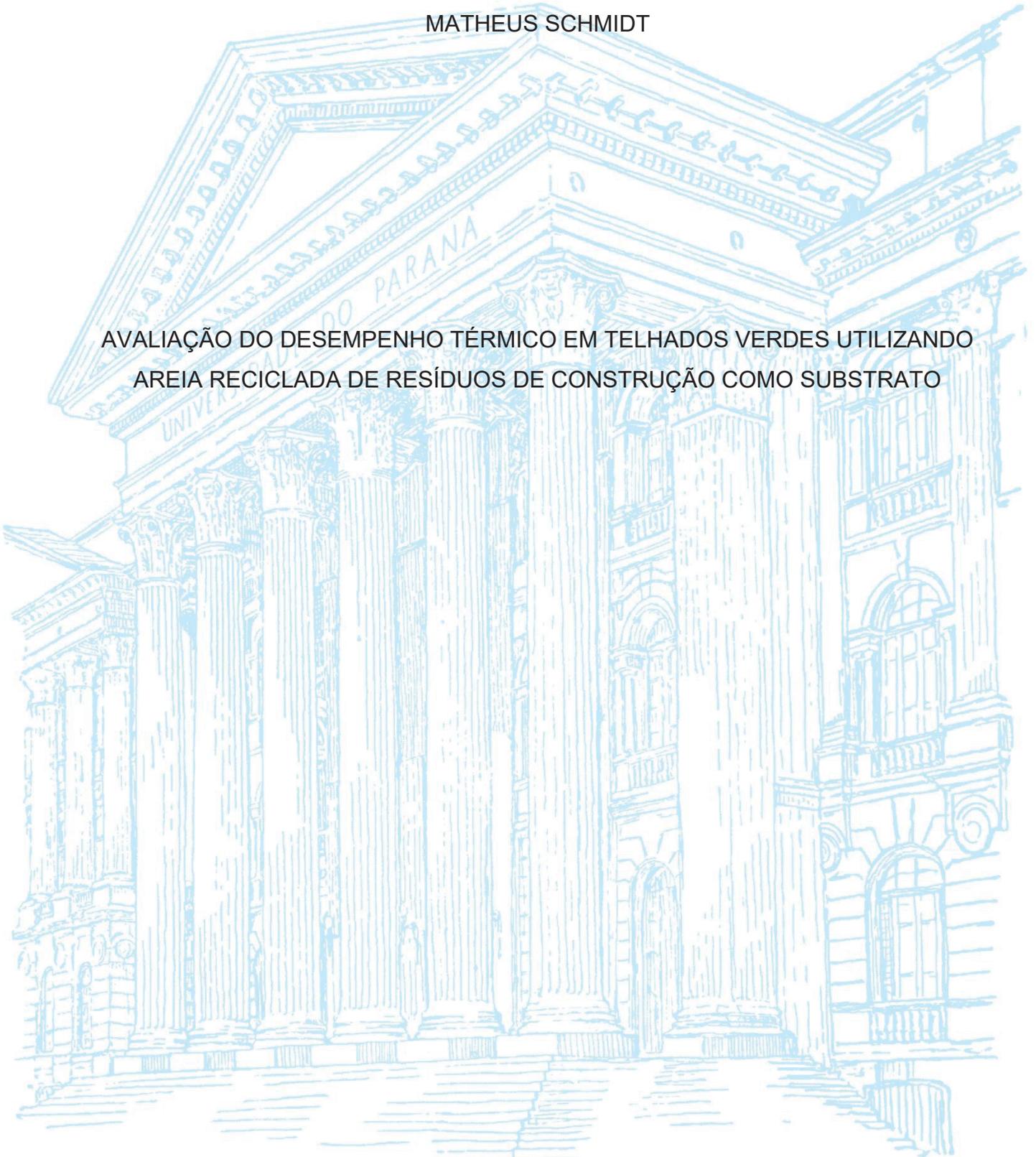


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS SCHMIDT

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO EM TELHADOS VERDES UTILIZANDO
AREIA RECICLADA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO COMO SUBSTRATO



CASCADEL – PR

2024

MATHEUS SCHMIDT

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO EM TELHADOS VERDES UTILIZANDO
AREIA RECICLADA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO COMO SUBSTRATO

Trabalho apresentado à Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental, Setor Palotina, para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Tecnologia Ambiental. Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCADEL - PR

2024

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.
Biblioteca UFPR Palotina.

S349 Schmidt, Matheus

Avaliação do desempenho térmico em telhados verdes utilizando areia reciclada de resíduos de construção como substrato / Matheus Schmidt. – Cascavel, PR, 2023.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Programa de Pós-Graduação Engenharia e Tecnologia Ambiental – UFPR/UNIOESTE.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

1. Areia reciclada. 2. Eficiência energética. 3. Reaproveitamento de resíduos. 4. Telhado verde. I. Souza, Samuel Nelson Melegari de. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDU 502

Bibliotecária: Aparecida Pereira dos Santos – CRB 9/1653



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR PALOTINA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E
TECNOLOGIA AMBIENTAL - 40001016173P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **MATHEUS SCHMIDT** intitulada: **Avaliação do desempenho térmico em telhados verdes utilizando areia reciclada de resíduos da construção como substrato**, sob orientação do Prof. Dr. SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 23 de Fevereiro de 2024.

Assinatura Eletrônica

11/03/2024 14:43:42.0

SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

12/03/2024 09:07:07.0

HITOMI MUKAI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

11/03/2024 09:47:51.0

DOGLAS BASSEGIO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

11/03/2024 13:40:33.0

CAMILA GREGORIO ATEM

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA)

Assinatura Eletrônica

12/03/2024 09:00:22.0

WILLIAN CEZAR NADALETI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS)

RUA PIONEIRO, 2153 - Palotina - Paraná - Brasil

CEP 85950-000 - Tel: (44) 3211-8500 - E-mail: ppgeta@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 346220

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 346220

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental, à Universidade Federal do Paraná e à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, expresso minha sincera gratidão por terem possibilitado a realização do curso de pós-graduação.

Um agradecimento especial aos meus pais, Luiz Schmidt e Maria de Fátima Schmidt, cujo apoio incondicional e incentivo ao valor dos estudos foi imprescindível. Sem o suporte de vocês, este caminho não teria sido possível.

À minha esposa, Aline Snak, sou eternamente grato por todos os momentos notáveis de apoio emocional e amoroso, pela paciência e auxílio imensurável durante este projeto, especialmente na sua aplicação prática. As noites de sono perdidas oportunizaram reflexões que foram fundamentais para o sucesso desta jornada. Quero juntamente agradecer aos seus pais, Terezinha e Delcio, no qual o apoio e ajuda foram inestimáveis e profundamente significativos, marcando positivamente e valorizando esta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, agradeço o incentivo ao tema, disponibilidade, críticas construtivas, contribuição intelectual e oportunidades de aprendizado. Suas sugestões foram essenciais para meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Minha gratidão se estende ao meu coorientador, Prof. Dr. Deonir Secco, e ao colega, Dr. Douglas Bassegio, cujas sugestões e informações foram cruciais para a conclusão desta dissertação.

Agradeço também a Robson Biela e à empresa Future Reciclagem Inteligente, cuja contribuição foi fundamental para a concepção e fornecimento dos materiais necessários para a realização da pesquisa.

Por fim, sou grato a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho. Sua ajuda foi vital para alcançar os objetivos traçados.

