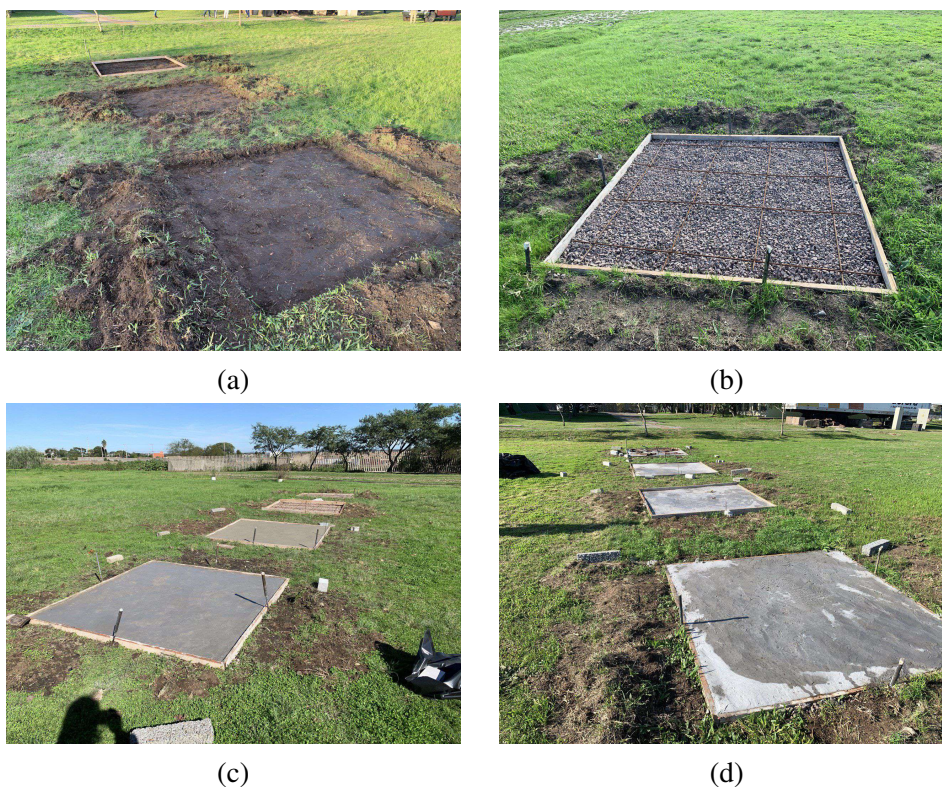
Fonte: Registros de pesquisa (2024)

In loco, a confecção iniciou com a concretagem das bases, onde posteriormente

³Utilização de aberturas para proporcionar durante o verão (ventilação cruzada) e no inverno [aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica)].

foram montadas as células-teste. As bases apresentam dimensões de um metro e noventa centímetros (1,9m) por um metro e noventa centímetros (1,9m) totalizando em uma área de três metros quadrados e sessenta e um centímetros quadrados (3,61m²) por célula-teste. A Figura 18 Apresenta o processo de montagem das bases das células-teste, na qual (a) mostra a remoção do material orgânico, (b) a a inserção de uma base de brita e o posicionamento das fôrmas, (c) concretagem das bases e (d) processo de cura das bases de concreto.

Figura 18 – Montagem das bases (a) Remoção do material orgânico (b) Posicionamento da brita e armadura (c) Concretagem das bases (d) Processo de cura das bases de concreto

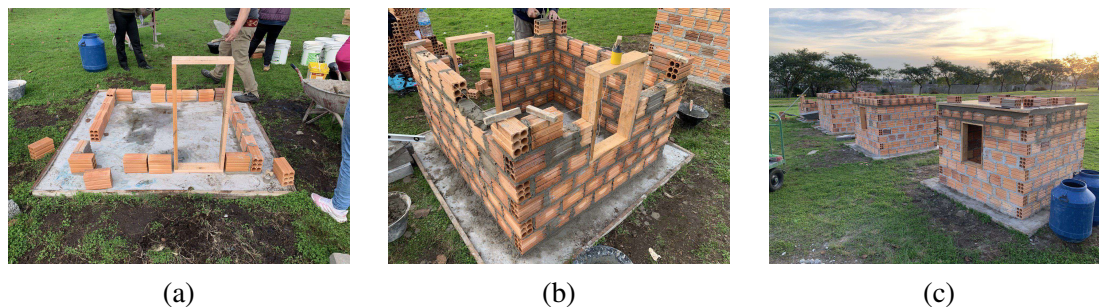


Fonte: Registros de pesquisa (2024)

No levantamento das paredes foram utilizados blocos cerâmicos de vedação com dimensões de nove centímetros (9cm) de largura, quatorze centímetros (14cm) de altura e dezenove centímetros (19cm) de comprimento e juntas verticais e horizontais. O processo de levantamento das células-teste pode ser visualizado na Figura 19, onde (a) mostra o alinhamento das paredes, (b) o posicionamento das esquadrias e (c) a preparação final para instalação do respectivo sistema de cobertura (Figura 20).

Para o sistema estrutural das coberturas foi utilizado a madeira, devido a limitações orçamentárias e facilidade de serem personalizados para a finalidade do projeto

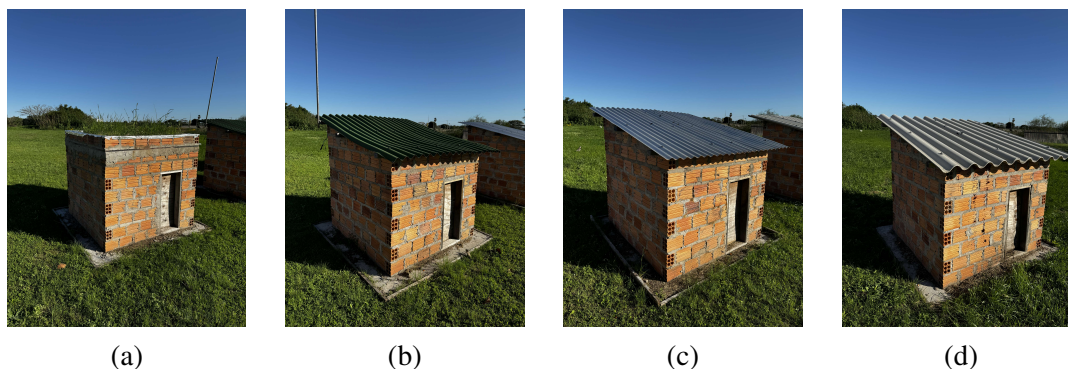
Figura 19 – Levantamento das alvenarias (a) Alinhamento (b) Levantamento (c) Paredes levantadas



Fonte: Registros de pesquisa (2024)

de pesquisa. Como já relatado, foram selecionados três (3) tipos de coberturas em chapas para a pesquisa, sendo elas, telha aluzinco, telha de fibrocimento e telha ecológica. As propriedades destes materiais foram abordadas no subsubitem 3.2.1.1. Exceto para a cobertura verde, todos os tipos de telhas possuem o mesmo sistema de sustentação, diferindo apenas no processo de instalação. Para esta pesquisa, o processo de instalação das telhas foi realizado de acordo com as recomendações dos respectivos fabricantes.

Figura 20 – Células-teste: fachada principal e sistemas de cobertura (a) Telhado Verde (b) Telha Ecológica (c) Telha Aluzinco (d) Telha Fibrocimento



Fonte: Registros de pesquisa (2024)

A Figura 20 apresenta, portanto, as células-teste com suas respectivas coberturas, sendo eles, Telhado Verde (a), Telha Ecológica (b), Telha Aluzinco (c) e Telha Fibrocimento (d).

A Telha Ecológica (Figura 20 - (b)) possui dimensões de dois metros e vinte centímetros (2,2m) por um metro e dez centímetros (1,1m) com espessura da chapa de seis milímetros (6mm) e a condutividade térmica (λ) a ser utilizada é de 0,066W/(m.K) como especificado no subsubitem 3.2.1.1.

A Telha de Aluzinco (Figura 20 - (c)) possui dimensões de dois metros (2m) por

um metro e dez centímetros (1,1m) chapa 28 (0,43mm) e a condutividade térmica (λ) a ser utilizada é de 110W/(m.K) como especificado na seção 3.2.1.1.

A Telha Fibrocimento (Figura 20 - (d)) utilizada possui dimensões de dois metros e vinte centímetros (2,2m) por um metro e dez centímetros (1,1m) com espessura da chapa de seis milímetros (6mm) e foi utilizado condutividade térmica (λ) de 0,35W/(m.K) como especificado no subsubitem 3.2.1.1.

A instalação da cobertura verde, pelo método extensivo, iniciou com a colocação de uma manta asfáltica impermeabilizante, seguido pelo posicionamento do sistema de drenagem representado pela argila expandida, sobreposta por uma manta permeável anti-raízes e por fim a inserção da camada de substrato com a gramínea escolhida para o projeto de pesquisa, deste modo a Figura 21 apresenta como ficou o telhado Verde utilizado para a pesquisa.

Figura 21 – Telhado Verde finalizado



Fonte: Registros de pesquisa (2024)

Após a confecção das células-teste, foram feitas vistorias de dentro para fora em cada uma das células-teste de modo a observar se haviam vazios que poderiam alterar as condições de pesquisa, com ventilação ou luz indesejada. Feito isso, foi necessário realizar o preenchimento dos vazios com espuma expansiva.

3.3 Etapa 3 – Instalação e testagem dos sensores e equipamentos

A terceira etapa, correspondente a instalação, programação e testagem dos sensores e equipamentos é dividida entre os subitens 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3, que apresentam de forma detalhada os processos executados nesta fase.

3.3.1 Sensores e equipamentos

Os sensores e equipamentos utilizados para a captura dos dados, como observados na Figura 22 são compatíveis com a plataforma programável arduino, sendo que os sensores utilizados são: sensor de temperatura (Figura 22 – a), responsável por medir a temperatura; anemômetro (Figura 22 – b), responsável por medir a velocidade do vento no local de estudo.

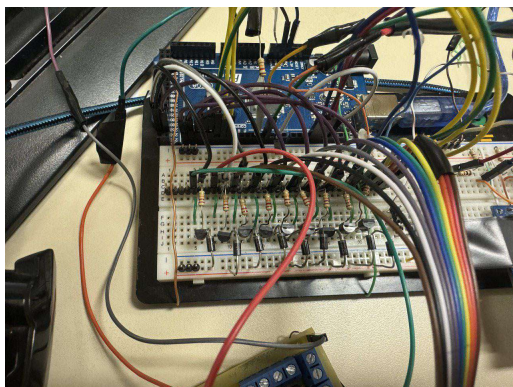
Figura 22 – Equipamentos e sensores utilizados Termistor (a), Anemômetro (b), Arduino (c) e Placa (d)



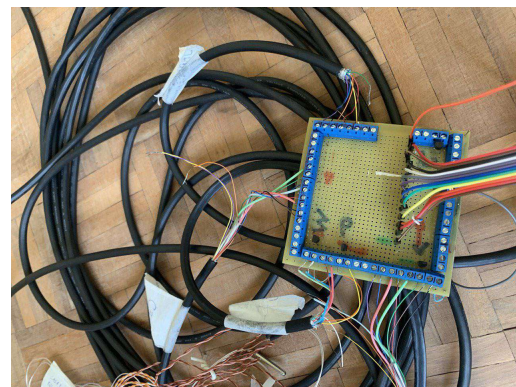
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Registros de pesquisa (2024)

A Figura 22 – a representa o sensor de temperatura (PT 100) utilizado na pesquisa,

que segundo CITEX (2023) possui como principais características:

- Resistência a 0°C: 100 (+ ou - 0,12ohm);
- Precisão: + ou - 0.6°C;
- Faixa de medição de temperatura: -50°C a 450°C.
- Corrente de operação: até 5mA.

A Figura 22 – b representa o sensor anemômetro (AN-1) utilizado na pesquisa, que segundo Ciclus (2023) possui como principais características:

- Resistente a intempéries;
- Suporta altas velocidades (+135 km/h);
- Alta sensibilidade, inicia em 0,7 Km/h.

Todos os sensores foram conectados a uma placa arduino, dimensionada para atender aos requisitos de medições do projeto. A placa arduino foi o equipamento utilizado para gerenciar a captura de dados pelos sensores, cujo os dados foram armazenados em um *memory card* para futuras interações.

Para controlar toda a coleta de dados e seu armazenamento, o arduino foi montado em uma protoboard como visto na Figura 22 – c e é composta por um arduino mega que é responsável por realizar as medições nos intervalos de tempo escolhido para a pesquisa que é de hora em hora, ou seja a cada uma (1) hora, o arduino iniciará o processo de captura de dado de todos os sensores, sendo que ao final de oito (8) horas de coleta ele irá realizar o salvamento dos dados no *memory card*, o limite de oito (8) horas de armazenamento foi escolhido como o máximo desejado, pois acima deste número em caso de perda de dados, o período de dados perdidos seria de acima de oito (8) horas, além do fato de que o arduino apresentava capacidade de armazenamento limitado de 9 arquivos .txt (mesmo utilizando um *memory card* com maior capacidade), logo totalizando em três (3) dias de armazenamento.

Para realizar a captura das temperaturas, foi necessário fazer a montagem de uma placa externa que possibilita suportar até trinta (30) termistores, sendo que para a pesquisa foram utilizados 14 sensores de temperatura. A placa em sua forma final utilizada para a pesquisa é apresentada na Figura 22 – d. e foi desenvolvida em conjunto com o prof. Celso Nobre da Fonseca e pelo técnico Thales Santos Lima. O seu desenvolvimento se iniciou em março de 2023 e se estendeu até agosto do mesmo ano, passando por diversos testes e modificações que foram necessárias para ser utilizado, sendo mais aprofundado no subitem 3.3.3. O seu desenvolvimento é justificado devido a falta de equipamentos

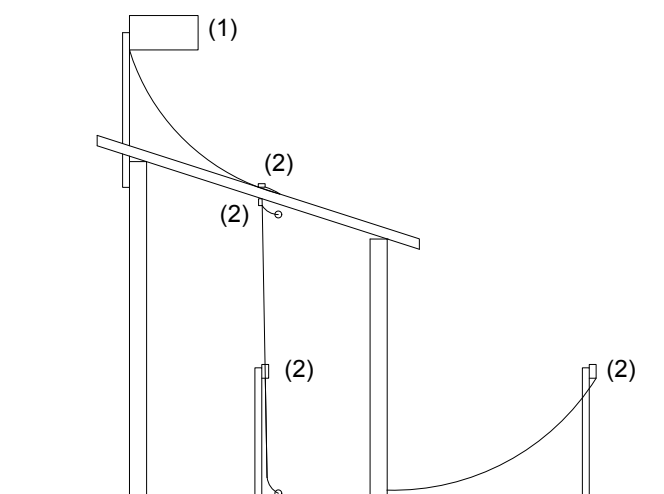
semelhantes no mercado que realizem a função de ampliar a quantidade de sensores que o arduino consegue suportar.

Para medida de segurança em caso de queda de energia por um período curto de tempo, foi utilizado um nobreak, com a finalidade de o sistema de captura de dados permanecer funcionando durante períodos de queda de energia que se estendam por até um período de uma (1) hora, dando tempo suficiente para que o sistema não perca dados em quedas de energia de curto período de tempo.

3.3.2 Programação e instalação do sistema de coleta de dados

Neste item é discutido alguns dos códigos mais relevantes utilizados para a pesquisa, sendo que o código completo pode ser encontrado no Apêndice A. Os sensores foram distribuídos entre as células-teste como descritos neste item e visto nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Localização dos sensores nos protótipos



Fonte: Elaborado própria (2023)

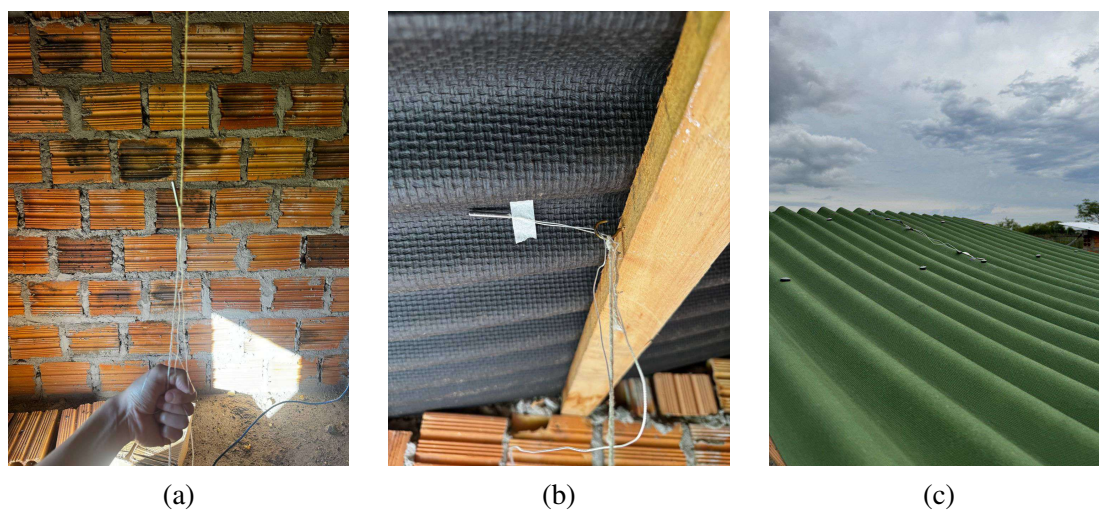
A Figura 23 apresenta um esquema do posicionamento dos sensores utilizados nesta pesquisa, na qual (1) – Anemômetro, (2) – Termistor.

A instalação dos sensores de temperatura (Figura 23 – (2)) se encontram na superfície externa e interna das telhas, na superfície externa e interna da cobertura verde, no substrato da cobertura verde, no interior das células-teste e no exterior. A escolha dos posicionamentos é justificada pela possibilidade de analisar o quanto será refletido, absorvido e emitido pelo telhado e como isso influencia no conforto térmico

da célula-teste, além de possibilitar comparar a diferença de temperatura do interior da célula-teste em relação ao ambiente externo.

A instalação do sensor de velocidade do vento (anemômetro) (Figura 23 – (1)) foi instalado no exterior para possibilitar a captura da velocidade do vento no local onde as células-teste foram implementadas.

Figura 24 – Foto do posicionamento dos sensores (a) Camada Interior (b) Camada Inferior (c) Camada Superior



Fonte: Registros de pesquisa (2024)

A Figura 24 apresenta o posicionamento final dos sensores nas células-teste, na qual (a) – Camada Interior, (b) – Camada Inferior e (c) – Camada superior.

A programação do conjunto sensores e equipamentos foi realizado entre os meses de agosto e dezembro de 2023, juntamente com a instalação e a testagem dos equipamentos, como descrito no subitem 3.3.3.

Para o funcionamento correto do equipamento de captura e armazenamento de dados, foi necessário realizar a montagem de um código para o arduino que realizaria o controle de todo o sistema, na qual, os termos `SPI.h` e `SD.h`, quando inseridos permitiram a leitura e a escrita de dados no *memory card* (cartão de memória SD) utilizado para o armazenamento dos dados do projeto de pesquisa e o termo `EEPROM.h` foi inserido para permitir que fosse possível realizar um resetamento do cachê acumulado pelos microcontroladores do arduino, que podem acabar gerando erros.

Para realizar o armazenamento correto dos valores obtidos pelos sensores em formato `.txt`, foi necessário que todos os valores dos sensores fossem posicionados em uma linha separa por ponto e vírgula (;), caracterizando então uma string, logo para o projeto foi utilizado uma string total de trinta (30) colunas e uma (1) linha, se iniciando

em zero (0) e terminando em vinte e nove (29), sendo que uma (1) linha representa os valores de uma (1) hora de coleta dos dados.

O código de coleta de dados do anemômetro apresenta a ordem como é realizado o cálculo da velocidade do vento, na qual o arduíno chama as funções utilizadas para a conversão dos valores de velocidade do vento, sendo as funções, na qual as funções *windvelocity*, *RPMcalc* observados no código, são utilizadas para obter o *windspeed*, que apresenta a velocidade do vento em metros por segundo (m/s). Obtendo o valor de velocidade do vento, o arduino prossegue para realizar o armazenamento do valor obtido no *memory card*, convertendo o valor em forma de string para que possa ser escrito em arquivo *.txt* e posicionado na coluna 1 da matriz.

Para os sensores de temperatura, devido a grande quantidade, foi necessário a manufatura de uma placa que fosse capaz de suportar todos os 14 sensores de temperatura como especificado no subitem 3.3.1, sendo assim, a leitura de todos os sensores da placa utilizada foi dividir em três setores, cada um contendo 10 sensores.

No código utilizado para fazer a leitura de todos os trinta (30) sensores, a transição entre os setores é realizada na forma de uma matriz onde realiza primeiro a leitura da linha um (1) e das dez (10) colunas, seguido pela linha dois (2) e das dez (10) colunas e por ultimo pela linha três (3) e das dez colunas (10) restantes. o intervalo entre as leituras dos sensores teve de ser ajustada para dez segundo (10s), fato explicado no subitem 3.3.3. Ao final da leitura de todas as colunas e linhas, o arduino aguarda até registrar um total de oito (8) strings (totalizando oito (8) horas de dados), que assim registra em forma de *.txt* no *memory card*, juntamente com os valores do sensor anemômetro.

3.3.3 Testagem dos sensores e equipamentos

A testagem dos sensores e equipamentos se iniciou no mês de agosto e durante o período de testagem foi possível realizar a calibragem e otimização dos sensores para tornar eficiente os valores obtidos do conjunto de coleta de dados. Nesta subseção serão apresentados os testes, calibrações e modificações que foram realizadas até o período de coleta de dados.

A protoboard apresentada na Figura 22 – C recebeu diversas modificações durante o desenvolvimento do sistema, principalmente para ser capaz de gerenciar os termopares da placa da Figura 22 – D, sendo assim um dos problemas mais marcantes encontrados durante sua manufatura foram em relação a corrente e a precisão dos dados. Na qual em

relação a corrente, foi necessário utilizar uma resistência com transistor em cada uma das 10 entradas da placa para limitar a corrente de alimentação dos termopares para 12V ao invés de 5V do arduíno, deste modo, aumentando a corrente e conseqüentemente aumentando o detalhamento de faixa de medição da temperatura. Ao realizarmos teste ligados a precisão, foi obtido que a cada unidade de variação dos dados, era equivalente a cinco (5) a seis (6) graus, não sendo muito preciso e para resolver esta situação foi realizado uma limitação na voltagem do arduino para próximo de 2V, este limite foi determinado, pois inferior a este valor, a entrada do arduino para a placa poderia queimar, e quanto maior a voltagem, menor seria a precisão dos dados, portanto para trabalhar com uma margem de segurança, a voltagem foi determinada próximo a 2V, resultando em uma variação de dados de aproximadamente dois graus e meio (2,5°).

Para as capturas de dados foi necessário determinar um período de tempo entre a passagem dos sensores da placa, fato necessário devido a alteração dos valores capturados em testes feitos em laboratório. Em laboratório foi visto que ao passar pelos sensores com tempo muito rápidos (100 milissegundo até 5.000 milissegundos) os valores capturados se misturavam e alguns sensores apresentavam o mesmo valor ou valores aproximados de temperatura. Deste modo foi determinado por segurança o valor de 10.000 milissegundo ou 10 segundos, totalizando assim 300.000 milissegundos (5 minutos) até o final da leitura da placa.

A coleta de dados sofreu grande atraso devido ao período de testagem dos sensores, sendo inicialmente previsto para agosto de 2023 mas se iniciou apenas no final de dezembro de 2023. Durante o período de testagem dos equipamentos, muitos dos problemas que eventualmente surgiram foram devido a defeitos nos componentes utilizados, como protoboards defeituosos, componentes que devido ao uso e manuseio eventualmente apresentaram falhas, como é o caso de alguns termopares e bornes conectores.

3.4 Etapa 4 – Coleta e análise de dados

Nesta etapa foi realizada a coleta e a análise dos dados, como apresentados nos subitens 3.4.1 e 3.4.2, sendo que os dados coletados foram obtidos através dos sensores especificados no subitem 3.3.1, que são os sensores de medição de temperatura e velocidade do vento.