RESUMO

Nas últimas décadas, o crescimento dos centros urbanos tem levado a desequilíbrios climáticos, incluindo o aumento das temperaturas regionais devido ao fenômeno das ilhas de calor urbano. Uma resposta ecológica a esse desafio tem sido a adoção de telhados verdes, estruturas que combinam múltiplas camadas com cobertura vegetal sobre uma base estrutural. Neste contexto, surge a possibilidade de aprimorar os benefícios dos telhados verdes utilizando materiais reciclados, particularmente os resíduos de construção e demolição (RCD). Dado que a construção civil consome entre 20 a 50% dos recursos naturais globais e gera uma quantidade significativa de resíduos recicláveis, é essencial explorar o potencial dos RCD em telhados verdes com foco na eficiência energética. Este estudo, conduzido de maio a dezembro no município de Cascavel, Paraná, teve como objetivo geral investigar a eficiência energética de telhados verdes compostos por resíduos de construção e demolição, como fragmentos de concreto e cerâmica, em comparação com os materiais tradicionais de construção de telhados. Focando em variadas proporções e tipos de resíduos, o projeto monitorou a temperatura interna e a umidade de protótipos de telhado verde, utilizando substratos que variam de 0 a 100% em areia reciclada e solo argiloso, além de incluir um protótipo controle com telhas de barro. Os resultados mostraram que a incorporação de areia reciclada aos substratos melhora a eficiência térmica, diminuindo as temperaturas internas nos dias mais quentes em comparação ao controle ($3,4^{\circ}\text{C}$) e ao substrato de solo argiloso ($0,6^{\circ}\text{C}$). Além disso, nos períodos mais frios, o substrato arenoso se mostrou eficaz em reter calor. Contudo, sob condições de saturação, a eficiência térmica dos substratos arenosos declinou, equiparando-se ao substrato argiloso. Esses achados sublinham a viabilidade do uso de RCD para otimizar as propriedades térmicas e o desempenho energético de telhados verdes, sobretudo em climas secos.

Palavras-chave: Telhado verde. Eficiência energética. RCD. Reaproveitamento de resíduos. Areia reciclada.

ABSTRACT

In recent decades, the growth of urban centers has led to climatic imbalances, including the increase in regional temperatures due to the urban heat island phenomenon. An ecological response to this challenge has been the adoption of green roofs, structures that combine multiple layers with vegetative cover over a structural base. In this context, there is an opportunity to enhance the benefits of green roofs by using recycled materials, particularly construction and demolition waste (C&D). Given that the construction industry consumes between 20 to 50% of global natural resources and generates a significant amount of recyclable waste, exploring the potential of C&D in green roofs with a focus on energy efficiency is essential. This study, conducted from May to December in the municipality of Cascavel, Paraná, aimed to investigate the energy efficiency of green roofs composed of construction and demolition waste, such as concrete and ceramic fragments, in comparison with traditional roofing materials. Focusing on various proportions and types of waste, the project monitored the internal temperature and humidity of green roof prototypes, using substrates ranging from 0 to 100% in recycled sand and clay soil, and included a control prototype with clay tiles. The results showed that the incorporation of recycled sand into the substrates improves thermal efficiency, lowering internal temperatures on hotter days compared to the control (3.4°C) and clay soil substrate (0.6°C). Moreover, in colder periods, the sandy substrate proved effective in retaining heat. However, under saturation conditions, the thermal efficiency of sandy substrates declined, equating to that of the clay substrate. These findings underline the feasibility of using C&D to optimize thermal properties and energy performance of green roofs, especially in dry climates.

Keywords: Green roof. Energy efficiency. CDW. Reuse of waste. Recycled sand.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPOSIÇÃO DO TELHADO VERDE.	19
FIGURA 2 - EXEMPLOS DE TELHADO VERDE INTENSIVO (A) E EXTENSIVO (B).	22
FIGURA 3 - LOCALIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO DOS PROTÓTIPOS.....	41
FIGURA 4 – DIMENSÕES E DESENHO TÉCNICO DOS PROTÓTIPOS DE TELHADO VERDE, INCLUINDO VISTA LATERAL (A), VISTA POSTERIOR (B), CORTE DA VISTA LATERAL (C), VISTA FRONTAL (D), VISTA SUPERIOR (E), E CORTE DA VISTA POSTERIOR (F)..	42
FIGURA 5 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS CONSTRUTIVAS	44
FIGURA 6 – SUBSTRATO DE SOLO ARGILOSO	45
FIGURA 7 – SUBSTRATO DE AREIA RECICLADA.....	46
FIGURA 8 – SUBSTRATOS UTILIZADOS.....	48
FIGURA 9 – SENSOR DE TEMPERATURA.....	49
FIGURA 10 – SENSOR DE UMIDADE	49
FIGURA 11 – DATALOGGER.....	50
FIGURA 12 - PROTÓTIPO DE TELHADO VERDE COM SENSORES DE UMIDADE DO SOLO ACOPLADOS EM SUA COBERTURA.	51
FIGURA 13 - TEMPERATURAS INTERNAS E AMBIENTE MÉDIAS DE DEZEMBRO	56
FIGURA 14 - TEMPERATURAS INTERNAS E AMBIENTE MÉDIAS DE JUNHO....	62
FIGURA 15 - TEMPERATURAS DOS SUBSTRATOS APÓS (A) E ANTES (B) DA SATURAÇÃO.....	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÕES E PROPRIEDADES DOS TELHADOS VERDES ..	21
TABELA 2 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DE MATERIAIS USADOS EM SUBSTRATOS.....	25
TABELA 3 - CAPACIDADE TÉRMICA VOLUMÉTRICA DE CONSTITUINTES DO SOLO (AOS 10 °C)	29
TABELA 4 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE CONSTITUINTES DO SOLO (AOS 10°C).....	31
TABELA 5 - RESUMO DE TRABALHOS RELACIONADOS AO USO DE MATERIAIS RECICLADOS EM TELHADOS VERDES.	33
TABELA 6 – PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MATERIAIS ISOLANTES	34
TABELA 7 - RESUMO DOS PROTÓTIPOS.....	47
TABELA 8 - TEORES NUTRICIONAIS DOS SUBSTRATOS	54
TABELA 9 - TEMPERATURAS MÉDIAS EM FUNÇÃO DO HORÁRIO NO MÊS DE DEZEMBRO.....	58
TABELA 10 - TEMPERATURAS MÉDIAS EM FUNÇÃO DO HORÁRIO NO MÊS DE JUNHO.....	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
1.2 URBANIZAÇÃO E ILHAS DE CALOR.....	15
1.3 TELHADOS VERDES	16
1.4 ESTRUTURA E CLASSIFICAÇÕES DE TELHADOS VERDES	19
1.4.1 Impermeabilização	20
1.4.2 Camada filtrante e anti-raíz	20
1.4.3 Drenagem.....	20
1.4.4 Substrato e Vegetação	20
1.4.5 Classificação dos telhados verdes	20
1.5 DESVANTAGENS	22
1.6 COMPOSIÇÃO E DESEMPENHO TÉRMICO DO TELHADO VERDE	23
1.6.1 Substrato em função da vegetação	24
1.6.2 Substrato em função do desempenho térmico	26
1.6.2.1 Condução	27
1.6.2.2 Convecção.....	27
1.6.2.3 Radiação	27
1.6.2.4 Evaporação e Condensação	27
1.6.2.5 Albedo	28
1.6.2.6 Capacidade Térmica Volumétrica ou Inércia Térmica	28
1.6.2.7 Condutividade Térmica.....	30
1.6.2.8 Atraso térmico	32
1.7 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM TELHADOS VERDES	32
1.7.1 Resíduos na Construção Civil	35
1.7.2 Classificação dos resíduos.....	36
1.7.3 Reciclagem dos RCD	37
1.7.4 RCD no Brasil.....	39
2 MATERIAL E MÉTODOS	41
2.1 MONTAGEM DOS PROTÓTIPOS	42
2.2 SUBSTRATOS	45

2.3 MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICOS	48
2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	52
2.4.1 Análise em função da Temperatura Externa	52
2.4.2 Análise em função da umidade	53
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
3.1 ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICAS	54
3.2 RESULTADOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA EXTERNA.....	55
3.3 RESULTADOS EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO SUBSTRATO	65
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
REFERÊNCIAS.....	71
APÊNDICE 1 – FORMULÁRIO DE PESQUISA	86

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da evolução humana, observa-se um constante esforço para obter proteção contra as adversidades climáticas, evoluindo para a busca por condições de bem-estar e conforto físico. Desde os abrigos em cavernas, o uso das primeiras vestimentas e a descoberta do fogo, até os modernos sistemas de climatização, fica evidente a importância do conforto térmico na definição do projeto e construção de moradias.

Recentemente, a tendência de urbanização acelerada e a necessidade de encurtar distâncias têm levado à expansão das populações em áreas metropolitanas e ao surgimento de grandes centros urbanos. Essa concentração populacional resulta em impactos ambientais significativos, desequilíbrios termo climáticos e a formação de novos microclimas urbanos. Conforme indicado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, cidades com populações acima de um milhão podem apresentar temperaturas até 12°C mais altas que suas zonas rurais circundantes. Cidades como Chicago, Nova York e Tóquio já registraram diferenças de até 14°C em relação às áreas rurais vizinhas durante o verão (EPA, 2023).

As temperaturas elevadas nas áreas urbanas devem-se principalmente à liberação de calor antropogênico, acumulação excessiva de radiação solar pelas estruturas urbanas, escassez de áreas verdes, circulação de ar limitada e redução da capacidade da radiação infravermelha de se dispersar na atmosfera. O fenômeno da ilha de calor urbano reflete as mudanças microclimáticas provocadas pelas alterações urbanísticas nos espaços abertos. Conforme estudo realizado pela EMBRAPA em Curitiba-PR, a simples inclusão de um bosque urbano em um grande centro pode promover uma redução de temperatura média na região de até 4° C (EMBRAPA, 2023). Além disso, devemos considerar ainda que a temperatura da superfície da Terra aumentou entre 0,6°C e 1,1°C de 1905 a 2022, (NASA, 2023), e modelos climáticos ainda preveem um acréscimo futuro na faixa de 1,3°C a 3,3°C até meados do século 21, isto se as emissões anuais aumentarem de forma mais lenta e começarem a diminuir consideravelmente (LINDSEY; DAHLMAN, 2023).

Este conjunto de medidas evidencia a constante busca do ser humano em adaptar seu conforto térmico ao ambiente em que reside. Na contemporaneidade, isso se manifesta principalmente através da utilização crescente de aparelhos de ar-condicionado, cuja demanda tem mostrado uma tendência de aumento contínuo. É

estimado que o aumento real da demanda de eletricidade por grau de aumento da temperatura pode chegar em até 8,5% (SANTAMOURIS et al., 2015). Não é ao caso que foi apurada pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) um aumento de 12 % no consumo do mercado paranaense atendido em 2022, na comparação com o ano anterior, e repetidamente, um aumento médio nacional de 11,4% em 2023 comparado com 2022 (CCEE, 2023).

À luz dos dados expostos, evidencia-se a imprescindibilidade de implementar tecnologias que visem à mitigação das temperaturas em centros urbanos. Neste contexto, surge como solução promissora a aplicação de telhados verdes (ou eco telhado), que consistem na sobreposição de diversas camadas sobre uma superfície estrutural, incorporando uma cobertura vegetal (ROSENZWEIG; GAFFIN; PARSHALL, 2006). A incorporação dessa tecnologia no planejamento urbano contemporâneo não apenas alinha-se com as estratégias de sustentabilidade ambiental, mas também representa uma resposta adaptativa essencial diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Com o aumento do interesse na tecnologia de telhados verdes, surge a possibilidade de ampliar seus benefícios através do uso de materiais reciclados e resíduos na composição de seus substratos. Especificamente, há um potencial significativo para melhorar a capacidade de retenção de água em áreas urbanas, diminuir o custo total dos telhados verdes e melhorar o desempenho térmico das edificações, resultando na redução das temperaturas internas. Contudo, é essencial realizar a quantificação e comparação dos benefícios de telhados verdes construídos com materiais convencionais disponíveis no mercado em relação àqueles feitos com materiais reciclados.

Um recurso reciclado que merece atenção especial é o resíduo gerado na construção civil, que atualmente é subutilizado. Desde os seus primórdios, este setor gera como subproduto grande quantidade de resíduos de diversas naturezas (LINTZ et al., 2012). É também responsável pelo grande consumo de recursos naturais provenientes de fontes não-renováveis, consumindo entre 20 e 50% dos recursos naturais de todo o planeta (SANTOS et al., 2011), acarretando sérios impactos ambientais (BRASILEIRO; MATOS, 2015; CHEN et al., 2021; WU et al., 2021; ZHAO et al., 2022).

Claramente toda essa extração e utilização de recursos gera como produto grande volume de resíduos e desperdício em obras e construções, que acabam

conhecidos como resíduos de construção e demolição (RCD). No Brasil, os resíduos de construção e demolição representam uma carga significativa para os sistemas municipais de limpeza, constituindo de 50% a 70% do total de resíduos gerados (ABRELPE, 2022). Em 2021, observou-se nos municípios brasileiros um aumento de 2,9% na coleta de RCD, totalizando mais de 48 milhões de toneladas. Esse crescimento, que vem se intensificando anualmente, corresponde a uma média de aproximadamente 227 kg de resíduos por habitante por ano. Grande parte desses resíduos consiste em materiais de construção e demolição descartados inadequadamente em espaços públicos, como vias e logradouros (ABRELPE, 2022). Para contextualizar ainda mais a dimensão do problema, estima-se que sejam produzidos mais de 10 bilhões de toneladas de RCD globalmente. (WANG et al., 2018)

De acordo com a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2011), no Brasil, são desperdiçados 8 bilhões de reais por ano em função da não reciclagem dos RCD, uma vez que cerca de 70% desse total poderia ser reutilizado. Dessa forma, este é um dos setores que apresenta maior potencial para absorver os resíduos sólidos, e a reciclagem de seus produtos é ação imprescindível para a redução do impacto e para sua preservação do meio ambiente (KLEPA et al., 2019; LINTZ et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2006).

O melhoramento de parâmetros de telhado verde pela combinação de seu substrato com RCD já foi observado em alguns estudos, especialmente em se tratando de parâmetros como crescimento de vegetação, capacidade de retenção de água e a diminuição da carga estrutural (BATES et al., 2015; BIANCHINI; HEWAGE, 2012; BIANCHINI; EMAR, 2012; CASCONI; GAGLIANO, 2022; EKSI et al., 2020; EKSI; ROWE, 2016; LIBERALESSO, 2018; LÓPEZ-UCEDA et al., 2018, 2018; MOLINEUX; FENTIMAN; GANGE, 2009). No entanto, artigos que focam na eficiência energética e que baseiam suas conclusões em dados empíricos são escassos. Isso ressalta a necessidade de estudos casque destaquem a relevância e o potencial dos resíduos de construção e demolição como componentes de substratos em telhados verdes, especialmente no que tange a aspectos energéticos. Além disso, é importante explorar formas de reutilizar esses resíduos, possibilitando a reciclagem em vez de seu descarte em aterros sanitários, prática comum na atualidade (CHEN et al., 2021).