3.4.1 Coleta de dados

A captura de dados ocorreu de forma contínua, ou seja, a cada hora por três (3) dias corridos, sendo interrompida para a troca de *memory card* para armazenamento de dados e limpeza de espaço para a coleta seguinte⁴. Muitos dados foram perdidos devido a problemas como as limitações do arduíno (fato que levou a inserção do código para resetar todo o sistema) e devido a condições climáticas (devido ao fato que a tomada que alimenta o sistema estar exposta ao céu aberto). Desta forma os valores de temperaturas nas camadas das células-teste e a velocidade do vento foram coletadas e armazenadas no sistema *arduino* e os valores de radiação global (W/m^2), milimetragem de chuva e umidade relativa do ar foram extraídas da estação meteorológica que se localiza próximo a área onde as células-teste estão localizadas.

Inicialmente foi previsto realizar a coleta de dados a partir de agosto de 2023. No entanto, devido a manufatura, testagem e modificações da placa de termistores, protoboard e adaptação dos demais sensores, não foi possível cumprir com a data programada. Deste modo, a coleta de dados se iniciou apenas a partir da terceira semana de dezembro de 2023, sendo assim, a coleta de dados abrange a estação de verão (2023 - 2024), se encerrando na terceira semana de março de 2024.

3.4.2 Análise dos dados

Este subitem apresenta o cálculo da transmitância térmica para cada tipo de telhado e como os dados coletados pelos sensores foram tratados referente à análise estatística, visando sustentar as comparações dos desempenhos térmicos das coberturas. Posteriormente a análise dos dados, gráficos e tabelas foram confeccionados para comparação dos resultados.

3.4.2.1 Cálculo da Transmitância térmica

Como visto na seção 3.1.1, o município de Alegrete está localizado na zona bioclimática 2, logo o valor limite de transmitância térmica (U) dos sistemas de cobertura não devem ultrapassar o valor de $2,30W/m^2K$. Para a pesquisa foi utilizado o método de

⁴Para evitar perda do sistema ou componentes devido a curto-circuito e/ou choques durante o manuseio dos equipamentos, quando ocorresse um evento de precipitação no dia em que seria realizado a coleta de dados, foi evitado a ida as células-teste e aguardado a coleta no dia seguinte.

cálculo simplificado como descrito no subitem 2.2.4 devido ao fato de a pesquisa respeitar as limitações de aplicabilidade do método:

- As resistências das camadas homogêneas individuais do elementos construtivos da edificação são obtidas de acordo com o subsubitem 2.2.4.3 e as resistências térmicas totais são calculadas de acordo com o subsubitem 2.2.4.4;
- Não possuir camadas de ar maiores que trinta centímetros (0,3m) de espessura;
- Aplicação do método em ambientes interno e externo.

Para calcular as resistências térmicas totais, foi utilizado o método em camadas homogêneas, como visto no subsubitem 2.2.4.4, devido a utilização de componentes com camadas homogêneas nos sistemas de cobertura como descrito no item 3.2.1. Para obter os valores de resistência térmica total não foram realizadas nenhuma medição de λ , logo serão utilizados os valores de λ tabelados pela ISO 10456 ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022b), sendo que quando possível a norma aconselha a utilização de valor oferecido pela fabricante certificada.

Para a pesquisa, não foi utilizado nenhum componente que contenha uma camada de ar ventilada, como visto no item 3.2.1. Logo não foi necessário realizar correções relativas as resistências térmicas. Será realizado apenas a correção para os fixadores mecânicos como visto no subsubitem 2.2.4.6 pois não existem vazios de ar nos componentes de isolamento e não foi utilizado o telhado invertido.

Para o cálculo da transmitância térmica da Telha Ecológica foi utilizado os dados apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Dados para cálculo da Transmitância térmica da Telha Ecológica

Dados Telha Ecológica	
e - Espessura de material sólido homogêneo (mm)	3
e - Espessura de material sólido homogêneo (m)	0,003
λ - Coeficiente de condutividade (W/m.K)	0,066
Dados correção dos fixadores	
$\alpha = 0,8$ se o fixador penetra completamente na camada de isolamento	0,8
λ_f - condutividade térmica do fixador [W/(m.K)]	50
n_f - número de fixadores por metro quadrado (m ²)	4
Diâmetro fixador (mm)	4
A_f - área da seção transversal de um fixador (m ²)	0,00005
d1 - comprimento do fixador que penetra na camada de isolamento (m)	0,07

Fonte: Elaborado própria (2024)

Como informado no subitem 3.2.1, a Telha Ecológica da empresa Onduline não

disponibiliza a condutividade térmica da telha, logo para o estudo foi utilizado o valor apresentado por Yusof, Afifi e Said (2020), Shahrin e Yusof (2018). Deste modo para os cálculos foi utilizado uma espessura da telha de 3mm e um coeficiente de condutividade de $0,066W/m.K$ como especificado no subitem 3.2.1, obtendo assim através das equações 1, 3 e 4 uma transmitância térmica (U) de $3,91W/m^2.K$. Realizando a correção como observado na equação 7, foi calculado uma correção na transmitância térmica (ΔUf) de $0,0036W/m^2.K$, apresentando então uma interferência mínima. Logo, quando somado com a transmitância térmica original, foi obtido uma transmitância térmica final de $3,91W/m^2.K$.

Para o cálculo da transmitância térmica da Telha Fibrocimento foi utilizado os dados apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Dados para cálculo da Transmitância térmica da Telha Fibrocimento

Dados Telha Fibrocimento	
e - Espessura de material sólido homogêneo (mm)	6
e - Espessura de material sólido homogêneo (m)	0,006
λ - Coeficiente de condutividade (W/m.K)	0,35
Dados correção dos fixadores	
$\alpha = 0,8$ se o fixador penetra completamente na camada de isolamento	0,8
λf - condutividade térmica do fixador [W/(m.K)]	50
nf - número de fixadores por metro quadrado (m ²)	2
Diâmetro fixador (mm)	8
Af - área da seção transversal de um fixador (m ²)	0,0002
d1 - comprimento do fixador que penetra na camada de isolamento (m)	0,11

Fonte: Elaborado própria (2024)

Deste modo para os cálculos foi utilizado uma espessura da telha de 6mm e um coeficiente de condutividade de $0,35W/m.K$ como especificado no subitem 3.2.1, obtendo assim através das equações 1, 3 e 4 uma transmitância térmica (U) de $4,40W/m^2.K$. Realizando a correção como observado na equação 7, foi calculado uma correção na transmitância térmica (ΔUf) de $0,0008W/m^2.K$, apresentando então uma interferência mínima. Logo, quando somado com a transmitância térmica original, foi obtido uma transmitância térmica final de $4,40W/m^2.K$.

Para o cálculo da transmitância térmica da Telha Fibrocimento foi utilizado os dados apresentados na Tabela 16.

Deste modo para os cálculos foi utilizado uma espessura da telha de 0,43mm e um coeficiente de condutividade de $110W/m.K$ como especificado no subitem 3.2.1, obtendo assim através das equações 1, 3 e 4 uma transmitância térmica (U) de $4,76W/m^2.K$.

Tabela 16 – Dados para cálculo da Transmitância térmica da Telha Aluzinco

Dados Telha Fibrocimento	
e - Espessura de material sólido homogêneo (mm)	0,43
e - Espessura de material sólido homogêneo (m)	0,00043
λ - Coeficiente de condutividade (W/m.K)	110
Dados correção dos fixadores	
$\alpha = 0,8$ se o fixador penetra completamente na camada de isolamento	0,8
λ_f - condutividade térmica do fixador [W/(m.K)]	50
n_f - número de fixadores por metro quadrado (m ²)	4
Diâmetro fixador (mm)	4
A_f - área da seção transversal de um fixador (m ²)	0,00005
d_1 - comprimento do fixador que penetra na camada de isolamento (m)	0,07

Fonte: Elaborado própria (2024)

Realizando a correção como observado na equação 7, foi calculado uma correção na transmitância térmica (ΔU_f) de $3,98^{-11} W/m^2.K$, apresentando então uma interferência mínima. Logo, quando somado com a transmitância térmica original, foi obtido uma transmitância térmica final de $4,76 W/m^2.K$.

Para o cálculo da transmitância térmica da Telha Fibrocimento foi utilizado os dados apresentados na Tabela 17.

Pela Tabela 17 é possível observar que os dados da manta Jeans e da grama estão destacados com *, Isto ocorre pois os dados destas camadas não foram utilizados para o cálculo da transmitância térmica. A manta jeans não foi utilizada para o cálculo devido a sua espessura e função específica de impedir o crescimento das raízes para a camada de drenagem e impermeabilização, de modo a impedir danos a estas estruturas. Os dados da grama também não foram utilizados pois exercem uma função mais impactante, que é proporcionar uma zona de albedo e realizar a transpiração para auxiliar na redução da temperatura local.

Deste modo para os cálculos foi utilizado uma espessura da madeira compensada de 12mm, com um coeficiente de condutividade de $0,12 W/m.K$, uma espessura da manta asfáltica de 2mm com um coeficiente de condutividade de $0,23 W/m.K$, uma espessura de argila expandida de 50mm com um coeficiente de condutividade de $0,16 W/m.K$ e uma espessura de substrato de 100mm com um coeficiente de condutividade de $0,52 W/m.K$ como especificado no subitem 3.2.1, obtendo assim através das equações 1, 3 e 4 uma transmitância térmica (U) de $1,21 W/m^2.K$. Para o Telhado Verde com supracitado, não é necessário realizar uma correção da transmitância, devido a ausencia de fixadores e vazios de ar no isolamento nas camadas.

Tabela 17 – Dados para cálculo da Transmitância térmica do Telhado Verde

Dados Madeira Compensada	
e - Espessura de material sólido homogêneo (mm)	12
e - Espessura de material sólido homogêneo (m)	0,012
λ - Coeficiente de condutividade (W/m.K)	0,12
Dados Manta Asfáltica	
e - Espessura de material sólido homogêneo (mm)	2
e - Espessura de material sólido homogêneo (m)	0,002
λ - Coeficiente de condutividade (W/m.K)	0,23
Dados Argila Expandida	
e - Espessura de material sólido homogêneo (mm)	50
e - Espessura de material sólido homogêneo (m)	0,050
λ - Coeficiente de condutividade (W/m.K)	0,16
Dados Manta Jeans (*)	
e - Espessura de material sólido homogêneo (mm)	0
e - Espessura de material sólido homogêneo (m)	0,000
λ - Coeficiente de condutividade (W/m.K)	0
Dados Substrato	
e - Espessura de material sólido homogêneo (mm)	100
e - Espessura de material sólido homogêneo (m)	0,100
λ - Coeficiente de condutividade (W/m.K)	0,52
Dados Grama (*)	
e - Espessura de material sólido homogêneo (mm)	0
e - Espessura de material sólido homogêneo (m)	0,000
λ - Coeficiente de condutividade (W/m.K)	0

Fonte: Elaborado própria (2024)

Em síntese, os valores de transmitância térmica calculados para cada tipo de telhado estudado podem ser vistos na Tabela 18.

Tabela 18 – Valores de Transmitância térmica

	Telhado Verde	Telha Ecológica	Telha Aluzinco	Telha Fibrocimento
Transmitância térmica (W/m².K)	1,21	3,91	4,76	4,4

Fonte: Elaborado própria (2024)

3.4.2.2 Teste de normalidade Shapiro-Wilk

Para sustentar as análises dos resultados realizados nesta pesquisa, foi proposto a utilização do teste de Análise de Variância (ANOVA) e para determinar se seria utilizado um modelo paramétrico ou não paramétrico foi realizado o teste de normalidade

Shapiro-Wilk, como visto nas Tabelas 19 e 20.

O teste de normalidade Shapiro-Wilk tem como objetivo avaliar se os dados amostrados tem uma distribuição normal, ou seja, se os dados da amostra são adequados para a utilização em modelos estatísticos paramétricos que são os mais sensíveis e robustos, tornando as suposições e resultados desta amostragem válidos. Em caso contrário, existem os modelos não paramétricos que apresentam uma menor sensibilidade, no entanto os resultados e suposições gerados por estes modelos não serão tão sensíveis e robustos como os de um modelo paramétrico.

Deste modo, o teste de normalidade Shapiro-Wilk apresenta como resultado principal o valor de p Shapiro-Wilk referente a cada conjunto de dados, no qual caso o valor esteja acima de 0,05, significa que o conjunto de amostra apresenta normalidade, logo possibilitando a utilização de modelos paramétrico. Por outro lado, se a amostra apresentar um comportamento diferente da normalidade, é necessário a utilização de modelos não paramétricos.

Tabela 19 – Teste de normalidade Shapiro-Wilk com dados completos Parte 1

	Velocidade do Vento (m/s) *	Radiação Global (W/m²)	Umidade (%)	Chuva (mm)	Telhado Verde (Drenagem)	Telhado Verde (Superior)	Telhado Verde (Inferior)	Telhado Verde (Interno)	Telha Ecológica (Superior)	Telha Ecológica (Inferior)	Telha Ecológica (Interior)
N	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Média	10,5	502	81,4	0,833	136	144	115	150	105	139	137
Mediana	11	70,5	80,5	0,000	136	143	114	148	105	138	136
Desvio-padrão	4,66	720	12,100	1,46	7,41	7,73	6,32	7,75	6,92	8,32	8,65
Mínimo	2	0	66	0	122	127	101	134	87	122	120
Máximo	17	2192	96	4	148	154	121	158	112	148	150
W de Shapiro-Wilk	0,918	0,736	0,837	0,612	0,971	0,911	0,865	0,857	0,870	0,877	0,969
p Shapiro-Wilk	0,052	< ,001	< ,001	< ,001	0,704	0,037	0,004	0,003	0,005	0,007	0,644

Fonte: Elaborado própria (2024)

Tabela 20 – Teste de normalidade Shapiro-Wilk com dados completos Parte 2

	Velocidade do Vento (m/s) *	Radiação Global (W/m²)	Umidade (%)	Chuva (mm)	Telha Aluzinco (Superior)	Telha Aluzinco (Inferior)	Telha Aluzinco (Interior)	Telha Fibrocimento (Superior)	Telha Fibrocimento (Inferior)	Telha Fibrocimento (Interior)	Exterior
N	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Média	10,5	502	81,4	0,833	103	76,2	146	117	128	139	114
Mediana	11	70,5	80,5	0,000	101	73,5	145	116	128	139	112
Desvio-padrão	4,66	720	12,1	1,46	9,11	16,8	8,85	8,29	7,51	8,05	12
Mínimo	2	0	66	0	89	52	129	99	111	122	91
Máximo	17	2192	96	4	131	120	157	129	137	148	143
W de Shapiro-Wilk	0,918	0,736	0,837	0,612	0,914	0,897	0,892	0,961	0,905	0,893	0,977
p Shapiro-Wilk	0,052	< ,001	< ,001	< ,001	0,043	0,018	0,015	0,463	0,028	0,016	0,826

Fonte: Elaborado própria (2024)

As Tabelas 19 e 20 apresentam os dados coletados de um dia que foi escolhido por conter todos os dados que serão utilizados na análise comparativa dos sistemas de cobertura, na qual apresenta os dados de precipitação (milímetros), umidade do ar (%), radiação global (W/m^2), velocidade do vento (m/s) e os valores de temperatura dos respectivos termopares, analisados na pesquisa. Desta forma possibilitando observar se existe normalidade nos conjuntos de dados que serão utilizados para a pesquisa de modo a possibilitar a utilização de modelos paramétricos.

Desta forma, nas Tabelas 19 e 20 é possível visualizar que apenas a velocidade do vento, Telhado verde (Drenagem), Telha Ecológica (Interior), Telha Fibrocimento (Superior) e Exterior apresentam valores de p acima de 0,05. Sendo assim, como a maior parte dos dados não apresentam normalidade, é aconselhado a utilização do ANOVA não-paramétrico para a análise estatística. Além disso, para as análises no item 4.2, será utilizado a mediana no lugar da média devido a fato de os dados não apresentarem normalidade, como encontrado no teste de Shapiro-Wilk.

Ao final foram realizados diversos testes com diversos modelos não-paramétricos, no entanto não foi possível encontrar um que se adaptasse aos dados coletados para a análise. Portanto, o teste de normalidade Shapiro-Wilk foi utilizado para determinar a normalidade, se os dados são paramétricos ou não paramétricos e se para as análises do subitem 4.2 seria utilizado a mediana ou a média.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentadas as análises dos resultados realizadas para estudar o desempenho térmico das coberturas selecionadas para a pesquisa, na qual são utilizados tabelas e gráficos que possibilitam uma visualização de alguns eventos que são considerados significativos para este estudo. Desta forma a análise dos resultados foi dividida em duas (2) etapas, na qual o item 4.1 se refere a uma média dos dados de verão, e o item 4.2 se refere a todos os dias significativos analisados. Além disso, também foram realizadas duas análises comparativas, sendo uma delas mostrando o comportamento das coberturas em um dia frio e um dia quente (subitem 4.2.5) e a outra análise comparando a célula-teste do telhado verde contendo apenas o substrato, em relação a mesma célula-teste após a instalação da vegetação (como visto no subitem 4.2.6)

Para auxiliar na análise desta etapa, foi montado a Tabela 21 que nomeia as situações (Q-SP, Q-SP*, Q-CP, e F-SP) com suas respectivas datas, acompanhadas com a descrição de o que levou a escolha desta data para análise neste estudo. Desta forma, Q-SP se refere ao dia 06 de fevereiro de 2024, Q-SP* se refere a 09 de fevereiro de 2024, Q-CP se refere a 13 de fevereiro de 2024 e por fim F-SP se refere a 06 de março de 2024.

Tabela 21 – Datas e descrição de evento

Código	Data	Situação e descrição
Q-SP	06/02/2024	Dados de um dia Quente Sem Precipitação
Q-SP*	09/02/2024	Dados de um dia Quente Sem Precipitação (baixa velocidade de vento)*
Q-CP	13/02/2024	Dados de um dia Quente Com Precipitação
F-SP	06/03/2024	Dados de um dia Frio Sem Precipitação

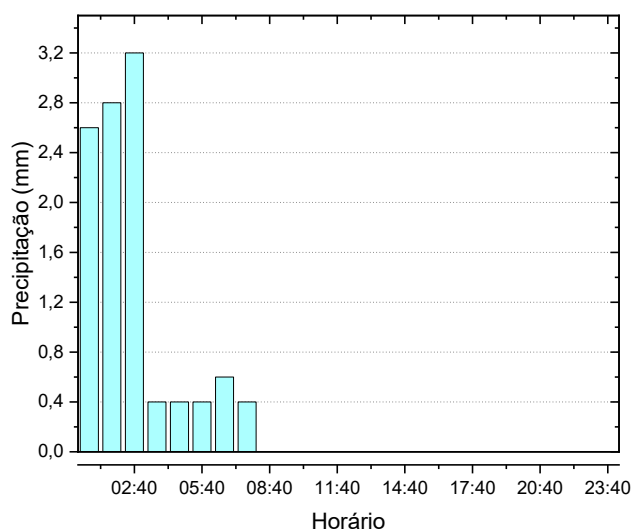
* Dia que apresenta as menores velocidades de vento entre os dados registrados na pesquisa.

Fonte: Elaborado própria (2024)

A separação dos dias com e sem os eventos de chuva é justificada pelo fato de que os eventos chuvosos foram muitos escassos. Deste modo, é interessante analisar o desempenho térmico das coberturas em dias chuvosos, devido a sua grande influência, principalmente na cobertura verde e dias secos, sabendo que a maior parte do verão percorreu de forma seca. Deste modo, o dia escolhido para análise com precipitação (13 de fevereiro de 2024) apresenta o histograma da Figura 25.

Para auxiliar na visualização da baixa incidência de vento, foram elaborados gráficos do Q-SP, Q-SP*, Q-CP e F-SP apresentados na Figura 26, na qual os gráficos apresentam as velocidades e temperaturas em seus respectivos horários, registrados nos

Figura 25 – Histograma de precipitação Q-CP



Fonte: Elaborado própria (2024)

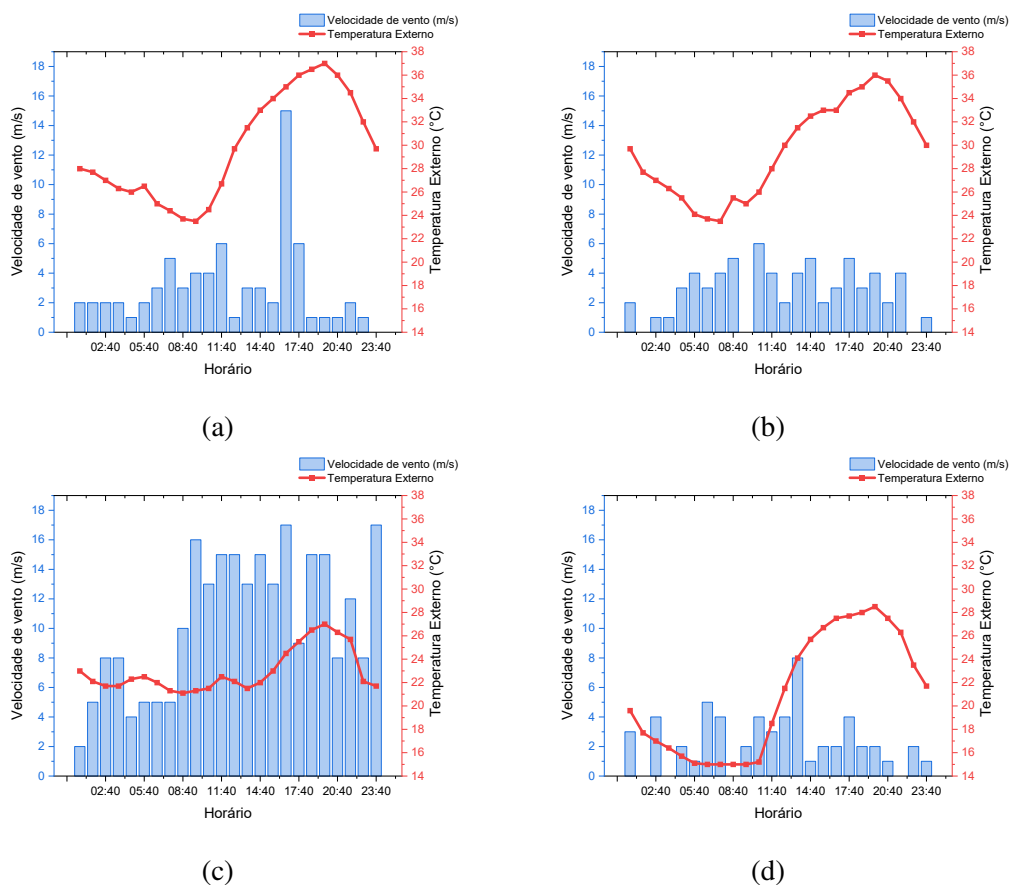
dias significativos analisados na pesquisa.

4.1 Análise da temperatura dos dias de verão

Para a análise da temperatura dos dias de verão, foram utilizados dados obtidos de vinte e dois (22) dias, distribuídos entre 25 de janeiro a 11 de março de 2024. Alguns dados foram perdidos devido a falhas no sistema de coleta de dados como explicado no subitem 3.4.1. A Tabela 22 apresenta os valores máximos, medianos, mínimos e as diferenças (entre máximos e mínimos) obtidos durante o período analisado. É importante ressaltar que os dados são mostrados em função da mediana, e não média, conforme explicado no subitem 3.4.2.2. Os valores de temperatura média de todas os dados capturados e armazenados, durante 24 horas em intervalos de 1 hora, encontram-se no Apêndice B.

Todas as células-teste possuem três (3) camadas com sensores, sendo eles a camada superior, localizada logo acima da cobertura, a camada inferior localizada logo abaixo da cobertura e a camada interior que está localizado a setenta e cinco centímetros (75 cm) do piso, centralizado dentro do interior das células-teste. A célula-teste contendo o telhado verde possui um sensor extra, posicionado na camada de drenagem, logo acima da camada de impermeabilização, para possibilitar uma análise sobre o comportamento

Figura 26 – Temperaturas e velocidade do vento Q-SP (a), Q-SP* (b), Q-CP (c) e F-SP (d)



Fonte: Registros de pesquisa (2024)

desta camada em específico, como descrito no subitem 3.3.2 e na Figura 23.