Desta forma, a hipótese central desta tese é que a utilização de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em telhados verdes não apenas melhora o desempenho térmico em comparação com os telhados verdes tradicionais sem RCD,

mas também oferece uma solução viável e sustentável para a gestão de resíduos. Isso se refletirá em uma redução significativa da temperatura interna dos edifícios, contribuindo assim para a eficiência e conforto térmico dos ambientes internos de edificações.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Investigar a eficiência energética de telhados verdes compostos por resíduos de construção e demolição. Este estudo envolverá o monitoramento da temperatura interna de protótipos de telhado verde em Cascavel, Paraná, considerando variadas proporções e tipos de resíduos, como fragmentos de concreto e cerâmica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Criar e colocar em prática uma série de modelos experimentais de telhados verdes, cada um apresentando uma mistura única de substratos, incorporando uma gama diversificada de resíduos de construção e demolição (RCD) em diferentes proporções;
- Monitorar as variações de temperatura e umidade dentro dos substratos dos protótipos ao longo do tempo, garantindo a coleta de dados precisos e confiáveis para análise subsequente;
- Comparar sistematicamente o desempenho térmico e a eficiência de umidade dos protótipos de telhado verde com um modelo de referência equipado com telhas de barro convencionais, além de um telhado verde padrão desprovido de materiais reciclados, sob condições ambientais variáveis;
- Avaliar o impacto das diferentes composições de substrato nos telhados verdes, focando especificamente na eficácia do controle térmico e na gestão da umidade, em comparação com soluções de cobertura tradicionais e ecológicas.

REVISÃO DE LITERATURA

1.2 URBANIZAÇÃO E ILHAS DE CALOR

A urbanização levou a mudanças no ambiente físico das cidades, que rapidamente se alterou devido ao desenvolvimento econômico e ao aumento da concentração populacional. Essas alterações no ambiente físico das cidades contribuíram para a mudança climática urbana, as quais também afetaram a gravidade da mudança climática urbana à medida que a urbanização continua a expandir as cidades e aumentar a densidade das formas físicas urbanas (KIM; BROWN, 2021). A mudança climática urbana, provocada pela urbanização, afetou mais diretamente o ambiente térmico urbano do que a mudança climática global (TAM; GOUGH; MOHSIN, 2015; ZHANG et al., 2010).

O aquecimento urbano é especialmente preocupante em cidades onde a mudança climática urbana causou eventos de calor extremo agravados pela própria mudança climática urbana (SANTAMOURIS, 2014b). Vários fatores contribuem e amplificam o aumento da temperatura ambiente causado pela mudança climática urbana, incluindo a alta massa térmica emitida por estradas de concreto e asfalto, a baixa capacidade de ventilação dos cânions urbanos formados por prédios altos e o efeito combinado do calor liberado por veículos nas ruas e ar-condicionado (AKBARI et al., 2015). A ilha de calor urbano (ICU) é um fenômeno representativo da mudança climática urbana baseado em indicadores numéricos específicos, particularmente um aumento da temperatura do ar em áreas específicas dentro das cidades (SANTAMOURIS, 2019).

Embora a maioria dos estudos sobre o impacto dos efeitos das ICUs tenha sido conduzida no contexto da mudança climática global, eles verificaram que os dois fenômenos (ICUs e mudança climática) afetam um ao outro. A mudança climática global e as ICUs interagem, especialmente produzindo ondas de calor durante os dias de eventos de calor extremo no verão, alterando o ambiente térmico na cidade e expondo as pessoas ao estresse térmico (LUBER; MCGEEHIN, 2008).

Problemas que surgem diretamente da combinação de ICUs e eventos de calor extremo nas cidades incluem aumento da mortalidade e morbidade devido à temperatura do ar extremamente alta. Outras questões decorrentes de temperaturas urbanas severamente altas incluem o aumento da falha da infraestrutura urbana

causada pelo superaquecimento, diminuição da qualidade do ar e baixa qualidade de vida para os habitantes urbanos devido a um menor nível de conforto térmico ao ar livre (STONE et al., 2013).

No entanto, como solução ecológica para o problema, é possível atenuar o efeito das ilhas de calor mediante o incremento de áreas verdes, especificamente através da implementação de telhados verdes, conforme demonstrado em diversos estudos (BASS et al., 2003; LI; BOU-ZEID; OPPENHEIMER, 2014; SANTAMOURIS, 2014a, 2014b, 2019; TAKEBAYASHI; MORIYAMA, 2007; WONG; LAU, 2013).

1.3 TELHADOS VERDES

A tecnologia dos telhados verdes, enquanto instrumento arquitetônico, teve sua origem na Alemanha por volta de 1880, mas seu conceito remonta aos jardins suspensos da Babilônia, aproximadamente em 500 a.C. (DIMITRIJEVIC et al., 2016). Embora seja uma prática com longa história, ela ganhou destaque no Brasil apenas recentemente (LOPES, 2007). Esse reconhecimento deve-se às características sustentáveis dos telhados verdes e aos seus benefícios, tais como aumento da área verde, controle do escoamento superficial, absorção de ruído e a modulação da temperatura interna, contribuindo para a redução de perda de calor no inverno e diminuição de temperatura no verão (PERUSSI; VECCHIA, 2016). Assim, os telhados verdes não apenas representam uma solução ecologicamente sustentável, mas também uma estratégia eficaz na economia de energia em edificações.

Os telhados verdes oferecem sombreamento e isolamento térmico, levando a uma redução no consumo de energia e atenuação do efeito de ilha de calor em áreas urbanas. É importante ressaltar que a eficiência térmica desses telhados é particularmente relevante diante do contínuo aumento das temperaturas globais. A critério de exemplo, uma pesquisa proeminente realizada pelo Serviço de Mudanças Climáticas Copernicus da União Europeia destacou que o ano de 2023 foi marcado por temperaturas recordes (COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE, 2024). Este período notável é caracterizado pelo fato de que, pela primeira vez na história documentada, cada dia do ano registrou temperaturas que excederam em 1°C os níveis pré-industriais do período entre 1850 e 1900. A análise detalhada dos dados revela que, durante a metade do ano de 2023, as temperaturas excederam 1,5°C acima deste limiar pré-industrial, e em dois dias específicos de novembro, os registros

alcançaram um aumento de 2°C. Estes números representam as temperaturas mais elevadas em um interstício de aproximadamente 100 mil anos. Destaca-se que estas temperaturas podem ser ainda mais elevadas em grandes centros urbanos, uma vez que as condições climáticas deteriorantes estão associadas ao aumento da urbanização (CASTELLS-QUINTANA; KRAUSE; MCDERMOTT, 2021), e tais incrementos na temperatura resultam, conseqüentemente, em sérios problemas ambientais globais (ALFONSO; GESTO; SADOUL, 2021; VENIOS et al., 2020; VICENTE-SERRANO et al., 2020; ZANDALINAS; FRITSCHI; MITTLER, 2021).

Neste cenário, os telhados verdes se tornam particularmente notáveis, e a literatura científica é repleta de evidências. Peck et al. (1999) verificaram que telhados verdes reduziram as temperaturas internas de 3 a 4 °C enquanto as temperaturas externas estavam entre 25 °C, sendo que cada decréscimo na temperatura interna do ar do edifício em 0,5 °C pode reduzir o consumo de eletricidade do condicionamento de ar em até 8% (DUNNETT; KINGSBURY, 2004). Por outro lado, uma pesquisa realizada na Grécia por Niachou et al. (2001) demonstrou que os telhados verdes podem reduzir o consumo de energia para refrigeração entre 2% e 48%, dependendo da extensão do telhado verde, com uma diminuição interna de temperatura de até 4°C. Em outro estudo, Jamei et al. (2021) constataram que as maiores reduções de temperatura em edificações com telhados verdes ocorrem em climas secos (3°C), enquanto em climas úmidos a redução é menor (1°C). Em outra pesquisa focada no consumo energético por Zheng et al. (2023) apontou que telhados verdes podem diminuir a demanda por ar-condicionado em até 0,56 kWh/m² por dia, embora esse valor varie conforme a eficiência do equipamento de ar-condicionado.

Além disso, diversos estudos, incluindo os de Yang et al. (2020), Wang, Li e Sodoudi (2022), e Liu et al. (2021), comprovam o efeito de resfriamento dos telhados verdes, tanto nas próprias edificações quanto como uma estratégia eficaz na redução dos efeitos das ilhas de calor urbanas, promovendo a redução de temperaturas internas inclusive em edifícios sem telhados verdes. Outro benefício importante dos telhados verdes é a mitigação do escoamento superficial, contribuindo para a prevenção de enchentes e alagamentos (DA COSTA; COSTA; POLETO, 2012; SANTOS et al., 2013; SHAFIQUE; KIM; KYUNG-HO, 2018).

Existem também políticas públicas ambientais voltadas para telhados verdes, que promovem a implementação de incentivos, em forma de subsídios, redução de taxas ou gratificações, como estímulo para instalação de telhados verdes. Um

exemplo destas políticas ocorre no Canadá, que apresenta como necessária a cobertura verde para novas construções acima de 2000 m² (TORONTO, 2017). Desde quando foi aprovada na Câmara Municipal, resultou mais de 110 mil metros quadrados verdes em diferentes tipos de construções, assim como na economia de energia de mais de 1,5 milhões de kWh por ano (SETTA, 2017).

No Brasil, também há uma série de leis que podem ser elencadas no assunto. Em se tratando de Leis de compensação ambiental em construções urbanas, podemos citar a Lei Complementar 434/1999 de Porto Alegre/RS, Lei 5840/2014 de Canoas/RS, Lei Complementar nº 1.174/2018 de Blumenau/SC e Decreto 53.889/2013 (alterado pelo Decreto 55.994/2015) de São Paulo/SP, que são normativas que estabelecem obrigações para mitigar impactos negativos ao meio ambiente, geralmente associadas a projetos de construção e desenvolvimento urbano, as quais neste caso permitem a compensação ambiental por meio de telhados verdes (MUNICÍPIO DE BLUMENAU, 2018; MUNICÍPIO DE CANOAS, 2014; MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE, 1999; MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2013, 2015).

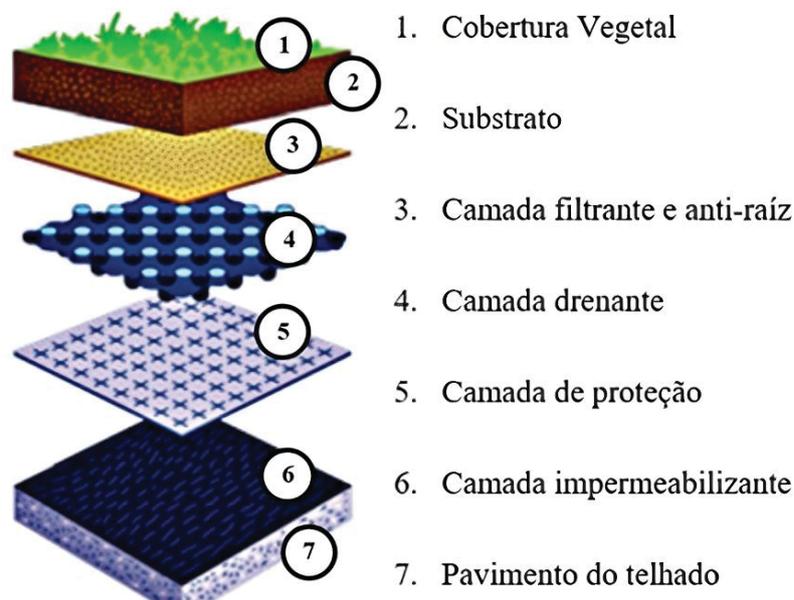
Em se tratando de normas de Incentivos Fiscais, a Lei Complementar 235/2012 de Goiânia e a Lei 6793/2010 de Guarulhos garante descontos de até 20% do IPTU a quem instalar telhados verdes, jardins verticais, painéis fotovoltaicos, pavimentos permeáveis ou sistemas de captação de água. Inclusive leis que promovem obrigatoriedade no uso do telhado verde, em critérios e situações específicas, como a Lei 18.112/2015 de Recife/PE, Lei 7031/2012 de Guarulhos/SP, o Decreto 25899/2015 (substituída pelo Decreto 29.100, de 2017) de Salvador e a Lei 10.047/2003 de João Pessoa/PB (ESTADO DA PARAÍBA, 2013; MUNICÍPIO DE GOIÂNIA, 2012; MUNICÍPIO DE GUARULHOS, 2010, 2012; MUNICÍPIO DE SALVADOR, 2015, 2017).

Existem ainda outras normas que promovem uso do telhado verde por meio de certificações/selos de sustentabilidade, como o Decreto 35.745/2012 de Rio de Janeiro/RJ, no qual edificações e projetos que incluam tecnologias como telhados verdes, jardins verticais, etc, ganharão o selo “Qualiverde”, com a vantagem de preferência nos processos de licenciamento da obra, e novamente o Decreto 25899/2015 (substituída pelo Decreto 29.100, de 2017) de Salvador, que cria certificação sustentável com direito a desconto do IPTU a quem instala tecnologias como telhados verdes (MUNICÍPIO DE RIO DE JANEIRO, 2012; MUNICÍPIO DE SALVADOR, 2015, 2017).

1.4 ESTRUTURA E CLASSIFICAÇÕES DE TELHADOS VERDES

Cada camada de um telhado verde pode ser implementada com características únicas, variando conforme o executor e as práticas construtivas locais. Contudo, as descrições e os materiais utilizados serão aqui sintetizados com base no que é comumente encontrado na literatura científica. Especial atenção será dada às diretrizes apresentadas no livro "Diretrizes para Telhados Verdes", desenvolvido pela Sociedade de Pesquisa e Desenvolvimento de Paisagismo da Alemanha (FLL, 2018), que, na ausência de normas nacionais ou internacionais estabelecidas e consagradas sobre o assunto, tais diretrizes são frequentemente adotadas como referência principal na metodologia aplicada ao projeto de telhados verdes (ALMAAITAH; DRAKE; JOKSIMOVIC, 2022; CARRILLO; JAUCH; MEINKEN, 2012; CONN et al., 2020; DVORAK, 2011; GIACOMELLO; GASPARI, 2021; KADER et al., 2022; PENG; GARNER; STOVIN, 2022; SCHÄRER et al., 2020). Portanto, mesmo considerando a vasta gama de fatores e aspectos que permeiam a construção de telhados verdes, sua estrutura pode ser resumida conforme ilustrado na Figura 1.