Analisando a camada superior, em ordem crescente, é possível visualizar que o Telhado Verde apresenta a menor temperatura mediana, sendo de $19,1^{\circ}\text{C}$ em conjunto com uma variação de temperatura de $2,2^{\circ}\text{C}$, seguido pela Telha Fibrocimento com $21,7^{\circ}\text{C}$ e uma variação de $2,7^{\circ}\text{C}$, Telha Aluzinco com $23,2^{\circ}\text{C}$ e uma variação de 4°C e por último a Telha Ecológica com $25,7^{\circ}\text{C}$ e uma variação de 5°C . Sendo assim, o Telhado Verde possui a menor temperatura na camada superior entre os sistemas analisados. Este fato é justificado pela vegetação, como afirmado por Yang e Wang (2014), na qual a vegetação com sua alta sensibilidade a turbulência causada pela ação dos ventos, saturação do substrato e a área de albedo criado pela vegetação sobre o substrato, proporcionam uma redução significativa da carga de radiação solar que o substrato absorve, conseqüentemente reduzindo drasticamente a transferência de calor do exterior para o interior da célula-teste.

A Tabela 22 apresenta também os valores de temperatura mediana na camada

Tabela 22 – Maior, menor, mediana e diferença de temperatura no verão

Tipo de cobertura	Camada	Temperatura (°C)			
		Maior	Mediana	Menor	Diferença
Telhado verde	Drenagem	21,5	19,6	18,5	3,0
	Superior	20,5	19,1	18,3	2,2
	Inferior	25,7	23,7	22,3	3,4
	Interior	19,7	18,4	17,6	2,1
Telha Ecológica	Superior	29,0	25,7	24,0	5,0
	Inferior	21,3	19,5	18,3	3,0
	Interior	21,5	19,5	18,4	3,1
Telha Aluzinco	Superior	26,0	23,2	22,0	4,0
	Inferior	26,7	23,8	22,3	4,4
	Interior	20,1	18,6	17,5	2,6
Telha Fibrocimento	Superior	23,7	21,7	21,0	2,7
	Inferior	22,8	21,1	19,8	3,0
	Interior	20,3	18,7	18,0	2,3
Externo	Exterior	29,5	23,6	20,5	9,0

Fonte: Elaborado própria (2024)

inferior, sendo que em ordem crescente, a Telha Ecológica apresenta a menor temperatura sendo de 19,5°C, com uma variação de 3°C, seguida pela Telha Fibrocimento com 21,1°C e uma variação de 3°C, Telha Aluzinco com 23,8°C e uma variação de 4,4°C e por ultimo o Telhado Verde com 23,7°C e uma variação de 3,4°C. Estes valores foram obtidos devido a inclinação dos sistemas de cobertura, na qual as Telhas (Ecológico, Aluzinco e Fibrocimento) foram posicionadas com uma inclinação de 25% devido a padronização das inclinações para o estudo, sendo padronizados para exceder o mínimo de 18% que é a maior inclinação solicitada pelo fabricante entre as Telhas (referente a Telha Ecológica), deste modo evitando a chance de infiltração e estagnação das águas pluviais.

Para o Telhado Verde foi aplicado uma inclinação de 3% de modo a proporcionar uma inclinação mínima para evitar estagnação de águas pluviais (RENTERGHEM; BOTTELDOOREN, 2014; KOROL; SHUSHUNOVA; SHUSHUNOVA, 2018). Inclinações muito elevadas, como a utilizada nas células-teste com telhas, necessitariam de um sistema de ancoragem e processos de montagem geralmente utilizadas por empresas especializadas na confecção de Telhado Verde. Sendo assim, para a pesquisa foi escolhido manter a inclinação mínima necessária para a drenagem das águas pluviais, de modo que não seja necessário utilizar ancoragem e processos de montagem especializados.

Deste modo, devido a inclinação dos sistemas de telhado em conjunto com

o posicionamento dos sensores da camada inferior que estão localizados de forma centralizada, logo abaixo das coberturas, a captura de dados da camada inferior da célula-teste contendo o Telhado Verde foi afetada de forma diferente das demais células-teste. Fato justificado pela massa de ar mais aquecida que se deslocou para a parte superior interna da célula-teste, devido ao fato de ela ser menos densa que a massa de ar mais resfriada, como explicado no subitem 2.2.3. A célula-teste contendo o Telhado Verde apresenta uma inclinação muito inferior as demais células-teste, a concentração da massa de ar mais aquecida se espalha sobre quase toda a superfície inferior do Telhado Verde, diferentemente das demais células-teste que apresentam em sua superfície inferior da cobertura, uma parte mais elevada que a outra.

Logo, para analisar a temperatura mediana na camada inferior podemos utilizar a camada de drenagem para a célula-teste de Telhado Verde que equivale a $19,6^{\circ}\text{C}$, com uma variação de temperatura de 3°C , sendo que devido a não apresentar todas as camadas do sistema (faltando a impermeabilização e o suporte de madeira) e ser influenciado pela alta temperatura na camada inferior, deveria apresentar uma temperatura relativamente inferior. No entanto, mesmo sem apresentar todas as camadas completas e sendo influenciada pela camada inferior, a camada de drenagem já apresenta uma temperatura semelhante a da Telha Ecológica, sendo as duas coberturas com a menor temperatura mediana na camada inferior.

Pela Tabela 22 e pela Figura C.1 é possível visualizar também que em mediana o Telhado Verde apresenta a menor temperatura interna de $18,4^{\circ}\text{C}$ e a menor variação térmica, sendo de $2,1^{\circ}\text{C}$, entre as células-teste analisadas, seguido pelas células-teste contendo Telha de Aluzinco com $18,6^{\circ}\text{C}$ e uma variação de $2,6^{\circ}\text{C}$, Telha Fibrocimento com $18,7^{\circ}\text{C}$ e uma variação de $2,3^{\circ}\text{C}$ e por último contendo a Telha Ecológica com $19,5^{\circ}\text{C}$ e uma variação de $3,1^{\circ}\text{C}$. Sabendo que estes dados se referem ao período do verão em Alegrete, é possível observar que o Telhado Verde proporciona uma menor transferência de calor do exterior para o interior da célula-teste em relação às demais telhas.

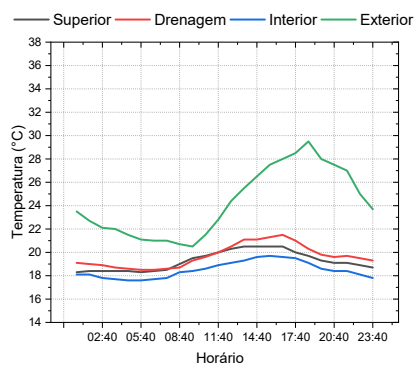
Pela literatura era esperado que a célula-teste contendo a Telha Ecológica apresentasse um valor de temperatura entre as célula-teste contendo Telhado Verde e a Telha Fibrocimento, no entanto devido ao fato de a central de equipamentos estar localizado dentro da célula-teste contendo Telha Ecológica, os valores de temperatura foram alterados, pois o sistema de arduino e coleta de dados produz calor extra dentro da célula-teste, sendo este um fato que não foi previsto para o estudo.

Este resultado é obtido com o sistema de cobertura do Telhado Verde contendo

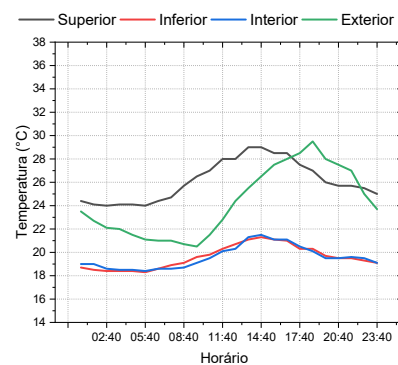
a camada de madeira que serve como suporte para toda a estrutura, no entanto não foi previsto o mesmo sistema de madeiramento para as demais células-teste, pois inicialmente era previsto que a suporte de madeira da cobertura verde seria equivalente a uma estrutura de telha completa tal qual as demais telhas. Logo a análise comparativa para os valores de temperatura no interior das células-teste são apenas válidos em situações que não são levados em consideração a utilização de forro em conjunto com as telhas (Ecológica, Aluzinco e Fibrocimento).

Com os valores das temperaturas medianas das camadas, é possível montar gráficos de cada célula-teste contendo os valores de temperaturas medianas como vistos na Figura 27, que apresenta os valores de temperaturas medianas no decorrer de vinte e quatro (24) horas para cada célula-teste. Onde (a) é o Telhado verde, (b) é a Telha Ecológica, (c) é a Telha Aluzinco e (d) é a Telha Fibrocimento.

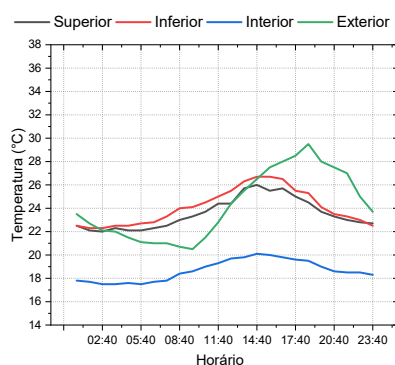
Figura 27 – Temperaturas medianas das células-teste (a) Telhado Verde, (b) Telha Ecológica, (c) Telha Aluzinco e (d) Telha Fibrocimento



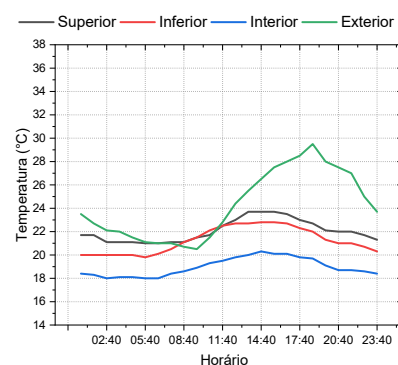
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Registros de pesquisa (2024)

Pela Figura 27 (a) – Telhado Verde, temos que as temperaturas medianas das

camadas superior e drenagem se encontram bem próximas da temperatura da camada interior, fato que ocorre devido ao albedo da vegetação, ações do vento e a umidade do solo, de modo a refletir grande parte da radiação solar, diminuindo o aquecimento do substrato e da água contida no substrato, como afirmado por Yang e Wang (2014) e Litardo et al. (2020). Isto pode ser confirmado também pela temperatura no interior da célula-teste, que apresenta uma variação de temperatura de $2,1^{\circ}\text{C}$, sendo a menor entre as coberturas analisadas.

É possível observar também que a célula-teste contendo a Telha Aluzinco (Figura 27 – c) apresenta altas temperaturas na camada superior e inferior (chegando a 26°C e $26,7^{\circ}\text{C}$ respectivamente), sendo que a temperatura na camada interior é a segunda mediana mais baixa, sendo de $18,6^{\circ}\text{C}$. Poderia-se dizer que a célula-teste contendo Telha Aluzinco seria comparável ao Telhado Verde principalmente observando a temperatura interna da célula-teste, no entanto este fato não necessariamente é real, pois o Telhado Verde apresenta menor temperatura na camada interna devido ao fato de a camada superior e a inferior apresentar uma temperatura semelhante. Já na Telha Aluzinco, tanto a camada superior quanto a camada inferior apresentam temperaturas elevadas em comparação a camada interna. Além disso, pelos cálculos de transmitância térmica como apresentados no subitem 3.4.2.1, a transmitância térmica da Telha Aluzinco é bem superior a do Telhado Verde, sendo de $4,76\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ e $1,21\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$, respectivamente. Este fato é explicado com mais detalhe no subitem 4.2.2.

A Telha Ecológica (Figura 27 – b) apresenta a maior temperatura mediana nas camadas superior ($25,7^{\circ}\text{C}$) e interior ($19,5^{\circ}\text{C}$) entre as coberturas estudadas. Este fato pode ser justificado pela coloração da telha, sendo ela a telha mais escura utilizada no estudo e também pode ser explicado pela propriedade de absorção do material que é utilizado para a sua manufatura. Por outro lado, mesmo apresentando a maior temperatura na camada superior e interna, ela apresenta uma das menores temperaturas na camada inferior ($19,5^{\circ}\text{C}$) como visto na Tabela B.1, além do fato de que a temperatura interna da célula-teste contendo Telha Ecológica pode ter sido afetada, como supracitado neste mesmo subitem. Este fato pode ser justificado observando os valores de transmitância térmica do subitem 3.4.2.1, na qual a Telha Ecológica apresenta o segundo menor valor de transmitância térmica, sendo de $3,91\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$.

A célula-teste contendo Telha Fibrocimento (Figura 27 – d) apresenta a segunda menor temperatura mediana na camada superior ($21,7^{\circ}\text{C}$), e a segunda maior temperatura na camada inferior ($21,1^{\circ}\text{C}$), ficando atrás apenas da Telha Aluzinco, consequentemente

apresentando a segunda maior temperatura mediana na camada interior (18,7°C). No entanto mesmo apresentando a segunda maior temperatura mediana interna, apresenta a segunda menor variação de temperatura interna, sendo de 2,3°C, ficando atrás apenas da célula-teste contendo o Telhado Verde (2,1°C).

Deste modo, ao analisarmos os valores de temperatura mediana das camadas entre as células-teste, como visto nas Figura 27, e na diferença de temperatura entre as camadas como visto na Tabela 22, podemos observar que o Telhado Verde e a Telha Ecológica são as coberturas com a menor transferência de calor entre os sistemas estudados no clima de verão de 2023 para 2024 no município de Alegrete/RS.

4.2 Análise dos dias significativos

Nesta seção serão apresentadas as análises dos dias significativos e um comparativo entre a cobertura verde completa e incompleto (sem a vegetação).

4.2.1 Análise de um dia quente no verão sem precipitação (Q-SP)

Neste subitem foi feito uma análise dos dados registrados no dia 06 de fevereiro de 2024 (Q-SP). Este dia foi escolhido por apresentar altas temperaturas durante quase todo o período do dia, sem a influência de um evento de precipitação. Deste modo para realizar a análise deste dia, foram montadas as Tabelas B.2 e B.3 que estão apresentadas no Apêndice B.

As Tabelas B.2 e B.3 apresentam os dados de temperatura nas camadas das células-teste e no exterior em seus respectivos horários, em conjunto com os valores de Velocidade do Vento (m/s), Radiação Global (W/m²), Umidade (%) e Chuva (mm). Com base nas tabelas supracitadas, foi elaborado a Tabela 23 que apresenta os valores máximos, medianos, mínimos e as diferenças (entre máximos e mínimos) obtidos durante o período analisado.

Pela Tabela 23 é possível observar que na camada superior em ordem crescente de temperatura mediana, o Telhado Verde apresentou a menor entre as células-teste, sendo de 19,4°C, seguido pela Telha Aluzinco com 23,2°C, Telha Fibrocimento com 23,4°C e por fim pela Telha Ecológica com 26,5°C, apresentando a maior temperatura entre as coberturas analisadas. Em relação a variação da temperatura na camada superior, o

Tabela 23 – Maior, menor, mediana e diferença de temperatura em Q-SP

Tipo de cobertura	Camada	Temperatura (°C)			
		Maior	Mediana	Menor	Diferença
Telhado verde	Drenagem	21,7	19,6	18,5	3,2
	Superior	21,1	19,4	18,1	3,0
	Inferior	30,5	26,5	24,7	5,8
	Interior	20,0	18,3	17,5	2,5
Telha Ecológica	Superior	33,0	26,5	24,7	8,3
	Inferior	22,3	20,0	18,5	3,8
	Interior	22,8	19,8	18,5	4,3
Telha Aluzinco	Superior	28,0	23,2	22,1	5,9
	Inferior	26,0	23,2	21,7	4,3
	Interior	21,1	19,0	17,7	3,4
Telha Fibrocimento	Superior	28,0	23,4	21,1	6,9
	Inferior	25,0	22,5	21,0	4,0
	Interior	22,3	19,7	18,9	3,4
Externo	Exterior	37,0	28,9	23,5	13,5

Fonte: Elaborado própria (2024)

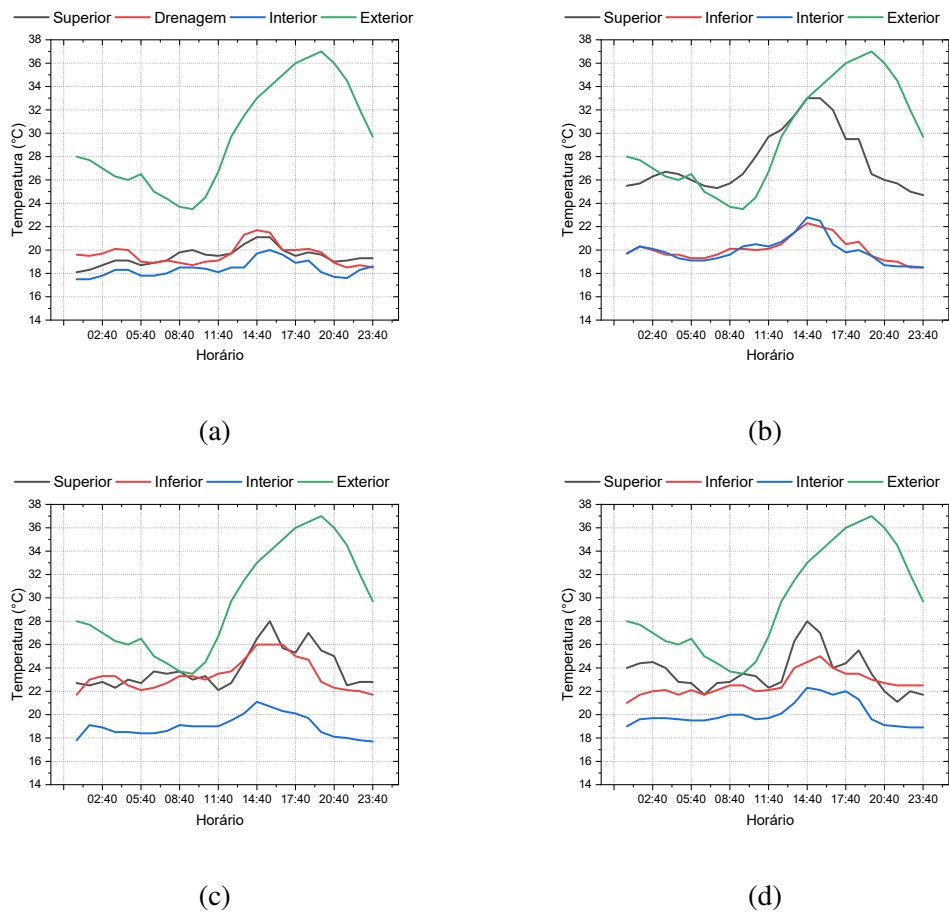
Telhado Verde apresentou a menor variação, sendo de 3°C, seguido pela Telha Aluzinco, com 5,9°C, Telha Fibrocimento com 6,9°C e por fim pela Telha Ecológica com 8,3°C.

Observando os valores de temperatura mediana na camada inferior, sabendo que para o Telhado Verde a camada utilizada para análise é a camada de drenagem (como informado no subitem 4.1), temos em ordem crescente, o Telhado Verde com 19,6°C, com uma variação de 3,2°C, seguido pela Telha Ecológica com 20°C e uma variação de 3,8°C, a Telha Fibrocimento com 22,5°C e uma variação de 4°C e por fim a Telha Aluzinco com 23,2°C e uma variação de 4,3°C, sendo a cobertura com a maior temperatura mediana em conjunto com a maior variação de temperatura na camada inferior.

Em relação a camada interior (Figura C.2), temos que o Telhado verde apresenta a menor temperatura mediana no interior da célula-teste (18,3°C), em conjunto com a menor variação de temperatura (2,5°C), seguindo em ordem crescente, temos a Telha Aluzinco com 19°C e a Telha Fibrocimento com 19,7°C, ambas com uma variação de temperatura de 3,4°C, por fim temos a Telha Ecológica com temperatura de 19,8°C e uma variação de 4,3°C, apresentando a maior temperatura mediana e a maior variação de temperatura na camada interior.

Com os valores das Tabelas B.2 e B.3 é possível montar os gráficos como apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Temperaturas do dia Q-SP das células-teste (a) Telhado Verde, (b) Telha Ecológica, (c) Telha Aluzinco e (d) Telha Fibrocimento



Fonte: Registros de pesquisa (2024)

A Figura 28 apresenta os gráficos das temperaturas no dia 06 de fevereiro de 2024 do Telhado Verde (a), Telha Ecológica (b), Telha Aluzinco (c) e Telha Fibrocimento (d). Observando a Telha Aluzinco (Figura 28 – c), era esperado que apresentasse uma temperatura maior na camada interior quando comparado aos demais, uma vez que sua transmitância térmica é a mais elevada. No entanto, a diminuição da temperatura no interior ocorreu devido a incidência de vento que, juntamente com a ventilação cruzada da célula-teste, possibilitou o seu resfriamento mais acelerado. Este fato fica mais evidente ao compararmos com um dia com baixa incidência de vento, fato discutido no subitem 4.2.2.

Analisando o comportamento da temperatura mediana e as variações de temperatura nas camadas, temos que o Telhado Verde apresenta a menor variação de temperatura em ambas as camadas e a menor temperatura entre as coberturas analisadas. Isso ocorre, devido ao albedo da vegetação, no qual a interação da umidade do substrato

com a ação dos ventos e a inércia térmica dos materiais, faz com que o sistema de cobertura do telhado verde apresente o melhor desempenho térmico entre as coberturas analisadas. Fato comprovado pela temperatura apresentada na camada interior, sendo a menor temperatura e a menor variação de temperatura entre as camadas analisadas.

Temos pela Figura 28 (b), que a Telha Ecológica apresenta o pior desempenho térmico entre as coberturas quando analisado a camada superior e a interior isoladamente. No entanto quando colocado em perspectiva a camada inferior em conjunto com a superior, temos que a Telha Ecológica apresenta o segundo melhor desempenho térmico entre as coberturas analisadas, pois por mais que ela apresente uma alta temperatura mediana na camada superior, ela não transmite todo esse calor para o interior da célula-teste, como visto na diferença de temperatura mediana entre as camadas superior ($26,5^{\circ}\text{C}$) e inferior (20°C). Em relação a camada interior, como informado no subitem 4.1, na célula-teste com a Telha Ecológica, o seu valor não representa o real valor, devido a uma fonte de calor extra em seu interior (central de armazenamento de dados do arduino). Deste modo, por apresentar a segunda menor temperatura mediana em conjunto com a segunda menor variação de temperatura na camada inferior e ainda levando em consideração que todas as células-teste foram levantadas com o mesmo material e mesmas dimensões, sem apresentar ventilação extra proveniente de furos ou falhas nas vedações, contendo apenas a ventilação para proporcionar a ventilação cruzada, solicitada pela ABNT NBR 15220-3 (2005), é possível que a temperatura mediana e as variações de temperatura na camada interior apresentem o segundo melhor desempenho térmico entre as coberturas analisadas.

É possível observar pela Figura 28 (b) e (c), que a Telha fibrocimento e a Telha Ecológica respectivamente, apresentam um desempenho térmico semelhante, principalmente observando as temperaturas nas camadas interior e inferior. As temperaturas medianas na camada interior da Telha Ecológica e Fibrocimento são de $18,5^{\circ}\text{C}$ e $18,5^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Já as temperaturas medianas na camada inferior são de $19,8^{\circ}\text{C}$ e $19,7^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Deste modo para analisar as variações de temperatura, foi montado a Tabela 24, na qual apresenta um comparativo de diferença entre a maior e a menor temperatura nas camadas das situações Q-SP e Q-CP que foi um dia quente com precipitação (mais discutido no subitem 4.2.3).

A partir da Tabela 24, observa-se que por mais que a Telha Ecológica apresente uma maior variação de temperatura na camada superior, devido a inércia térmica do material, a transmissão de calor para o seu interior quase não é afetada, independente

Tabela 24 – Comparativo Telha Ecológica e Fibrocimento entre situação Q-SP e Q-CP

Código	Diferença de temperatura (°C)					
	Telha Ecológica			Telha Fibrocimento		
	Superior	Inferior	Interior	Superior	Inferior	Interior
Q-CP	7,3	3,7	4,3	6,2	4,6	3,7
Q-SP	8,3	3,8	4,3	6,9	4,0	3,4
Diferença	1,0	0,1	0,0	0,7	0,6	0,3

Fonte: Elaborado própria (2024)

de ser um dia com evento de precipitação (Q-CP), ou se foi em um dia seco como visto em Q-SP. Fato confirmado pelas diferenças de temperatura na camada inferior, que foi de apenas 0,1°C e não houve diferença de temperatura na camada interior.