FIGURA 1 - COMPOSIÇÃO DO TELHADO VERDE.



FONTE: Adaptado de Dimitrijevic et al. (2016).

1.4.1 Impermeabilização

Esta camada é fundamental para proteger a estrutura da laje contra infiltrações, prolongando sua vida útil e prevenindo desconfortos para os ocupantes do edifício. Geralmente, a impermeabilização é feita com manta asfáltica ou uma combinação de tecido em tela reforçado com asfalto quente e manta asfáltica, conforme recomendado pela FLL (2018).

1.4.2 Camada filtrante e anti-raíz

Esta camada tem a função de reter as partículas da cobertura verde, evitando que sejam arrastadas pela água da chuva e obstruam a drenagem. Além disso, impede que as raízes penetrem na camada impermeabilizante, evitando vazamentos. Comumente, utiliza-se um geotêxtil sintético, por sua permeabilidade e capacidade de bloquear a passagem do substrato, sendo amplamente empregado na construção civil (FLL, 2018).

1.4.3 Drenagem

A drenagem eficiente é alcançada através de uma camada drenante, que filtra poluentes e elimina o excesso de água não absorvido pelo substrato, geralmente feita de material mineral granulado de alta permeabilidade, como a argila expandida (CANTOR, 2008; FLL, 2018).

1.4.4 Substrato e Vegetação

O substrato serve como suporte para as plantas, com uma ampla variedade de materiais disponíveis, dependendo do propósito do telhado verde e do clima da região. A escolha da vegetação deve priorizar espécies de baixa manutenção e resistentes às condições locais, adequadas à estrutura do edifício (CANTOR, 2008; FLL, 2018). O substrato e a vegetação, contudo, variam bastante de acordo com o tipo de telhado verde em questão.

1.4.5 Classificação dos telhados verdes

Existem basicamente dois tipos principais de telhados verdes: os extensivos, que possuem uma estrutura mais leve e substrato mais fino, e os intensivos, que têm

uma camada de substrato mais espessa para acomodar plantas com raízes mais profundas, como arbustos e árvores (FLL, 2018). Há também a categoria semiextensiva, que se situa como um nível intermediário entre os extensivos e intensivos. A Tabela 1 apresenta as diferenças principais entre esses modelos.

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÕES E PROPRIEDADES DOS TELHADOS VERDES

	Extensivo	Intensivo
Espessura do substrato (cm)	4 a 20	10 a 200+
Altura das plantas	5 a 30	30 a 90+
Inclinação dos telhados	≤ 30°	Mínimo ou plano
Contenção de águas pluviais	Baixa	Alta
Peso Geral (kg/m ²)	60-145	170-500+
Tipos de plantas	Plantas de baixo crescimento;	Mais variada, espécies maiores
Irrigação	Periódica a Nula	Regular

FONTE: Adaptado de Dimitrijević et al. (2016)

Os telhados verdes extensivos são caracterizados por sua baixa necessidade de manutenção e uma relação custo-benefício favorável, tornando-os opções economicamente viáveis para edifícios públicos e comerciais. Por outro lado, os telhados verdes intensivos, devido à sua camada mais espessa de solo, demandam uma estrutura de suporte mais robusta. Eles são frequentemente escolhidos mais por seu valor paisagístico, ambiental e arquitetônico do que por considerações econômicas (FLL, 2018; SOARES; DE OLIVEIRA; SANTOS, 2016). A Figura 2 ilustra as diferenças entre esses dois tipos de telhados verdes.

FIGURA 2 - EXEMPLOS DE TELHADO VERDE INTENSIVO (A) E EXTENSIVO (B).



FONTE: Disponível em < <https://www.shutterstock.com/pt/search/green-roof/>>, acessado em 12/07/2022.

1.5 DESVANTAGENS

A desvantagem mais significativa dos telhados verdes é o custo inicial elevado, podendo ser até o dobro do custo de um telhado convencional (GETTER; ROWE, 2006). Dependendo do tipo de telhado verde escolhido, os custos de manutenção podem ser mais altos, embora alguns tipos exijam pouca ou nenhuma manutenção contínua. Outro ponto negativo é a atração de vida selvagem, incluindo insetos que podem entrar em edifícios residenciais por janelas abertas.

A carga adicional do substrato do solo e da água retida pode sobrecarregar a estrutura de suporte de um edifício, o que, em muitos casos, torna inviável a implementação de telhados verdes intensivos devido à incapacidade de muitos edifícios suportarem o peso adicional e ao custo extra para reforçar tais estruturas (CURRIE; BASS, 2008; FLL, 2018). Em regiões sísmicas, os padrões estruturais para telhados verdes podem ser ainda mais rigorosos. Alguns edifícios existentes não podem ser adaptados para certos tipos de telhado verde, pois o peso do substrato e da vegetação excede a capacidade de carga estática permitida. Por exemplo, o peso de um telhado verde causou o colapso de um pavilhão esportivo em Hong Kong em 2016 (CHENG; CHEUNG, 2016), levando à remoção subsequente de muitos outros telhados verdes (TSANG, 2016).

Os telhados verdes intensivos também podem requerer manutenção mais frequente em comparação com um telhado padrão, incluindo remoção de detritos, controle de ervas daninhas, poda de árvores mortas, monitoramento de umidade e

fertilização, com fatores variáveis como clima, intensidade da chuva, tipo de construção, vegetação e revestimentos externos (SAADATIAN et al., 2013). Chuvas escassas podem aumentar a necessidade de rega, elevando os custos de manutenção. Além disso, os componentes individuais dos telhados verdes têm impacto de CO₂ durante sua fabricação, sendo maior do que o de um telhado convencional (CHENANI; LEHVÄVIRTA; HÄKKINEN, 2015)

Contudo, é importante salientar que essas desvantagens são mais pertinentes aos telhados verdes intensivos do que aos extensivos, principalmente devido aos custos adicionais e ao peso extra, que são menos impactantes nos telhados verdes extensivos.

1.6 COMPOSIÇÃO E DESEMPENHO TÉRMICO DO TELHADO VERDE

Os sistemas de telhados verdes apresentam grande diversidade, influenciada pela seleção dos materiais do substrato de cultivo, da camada de drenagem e do tipo de vegetação, bem como pela espessura dos diversos componentes do telhado. Cada um desses elementos tem um papel crucial no desempenho térmico do telhado verde.

O desempenho térmico dos telhados verdes é influenciado por vários fatores, incluindo a localização climática, os materiais de construção e as condições sazonais, conforme apontado por estudos de La Roche e Berardi (2014), Pianella et al. (2016), Bevilacqua et al. (2016), Olivieri et al. (2013) e Fioretti et al. (2010). Em climas frios, por exemplo, Liu e Baskaran (2003) destacam que um substrato mais espesso melhora o desempenho térmico, enquanto em climas quentes e úmidos, um substrato fino de cerca de 10 cm pode ser suficiente para reduzir a temperatura interna, conforme indicado por Jim e Tsang (2011). Em climas quentes e secos, a escolha das plantas é fundamental, pois os telhados verdes devem ser resistentes à seca (SCHWEITZER; ERELL, 2014).

A cobertura vegetal também impacta o isolamento térmico, através da quantidade de substrato exposto à radiação solar, influenciando o consumo de energia (YAGHOUBIAN; SREBRIC, 2015). O processo de evapotranspiração (ET) das plantas e do solo contribui para a redução da temperatura, sendo influenciado por fatores como tipo de solo, umidade, tipo de vegetação (BERRETTA; POË; STOVIN, 2014; WADZUK et al., 2013), umidade do ar e velocidade do vento (THEODOSIOU, 2003). Coutts et al. (2013) salientam que as características hidrológicas dos telhados verdes

são cruciais para o balanço energético, sendo determinadas pelas propriedades do substrato e da drenagem. Estes aspectos afetam a transmissão de calor através do telhado, sendo impactados pela porosidade e profundidade do substrato (DEL BARRIO, 1998). Brown (2014) reforça que a umidade do solo é um fator determinante para a ET das plantas, evidenciando a importância do substrato e suas propriedades na eficiência térmica dos telhados verdes.

1.6.1 Substrato em função da vegetação

A camada de substrato é considerada crucial, pois impacta diretamente no crescimento das plantas. O êxito de um telhado verde a longo prazo está intrinsecamente ligado a esta camada. Logo, a escolha adequada desse meio de cultivo é fundamental para a efetividade do telhado verde (SHAFIQUE; KIM; KYUNG-HO, 2018).

O substrato, antes de atuar como isolante, precisa funcionar como um solo para as plantas, fornecendo umidade, nutrientes e suporte físico. Deve ser leve, quimicamente estável, aerado e capaz de drenar a água com eficiência (FRIEDRICH, 2005). Essas características são essenciais para garantir a sobrevivência da vegetação dos telhados verdes e a manutenção dos benefícios que eles proporcionam.

Conforme Ampim et al. (2010), a composição do substrato pode variar conforme o tipo de telhado, a vegetação escolhida, as condições climáticas e a disponibilidade e custo dos materiais. Materiais leves e porosos, com boa capacidade de retenção de água e disponibilidade gradual de nutrientes são ideais. Exemplos incluem uma mistura de minerais naturais e artificiais (como areia, vermiculita, argila, cascalho e xisto ou argila expandida), materiais reciclados ou resíduos (como tijolos ou telhas de barro triturados, concreto triturado ou aerado e subsolo) e matéria orgânica (como cascas vegetais e turfas). Plásticos podem ser usados ocasionalmente para diminuir a densidade do substrato, e fertilizantes de liberação lenta podem ser adicionados para nutrir e estimular o crescimento das plantas.

A Tabela 2 apresenta um resumo das vantagens e desvantagens dos materiais comumente utilizados em telhados verdes, segundo Bunt (1988), Handreck e Black (2002), Miller (2003), Dunnett e Kingbury (2004) e Ampim et al. (2010)

TABELA 2 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DE MATERIAIS USADOS EM SUBSTRATOS

Material	Vantagens	Desvantagens
Areia	Permite fácil disponibilidade de água às plantas; não provoca efeitos de pH na ausência de carbonatos e outros contaminantes.	Pode criar problemas de saturação ou não reter suficiente umidade; Material pesado; dificilmente retém nutrientes.
Argila	Boa retenção de água e nutrientes; Alta capacidade de troca de cátions.	A perda gradual do meio pode obstruir as camadas de drenagem e membranas.
Cascalho	Estável e fornece forte suporte para plantas; Pode melhorar a drenagem.	Pesado comparado a outros minerais; Fraca retenção de água e nutrientes.
Vermiculita	Leve e porosa; CTC relativamente alta;	Deteriora-se com o tempo; Fraca retenção de água;
Turfa	Alta CTC; Baixa densidade aparente; Alta capacidade de retenção de água.	Mal arejado quando molhado; Difícil reidratação uma vez muito seco.
Húmus de Minhoca	Níveis elevados de minerais essenciais; Boa estrutura de agregados.	Possível toxicidade de zinco se o pH do meio cair abaixo de 5.

FONTE: Bunt (1988), FLL (2018), Handreck e Black (2002), Miller (2003), Dunnett e Kingbury (2004) e Ampim et al. (AMPIM et al., 2010).

Observa-se que solos argilosos apresentam uma capacidade de retenção de água superior aos solos arenosos, característica crucial tanto para a necessidade hídrica das plantas quanto para a proteção contra variações de temperatura. Al-Kayssi et al. (1990) descobriram que a variação diurna da temperatura do solo diminui significativamente com o aumento da umidade. Assim, um solo mais úmido protege o sistema radicular contra mudanças bruscas de temperatura, o que, apesar de aumentar a condutividade térmica do substrato, favorece o desenvolvimento de vegetação em telhados verdes em regiões com grandes amplitudes térmicas.

Beattie e Berghage (2004) sugerem que a composição mineral do substrato pode variar de 80 a 100%, com a matéria orgânica e pequenas quantidades de fertilizantes de liberação lenta, contendo macro e micronutrientes, representando os 0 a 20% restantes. Isso se deve à vida útil curta da matéria orgânica, que se degrada ao longo do tempo, perdendo a capacidade de retenção de água. A alta concentração de matéria orgânica também pode aumentar a incidência de ervas daninhas devido à maior disponibilidade de água e nutrientes (EMILSSON; ROLF, 2005). Além disso,

Friedrich (2005) observa que o material fino resultante da degradação da matéria orgânica pode obstruir as membranas filtrantes e drenantes, formando um lodo que inibe a drenagem e afeta o crescimento das plantas. Entretanto, é recomendado de forma geral ao menos 5% de teor de matéria orgânica, para fins de teor nutricional na vegetação (FLL, 2018).

Dunnett e Kingsbury (2004) e Getter e Rowe (2006) afirmam que um aumento da fertilidade do substrato por meio de adição de matéria orgânica ou fertilizantes eleva a biomassa vegetal, tornando as plantas mais suscetíveis a estresses ambientais e bióticos. Da mesma forma, Rowe et al. (2006) descobriram que a sobrevivência de algumas espécies vegetais foi maior sem fertilização, indicando uma maior tolerância à seca com menor biomassa vegetal. A proporção ideal de matéria orgânica em um substrato varia de acordo com o clima local, decompondo-se mais rapidamente em climas quentes e úmidos em comparação com climas áridos e frios.

No Brasil, segundo pesquisadores como Perussi e Vecchia (2016), Miller (2014), Savi (2018) e Souza (2016), costuma-se utilizar quantidades significativamente maiores de matéria orgânica em telhados verdes, em parte devido ao clima tropical e subtropical, que propicia temperaturas mais elevadas e, conseqüentemente, maior perda de água por evaporação. A adição de matéria orgânica, que possui alta capacidade de retenção de água, pode ser uma estratégia para lidar com essa adversidade (MINASNY; MCBRATNEY, 2018).

1.6.2 Substrato em função do desempenho térmico

Dado que o substrato de telhados verdes geralmente é composto por um ou mais tipos de solo, é crucial considerar as propriedades térmicas dos solos para determinar o desempenho térmico geral do substrato.

Como observado por Hillel (2005), a temperatura do solo é influenciada por alterações na troca de energia radiante, térmica e latente, processos que ocorrem principalmente na superfície do solo. Os efeitos destes fenômenos se propagam no perfil do solo por meio de uma série complexa de processos de transporte, cujas taxas são impactadas por propriedades do solo que variam no tempo e no espaço. A transmissão ou propagação do calor ocorre de quatro formas distintas: condução, convecção, radiação e evaporação/condensação, que normalmente acontecem simultaneamente.(PESSOA, 2006).