Como supracitado, ao analisar a camada superior, a Telha Fibrocimento apresentou uma diminuição de temperatura em relação a Telha Ecológica. No entanto, a transmissão de calor para o interior teve uma maior diferença, sendo de 0,3°C, enquanto que na Telha Ecológica a diferença foi de 0,0°C, fato explicado pela transmitância térmica do material, como apresentado no subitem 3.4.2.1, onde a Telha Ecológica apresenta uma transmitância térmica menor que a Telha Fibrocimento. Outro fato interessante observado é que a Telha Ecológica apresenta uma diferença de temperatura menor na camada superior no dia Q-CP do que em Q-SP, já a Telha Fibrocimento apresenta uma menor diferença de temperatura em Q-SP ao invés de Q-CP. Ou seja, a Telha Ecológica apresenta um melhor desempenho térmico quando em conjunto com o evento de precipitação, como observado em Q-CP.

4.2.2 Análise de um dia quente no verão sem precipitação com as menores velocidades de vento (Q-SP*)

Neste subitem foi realizado uma análise dos dados registrados no dia 09 de fevereiro de 2024 (Q-SP*), que corresponde ao dia que apresentou as menores velocidades de vento, sem a influência de eventos de precipitação e com altas temperaturas. Deste modo, para a sua análise, foram montadas as Tabelas B.4 e B.5 que estão no Apêndice B.

As Tabelas B.4 e B.5 apresentam as temperaturas em cada camada, analisadas em seus respectivos horários, em conjunto com os valores de Radiação Global (W/m²), Umidade (%) e principalmente em relação a Velocidade do Vento (m/s). Com base

nas tabelas supracitadas, foi elaborado a Tabela 25 que apresenta os valores máximos, medianos, mínimos e as diferenças (entre máximos e mínimos) obtidos durante o período analisado.

Tabela 25 – Maior, menor, mediana e diferença de temperatura em Q-SP*

Tipo de cobertura	Camada	Temperatura (°C)			
		Maior	Mediana	Menor	Diferença
Telhado verde	Drenagem	20,1	19,4	18,1	2,0
	Superior	20,5	19,0	17,5	3,0
	Inferior	25,7	23,5	22,3	3,4
	Interior	19,1	17,8	16,6	2,5
Telha Ecológica	Superior	27,5	24,6	23,0	4,5
	Inferior	23,3	20,9	19,0	4,3
	Interior	21,3	19,8	17,7	3,6
Telha Aluzinco	Superior	32,0	26,1	22,1	9,9
	Inferior	31,0	26,8	23,0	8,0
	Interior	25,5	20,6	18,3	7,2
Telha Fibrocimento	Superior	26,0	23,0	21,5	4,5
	Inferior	24,4	21,5	19,5	4,9
	Interior	21,7	19,5	18,3	3,4
Externo	Exterior	36,0	29,9	23,5	12,5

Fonte: Elaborado própria (2024)

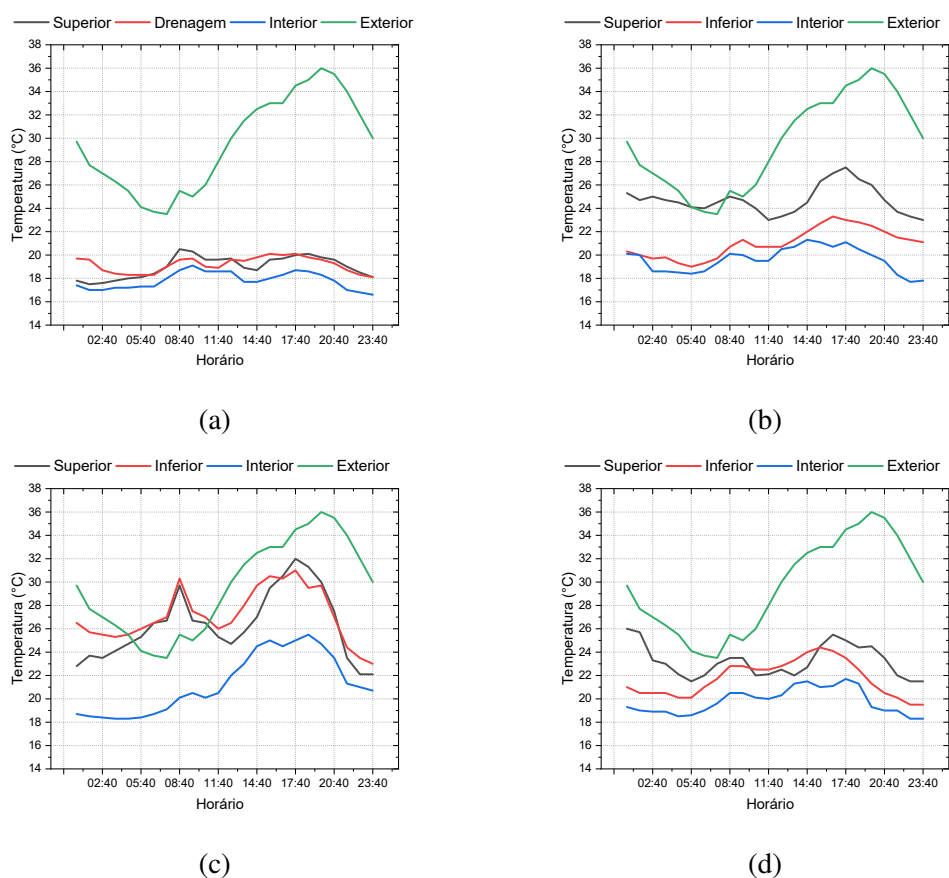
Para uma melhor visualização do comportamento da temperatura, com base nas Tabelas B.4 e B.5, foi realizado a montagem dos gráficos da Figura 29.

A Figura 29 apresenta os gráficos da mediana das temperaturas ao longo dia dia para o Telhado Verde (a), Telha Ecológica (b), Telha Aluzinco (c) e Telha Fibrocimento (d), na situação Q-SP*. Ao observarmos a camada superior, em ordem crescente de temperatura mediana, temos que o Telhado Verde apresenta a menor temperatura, sendo de 19°C com uma variação de temperatura de 3°C, seguido pela Telha Fibrocimento, com 23°C e uma variação de 4,5°C, Telha Ecológica, com 24,6°C e uma variação de 4,5°C e por fim temos a Telha Aluzinco, com 26,1°C e uma variação de temperatura de 9,9°C.

Observando a camada inferior, sabendo que para o Telhado Verde, como informado no subitem 4.1, foi utilizado a camada de drenagem ao invés da inferior nas análises deste estudo, o Telhado Verde apresenta a menor temperatura mediana, sendo de 19,4°C e uma variação de temperatura de 2°C, seguido pela Telha Ecológica, com 20,9°C e uma variação de 4,3°C, Telha Fibrocimento, com 21,5°C e uma variação de 4,9°C e por fim, temos a Telha Aluzinco, com 26,8°C e uma variação de 8°C.

Pela temperatura mediana na camada interior (Figura C.3), temos que o Telhado

Figura 29 – Temperaturas Q-SP* das células-teste (a) Telhado Verde, (b) Telha Ecológica, (c) Telha Aluzinco e (d) Telha Fibrocimento

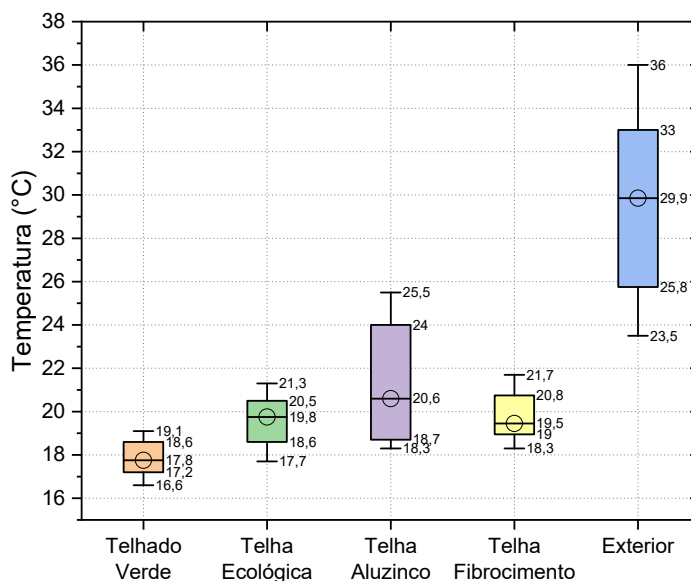


Fonte: Registros de pesquisa (2024)

Verde apresenta a menor temperatura mediana, sendo de 17,8°C, com uma variação de temperatura de 2,5°C, seguido pela Telha Fibrocimento, com 19,5°C e uma variação de 3,4°C, Telha Ecológica com 19,8°C e uma variação de 3,6°C e por fim temos a Telha Aluzinco apresentando a maior temperatura mediana e a maior variação de temperatura, sendo de 20,6°C e 7,2°C respectivamente. Deste modo foi possível montar o gráfico da Figura 30.

O gráfico da Figura 30 apresenta a amplitude dos valores de temperatura na camada interior em Q-SP* das coberturas estudadas. Sabendo que em Q-SP* teve uma das menores incidências de vento, em conjunto com altas temperaturas e sem evento de precipitação, como observado nas Tabelas B.4 e B.5, podemos observar a magnitude da influência do vento sobre a Telha Aluzinco. Sendo que em Q-SP e em Q-CP, analisados nos subitens 4.2.1 e 4.2.3, a Telha Aluzinco, por mais que apresentasse a maior temperatura na camada inferior, não apresentava grandes temperaturas na camada interior devido a incidência de vento, fato que pode ser explicado pelos dados encontrados em

Figura 30 – Temperatura Interior Q-SP* células-teste



Fonte: Elaborado própria (2024)

Q-SP*, onde a Telha Aluzinco apresenta a maior temperatura mediana e a maior variação de temperatura na camada interior, como observado no gráfico da Figura 30.

Pelo gráfico da Figura 30 é possível observar também que a Telha Ecológica apresenta novamente um comportamento semelhante a da Telha Fibrocimento, apresentando até uma temperatura mediana superior ao da Telha Fibrocimento. No entanto quando analisado a camada inferior é observado que a temperatura mediana e a variação de temperatura nesta camada são menores em comparação ao observado na Telha Fibrocimento, deste modo, novamente a temperatura no interior da célula-teste da Telha Ecológica foi afetada pelo equipamento de coleta de dados.

4.2.3 Análise de um dia quente no verão com precipitação (Q-CP)

Neste subitem foi feita uma análise dos dados registrados no dia 13 de fevereiro de 2024 (Q-CP). A escolha desta data se deu pelo registro de um evento de chuva no período da manhã em conjunto com uma alta temperatura, possibilitando assim analisar os efeitos da chuva nas células-teste em dias com alta temperatura. Deste modo, para realizar a análise deste dia, foram montadas as Tabelas B.7 e B.8 apresentados no Apêndice B.

Tabela 26 – Maior, menor, mediana e diferença de temperatura em Q-CP

Tipo de cobertura	Camada	Temperatura (°C)			
		Maior	Mediana	Menor	Diferença
Telhado verde	Drenagem	21,1	19,0	17,4	3,7
	Superior	20,1	18,1	16,7	3,4
	Inferior	25,5	22,6	21,3	4,2
	Interior	19,1	17,4	16,3	2,8
Telha Ecológica	Superior	30,0	24,3	22,7	7,3
	Inferior	21,1	18,7	17,4	3,7
	Interior	21,5	18,5	17,2	4,3
Telha Aluzinco	Superior	29,5	24,7	19,6	9,9
	Inferior	32,5	25,9	21,5	11,0
	Interior	19,8	17,8	16,4	3,4
Telha Fibrocimento	Superior	26,0	21,4	19,8	6,2
	Inferior	23,3	20,0	18,7	4,6
	Interior	21,1	18,5	17,4	3,7
Externo	Exterior	27,0	22,1	21,1	5,9

Fonte: Elaborado própria (2024)

As Tabelas B.7 e B.8 apresentam os valores de temperatura em cada camada das células-teste, juntamente com os valores de velocidade do vento, radiação global, porcentagem de umidade e milimetragem de chuva no respectivo horário. Com base nas Tabelas supracitadas foi montado a Tabela 26 que apresenta os valores máximos, medianos, mínimos e as diferenças (entre máximos e mínimos) obtidos durante o período analisado.

Analisando a camada superior das células-teste é observado que o Telhado verde apresenta a melhor temperatura mediana, de 19°C, com a menor variação térmica entre as células-teste (3,7°C) já a maior temperatura mediana nesta camada é observada na Telha Aluzinco, com 24,7°C em conjunto com a maior variação térmica (9,9°C). É observado também que a Telha Ecológica apresenta a segunda maior temperatura mediana superior (24,3°C) e a segunda maior variação térmica (7,3°C).

Sabendo que na análise da camada inferior para a célula-teste contendo o telhado verde foi utilizado a camada de drenagem como informado no subitem 4.1 e analisando a Tabela 26, é possível observar que a menor diferença de temperatura ocorre na camada de drenagem do telhado verde e também na camada inferior da telha ecológica, sendo esta variação de 3,7°C, seguido pela Telha Fibrocimento com variação de 4,6°C e por fim a maior diferença registrada na Telha Aluzinco, sendo de 11°C. É visto também que a temperatura mediana apresentada nesta camada é de 18,7°C para a telha ecológica, sendo a menor temperatura, seguida pelo telhado verde, com 19°C, 20°C para a telha

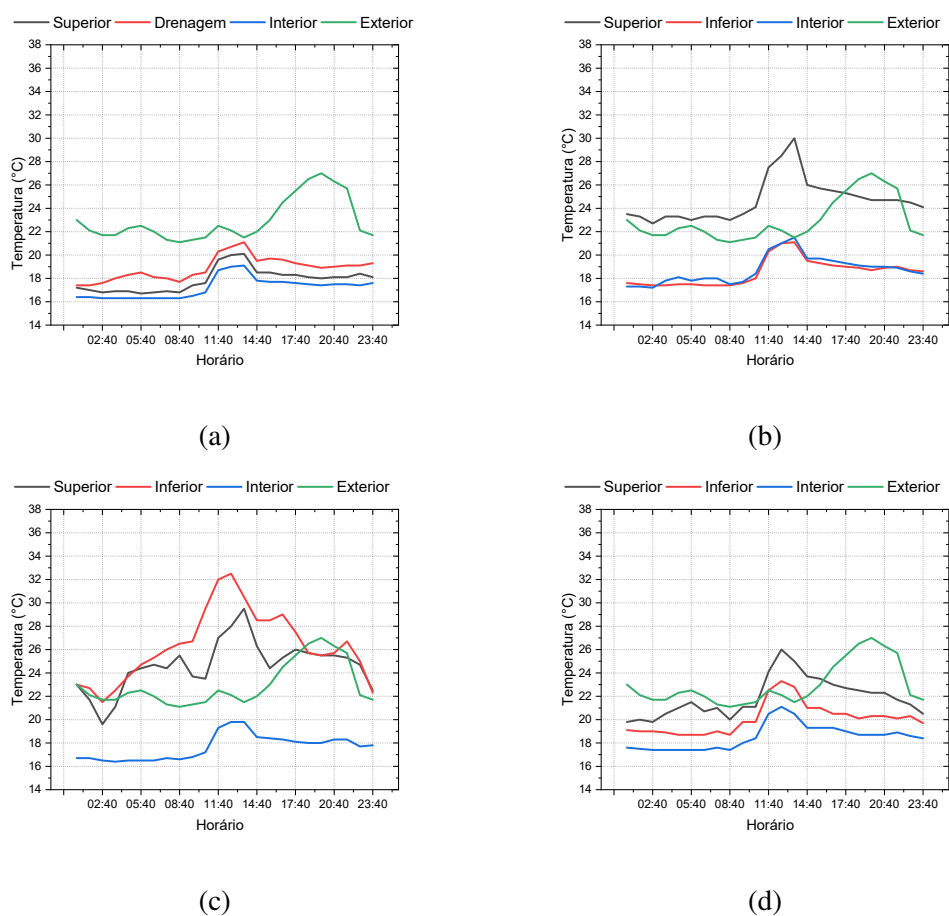
fibrocimento e 25,9°C para a telha aluzinco. Logo durante o dia, a telha ecológica e o telhado verde apresentam a menor variação térmica e a menor temperatura na camada inferior da cobertura das células-teste analisada e a célula-teste com a cobertura de Telha Aluzinco apresenta a maior diferença de temperatura e a maior temperatura mediana nesta camada, proporcionando um maior desconforto térmico quando comparado as demais células-teste.

Este fato pode ser justificado principalmente pelas propriedades do material utilizado para a sua manufatura, apresentando alta capacidade de condutividade térmica. Deste modo, a partir do momento em que a temperatura externa começa a aumentar, devido a suas propriedades térmicas, a maior parte da mudança de temperatura é transmitida para o interior da célula-teste, apresentando então uma baixa inércia térmica, causando maior desconforto térmico aos usuários da edificação quando comparados as demais células-teste.

Quando observado os valores de temperatura mediana e a diferença de temperatura da camada interior das células-teste (Figura C.4) já não é observado o mesmo padrão, pois a menor temperatura é observada na célula-teste contendo o Telhado verde, com temperatura mediana de 17,4°C e variação térmica de 2,8°C, seguido pela Telha Aluzinco com temperatura mediana de 17,8°C e variação térmica de 3,4°C, Telha Fibrocimento e Ecológica com temperatura mediana de 18,5°C e variação térmica de 3,7°C e 4,3°C respectivamente. O fato da Telha Aluzinco ocupar o lugar da Telha Ecológica como a segunda menor temperatura mediana na camada de drenagem, ocorre devido a influência do vento, evento de precipitação e da transmitância térmica da Telha Aluzinco. As altas velocidades de vento, somadas ao evento de precipitação observados no dia Q-CP, ao interagir com a alta condutividade térmica da Telha Aluzinco, fez com que toda a radiação global acumulada durante o período do dia, seja irradiada para o exterior junto a ação das intempéries.

Com os dados das Tabelas B.7 e B.8 é possível montar os gráficos de temperatura durante Q-CP como visto Figura 31.

Figura 31 – Temperaturas Q-CP das células-teste (a) Telhado Verde, (b) Telha Ecológica, (c) Telha Aluzinco e (d) Telha Fibrocimento



Fonte: Registros de pesquisa (2024)

Sabendo que o gráfico da Figura 31 se refere a um dia quente contendo evento de precipitação, a célula-teste contendo o Telhado Verde apresenta as menores temperaturas na camada superior durante todo o períodos do dia, seguido pela Telha de Fibrocimento e por fim pela Telha Ecológica e pela Telha Aluzinco. Logo, em relação a camada superior em um dia chuvoso com altas temperaturas, o telhado verde se destaca, contribuindo para reduzir a temperatura no local onde foi implantando, como observado por Litardo et al. (2020), Yang e Wang (2014), contribuindo então para mitigar o efeito das ilhas de calor urbano.

Pelo gráfico da Figura 31 é observado que o comportamento da Telha Ecológica é semelhante ao da Telha Aluzinco na camada superior, este fato é justificado como visto no subitem 4.1, pelas propriedades dos materiais utilizados para sua manufatura, sendo que a cor utilizada também interfere no conforto térmico local, como afirmado por Lopez-Cabeza et al. (2022), na qual a Telha Ecológica utilizada apresenta uma

cor mais escura que a Telha de Fibrocimento, resultando em uma maior absorção da radiação solar. No entanto apesar da telha ecológica na camada superior apresentar uma temperatura mais elevada que a da Telha de Fibrocimento, ela apresenta uma menor temperatura na camada inferior, apresentando um isolamento térmico maior que a da Telha de Fibrocimento e da Telha Aluzinco, sendo uma das exigências da ABNT NBR 15220-3 (2005), proporcionando assim um maior conforto térmico para os usuários da edificação.

Durante o período das 00:00 até as 09:00 ocorreu um evento de precipitação e é visto pelos gráficos da Figura 31 que a temperatura da camada superior teve diversas quedas, principalmente para a carga da Telha Aluzinco (Figura 31 - C). Este fato pode ser justificado principalmente pela natureza condutiva do material da Telha Aluzinco, em conjunto com o vento e a chuva que ocorrem neste período. Possuindo uma baixa inércia térmica, a Telha Aluzinco apresenta a maior variação térmica durante este período, como visto na Tabela 27.

Tabela 27 – Diferença de temperatura na camada superior no evento de precipitação

Horário	Velocidade de vento (m/s)	Umidade (%)	Chuva (mm)	Temperatura				Exterior
				Telhado verde	Telha Ecológica	Telha Aluzinco	Telha Fibrocimento	
00:40	2,0	98,0	2,6	17,2	23,5	23,0	19,8	23,0
01:40	5,0	99,0	2,8	17,0	23,3	21,7	20,0	22,1
02:40	8,0	99,0	3,2	16,8	22,7	19,6	19,8	21,7
03:40	8,0	100,0	0,4	16,9	23,3	21,1	20,5	21,7
04:40	4,0	99,0	0,4	16,9	23,3	24,0	21,0	22,3
05:40	5,0	99,0	0,4	16,7	23,0	24,4	21,5	22,5
06:40	5,0	95,0	0,6	16,8	23,3	24,7	20,7	22,0
07:40	5,0	96,0	0,4	16,9	23,3	24,4	21,0	21,3
08:40	10,0	95,0	0,0	16,8	23,0	25,5	20,0	21,1
Maior				17,2	23,5	25,5	21,5	23,0
Mediana				16,9	23,3	24,0	20,5	22,0
Menor				16,7	22,7	19,6	19,8	21,1
Diferença				0,5	0,8	5,9	1,7	1,9

Fonte: Elaborado própria (2024)

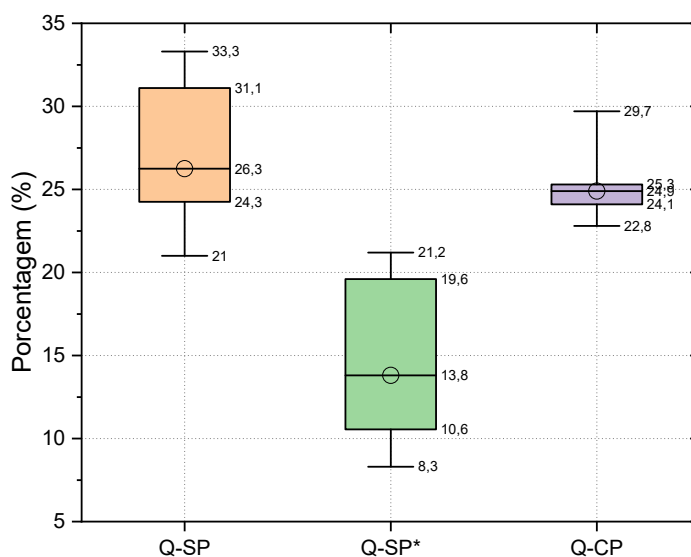
A Tabela 27 apresenta a diferença de temperatura na camada superior entre as células-teste durante o período das 00:00 e 09:00, que apresenta um evento de precipitação. Por volta das 1:40 para 2:40 é observado um conjunto de 3,2mm de chuva e 8m/s de velocidade do vento que causaram uma queda de temperatura na camada superficial da Telha Aluzinco de 2,1°C enquanto que para o Telhado Verde e a Telha Fibrocimento resultou em uma queda de 0,2°C e para a Telha Ecológica houve uma redução

de 0,6°C.

Deste modo, quando analisado o evento de chuva completo, é visto que a Telha Aluzinco apresentou a maior diferença de temperatura, sendo de 5,9°C, seguido pela Telha Fibrocimento, sendo de 1,7°C, por fim o Telhado Verde e a Telha Ecológica, ambas apresentam uma maior inércia térmica que as demais telhas, apresentando uma diferença de temperatura de 0,5°C e 0,8°C respectivamente, contribuindo para uma menor mudança de temperatura dentro das células-teste.

Para auxiliar na análise das temperaturas na Telha Ecológica, foi elaborado a Tabela B.6 que se encontra no Apêndice B e com base nesta tabela, foi montado o gráfico da Figura 32. Esta análise específica em relação a Telha Ecológica foi realizada para poder evidenciar o desempenho térmico na camada interior, cujo resultado foi semelhante ao Telhado verde, embora tenha apresentando a maior temperatura na camada superior em todos os eventos extremos analisados nesta pesquisa.

Figura 32 – Porcentagem de transmissão de calor da telha ecológica nas situações Q-SP, Q-SP* e Q-CP



Fonte: Elaborado própria (2024)

Pelo gráfico da Figura 32, é observado que em Q-CP apresenta a menor variação das porcentagens, seguido por Q-SP e por fim por Q-SP*. Este fato ocorre devido ao evento de precipitação que ocorre em Q-CP, na qual o material construtivo da Telha Ecológica, ao trabalhar em conjunto com a alta umidade gerada pela precipitação,

consegue manter uma constante redução na transmissão de calor da camada superior para a camada inferior, proporcionando uma maior inércia térmica.

Podemos observar que em Q-SP que não apresenta evento de precipitação, a Telha Ecológica conseguiu reduzir em mediana 26,3% de todo o calor que seria transmitido para a camada inferior, sendo que em Q-SP*, que corresponde ao dia com uma das menores incidências de vento, apresenta uma redução de apenas 13,8% de todo o calor que seria transmitido para a camada inferior e em Q-CP, que apresentou um evento de precipitação, teve uma redução de 24,9% de todo o calor que seria transmitido para a camada inferior.

É importante salientar que ambos Q-SP e Q-CP apresentaram alta incidência de vento. Deste modo a Telha Ecológica sofre alta influência da incidência de vento, assim como observado na Telha Aluzinco. Também é observado que a Telha Ecológica, quando em conjunto com uma alta umidade e alta incidência de vento, desempenha uma maior inércia térmica, reduzindo a transmissão de calor da camada superior para a camada inferior.

4.2.4 Análise do dia mais frio registrado sem precipitação (F-SP)

Neste subitem foi realizado uma análise dos dados de temperatura registrados no dia 06 de março de 2024 (F-SP). Deste modo será utilizado os valores das tabelas e gráficos do subitem 4.2.2 e as análises realizadas através das Tabelas B.9 e B.10 apresentada no Apêndice B.

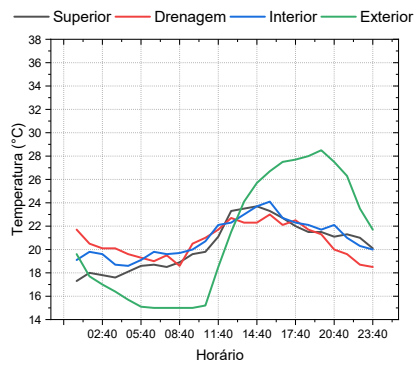
As Tabelas B.9 e B.10 apresentam as temperaturas em cada camada e em seus respectivos horários, junto as temperaturas é apresentado também os valores de Radiação Global (W/m^2), Umidade (%), Velocidade do Vento (m/s) e Chuva (mm). Com base nas Tabelas supracitas foi montado a Tabela 28 que apresenta os valores máximos, medianos, mínimos e as diferenças (entre máximos e mínimos) obtidos durante o período analisado e foram montados os gráficos apresentados na Figura 33.

Tabela 28 – Maior, menor, mediana e diferença de temperatura em F-SP

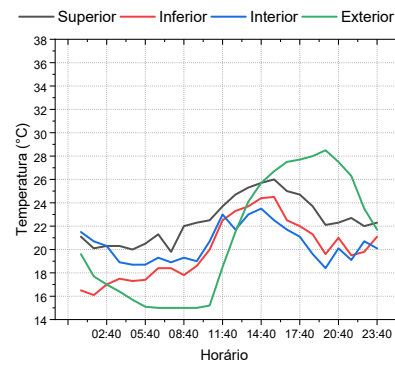
Tipo de cobertura	Camada	Temperatura (°C)			
		Maior	Mediana	Menor	Diferença
Telhado verde	Drenagem	23,0	20,5	18,5	4,5
	Superior	23,7	20,6	17,3	6,4
	Inferior	24,7	22,7	21,3	3,4
	Interior	24,1	20,5	18,6	5,5
Telha Ecológica	Superior	26,0	22,3	19,8	6,2
	Inferior	24,5	19,7	16,1	8,4
	Interior	23,5	20,2	18,4	5,1
Telha Aluzinco	Superior	25,3	20,3	16,6	8,7
	Inferior	30,5	22,7	18,1	12,4
	Interior	23,7	19,8	17,4	6,3
Telha Fibrocimento	Superior	22,8	20,9	18,5	4,3
	Inferior	23,7	21,6	18,5	5,2
	Interior	25,5	21,3	19,8	5,7
Externo	Exterior	28,5	20,6	15,0	13,5

Fonte: Elaborado própria (2024)

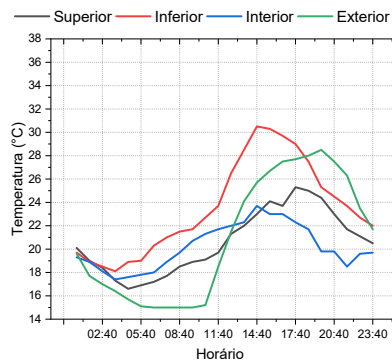
Figura 33 – Temperaturas F-SP das células-teste (a) Telhado Verde, (b) Telha Ecológica, (c) Telha Aluzinco e (d) Telha Fibrocimento



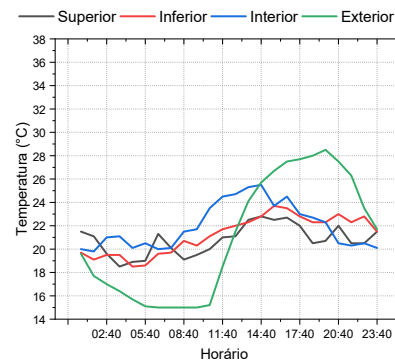
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Registros de pesquisa (2024)

A Figura 33 apresenta os gráficos das temperaturas em cada camada durante F-SP de cada cobertura, na qual (a) se refere ao Telhado Verde, (b) a Telha Ecológica, (c) a Telha Aluzinco e (d) a Telha Fibrocimento.

Pela Tabela 28 e pelos gráficos da Figura 33, quando comparado a camada superior, a Telha Aluzinco apresenta a menor temperatura mediana, sendo de $20,3^{\circ}$, com uma variação de $8,7^{\circ}$, seguido pelo Telhado Verde, com temperatura mediana de $20,6^{\circ}$ e variação de $6,4^{\circ}$, Telha Fibrocimento com temperatura mediana de $20,9^{\circ}$ e variação de $4,3^{\circ}$ e por fim a Telha Ecológica $22,3^{\circ}$ e uma variação de $6,2^{\circ}$.

Observando a camada inferior, sabendo que para o Telhado verde será utilizado a camada drenagem, a Telha Ecológica apresenta a menor temperatura mediana entre as coberturas analisadas, sendo de $19,7^{\circ}$ com uma variação de $8,4^{\circ}$, seguido pelo Telhado verde com $20,5^{\circ}$ com uma variação de $4,5^{\circ}$, Telha Fibrocimento com $21,6^{\circ}$ e uma variação de $5,2^{\circ}$ e por fim a Telha Aluzinco com $22,7^{\circ}$, com uma variação de $12,4^{\circ}$.

Na camada interior (Figura C.5) temos que a Telha Aluzinco apresenta a menor temperatura mediana, sendo de $19,8^{\circ}$, com uma variação de temperatura de $6,3^{\circ}$, seguido Telha Ecológica com $20,2^{\circ}$ e uma variação de $5,1^{\circ}$, Telhado Verde com $20,5$ e uma variação de $5,5^{\circ}$ e por fim a Telha Fibrocimento com $21,3^{\circ}$ com uma variação de $5,7^{\circ}$.

Desta forma, em um dia frio que a temperatura externa variou de $28,5^{\circ}$ a até 15° , sendo um total de $13,5^{\circ}$ de variação de temperatura, a cobertura que proporcionou a menor variação de temperatura para o interior da células-teste foi a Telha Ecológica, apresentando uma variação de $5,1^{\circ}$, seguido pelo Telhado Verde, com $5,5^{\circ}$, Telha Fibrocimento com $5,7^{\circ}$ e por fim pela Telha Aluzinco com $6,3^{\circ}$.

Sabendo que esta é F-SP onde representa um dia frio, a Telha Aluzinco e a Telha Fibrocimento pelo fato de perderem calor para o ambiente externo demonstra que não são materiais que proporcionam isolamento térmico como o apresentado pelo Telhado Verde e pela Telha Ecológica e que proporcionem em dias mais frios, que o interior das células-teste tenha um maior equilíbrio térmico, com baixa redução de temperatura devido a condutividade térmica da cobertura.

Em F-SP é visto que a Telha Ecológica apresenta o melhor comportamento, isto se dá devido ao fato da sua inércia térmica, sendo a telha que apresenta absorção de calor e a maior variação de temperatura entre a camada superior e inferior. O Telhado Verde é a segunda melhor cobertura para esta situação, pois apresenta absorção de calor, no entanto a temperatura mediana apresentada na camada superior é semelhante a mediana na camada inferior, estando em equilíbrio com a temperatura no ambiente externo, desta

forma para dias mais frios (F-SP) pode ser que o Telhado Verde não seja muito adequado.

4.2.5 Síntese comparativa entre dias extremos sem precipitação (Q-SP* e F-SP)

Neste subitem foi realizado um resumo comparativo entre Q-SP* e F-SP que apresentas as condições mais extrema de temperatura entre os dias registrados para esta pesquisa. Desta forma para esta comparação foram elaboradas as Tabelas 29 e 30.

Tabela 29 – Diferença de temperatura entre as camadas superior e inferior em F-SP

Camada	Temperatura Mediana (°C)				
	Telhado Verde	Telha Ecológica	Telha Aluzinco	Telha Fibrocimento	Exterior
Superior	20,6	22,3	20,3	20,9	
Inferior	20,5	19,7	22,7	21,6	
Externo					20,6
Diferença	0,1	2,6	-2,4	-0,8	

Fonte: Elaborado própria (2024)

A Tabela 29 apresenta os valores de diferença de temperatura entre as medianas das camadas superior e inferior em cada cobertura. Desta forma é observado que as menores diferenças de temperaturas são observadas no Telhado Verde e na Telha Fibrocimento sendo de 0,1° e -0,8° respectivamente, seguido pela Telha Aluzinco com uma variação de -2,4° e por fim da Telha Ecológica com variação de 2,6°. O sinal negativo apresentado pela Telha Aluzinco e pela Telha Fibrocimento são referentes ao sentido da transmissão de calor que ocorre de forma oposta ao do Telhado Verde e da Telha Ecológica, ou seja, enquanto em mediana o Telhado Verde e a Telha Ecológica absorve a radiação solar e a transmite para o interior das células-teste, a Telha Aluzinco e a Telha Fibrocimento perde o calor do interior das células-teste para o ambiente externo.

Tabela 30 – Diferença de temperatura entre as camadas superior e inferior em Q-SP*

Camada	Temperatura Mediana (°C)				
	Telhado Verde	Telha Ecológica	Telha Aluzinco	Telha Fibrocimento	Exterior
Superior	19,0	24,6	26,1	23,0	
Inferior	19,4	20,9	26,8	21,5	
Externo					29,9
Diferença	-0,4	3,7	-0,6	1,5	

Fonte: Elaborado própria (2024)

A Tabela 30 apresenta os valores de diferença de temperatura entre as medianas das camadas superior e inferior em cada cobertura em Q-SP* e sabendo que Q-SP* representa um dia quente com baixa velocidade de vento e sem precipitação como apresentado no subitem 4.2.2 é possível observar que as menores variações de temperatura são dadas pelo Telhado Verde com $-0,4^{\circ}$ e pela Telha Aluzinco com $-0,6^{\circ}$, sendo também as células-teste que apresentam perda de calor para o ambiente externo. Por fim, temos a Telha Fibrocimento com uma variação de $1,5^{\circ}$ e a Telha Ecológica com uma variação de $3,7^{\circ}$, apresentando absorção da radiação e sua transmissão para o interior da célula-teste.

Sabendo que Q-SP* se refere a um dia quente, o ideal é a perda de calor do ambiente interno para o ambiente externo, tornando o interior mais refrescante, principalmente observando que a temperatura externa mediana está a $29,9^{\circ}$. Deste modo o Telhado Verde se destaca por apresentar perda de calor para o ambiente externo e por apresentar a menor temperatura nas camadas superior e inferior, sendo próximas (19° e $19,4^{\circ}$ respectivamente), apesar da Telha Aluzinco apresentar perda de calor para o ambiente externo, não é adequada por apresentar temperaturas muito elevadas, sendo as mais altas entre as coberturas analisadas, sendo de $26,1^{\circ}$ na camada superior e $26,8^{\circ}$ na camada inferior.

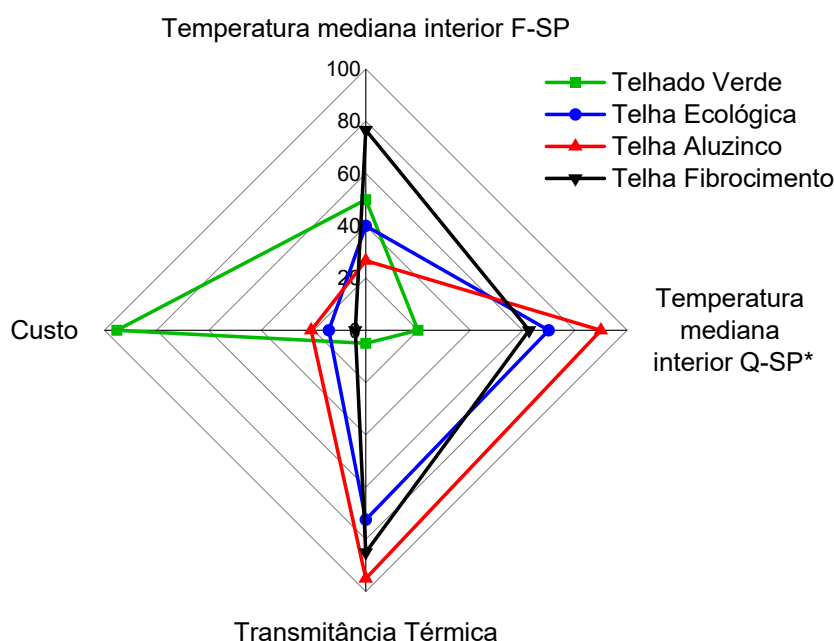
Outra cobertura que se destaca é a Telha Ecológica, pois apesar de apresentar absorção de calor para o interior da célula-teste, apresenta a segunda menor temperatura mediana na camada inferior, sendo de $20,9^{\circ}$. Fato explicado pela sua alta capacidade de isolamento térmico, como observado na diferença de temperatura entre as camadas superior e inferior, sendo de $3,7^{\circ}$. Deste modo o Telhado Verde e a Telha Ecológica apresentam os melhores comportamentos para um dia quente, sem evento de precipitação e com pouca incidência de vento como apresentando por Q-SP*.

Em síntese, observando dados de temperatura mediana na camada interior em Q-SP* e F-SP, custo para manufatura das coberturas e transmitância térmica das coberturas, tem-se o gráfico da Figura 34. No gráfico são apresentados os destaques das coberturas analisadas nesta pesquisa em quatro (4) categorias, na qual cada categoria é escalada de zero (0) a cem (100) por cento.

Para a análise do custo de cada cobertura nesta pesquisa, foi levado em consideração o valor total de todo o material utilizado, como os componentes (telhas), o sistema de cobertura (o Telhado Verde, que leva em consideração a manta asfáltica, manta jeans, argila expandida e o substrato), a estrutura de madeiramento para sustentação das coberturas e das peças de fixação das coberturas (com exceção do Telhado Verde). É

importante ressaltar que o custo analisado é específico deste estudo, podendo aumentar considerando o dimensionamento da estrutura para condições adversas (por exemplo, situações de grande incidência de vento, grandes vãos, colocação de forro, etc.).

Figura 34 – Síntese comparativa das coberturas



Fonte: Elaborado própria (2024)

Desta forma é possível observar que o Telhado Verde se destaca em duas (2) categorias, na Temperatura mediana interior Q-SP* e na Transmitância Térmica, com a menor temperatura mediana e transmitância térmica entre os telhados investigados; ficando em último na categoria Custo (Devido a seu elevado custo de manufatura). A Telha Ecológica fica em segundo destaque nas categorias Transmitância Térmica, Temperatura mediana interior F-SP e Custo. A Telha Aluzinco se destaca na categoria Temperatura mediana interior F-SP mas apresenta os piores desempenhos nas categorias Transmitância Térmica e Temperatura mediana interior Q-SP*. A Telha Fibrocimento se destaca na categoria Custo mas apresenta o pior desempenho na categoria Temperatura mediana interior F-SP.

Tabela 31 – Temperaturas Telhado Verde com vegetação x sem vegetação

Horário	Temperatura com vegetação (°C)				Temperatura sem vegetação (°C)			
	Camada				Camada			
	Drenagem	Superior	Inferior	Interior	Drenagem	Superior	Inferior	Interior
00:40	19,1	18,3	22,3	18,1	19,8	20,3	25,3	18,9
01:40	19,0	18,4	22,5	18,1	19,6	20,1	25,0	18,7
02:40	18,9	18,4	22,3	17,8	19,7	20,1	25,5	19,0
03:40	18,7	18,4	22,5	17,8	19,6	20,1	25,5	19,0
04:40	18,6	18,4	22,7	17,7	19,7	20,3	25,7	19,1
05:40	18,5	18,3	22,5	17,7	19,5	19,8	25,5	18,9
06:40	18,5	18,5	22,7	17,8	19,7	20,1	24,5	18,5
07:40	18,6	18,5	22,8	18,0	19,6	20,0	24,7	18,7
08:40	18,7	19,0	23,3	18,3	19,7	20,0	25,5	18,9
09:40	19,3	19,5	24,0	18,4	20,0	20,5	26,5	19,6
10:40	19,6	19,7	24,1	18,6	20,1	20,5	26,0	19,7
11:40	20,0	20,0	24,5	18,9	21,0	21,1	26,5	19,8
12:40	20,5	20,3	25,3	19,3	20,3	20,7	26,7	19,7
13:40	21,1	20,5	25,5	19,5	21,0	21,3	27,0	20,3
14:40	21,3	20,5	25,5	19,7	21,0	21,5	27,0	20,0
15:40	21,3	20,5	25,7	19,7	21,3	21,7	27,7	20,3
16:40	21,5	20,3	25,7	19,7	21,7	21,7	27,7	20,1
17:40	21,0	20,0	25,3	19,5	21,7	22,1	27,5	20,3
18:40	20,1	19,7	24,7	19,1	21,5	22,1	28,0	20,7
19:40	19,8	19,3	24,0	18,6	22,0	22,3	27,7	20,7
20:40	19,6	19,1	23,7	18,5	22,3	22,5	26,7	20,5
21:40	19,7	19,1	23,7	18,4	22,1	22,3	26,5	20,3
22:40	19,5	18,9	23,3	18,1	22,1	22,1	26,3	20,5
23:40	19,5	18,7	23,3	17,8	21,5	21,5	26,0	20,0
Maior	21,5	20,5	25,7	19,7	22,3	22,5	28,0	20,7
Mediana	19,6	19,1	23,7	18,4	20,7	20,9	26,4	19,8
Menor	18,5	18,3	22,3	17,6	19,5	19,8	24,5	18,5
Diferença	3,0	2,2	3,4	2,1	2,8	2,7	3,5	2,2

Fonte: Elaborado própria (2024)

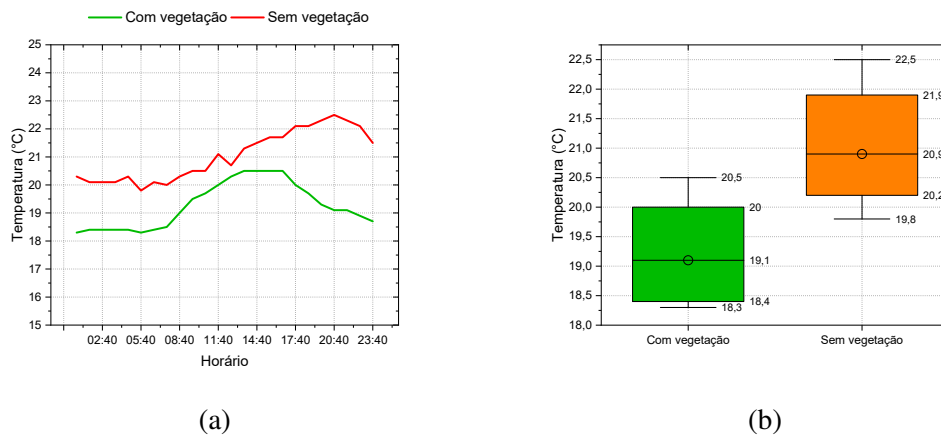
4.2.6 Análise comparativa entre Telhado verde com substrato e com vegetação

Neste subitem foi realizado uma análise entre os dados de temperatura registrados na célula-teste de Telhado Verde antes e após a implantação da vegetação de modo a observar a influência da vegetação sobre o Telhado Verde. Para esta análise é utilizado os valores das médias apresentadas no subitem 4.1 e da média dos valores de 11 dias que se encontram entre o período de 24 de dezembro de 2023 até 20 de janeiro de 2024, na qual as célula-teste do Telhado Verde estava sem a Vegetação. Deste modo é possível montar a Tabela 31.

A Tabela 31 apresenta um comparativo dos valores de temperaturas médias na célula-teste contendo o Telhado Verde com a vegetação e sem a vegetação. Ao final da tabela é apresentado também as maiores e menores temperaturas, as medianas e as diferenças de temperatura correspondentes a cada camada da célula-teste. Deste modo, com os valores da supracitada tabela, é possível realizar a montagens dos gráficos apresentados nas Figuras 35, 36 e 37.

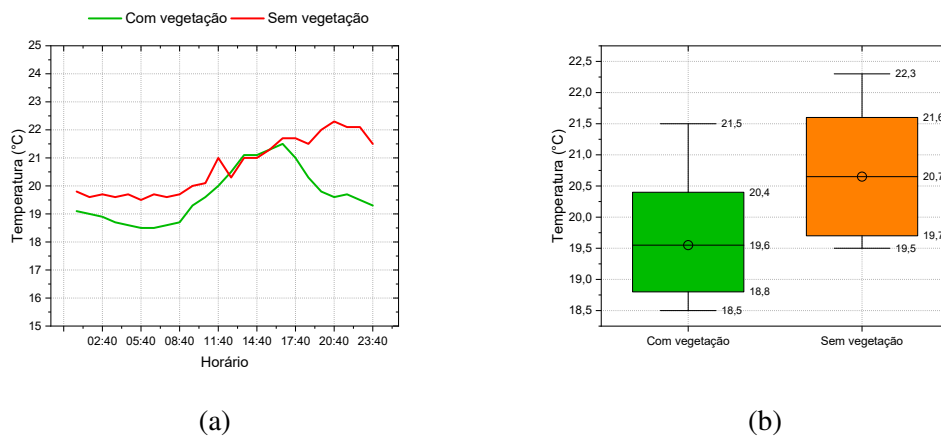
Os gráficos das Figuras 35, 36 e 37 apresentam o comportamento da temperatura

Figura 35 – Camada superior com vegetação x sem vegetação (a) Camada superior, (b) Camada superior distribuição



Fonte: Registros de pesquisa (2024)

Figura 36 – Camada drenagem com vegetação x sem vegetação (a) Camada drenagem, (b) Camada drenagem distribuição



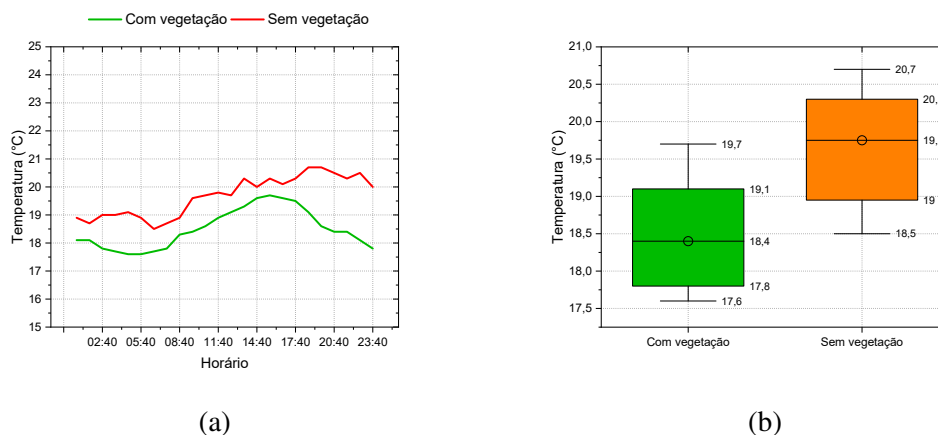
Fonte: Registros de pesquisa (2024)

média (a) em seus respectivos horários para cada camada analisada e as distribuições das temperaturas médias (b) em cada condição (Telhado Verde com vegetação ou sem vegetação). A Figura 35 corresponde a camada superior, seguido pela Figura 36 e por fim a Figura 37 que corresponde a camada interior.

Pelos gráficos da Figura 35, é observado que na camada superior quando a cobertura apresentava a vegetação, a temperatura era menor que na cobertura sem vegetação, na qual a mediana, com a vegetação a temperatura foi de 19,1°C, tendo uma variação térmica de 2,2°C, enquanto que sem vegetação, a temperatura mediana foi de 20,9°C, com uma variação de 2,7°C.

Observando a camada drenagem, por maior parte do dia a temperatura media na

Figura 37 – Camada interior com vegetação x sem vegetação (a) Camada interior, (b) Camada interior distribuição



Fonte: Registros de pesquisa (2024)

cobertura com a vegetação apresenta menor temperatura, sendo que entre o período de 12:00 até 16:00 o comportamento nas duas situações é semelhante. Ao observar o gráfico (b) da Figura 36, a cobertura com a vegetação apresenta a menor temperatura mediana, sendo de 19,6°C, com uma variação térmica de 3°C, enquanto que sem a vegetação, a temperatura mediana foi de 20,7°C, com uma variação de 2,8°C.

Na camada interior, observamos um comportamento semelhante ao da camada superior, na qual a a cobertura com a vegetação apresenta uma menor temperatura mediana, sendo de 18,4°C, com uma variação térmica de 2,1°C, enquanto que sem a vegetação a temperatura mediana foi de 19,8°C, com uma variação térmica de 2,2°C.

Desta forma é possível observar que o telhado verde completo contendo a grama apresenta menor temperatura em todas as camadas, com exceção apenas em um pequeno trecho (entre 12:00 e 16:00) na camada de drenagem, que apresenta uma temperatura semelhante ao do telhado verde sem a grama.

O Telhado Verde contendo apenas o substrato apresenta elevada temperatura por um período de tempo mais prolongado que o apresentado pelo Telhado Verde contendo a grama em todas as camadas, isto se deve a incidência direta da radiação solar sobre o substrato, fazendo com que o substrato absorva maior parte da radiação e irradiando todo o calor absorvido em forma de calor sensível por um maior período do dia. Desta forma o uso da vegetação é um grande diferencial, principalmente devido ao seu albedo, como descrito por Yang e Wang (2014) e Litardo et al. (2020).

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa avaliou, no período de verão, o desempenho térmico proporcionado por diferentes sistemas de telhado (telhado verde, telha ecológica, telha de fibrocimento e telha de zinco) em protótipos de alvenaria (células-testes) na cidade de Alegrete/RS. Conclui-se que com os resultados obtidos, o Telhado Verde apresenta o melhor comportamento para todas as situações analisadas nesta pesquisa.

Em segundo, tem-se a Telha Ecológica que também proporciona um desempenho satisfatório para o conforto térmico no interior das células-teste, apresentando grande inércia térmica, o que contribui para um alto isolamento térmico, além de fomentar questões de sustentabilidade pela sua manufatura com materiais reciclados. No entanto, o seu uso pode contribuir para o aumento do efeito de Ilha de Calor Urbano, já que apresenta maiores temperaturas na sua camada superior. A Telha Ecológica e a Telha Fibrocimento apresentam um comportamento semelhante, como observado na situação Q-SP, Q-SP* e Q-CP, quando analisado a temperatura na camada interior. A Telha Ecológica ainda apresenta as menores temperaturas e as menores variações entre elas. Entretanto, para regiões com baixo índice de vento, a Telha Fibrocimento é uma solução que apresenta um comportamento satisfatório e um custo mais acessível, além de apresentar menores temperaturas na superfície externa. Neste caso, o uso da Telha Fibrocimento pode melhor contribuir para o efeito de Ilha de Calor. Por outro lado, estudos de avaliação do impacto ambiental dos materiais são necessários para quantificar e avaliar se a utilização de materiais reciclados na fabricação da Telha Ecológica podem amenizar sua contribuição no efeito da Ilha de Calor considerando o todo o Ciclo de Vida do material.

Durante a análise de resultados é observado que o vento tem grande influência principalmente na Telha Aluzinco, de modo a proporcionar um conforto térmico semelhante ao do Telhado Verde em dias com altos índices de vento (a partir de 8m/s), chegando a uma temperatura interna em torno de 20°C, com temperatura externa de 27°C. Tal fato é positivo para a região onde o município de Alegrete/RS se localiza, devido ao alto índice de velocidade de vento na região (pelo mapa das isopleias a velocidade básica $V_0 = 40$ a 45m/s). No entanto este fato deve ser visto com cautela, pois ao analisar dias com pouca incidência de vento, a Telha Aluzinco obteve o pior desempenho entre as coberturas analisadas, apresentando grande variação de temperatura durante o dia e alta temperatura mediana no interior de sua célula-teste. Portanto, durante o verão, quando o índice de vento reduz, a temperatura no interior das células-teste sofre um aumento que

proporciona grande desconforto térmico, chegando a valores em torno de 26°C, para uma temperatura externa de 36°C. Desta forma, em relação as telhas convencionais, para a região de Alegrete/RS que apresenta altos índices de vento, a Telha Aluzinco apresenta um comportamento satisfatório, não sendo aconselhado o seu uso em regiões com baixo índice de vento.

Através da análise comparativa entre Telhado verde com e sem vegetação, foi observado que a utilização da vegetação proporciona um leve aumento do conforto térmico no interior da célula-teste, fato que ocorre principalmente devido ao conjunto albedo e evapotranspiração que a vegetação realiza. A área de albedo proporcionada pela vegetação reduz a absorção da radiação solar pelo substrato, reduzindo seu aquecimento e a transferência para o interior da célula-teste. Adicionalmente, o processo de evapotranspiração em conjunto com o vento auxilia no processo de resfriamento da camada superior da célula-teste, contribuindo para a mitigação do efeito das ilhas de calor urbano. Assim, a diferença de temperatura é mais evidente na camada superior do que interna, ao comparar o Telhado Verde com e sem vegetação. Logo, a utilização do Telhado Verde pode ser aconselhado em centros urbanos, auxiliando no resfriamento da região em que é inserida.

Em síntese, a Telha Ecológica junto com o Telhado Verde apresentam alta capacidade de reduzir a temperatura no interior das células-teste, sendo as melhores entre as coberturas analisadas. No entanto quando observado a capacidade de auxiliar na mitigação dos efeitos das ilhas de calor urbano, a Telha Ecológica pode não ser a mais adequada, isto se dá devido ao fato de que em todas as situações a sua camada superior apresenta a maior temperatura entre as coberturas analisadas. Além disso, a Telha Ecológica possui alta capacidade de retenção de calor, evidenciado pela manutenção da temperatura superficial no período da noite. Assim, presume-se que a Telha Ecológica torna-se uma fonte de emissão de calor para a região ao seu redor ao invés de auxiliar na mitigação das ilhas de calor. Fato que é justificado pelo material utilizado na sua manufatura e coloração da telha, sendo um fato que não interfere na alta capacidade de inércia térmica, proporcionando baixa transferência de calor para o interior das células-teste, sendo a segunda melhor entre as coberturas analisadas.

O Brasil, em função de sua vasta extensão territorial, apresenta uma grande diversidade de condições climáticas, que vão desde regiões tropicais até áreas áridas e de clima subtropical. Diante disso, os resultados obtidos neste estudo são válidos especificamente para as condições climáticas de Alegrete /RS e para os materiais testados,

não podendo ser generalizados para todo o território nacional. O desempenho dos materiais pode variar significativamente conforme o clima local e as particularidades de cada região. Logo, novas pesquisas devem considerar as especificidades das diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, avaliando não apenas a resistência e durabilidade dos materiais, mas também a eficiência térmica, o impacto ambiental e as metas econômicas. Além disso, a incorporação de novas tecnologias e materiais sustentáveis pode fornecer soluções inovadoras e adaptadas às necessidades de cada região, contribuindo para a melhoria do conforto térmico e para a redução do consumo de energia nas edificações.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através do estudo realizado, verificou-se algumas lacunas que necessitam serem preenchidas. Assim, como sugestões para trabalhos futuros, podem-se citar:

- Para maior entendimento sobre o desempenho das coberturas estudadas em relação as intempéries como a velocidade do vento, precipitação e radiação UV, é aconselhado encontrar um modelo estatístico para análise de todos os dados obtidos nesta pesquisa.
- Realizar esta pesquisa em laboratório, de forma a reproduzir individualmente os fatores das intempéries, possibilitando determinar a interferência de forma individual sobre os diferentes tipos de coberturas.
- Testar diferentes áreas de cobertura verde, com o propósito de descobrir qual a área que proporciona com maior eficiência um resfriamento da área externa e do interior das células-teste. Desta forma, possibilitando reduzir a área de telhado verde que poderá ser utilizado, consequentemente reduzindo o seu custo de implantação.
- Analisar a contribuição de cada telha para o efeito das ilhas de calor urbano.
- Realizar estudos de avaliação de impacto ambiental e Análise do Ciclo de Vida (ACV) para as diferentes coberturas.
- Estudar os custos da manutenção do Telhado Verde a longo prazo e testar diferentes tipos de vegetação para o Telhado Verde;
- Estudar a influência da cor das telhas no desempenho térmico das telhas;
- Incorporar a umidade do ar na coleta de dados.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. In: **Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 23.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Impermeabilização- Seleção e projeto. In: **Impermeabilização- Seleção e projeto**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2010. p. 18.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Desempenho térmico de edificações Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações - Resistência e transmitância térmica - Métodos de cálculo (ISO 6946:2017MOD). In: **Desempenho térmico de edificações Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações - Resistência e transmitância térmica - Métodos de cálculo (ISO 6946:2017MOD)**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 47.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Materiais e produtos de construção - Propriedades higrotérmicas - Valores e procedimentos de projetos tabulados para determinar valores térmicos declarados e de projeto. In: **Materiais e produtos de construção - Propriedades higrotérmicas - Valores e procedimentos de projetos tabulados para determinar valores térmicos declarados e de projeto**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 35.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Desempenho de Edificações Habitacionais. In: **Desempenho de Edificações Habitacionais**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2024.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Edificações Habitacionais - Desempenho - Parte 5: Requisitos para os sistemas de cobertura. In: **Edificações Habitacionais - Desempenho - Parte 5: Requisitos para os sistemas de cobertura**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2024. p. 97.

ABRAHÃO, K. C. d. F. J.; SOUZA, R. G. V. d. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. **Ambiente Construído**, SciELO Brasil, v. 21, p. 383–408, 2021.

AL-OBAIDI, I. et al. Assessing the impact of wind conditions on urban heat islands in large Australian cities. **Journal of Ecological Engineering**, Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej, v. 22, n. 11, p. 1–15, 2021.

ANAC. **Camadas Atmosféricas significativas**. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/meteorologia-aeronautica/destaques-1/camadas-atmosfericas-significativas>> Acesso em 14 de março 2024.

AZEVEDO, M. V. L. et al. Avaliação de um telhado verde como isolante térmico para redução do uso energia elétrica em uma sala comercial: Evaluation of a green roof as thermal insulator to reduce the use of electricity in a commercial room. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 12, p. 79262–79275, 2022.

BALDESSAR, S. M. Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada. **Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Curitiba, 2012.**

BALVEDI, N.; GIGLIO, T. Influence of green roof systems on the energy performance of buildings and their surroundings. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 70, p. 106430, 2023.

BOFF, E. H. et al. Desempenho de diferentes tipos de telhas ecológicas. **ENSUS 2022 – X Encontro de Sustentabilidade em Projeto – UNIFESSPA**, Grupo de Pesquisa Virtuhab/UFSC, v. 7, p. 914 – 925, 2022.

BORGES, L. R. L.; MACEDO, F. R. C. de. Telhados verdes e telhas ecologicamente sustentáveis: Análise comparativa de benefícios e custos em comparação com telhados convencionais. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 14, n. 4, 2022.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2010. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em 4 de julho 2023.

Brasilit Saint-Gobain. **Filipeta - Linha Essencial Ondulada**. 2021. Disponível em: <https://www.brasilit.com.br/sites/brasilit.com.br/files/produto/arquivos/Filipeta_Ondulada.pdf> Acesso em 17 de julho 2023.

CASTLETONA V. STOVINB, S. B. H.; DAVISONB, J. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1582–1591, 2010. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810001453>.

ÇENGEL, Y.; GHAJAR, A. **Transferência de Calor e Massa, 4ª edição**. 4. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, Bookman, AMGH Editora Ltda., 2012. 904 p.

Chris Reardon, Caitlin McGee and Geoff Milne. **Thermal mass**. 2013. Disponível em: <<https://www.yourhome.gov.au/passive-design/thermal-mass#:~:text=Thermal%20mass%20is%20the%20ability,the%20longer%20the%20thermal%20lag.>> Acesso em 25 de julho 2023.

Ciclus. **Anemômetro**. 2023. Disponível em: <https://wrfcomercial.mercadoshops.com.br/MLB-2631289173-anemmetro-eletrnico-em-aluminio-pp-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=614777a2-5564-4acc-aab6-470b41d375c0> Acesso em 07 de agosto 2023.

CITEX. **PT 100**. 2023. Disponível em: <<https://www.citex.com.br/pt100-2m.html>> Acesso em 09 de agosto 2024.

DINIZ, R. L.; COSTA, F. N.; OLIVEIRA, L. S. D. Redução do consumo energético no setor comercial devido ao uso e aparelhos de ar condicionado: Estudo de caso. In: **Anais do Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial**. São Paulo: [s.n.], 2023. ISBN 2764-4294.

Empresa de Pesquisa Energética. **Painel de Monitoramento do Consumo de Energia Elétrica**. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>> Acesso em 4 de julho 2023.

Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório Síntese 2023 - Ano base 2022**. Brasília – DF, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf> Acesso em 30 de junho 2023.

Empresa de Pesquisa Energética. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. Brasília – DF, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/resenha-mensal-do-mercado-de-energia-eletrica>> Acesso em 30 de junho 2023.

Eternit. **TELHAS METÁLICAS - Catálogo Técnico**. 20–. Disponível em: <https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/eternit/telha_termoacustica.pdf> Acesso em 17 de julho 2023.

FANGER, P. O. Assessment of man's thermal comfort in practice. **Occupational and Environmental Medicine**, BMJ Publishing Group Ltd, v. 30, n. 4, p. 313–324, 1973.

FIALHO, E. S. As repercussões da expansão da mancha urbana na dinâmica climática local de viçosa-mg. *Revista de Ciências Humanas*, 2015.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 8. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2016. 248 p.

GBS Brasil. **Compreenda o LEED**. 2019. Disponível em: <<https://www.gbcbrasil.org.br/wp-content/uploads/2017/09/Compreenda-o-LEED-1.pdf>> Acesso em 30 de junho 2023.

GHISI, E.; GOSCH, S.; LAMBERTS, R. Electricity end-uses in the residential sector of brazil. **Energy Policy**, Elsevier, v. 35, n. 8, p. 4107–4120, 2007.

GUNN, P.; GUNAY, H.; GEEL, P. V. A multi-year comparative analysis of green and conventional roof thermal performance under temperate climate conditions. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2021. v. 2069, n. 1, p. 012067.

HERNÁNDEZ, A. Ávila; SIMÁ, E.; CHÉ-PAN, M. Research and development of green roofs and green walls in Mexico: A review. **Science of The Total Environment**, v. 856, p. 158978, 2023. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722060776>.

HOWARD, L. **The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it**. [S.l.]: Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley [and] R. Hunter, 1833. v. 3.

International energy initiative Brasil. **O que é a etiqueta nacional de conservação de energia (ENCE)?** 2019. Disponível em: <<https://iei-brasil.org/2019/05/30/o-que-e-a-etiqueta-nacional-de-conservacao-de-energia-ence/>> Acesso em 4 de julho 2023.

ISO - International Organization for Standardization. Ergonomics of the thermal environment. In: **Ergonomics of the thermal environment**. Genebra: [s.n.], 2005. p. 52.

KAEHLER, J. W. M. **Recursos Solares nos Dez Campi**. Alegrete, RS, 2017.

KAWAKUBO, S.; SUGIUCHI, M.; ARATA, S. Office thermal environment that maximizes workers' thermal comfort and productivity. **Building and Environment**, Elsevier, v. 233, p. 110092, 2023.

Kingspan. **Manual de Instalação Telha Standard TP-40**. 20–.
Disponível em: <<https://downloads.kingspan-isoeste.com.br/Manuais/Kingspan-Isoeste-TP40-Manual-de-Instala%C3%A7%C3%A3o-PT-BR.pdf>>
Acesso em 03 de agosto 2023.

KOROL, S.; SHUSHUNOVA, N.; SHUSHUNOVA, T. Innovation technologies in green roof systems. In: EDP SCIENCES. **MATEC Web of Conferences**. [S.l.], 2018. v. 193, p. 04009.

LAMBERTS, R. et al. **DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES**. 7. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, CTC – Departamento de Engenharia Civil, 2016. 170 p.

LI, X. et al. Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. **Energy**, v. 174, p. 407–419, 2019. ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219303895>.

LIMA, C. A. de S.; SILVA, J. R. A. da; FONTINELES, F. H. S. Telhados verdes e telhados convencionais: Uma análise comparativa sob a ótica da relação de custo-benefício. **Revista Artigos. Com**, v. 10, p. e2050–e2050, 2019.

LITARDO, J. et al. Urban heat island intensity and buildings' energy needs in duran, ecuador: Simulation studies and proposal of mitigation strategies. **Sustainable Cities and Society**, v. 62, p. 102387, 2020. ISSN 2210-6707. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720306089>.

LOPEZ-CABEZA, V. P. et al. Albedo influence on the microclimate and thermal comfort of courtyards under mediterranean hot summer climate conditions. **Sustainable Cities and Society**, Elsevier, v. 81, p. 103872, 2022.

MAIOLO, M. et al. The role of the extensive green roofs on decreasing building energy consumption in the mediterranean climate. **Sustainability**, MDPI, v. 12, n. 1, p. 359, 2020.

MICHELS, C.; GÜTHS, S.; SILVA, L. C. da. Desempenho térmico de uma cobertura verde testada em bancada experimental. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 92254–92266, 2020.

NETO, E. G. C. et al. Telhado verde: alternativa sustentável para a drenagem do escoamento superficial. **Mix sustentável**, v. 7, n. 2, p. 125–136, 2021.

NUNEZ, M.; OKE, T. R. The energy balance of an urban canyon. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 16, n. 1, p. 11–19, 1977.

OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. **Atmosphere**, Taylor & Francis, v. 14, n. 4, p. 268–277, 1976.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly journal of the royal meteorological society**, John Wiley & Sons, Ltd Bracknell, v. 108, n. 455, p. 1–24, 1982.

OLIVEIRA, Z. B. d.; KNIES, A. E. Conforto térmico em protótipos de bezerreiros na região central do rs. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 8748–8759, 2021.

Onduline. **FILIPETA ONDULINE - TELHAS CLÁSSICA®, CLÁSSICA FIT®, STILO® E STILO 3D®**. 20–. Disponível em: <<https://br.onduline.com/pt-br/consumidor/guia-de-instalacao-arquivos>> Acesso em 17 de julho 2023.

Onduline. **Como Instalar Telhas Ecológicas Stilo**. 2019. Disponível em: <<https://br.onduline.com/pt-br/consumidor/como-instalar-telhas-ecologicas-stilo>> Acesso em 11 de julho 2023.

RACKES, A.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Naturally comfortable and sustainable: Informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates. **Applied Energy**, Elsevier, v. 174, p. 256–274, 2016.

RAWAT, M.; SINGH, R. A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions. **Energy and Built Environment**, Elsevier, v. 3, n. 3, p. 327–347, 2022.

RÊGO, L. D. R. M. d. et al. Construção de protótipos para estudo de conforto térmico. In: **7ª JICE-JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EXTENSÃO**. [S.l.: s.n.], 2016.

RENTERGHEM, T. V.; BOTTELDOOREN, D. Influence of rainfall on the noise shielding by a green roof. **Building and environment**, Elsevier, v. 82, p. 1–8, 2014.

SAADATIAN, O. et al. A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 155–168, 2013. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211300124X>.

SCHMIDT, G. T.; RUPP, R. F.; GHISI, E. Conforto térmico e produtividade em escritórios: estudo de caso em florianópolis/sc. In: **XVI ENCAC/XII ELACAC 2021**. [S.l.: s.n.], 2021.

SCOLARO, T. P.; GHISI, E. Life cycle assessment of green roofs: A literature review of layers materials and purposes. **Science of The Total Environment**, v. 829, p. 154650, 2022. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722017430>.

SEN, S.; ROESLER, J. Wind direction and cool surface strategies on microscale urban heat island. **Urban Climate**, v. 31, p. 100548, 2020. ISSN 2212-0955. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221209551930149X>.

SHAHRIN, A. M.; YUSOF, M. Z. Quantitative thermal comfort analysis of traditional perak malay houses aida. **3rd Undergraduate Seminar on Built Environment and Technology 2018 (USBET2018)**, v. 3, p. 398–400, 2018.

SINGH, M.; SHARSTON, R. Quantifying the dualistic nature of urban heat island effect (uhi) on building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 255, p. 111649, 2022. ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821009336>.

Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos. **Resíduos Sólidos da Construção Civil**. 2019. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-da-construcao-civil/>> Acesso em 4 de julho 2023.

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

SOUZA, D. O. de. Influência da ilha de calor urbana das cidades de manaus e belém sobre o microclima local. (**No Title**), 2012.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 13.

TASSI, R. et al. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, SciELO Brasil, v. 14, p. 139–154, 2014.

YANG, J.; WANG, Z.-H. Physical parameterization and sensitivity of urban hydrological models: Application to green roof systems. **Building and Environment**, v. 75, p. 250–263, 2014. ISSN 0360-1323. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132314000468>.

YANG, X. et al. Impact of urban heat island on energy demand in buildings: Local climate zones in nanjing. **Applied Energy**, Elsevier, v. 260, p. 114279, 2020.

YUSOF, M. Z.; AFIFI, H.; SAID, S. Determining indoor thermal comfort condition of kutai house through bioclimatic analysis. **Malaysian Journal of Sustainable Environment**, v. 7, n. 1, p. 151–169, 2020.

ZINI, D.; CAMPOS, R. F. F. de. Análise avaliativa e comparativa entre telha ondulada ecológica, telha ondulada de fibrocimento e telha ecológica de tubos de pasta de dente. **IGNIS Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação**, v. 11, n. 01, p. 12–31, 2022.

APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUÍNO

```
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <EEPROM.h>

const float pi = 3.14159265;
int period = 5000;
int delaytime = 1000;
int radius = 147;
unsigned int Sample = 0;
unsigned int counter = 0;
unsigned int RPM = 0;
float speedwind = 0;
int windspeed = 0;

File myFile;
int analogInPin = A5;
const int numRows = 1;
const int numCols = 30;
const unsigned long interval = 500;
const unsigned long horas = 1;
const unsigned long totaltime = horas * 10000;
int sensorValue = 0;
String valueString = "x";
int currentRow = 16600;
int currentCol = 0;
float dataMatrix[numRows][numCols];
int fileCount = 1;

void setup() {
    analogReference(INTERNAL2V56);
    Serial.begin(9600);
```

```

Serial.flush();
  for (int i = 0 ; i < EEPROM.length() ; i++) {
    EEPROM.write(i, 0);
  }

  for (int p = 18; p < 27; p++) {
    pinMode(p, OUTPUT);
    digitalWrite(p, HIGH);
  }
  for (int p = 14; p < 18; p++) {
    pinMode(p, OUTPUT);
    digitalWrite(p, LOW);
  }

  pinMode(2, INPUT_PULLUP);
  digitalWrite(2, HIGH);
  pinMode(A0, INPUT);
  pinMode(A1, INPUT);
  currentRow=0;
}

void loop() {
  delay(totaltime);
  int linhamatriz = currentRow;
  int colunamatriz = currentCol;

  int uvLevel = averageAnalogRead(A0);
  int refLevel = averageAnalogRead(A1);
  float outputVoltage = 3.3 / refLevel * uvLevel;
  float uvIntensity = mapfloat(outputVoltage, 0.99, 2.8,
0.0, 15.0)* (2 / 2);

  valueString = String(uvIntensity) + ":";
  dataMatrix[linhamatriz][0] = valueString.toInt();
}

```

```
currentCol++;

windvelocity();
RPMcalc();
sensorValue = 0;
for (int i = 0; i < 100; i++){
    WindSpeed();
    sensorValue += windspeed;
}

sensorValue = sensorValue / 100;
SpeedWind();

delay(delaytime);

valueString = String(sensorValue) + ":";
dataMatrix[linhamatriz][1] = valueString.toInt();

currentCol++;

for(int i = 14; i<17;i++){
    digitalWrite(i,HIGH);
delay(interval);

    for(int j = 17; j<27;j++){
        if(j > 17){
            digitalWrite(j,LOW);
        }

        delay(interval);
        sensorValue = 0;

        for(int m=1;m<100;m++){
```

```

        sensorValue += analogRead(A5);
    }

    sensorValue = sensorValue/100;
    valueString = String(sensorValue) + ":";
    dataMatrix[linhamatriz][currentCol]=
valueString.toInt();

    currentCol++;

    if(j > 17){
        digitalWrite(j,HIGH);
    }
}
digitalWrite(i,LOW);
}

currentCol++;

if(currentCol > numCols){
    currentRow++;
    if (currentRow >= numRows) {
        saveParaSD();
        currentRow = 0;
        currentCol = 0;
        fileCount++;
    }
    currentCol = 0;
}
delay(interval/2);
}

int averageAnalogRead(int pinToRead){
    byte numberOfReadings = 8;

```

```

    unsigned int runningValue = 0;

    for(int x = 0 ; x < numberOfReadings ; x++)
        runningValue += analogRead(pinToRead);
    runningValue /= numberOfReadings;

    return(runningValue);
}

float mapfloat(float x, float in_min, float in_max,
float out_min, float out_max){
    return (x - in_min) * (out_max - out_min) /
(in_max - in_min) + out_min;
}

void saveParaSD() {
    String fileName = "datadia" + String(fileCount) +
".txt";
    SD.begin();
    myFile = SD.open(fileName, FILE_WRITE);
    String dataString;
    for (int i = 0; i < numRows; i++) {
        for (int j = 0; j < numCols; j++) {
            dataString = String(dataMatrix[i][j]) + ";";
            myFile.print(dataString);
        }
        myFile.println();
    }
    myFile.close();
}

void windvelocity(){
    speedwind = 0;
    windspeed = 0;
}

```

```
    counter = 0;
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), addcount,
RISING);
    unsigned long millis();
    long startTime = millis();
    while (millis() < startTime + period) {}
}

void RPMcalc(){
    RPM = ((counter) * 60) / (period / 1000);
}

void WindSpeed(){
    windspeed = ((4 * pi * radius * RPM) / 60) / 1000;
}

void SpeedWind(){
    speedwind = (((4 * pi * radius * RPM) / 60) / 1000) * 3.6;
}

void addcount(){
    counter++;
    if (counter > 100) {
        counter = 100;
    }
}
```

APÊNDICE B – TABELAS DAS CÉLULAS-TESTE

Tabela B.1 – Temperatura média no verão

Horário	Temperatura Telhado verde (°C)				Temperatura Telha Ecológica (°C)			Temperatura Telha Aluzinco (°C)			Temperatura Telha Fibrocimento (°C)			Temperatura Externo (°C)
	Camada				Camada			Camada			Camada			Camada
	Drenagem	Superior	Inferior	Interior	Superior	Inferior	Interior	Superior	Inferior	Interior	Superior	Inferior	Interior	Exterior
00:40	19,1	18,3	22,3	18,1	24,4	18,7	19,0	22,5	22,5	17,8	21,7	20,0	18,4	23,5
01:40	19,0	18,4	22,5	18,1	24,1	18,5	19,0	22,1	22,3	17,7	21,7	20,0	18,3	22,7
02:40	18,9	18,4	22,3	17,8	24,0	18,4	18,6	22,0	22,3	17,5	21,1	20,0	18,0	22,1
03:40	18,7	18,4	22,5	17,7	24,1	18,4	18,5	22,3	22,5	17,5	21,1	20,0	18,1	22,0
04:40	18,6	18,4	22,5	17,6	24,1	18,4	18,5	22,1	22,5	17,6	21,1	20,0	18,1	21,5
05:40	18,5	18,3	22,3	17,6	24,0	18,3	18,4	22,1	22,7	17,5	21,0	19,8	18,0	21,1
06:40	18,5	18,4	22,7	17,7	24,4	18,6	18,6	22,3	22,8	17,7	21,0	20,1	18,0	21,0
07:40	18,6	18,5	22,8	17,8	24,7	18,9	18,6	22,5	23,3	17,8	21,1	20,5	18,4	21,0
08:40	18,7	19,0	23,3	18,3	25,7	19,1	18,7	23,0	24,0	18,4	21,1	21,1	18,6	20,7
09:40	19,3	19,5	24,0	18,4	26,5	19,6	19,1	23,3	24,1	18,6	21,5	21,5	18,9	20,5
10:40	19,6	19,7	24,1	18,6	27,0	19,8	19,5	23,7	24,5	19,0	21,7	22,1	19,3	21,5
11:40	20,0	20,0	24,5	18,9	28,0	20,3	20,1	24,4	25,0	19,3	22,5	22,5	19,5	22,8
12:40	20,5	20,3	25,3	19,1	28,0	20,7	20,3	24,4	25,5	19,7	23,0	22,7	19,8	24,4
13:40	21,1	20,5	25,3	19,3	29,0	21,1	21,3	25,7	26,3	19,8	23,7	22,7	20,0	25,5
14:40	21,1	20,5	25,5	19,6	29,0	21,3	21,5	26,0	26,7	20,1	23,7	22,8	20,3	26,5
15:40	21,3	20,5	25,7	19,7	28,5	21,1	21,1	25,5	26,7	20,0	23,7	22,8	20,1	27,5
16:40	21,5	20,5	25,7	19,6	28,5	21,0	21,1	25,7	26,5	19,8	23,5	22,7	20,1	28,0
17:40	21,0	20,0	25,3	19,5	27,5	20,3	20,5	25,0	25,5	19,6	23,0	22,3	19,8	28,5
18:40	20,3	19,7	24,7	19,1	27,0	20,3	20,1	24,5	25,3	19,5	22,7	22,0	19,7	29,5
19:40	19,8	19,3	24,0	18,6	26,0	19,7	19,5	23,7	24,1	19,0	22,1	21,3	19,1	28,0
20:40	19,6	19,1	23,7	18,4	25,7	19,5	19,5	23,3	23,5	18,6	22,0	21,0	18,7	27,5
21:40	19,7	19,1	23,7	18,4	25,7	19,5	19,6	23,0	23,3	18,5	22,0	21,0	18,7	27,0
22:40	19,5	18,9	23,3	18,1	25,5	19,3	19,5	22,8	23,0	18,5	21,7	20,7	18,6	25,0
23:40	19,3	18,7	23,0	17,8	25,0	19,1	19,1	22,7	22,5	18,3	21,3	20,3	18,4	23,7
Maior	21,5	20,5	25,7	19,7	29,0	21,3	21,5	26,0	26,7	20,1	23,7	22,8	20,3	29,5
Mediana	19,6	19,1	23,7	18,4	25,7	19,5	19,5	23,2	23,8	18,6	21,7	21,1	18,7	23,6
Menor	18,5	18,3	22,3	17,6	24,0	18,3	18,4	22,0	22,3	17,5	21,0	19,8	18,0	20,5
Diferença	3,0	2,2	3,4	2,1	5,0	3,0	3,1	4,0	4,4	2,6	2,7	3,0	2,3	9,0

Fonte: Elaborado própria (2024)

Tabela B.2 – Dados A sem chuva parte 01

Horário	Velocidade de vento (m/s)	Radiação Global (W/m ²)	Umidade (%)	Chuva (mm)	Temperatura Telhado verde (°C)				Temperatura Telha Ecologica (°C)			Temperatura Externo (°C)
					Camada				Camada			Camada
					Drenagem	Superior	Inferior	Interior	Superior	Inferior	Interior	Exterior
00:40	2,0	0,0	67,0	0,0	19,6	18,1	25,5	17,5	25,5	19,7	19,7	28,0
01:40	2,0	0,0	74,0	0,0	19,5	18,3	25,5	17,5	25,7	20,3	20,3	27,7
02:40	2,0	0,0	80,0	0,0	19,7	18,7	26,0	17,8	26,3	20,0	20,1	27,0
03:40	2,0	0,0	82,0	0,0	20,1	19,1	26,5	18,3	26,7	19,6	19,8	26,3
04:40	1,0	0,0	84,0	0,0	20,0	19,1	26,5	18,3	26,5	19,6	19,3	26,0
05:40	2,0	0,0	87,0	0,0	19,0	18,7	26,0	17,8	26,0	19,3	19,1	26,5
06:40	3,0	0,0	88,0	0,0	18,9	18,9	25,7	17,8	25,5	19,3	19,1	25,0
07:40	5,0	0,0	88,0	0,0	19,1	19,1	26,3	18,0	25,3	19,6	19,3	24,4
08:40	3,0	2,0	91,0	0,0	18,9	19,8	26,7	18,5	25,7	20,1	19,6	23,7
09:40	4,0	85,0	93,0	0,0	18,7	20,0	26,7	18,5	26,5	20,1	20,3	23,5
10:40	4,0	236,0	89,0	0,0	19,0	19,6	26,7	18,4	28,0	20,0	20,5	24,5
11:40	6,0	421,0	79,0	0,0	19,1	19,5	27,0	18,1	29,7	20,1	20,3	26,7
12:40	1,0	566,0	68,0	0,0	19,7	19,7	27,5	18,5	30,3	20,5	20,7	29,7
13:40	3,0	700,0	60,0	0,0	21,3	20,5	29,5	18,5	31,5	21,5	21,5	31,5
14:40	3,0	787,0	55,0	0,0	21,7	21,1	30,3	19,7	33,0	22,3	22,8	33,0
15:40	2,0	811,0	52,0	0,0	21,5	21,1	30,5	20,0	33,0	22,0	22,5	34,0
16:40	15,0	700,0	45,0	0,0	20,0	20,0	30,5	19,6	32,0	21,7	20,5	35,0
17:40	6,0	504,0	42,0	0,0	20,0	19,5	29,0	18,9	29,5	20,5	19,8	36,0
18:40	1,0	568,0	40,0	0,0	20,1	19,8	28,5	19,1	29,5	20,7	20,0	36,5
19:40	1,0	562,0	37,0	0,0	19,8	19,6	26,5	18,1	26,5	19,5	19,5	37,0
20:40	1,0	313,0	42,0	0,0	18,9	19,0	26,0	17,7	26,0	19,1	18,7	36,0
21:40	2,0	155,0	47,0	0,0	18,5	19,1	25,7	17,6	25,7	19,0	18,6	34,5
22:40	1,0	16,0	55,0	0,0	18,7	19,3	24,7	18,3	25,0	18,5	18,6	32,0
23:40	0,0	0,0	62,0	0,0	18,5	19,3	24,7	18,6	24,7	18,5	18,5	29,7
Maior					21,7	21,1	30,5	20,0	33,0	22,3	22,8	37,0
Mediana					19,6	19,4	26,5	18,3	26,5	20,0	19,8	28,9
Menor					18,5	18,1	24,7	17,5	24,7	18,5	18,5	23,5
Diferença					3,2	3,0	5,8	2,5	8,3	3,8	4,3	13,5

Fonte: Elaborado própria (2024)

Tabela B.3 – Dados A sem chuva parte 02

Horário	Velocidade de vento (m/s)	Radiação Global (W/m ²)	Umidade (%)	Chuva (mm)	Temperatura Telha Aluzinco (°C)			Temperatura Telha Fibrocimento (°C)			Temperatura Externo (°C)
					Camada			Camada			Camada
					Superior	Inferior	Interior	Superior	Inferior	Interior	Exterior
00:40	2,0	0,0	67,0	0,0	22,7	21,7	17,8	24,0	21,0	19,0	28,0
01:40	2,0	0,0	74,0	0,0	22,5	23,0	19,1	24,4	21,7	19,6	27,7
02:40	2,0	0,0	80,0	0,0	22,8	23,3	18,9	24,5	22,0	19,7	27,0
03:40	2,0	0,0	82,0	0,0	22,3	23,3	18,5	24,0	22,1	19,7	26,3
04:40	1,0	0,0	84,0	0,0	23,0	22,5	18,5	22,8	21,7	19,6	26,0
05:40	2,0	0,0	87,0	0,0	22,7	22,1	18,4	22,7	22,1	19,5	26,5
06:40	3,0	0,0	88,0	0,0	23,7	22,3	18,4	21,7	21,7	19,5	25,0
07:40	5,0	0,0	88,0	0,0	23,5	22,7	18,6	22,7	22,1	19,7	24,4
08:40	3,0	2,0	91,0	0,0	23,7	23,3	19,1	22,8	22,5	20,0	23,7
09:40	4,0	85,0	93,0	0,0	23,0	23,3	19,0	23,5	22,5	20,0	23,5
10:40	4,0	236,0	89,0	0,0	23,3	23,0	19,0	23,3	22,0	19,6	24,5
11:40	6,0	421,0	79,0	0,0	22,1	23,5	19,0	22,3	22,1	19,7	26,7
12:40	1,0	566,0	68,0	0,0	22,7	23,7	19,5	22,8	22,3	20,1	29,7
13:40	3,0	700,0	60,0	0,0	24,5	24,7	20,1	26,3	24,0	21,0	31,5
14:40	3,0	787,0	55,0	0,0	26,5	26,0	21,1	28,0	24,5	22,3	33,0
15:40	2,0	811,0	52,0	0,0	28,0	26,0	20,7	27,0	25,0	22,1	34,0
16:40	15,0	700,0	45,0	0,0	25,7	26,0	20,3	24,0	24,0	21,7	35,0
17:40	6,0	504,0	42,0	0,0	25,3	25,0	20,1	24,4	23,5	22,0	36,0
18:40	1,0	568,0	40,0	0,0	27,0	24,7	19,7	25,5	23,5	21,3	36,5
19:40	1,0	562,0	37,0	0,0	25,5	22,8	18,5	23,5	23,0	19,6	37,0
20:40	1,0	313,0	42,0	0,0	25,0	22,3	18,1	22,0	22,7	19,1	36,0
21:40	2,0	155,0	47,0	0,0	22,5	22,1	18,0	21,1	22,5	19,0	34,5
22:40	1,0	16,0	55,0	0,0	22,8	22,0	17,8	22,0	22,5	18,9	32,0
23:40	0,0	0,0	62,0	0,0	22,8	21,7	17,7	21,7	22,5	18,9	29,7
Maior					28,0	26,0	21,1	28,0	25,0	22,3	37,0
Mediana					23,2	23,2	19,0	23,4	22,5	19,7	28,9
Menor					22,1	21,7	17,7	21,1	21,0	18,9	23,5
Diferença					5,9	4,3	3,4	6,9	4,0	3,4	13,5

Fonte: Elaborado própria (2024)

Tabela B.4 – Dados B parte 01

Horário	Velocidade de vento (m/s)	Radiação Global (W/m ²)	Umidade (%)	Chuva (mm)	Temperatura Telhado verde (°C)				Temperatura Telha Ecologica (°C)			Temperatura Externo (°C)
					Camada				Camada			Camada
					Drenagem	Superior	Inferior	Interior	Superior	Inferior	Interior	Exterior
00:40	2,0	0,0	58,0	0,0	19,7	17,8	23,5	17,4	25,3	20,3	20,1	29,7
01:40	0,0	0,0	59,0	0,0	19,6	17,5	22,7	17,0	24,7	20,0	20,0	27,7
02:40	1,0	0,0	65,0	0,0	18,7	17,6	22,8	17,0	25,0	19,7	18,6	27,0
03:40	1,0	0,0	78,0	0,0	18,4	17,8	22,8	17,2	24,7	19,8	18,6	26,3
04:40	3,0	0,0	82,0	0,0	18,3	18,0	22,8	17,2	24,5	19,3	18,5	25,5
05:40	4,0	0,0	89,0	0,0	18,3	18,1	23,0	17,3	24,1	19,0	18,4	24,1
06:40	3,0	0,0	93,0	0,0	18,3	18,4	23,5	17,3	24,0	19,3	18,6	23,7
07:40	4,0	0,0	94,0	0,0	19,0	19,0	24,0	18,0	24,5	19,7	19,3	23,5
08:40	5,0	2,0	94,0	0,0	19,6	20,5	25,0	18,7	25,0	20,7	20,1	25,5
09:40	0,0	65,0	90,0	0,0	19,7	20,3	25,7	19,1	24,7	21,3	20,0	25,0
10:40	6,0	62,0	83,0	0,0	19,0	19,6	25,5	18,6	24,0	20,7	19,5	26,0
11:40	4,0	19,0	73,0	0,0	18,9	19,6	25,5	18,6	23,0	20,7	19,5	28,0
12:40	2,0	50,0	66,0	0,0	19,6	19,7	25,5	18,6	23,3	20,7	20,5	30,0
13:40	4,0	34,0	56,0	0,0	19,5	18,9	24,1	17,7	23,7	21,3	20,7	31,5
14:40	5,0	25,0	55,0	0,0	19,8	18,7	24,4	17,7	24,5	22,0	21,3	32,5
15:40	2,0	44,0	54,0	0,0	20,1	19,6	24,4	18,0	26,3	22,7	21,1	33,0
16:40	3,0	49,0	55,0	0,0	20,0	19,7	24,1	18,3	27,0	23,3	20,7	33,0
17:40	5,0	41,0	48,0	0,0	20,1	20,0	24,0	18,7	27,5	23,0	21,1	34,5
18:40	3,0	144,0	46,0	0,0	19,8	20,1	23,5	18,6	26,5	22,8	20,5	35,0
19:40	4,0	137,0	43,0	0,0	19,6	19,8	23,0	18,3	26,0	22,5	20,0	36,0
20:40	2,0	112,0	47,0	0,0	19,3	19,6	22,7	17,8	24,7	22,0	19,5	35,5
21:40	4,0	24,0	52,0	0,0	18,7	19,0	22,7	17,0	23,7	21,5	18,3	34,0
22:40	0,0	26,0	60,0	0,0	18,3	18,5	22,5	16,8	23,3	21,3	17,7	32,0
23:40	1,0	0,0	67,0	0,0	18,1	18,1	22,3	16,6	23,0	21,1	17,8	30,0
Maior					20,1	20,5	25,7	19,1	27,5	23,3	21,3	36,0
Mediana					19,4	19,0	23,5	17,8	24,6	20,9	19,8	29,9
Menor					18,1	17,5	22,3	16,6	23,0	19,0	17,7	23,5
Diferença					2,0	3,0	3,4	2,5	4,5	4,3	3,6	12,5

Fonte: Elaborado própria (2024)

Tabela B.5 – Dados B parte 02

Horário	Velocidade de vento (m/s)	Radiação Global (W/m ²)	Umidade (%)	Chuva (mm)	Temperatura Telha Aluzinco			Temperatura Telha Fibrocimento			Temperatura Externo
					Camada			Camada			Camada
					Superior	Inferior	Interior	Superior	Inferior	Interior	Exterior
00:40	2,0	0,0	58,0	0,0	22,8	26,5	18,7	26,0	21,0	19,3	29,7
01:40	0,0	0,0	59,0	0,0	23,7	25,7	18,5	25,7	20,5	19,0	27,7
02:40	1,0	0,0	65,0	0,0	23,5	25,5	18,4	23,3	20,5	18,9	27,0
03:40	1,0	0,0	78,0	0,0	24,1	25,3	18,3	23,0	20,5	18,9	26,3
04:40	3,0	0,0	82,0	0,0	24,7	25,5	18,3	22,1	20,1	18,5	25,5
05:40	4,0	0,0	89,0	0,0	25,3	26,0	18,4	21,5	20,1	18,6	24,1
06:40	3,0	0,0	93,0	0,0	26,5	26,5	18,7	22,0	21,0	19,0	23,7
07:40	4,0	0,0	94,0	0,0	26,7	27,0	19,1	23,0	21,7	19,6	23,5
08:40	5,0	2,0	94,0	0,0	29,7	30,3	20,1	23,5	22,8	20,5	25,5
09:40	0,0	65,0	90,0	0,0	26,7	27,5	20,5	23,5	22,8	20,5	25,0
10:40	6,0	62,0	83,0	0,0	26,5	27,0	20,1	22,0	22,5	20,1	26,0
11:40	4,0	19,0	73,0	0,0	25,3	26,0	20,5	22,1	22,5	20,0	28,0
12:40	2,0	50,0	66,0	0,0	24,7	26,5	22,0	22,5	22,8	20,3	30,0
13:40	4,0	34,0	56,0	0,0	25,7	28,0	23,0	22,0	23,3	21,3	31,5
14:40	5,0	25,0	55,0	0,0	27,0	29,7	24,5	22,7	24,0	21,5	32,5
15:40	2,0	44,0	54,0	0,0	29,5	30,5	25,0	24,5	24,4	21,0	33,0
16:40	3,0	49,0	55,0	0,0	30,5	30,3	24,5	25,5	24,1	21,1	33,0
17:40	5,0	41,0	48,0	0,0	32,0	31,0	25,0	25,0	23,5	21,7	34,5
18:40	3,0	144,0	46,0	0,0	31,3	29,5	25,5	24,4	22,5	21,3	35,0
19:40	4,0	137,0	43,0	0,0	30,0	29,7	24,7	24,5	21,3	19,3	36,0
20:40	2,0	112,0	47,0	0,0	27,5	27,0	23,5	23,5	20,5	19,0	35,5
21:40	4,0	24,0	52,0	0,0	23,5	24,4	21,3	22,0	20,1	19,0	34,0
22:40	0,0	26,0	60,0	0,0	22,1	23,5	21,0	21,5	19,5	18,3	32,0
23:40	1,0	0,0	67,0	0,0	22,1	23,0	20,7	21,5	19,5	18,3	30,0
Maior					32,0	31,0	25,5	26,0	24,4	21,7	36,0
Mediana					26,1	26,8	20,6	23,0	21,5	19,5	29,9
Menor					22,1	23,0	18,3	21,5	19,5	18,3	23,5
Diferença					9,9	8,0	7,2	4,5	4,9	3,4	12,5

Fonte: Elaborado própria (2024)

Tabela B.6 – Diferença de temperatura entre camada superior e inferior da Telha Ecológica

Horário	06/02/2024 (Sem chuva)				09/02/2024 (Pouco vento)				13/02/2024 (Com chuva)			
	Temperatura Telha Ecológica (°C)			Porcentagem (%)	Temperatura Telha Ecológica (°C)			Porcentagem (%)	Temperatura Telha Ecológica (°C)			Porcentagem (%)
	Superior	Inferior	Diferença		Superior	Inferior	Diferença		Superior	Inferior	Diferença	
00:40	25,5	19,7	5,8	22,7	25,3	20,3	5,0	19,8	23,5	17,6	5,9	25,1
01:40	25,7	20,3	5,4	21,0	24,7	20,0	4,7	19,0	23,3	17,5	5,8	24,9
02:40	26,3	20,0	6,3	24,0	25,0	19,7	5,3	21,2	22,7	17,4	5,3	23,3
03:40	26,7	19,6	7,1	26,6	24,7	19,8	4,9	19,8	23,3	17,4	5,9	25,3
04:40	26,5	19,6	6,9	26,0	24,5	19,3	5,2	21,2	23,3	17,5	5,8	24,9
05:40	26,0	19,3	6,7	25,8	24,1	19,0	5,1	21,2	23,0	17,5	5,5	23,9
06:40	25,5	19,3	6,2	24,3	24,0	19,3	4,7	19,6	23,3	17,4	5,9	25,3
07:40	25,3	19,6	5,7	22,5	24,5	19,7	4,8	19,6	23,3	17,4	5,9	25,3
08:40	25,7	20,1	5,6	21,8	25,0	20,7	4,3	17,2	23,0	17,4	5,6	24,3
09:40	26,5	20,1	6,4	24,2	24,7	21,3	3,4	13,8	23,5	17,6	5,9	25,1
10:40	28,0	20,0	8,0	28,6	24,0	20,7	3,3	13,8	24,1	18,0	6,1	25,3
11:40	29,7	20,1	9,6	32,3	23,0	20,7	2,3	10,0	27,5	20,3	7,2	26,2
12:40	30,3	20,5	9,8	32,3	23,3	20,7	2,6	11,2	28,5	21,0	7,5	26,3
13:40	31,5	21,5	10,0	31,7	23,7	21,3	2,4	10,1	30,0	21,1	8,9	29,7
14:40	33,0	22,3	10,7	32,4	24,5	22,0	2,5	10,2	26,0	19,5	6,5	25,0
15:40	33,0	22,0	11,0	33,3	26,3	22,7	3,6	13,7	25,7	19,3	6,4	24,9
16:40	32,0	21,7	10,3	32,2	27,0	23,3	3,7	13,7	25,5	19,1	6,4	25,1
17:40	29,5	20,5	9,0	30,5	27,5	23,0	4,5	16,4	25,3	19,0	6,3	24,9
18:40	29,5	20,7	8,8	29,8	26,5	22,8	3,7	14,0	25,0	18,9	6,1	24,4
19:40	26,5	19,5	7,0	26,4	26,0	22,5	3,5	13,5	24,7	18,7	6,0	24,3
20:40	26,0	19,1	6,9	26,5	24,7	22,0	2,7	10,9	24,7	18,9	5,8	23,5
21:40	25,7	19,0	6,7	26,1	23,7	21,5	2,2	9,3	24,7	19,0	5,7	23,1
22:40	25,0	18,5	6,5	26,0	23,3	21,3	2,0	8,6	24,5	18,7	5,8	23,7
23:40	24,7	18,5	6,2	25,1	23,0	21,1	1,9	8,3	24,1	18,6	5,5	22,8
Maior	33,0	22,3	11,0	33,3	27,5	23,3	5,3	21,2	30,0	21,1	8,9	29,7
Média	27,7	20,1	7,6	27,2	24,7	21,0	3,7	14,8	24,7	18,5	6,2	24,9
Menor	24,7	18,5	5,4	21,0	23,0	19,0	1,9	8,3	22,7	17,4	5,3	22,8
Diferença	8,3	3,8	5,6	12,3	4,5	4,3	3,4	13,0	7,3	3,7	3,6	6,8

Fonte: Elaborado própria (2024)

Tabela B.7 – Dados C com chuva parte 1

Horário	Velocidade de vento (m/s)	Radiação Global (W/m ²)	Umidade (%)	Chuva (mm)	Temperatura Telhado verde (°C)			Temperatura Telha Ecologica (°C)			Temperatura Externo (°C)	
					Camada			Camada			Camada	
					Drenagem	Superior	Inferior	Interior	Superior	Inferior	Interior	Exterior
00:40	2,0	0,0	98,0	2,6	17,4	17,2	21,7	16,4	23,5	17,6	17,3	23,0
01:40	5,0	0,0	99,0	2,8	17,4	17,0	21,5	16,4	23,3	17,5	17,3	22,1
02:40	8,0	0,0	99,0	3,2	17,6	16,8	21,3	16,3	22,7	17,4	17,2	21,7
03:40	8,0	0,0	100,0	0,4	18,0	16,9	21,3	16,3	23,3	17,4	17,8	21,7
04:40	4,0	0,0	99,0	0,4	18,3	16,9	21,3	16,3	23,3	17,5	18,1	22,3
05:40	5,0	0,0	99,0	0,4	18,5	16,7	21,3	16,3	23,0	17,5	17,8	22,5
06:40	5,0	0,0	95,0	0,6	18,1	16,8	21,3	16,3	23,3	17,4	18,0	22,0
07:40	5,0	0,0	96,0	0,4	18,0	16,9	21,3	16,3	23,3	17,4	18,0	21,3
08:40	10,0	1,0	95,0	0,0	17,7	16,8	21,3	16,3	23,0	17,4	17,5	21,1
09:40	16,0	83,0	95,0	0,0	18,3	17,4	21,3	16,5	23,5	17,6	17,7	21,3
10:40	13,0	236,0	93,0	0,0	18,5	17,6	22,1	16,8	24,1	18,0	18,4	21,5
11:40	15,0	409,0	91,0	0,0	20,3	19,6	24,7	18,7	27,5	20,3	20,5	22,5
12:40	15,0	541,0	93,0	0,0	20,7	20,0	25,0	19,0	28,5	21,0	21,0	22,1
13:40	13,0	698,0	91,0	0,0	21,1	20,1	25,5	19,1	30,0	21,1	21,5	21,5
14:40	15,0	788,0	83,0	0,0	19,5	18,5	23,3	17,8	26,0	19,5	19,7	22,0
15:40	13,0	831,0	74,0	0,0	19,7	18,5	23,5	17,7	25,7	19,3	19,7	23,0
16:40	17,0	798,0	69,0	0,0	19,6	18,3	23,3	17,7	25,5	19,1	19,5	24,5
17:40	9,0	550,0	64,0	0,0	19,3	18,3	23,3	17,6	25,3	19,0	19,3	25,5
18:40	15,0	625,0	61,0	0,0	19,1	18,1	23,0	17,5	25,0	18,9	19,1	26,5
19:40	15,0	508,0	61,0	0,0	18,9	18,0	22,8	17,4	24,7	18,7	19,0	27,0
20:40	8,0	342,0	62,0	0,0	19,0	18,1	23,0	17,5	24,7	18,9	19,0	26,3
21:40	12,0	166,0	65,0	0,0	19,1	18,1	23,0	17,5	24,7	19,0	18,9	25,7
22:40	8,0	30,0	66,0	0,0	19,1	18,4	22,7	17,4	24,5	18,7	18,6	22,1
23:40	17,0	0,0	68,0	0,0	19,3	18,1	22,5	17,6	24,1	18,6	18,4	21,7
Maior					21,1	20,1	25,5	19,1	30,0	21,1	21,5	27,0
Mediana					19,0	18,1	22,6	17,4	24,3	18,7	18,5	22,1
Menor					17,4	16,7	21,3	16,3	22,7	17,4	17,2	21,1
Diferença					3,7	3,4	4,2	2,8	7,3	3,7	4,3	5,9

Fonte: Elaborado própria (2024)

Tabela B.8 – Dados C com chuva parte 2

Horário	Velocidade de vento (m/s)	Radiação Global (W/m ²)	Umidade (%)	Chuva (mm)	Temperatura Telha Aluzinco (°C)			Temperatura Telha Fibrocimento (°C)			Temperatura Externo (°C)
					Camada			Camada			Camada
					Superior	Inferior	Interior	Superior	Inferior	Interior	Exterior
00:40	2,0	0,0	98,0	2,6	23,0	23,0	16,7	19,8	19,1	17,6	23,0
01:40	5,0	0,0	99,0	2,8	21,7	22,7	16,7	20,0	19,0	17,5	22,1
02:40	8,0	0,0	99,0	3,2	19,6	21,5	16,5	19,8	19,0	17,4	21,7
03:40	8,0	0,0	100,0	0,4	21,1	22,5	16,4	20,5	18,9	17,4	21,7
04:40	4,0	0,0	99,0	0,4	24,0	23,7	16,5	21,0	18,7	17,4	22,3
05:40	5,0	0,0	99,0	0,4	24,4	24,7	16,5	21,5	18,7	17,4	22,5
06:40	5,0	0,0	95,0	0,6	24,7	25,3	16,5	20,7	18,7	17,4	22,0
07:40	5,0	0,0	96,0	0,4	24,4	26,0	16,7	21,0	19,0	17,6	21,3
08:40	10,0	1,0	95,0	0,0	25,5	26,5	16,6	20,0	18,7	17,4	21,1
09:40	16,0	83,0	95,0	0,0	23,7	26,7	16,8	21,1	19,8	18,0	21,3
10:40	13,0	236,0	93,0	0,0	23,5	29,5	17,2	21,1	19,8	18,4	21,5
11:40	15,0	409,0	91,0	0,0	27,0	32,0	19,3	24,1	22,5	20,5	22,5
12:40	15,0	541,0	93,0	0,0	28,0	32,5	19,8	26,0	23,3	21,1	22,1
13:40	13,0	698,0	91,0	0,0	29,5	30,5	19,8	25,0	22,8	20,5	21,5
14:40	15,0	788,0	83,0	0,0	26,3	28,5	18,5	23,7	21,0	19,3	22,0
15:40	13,0	831,0	74,0	0,0	24,4	28,5	18,4	23,5	21,0	19,3	23,0
16:40	17,0	798,0	69,0	0,0	25,3	29,0	18,3	23,0	20,5	19,3	24,5
17:40	9,0	550,0	64,0	0,0	26,0	27,5	18,1	22,7	20,5	19,0	25,5
18:40	15,0	625,0	61,0	0,0	25,7	25,7	18,0	22,5	20,1	18,7	26,5
19:40	15,0	508,0	61,0	0,0	25,5	25,5	18,0	22,3	20,3	18,7	27,0
20:40	8,0	342,0	62,0	0,0	25,5	25,7	18,3	22,3	20,3	18,7	26,3
21:40	12,0	166,0	65,0	0,0	25,3	26,7	18,3	21,7	20,1	18,9	25,7
22:40	8,0	30,0	66,0	0,0	24,7	25,0	17,7	21,3	20,3	18,6	22,1
23:40	17,0	0,0	68,0	0,0	22,5	22,3	17,8	20,5	19,7	18,4	21,7
Maior					29,5	32,5	19,8	26,0	23,3	21,1	27,0
Mediana					24,7	25,9	17,8	21,4	20,0	18,5	22,1
Menor					19,6	21,5	16,4	19,8	18,7	17,4	21,1
Diferença					9,9	11,0	3,4	6,2	4,6	3,7	5,9

Fonte: Elaborado própria (2024)

Tabela B.9 – Dados D parte 01

Horário	Velocidade de vento (m/s)	Radiação Global (W/m ²)	Umidade (%)	Chuva (mm)	Temperatura Telhado verde (°C)				Temperatura Telha Ecologica (°C)			Temperatura Externo (°C)
					Camada				Camada			Camada
					Drenagem	Superior	Inferior	Interior	Superior	Inferior	Interior	Exterior
00:40	3,0	0,0	65,0	0,0	21,7	17,3	21,3	19,1	21,1	16,5	21,5	19,6
01:40	0,0	0,0	80,0	0,0	20,5	18,0	22,7	19,8	20,1	16,1	20,7	17,7
02:40	4,0	0,0	83,0	0,0	20,1	17,8	22,3	19,6	20,3	17,0	20,3	17,0
03:40	0,0	0,0	86,0	0,0	20,1	17,6	22,8	18,7	20,3	17,5	18,9	16,4
04:40	2,0	0,0	89,0	0,0	19,6	18,1	23,5	18,6	20,0	17,3	18,7	15,7
05:40	1,0	0,0	91,0	0,0	19,3	18,6	22,7	19,1	20,5	17,4	18,7	15,1
06:40	5,0	0,0	94,0	0,0	19,0	18,7	23,0	19,8	21,3	18,4	19,3	15,0
07:40	4,0	0,0	95,0	0,0	19,5	18,5	22,0	19,6	19,8	18,4	18,9	15,0
08:40	0,0	0,0	95,0	0,0	18,6	18,9	21,5	19,7	22,0	17,8	19,3	15,0
09:40	2,0	19,0	96,0	0,0	20,5	19,6	22,5	20,0	22,3	18,6	19,0	15,0
10:40	4,0	121,0	90,0	0,0	21,0	19,8	22,3	20,7	22,5	20,0	20,7	15,2
11:40	3,0	349,0	77,0	0,0	21,7	21,1	22,8	22,1	23,7	22,5	23,0	18,5
12:40	4,0	552,0	68,0	0,0	22,7	23,3	23,7	22,3	24,7	23,3	21,7	21,5
13:40	8,0	686,0	59,0	0,0	22,3	23,5	24,4	23,0	25,3	23,7	23,0	24,1
14:40	1,0	701,0	50,0	0,0	22,3	23,7	24,5	23,7	25,7	24,4	23,5	25,7
15:40	2,0	663,0	43,0	0,0	23,0	23,3	24,7	24,1	26,0	24,5	22,5	26,7
16:40	2,0	756,0	42,0	0,0	22,1	22,7	23,7	22,7	25,0	22,5	21,7	27,5
17:40	4,0	517,0	43,0	0,0	22,5	22,0	23,0	22,3	24,7	22,0	21,1	27,7
18:40	2,0	455,0	43,0	0,0	21,7	21,5	22,7	22,1	23,7	21,3	19,6	28,0
19:40	2,0	463,0	41,0	0,0	21,3	21,5	22,3	21,7	22,1	19,6	18,4	28,5
20:40	1,0	215,0	43,0	0,0	20,0	21,1	23,3	22,1	22,3	21,0	20,1	27,5
21:40	0,0	126,0	47,0	0,0	19,6	21,3	22,0	21,0	22,7	19,5	19,1	26,3
22:40	2,0	4,0	58,0	0,0	18,7	21,0	21,7	20,3	22,0	19,8	20,7	23,5
23:40	1,0	0,0	66,0	0,0	18,5	20,1	21,3	20,0	22,3	21,1	20,1	21,7
Maior					23,0	23,7	24,7	24,1	26,0	24,5	23,5	28,5
Mediana					20,5	20,6	22,7	20,5	22,3	19,7	20,2	20,6
Menor					18,5	17,3	21,3	18,6	19,8	16,1	18,4	15,0
Diferença					4,5	6,4	3,4	5,5	6,2	8,4	5,1	13,5

Fonte: Elaborado própria (2024)

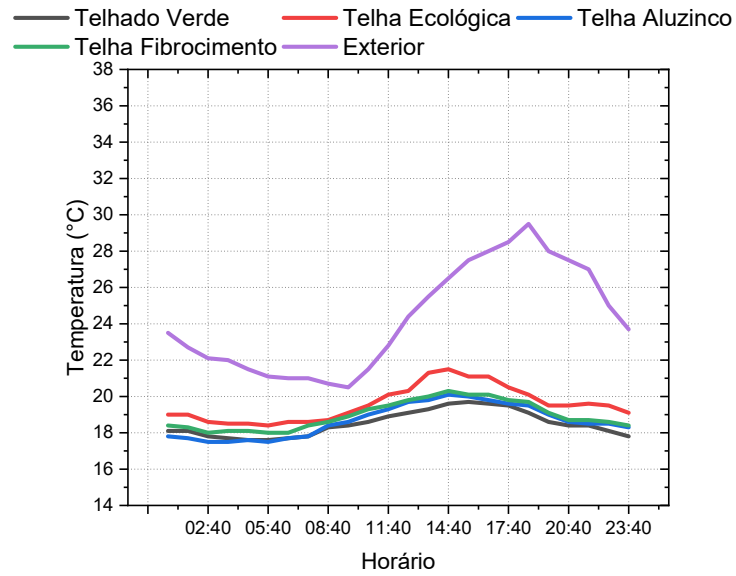
Tabela B.10 – Dados D parte 02

Horário	Velocidade de vento (m/s)	Radiação Global (W/m ²)	Umidade (%)	Chuva (mm)	Temperatura Telha Aluzinco (°C)			Temperatura Telha Fibrocimento (°C)			Temperatura Externo (°C)
					Camada			Camada			Camada
					Superior	Inferior	Interior	Superior	Inferior	Interior	Exterior
00:40	3,0	0,0	65,0	0,0	20,1	19,7	19,3	21,5	19,7	20,0	19,6
01:40	0,0	0,0	80,0	0,0	19,0	18,9	18,9	21,1	19,1	19,8	17,7
02:40	4,0	0,0	83,0	0,0	18,4	18,5	18,1	19,6	19,5	21,0	17,0
03:40	0,0	0,0	86,0	0,0	17,3	18,1	17,4	18,5	19,5	21,1	16,4
04:40	2,0	0,0	89,0	0,0	16,6	18,9	17,6	18,9	18,5	20,1	15,7
05:40	1,0	0,0	91,0	0,0	16,9	19,0	17,8	19,0	18,6	20,5	15,1
06:40	5,0	0,0	94,0	0,0	17,2	20,3	18,0	21,3	19,6	20,0	15,0
07:40	4,0	0,0	95,0	0,0	17,7	21,0	18,9	20,1	19,7	20,1	15,0
08:40	0,0	0,0	95,0	0,0	18,5	21,5	19,7	19,1	20,7	21,5	15,0
09:40	2,0	19,0	96,0	0,0	18,9	21,7	20,7	19,5	20,3	21,7	15,0
10:40	4,0	121,0	90,0	0,0	19,1	22,7	21,3	20,0	21,1	23,5	15,2
11:40	3,0	349,0	77,0	0,0	19,7	23,7	21,7	21,0	21,7	24,5	18,5
12:40	4,0	552,0	68,0	0,0	21,3	26,5	22,0	21,1	22,0	24,7	21,5
13:40	8,0	686,0	59,0	0,0	22,0	28,5	22,3	22,5	22,3	25,3	24,1
14:40	1,0	701,0	50,0	0,0	23,0	30,5	23,7	22,8	22,8	25,5	25,7
15:40	2,0	663,0	43,0	0,0	24,1	30,3	23,0	22,5	23,7	23,7	26,7
16:40	2,0	756,0	42,0	0,0	23,7	29,7	23,0	22,7	23,5	24,5	27,5
17:40	4,0	517,0	43,0	0,0	25,3	29,0	22,3	22,0	22,8	23,0	27,7
18:40	2,0	455,0	43,0	0,0	25,0	27,5	21,7	20,5	22,3	22,7	28,0
19:40	2,0	463,0	41,0	0,0	24,4	25,3	19,8	20,7	22,3	22,3	28,5
20:40	1,0	215,0	43,0	0,0	23,0	24,5	19,8	22,0	23,0	20,5	27,5
21:40	0,0	126,0	47,0	0,0	21,7	23,7	18,5	20,5	22,3	20,3	26,3
22:40	2,0	4,0	58,0	0,0	21,1	22,7	19,6	20,5	22,8	20,5	23,5
23:40	1,0	0,0	66,0	0,0	20,5	22,0	19,7	21,5	21,5	20,1	21,7
Maior					25,3	30,5	23,7	22,8	23,7	25,5	28,5
Mediana					20,3	22,7	19,8	20,9	21,6	21,3	20,6
Menor					16,6	18,1	17,4	18,5	18,5	19,8	15,0
Diferença					8,7	12,4	6,3	4,3	5,2	5,7	13,5

Fonte: Elaborado própria (2024)

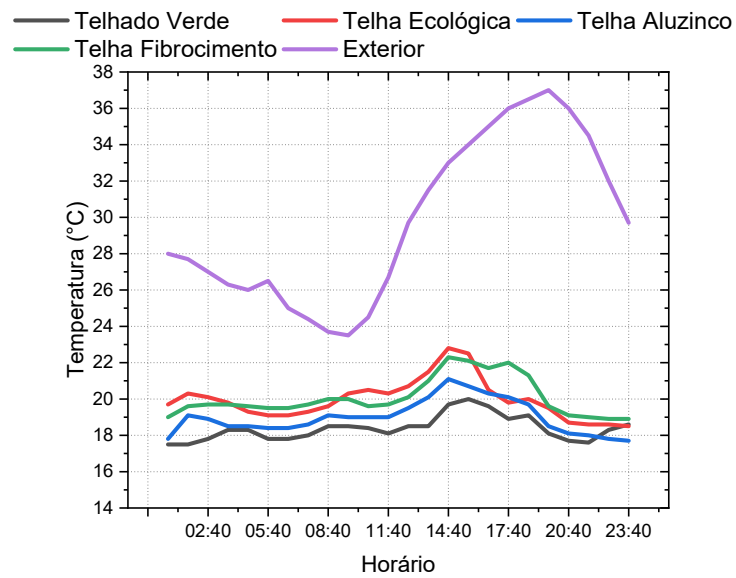
APÊNDICE C – GRÁFICOS TEMPERATURA INTERIOR

Figura C.1 – Temperatura interior mediana verão



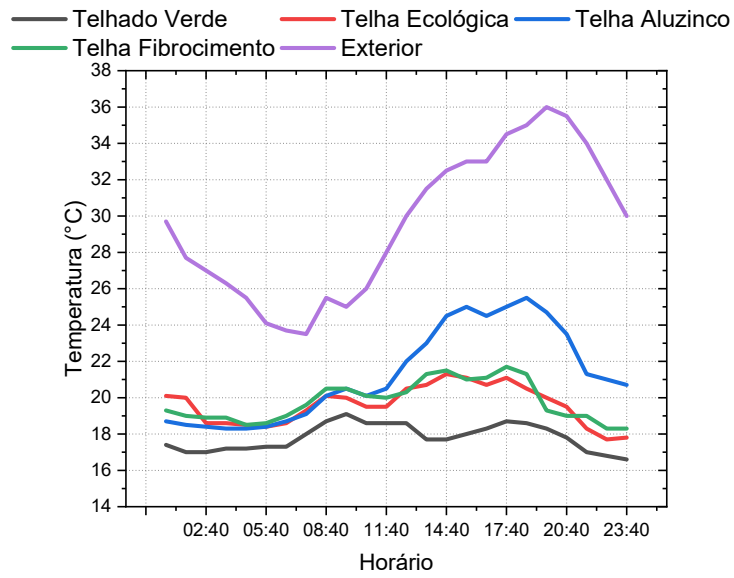
Fonte: Registro de pesquisa (2024)

Figura C.2 – Temperatura interior mediana Q-SP



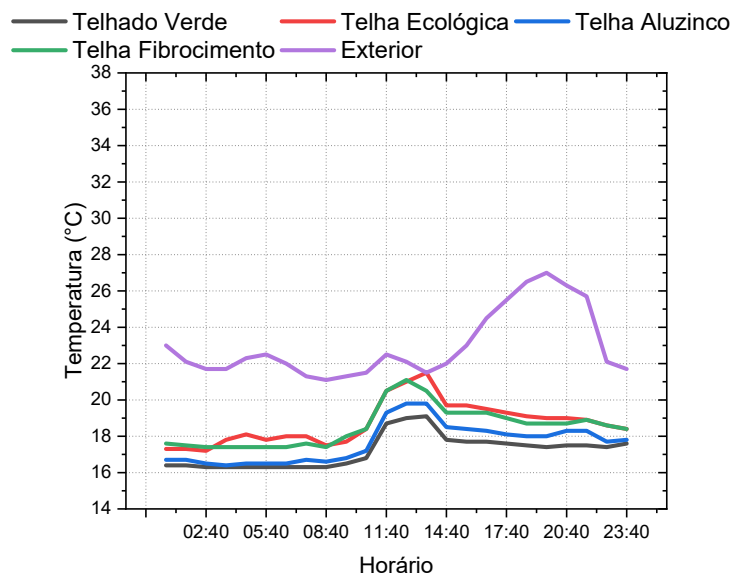
Fonte: Registro de pesquisa (2024)

Figura C.3 – Temperatura interior mediana Q-SP*



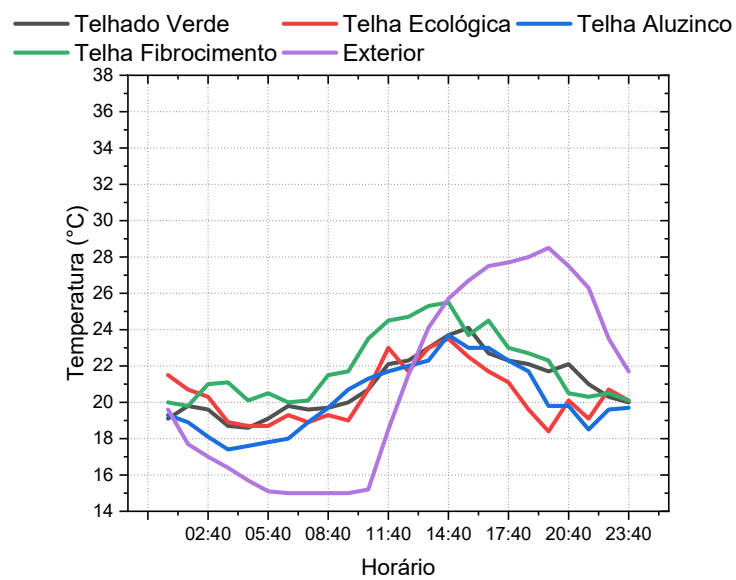
Fonte: Registro de pesquisa (2024)

Figura C.4 – Temperatura interior mediana Q-CP



Fonte: Registro de pesquisa (2024)

Figura C.5 – Temperatura interior mediana F-SP



Fonte: Registro de pesquisa (2024)