1.6.2.1 Condução

A condução é um processo que ocorre no interior de um meio, envolvendo todos os seus componentes, através de colisões entre partículas, resultando na transferência de energia cinética. Embora presente tanto na fase sólida quanto na líquida, a condução é considerada insignificante na fase gasosa. Conforme a massa específica e a umidade do solo aumentam, a quantidade de calor transferida por condução responde de maneira diretamente proporcional, conforme descrito por Farouki (1981). Isso ocorre tanto devido ao aumento do contato entre as partículas sólidas quanto pela maior condutividade térmica da água em comparação com o ar nos espaços vazios do solo. Este mecanismo é predominantemente responsável pelas trocas de calor no solo.

1.6.2.2 Convecção

Diferentemente da condução, na convecção o calor é transmitido pelo movimento de partículas do meio de uma região para outra. Esse processo não envolve a transferência microscópica de calor por átomos ou moléculas, mas sim um movimento macroscópico que transporta partes da substância de uma área quente para uma fria. A convecção ocorre em líquidos e gases, mas é geralmente considerada insignificante em solos.

1.6.2.3 Radiação

Neste processo, a transmissão de calor acontece por meio de ondas eletromagnéticas, sem necessidade de contato físico entre os corpos. Segundo Farouki (1981), a radiação é frequentemente negligenciada nesses contextos, pois em certos tipos de solo, como os de textura arenosa, ela é responsável por menos de 1% do total da transferência de calor. Contudo, o efeito da radiação pode ser observado em materiais de maior granulometria, como os pedregulhos.

1.6.2.4 Evaporação e Condensação

O aumento da temperatura em solos não saturados desencadeia a evaporação da água, resultando em um aumento da pressão de vapor local. Este

vapor, em seguida, se desloca para regiões com menor pressão de vapor por difusão e se condensa, processo através do qual uma quantidade significativa de calor pode ser transferida. Conforme Duarte (2004), a redução da densidade dos solos amplifica a influência da difusão do vapor d'água, devido ao aumento do número de vazios necessários para esse processo de transferência de calor.

Além dos processos de propagação de energia térmica, é crucial analisar as características térmicas do substrato. Dimitrijevic et al. (2016) apontam que, ao definir o substrato de um telhado verde, as características térmicas mais relevantes do solo incluem sua condutividade térmica, capacidade térmica e albedo.

1.6.2.5 Albedo

O albedo, ou coeficiente de reflexão, representa a capacidade de uma superfície refletir a radiação solar. Esse coeficiente varia conforme a cor básica do solo, a rugosidade da superfície e o ângulo de incidência da radiação solar em relação à superfície. A curto prazo, o albedo também é influenciado pela variação da umidade do solo exposto. Solos mais secos, com superfícies brilhantes e lisas, têm um albedo mais alto, resultando em temperaturas superficiais mais baixas. Por outro lado, solos escuros absorvem mais calor do que os claros e lisos, aquecendo-se mais rapidamente (HILLEL, 2005).

Adicionalmente, o albedo tende a aumentar com o volume de biomassa presente em um telhado verde. Em um estudo sobre o albedo de diferentes vegetações em telhados verdes, Maclvor e Lundholm (2011) constataram que a cobertura vegetal mais eficaz elevou o efeito de albedo em aproximadamente 22% em comparação com um controle que possuía apenas substrato, e em mais de 200% se comparado a um telhado convencional. Esse aumento do albedo resultou em uma redução de 16°C na temperatura.

1.6.2.6 Capacidade Térmica Volumétrica ou Inércia Térmica

Esta propriedade, conhecida como capacidade térmica, é a medida da quantidade de calor que um material precisa absorver ou perder para que sua temperatura se altere em uma unidade. De forma simplificada, materiais mais densos têm mais massa e, por isso, exigem mais energia térmica para mudar de temperatura.

No contexto dos telhados verdes, o foco é geralmente na capacidade térmica volumétrica, ou inércia térmica, que depende principalmente da densidade da fase sólida do substrato, da densidade aparente e da umidade do solo (ABU-HAMDEH; REEDER, 2000; HILLEL, 2005; SAILOR; HUTCHINSON; BOKOVOY, 2008). No Sistema Internacional (S.I.), essa unidade é medida em J/m^3K , e os valores típicos para materiais comuns em substratos de telhados verdes são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 - CAPACIDADE TÉRMICA VOLUMÉTRICA DE CONSTITUINTES DO SOLO (AOS 10 °C)

Material	$Jm^{-3}K^{-1}$
Quartzo	$2,0 \times 10^6$
Outros minerais (média)	$2,0 \times 10^6$
Matéria Orgânica	$2,5 \times 10^6$
Água	$4,2 \times 10^6$
Ar	$1,25 \times 10^3$

FONTE: Hillel (2005, p. 158).

De acordo com Souza, Amparo e Gomes (2011), a implementação de sistemas de vedação que empregam materiais com alta inércia térmica possibilita uma redução na variação da temperatura interna em comparação com a temperatura externa. Isso significa que os extremos de temperatura registrados no exterior são atenuados e percebidos de maneira mais branda no interior, além de apresentarem um retardo. Em contrapartida, a temperatura interna de edificações que adotam revestimentos com baixa inércia térmica é fortemente afetada pelas variações climáticas externas, diferentemente de edifícios que contam com uma inércia térmica mais elevada (FERNÁNDEZ; PORTA-GÁNDARA; CHARGOY, 2005).

A escolha de materiais de construção com alta capacidade de armazenamento térmico é recomendada para regiões de clima quente e seco, caracterizadas por altas temperaturas diurnas e baixas noturnas. Nesse contexto, a propriedade térmica dos materiais contribui para retardar a penetração do calor, enquanto que estruturas externas com grande inércia térmica resultam em um aquecimento interno mais contido (DORNELLES; RORIZ, 2004; EVANGELISTI et al., 2014).

Especificamente, a inércia térmica do solo desempenha um papel relevante no equilíbrio térmico de uma construção. A interação com o solo pode atuar como uma

medida de inércia térmica para resfriar e/ou aquecer o ambiente. A flutuação da temperatura do solo ao longo do tempo diminui conforme a profundidade e é influenciada pelo teor de umidade presente. Devido à sua elevada capacidade de armazenamento de calor, o solo mantém, em determinada profundidade, uma temperatura significativamente mais baixa que a do ar ambiente durante o verão e mais alta durante o inverno (ZAKI; AL-MUSAED; KHALIL, 2005).

1.6.2.7 Condutividade Térmica

A condutividade térmica representa a quantidade de calor transferida através de uma área unitária do corpo condutor em unidade de tempo sob um gradiente de temperatura unitário. Seu inverso é a resistividade térmica, resistência apresentada pelo solo ao fluxo de calor. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a condutividade térmica é medida em unidades de watt por metro kelvin ($Wm^{-1}K^{-1}$), e pode ser expressa conforme equação 1 a seguir.

$$\lambda = \frac{q}{A \times (\Delta T/l)} \quad (1)$$

No qual:

q – fluxo de calor (W ou J/s)

A – área da seção transversal (m^2)

ΔT – gradiente de temperatura (K ou $^{\circ}C$)

l – distância percorrida (m)

λ - condutividade térmica ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

Diferente de outras propriedades térmicas, como a capacidade de calor, a condutividade térmica é influenciada não somente pela composição volumétrica do solo, mas também pelos tamanhos, formas e disposições espaciais das partículas do solo, como aponta Hillel (2005). Adicionalmente, a condutividade térmica do solo é particularmente afetada pelo teor de umidade, com a porosidade e a condutividade térmica da fração sólida sendo também fatores cruciais (COSENZA; GUÉRIN; TABBAGH, 2003). Diversos autores confirmam que a condutividade térmica do solo é diretamente proporcional ao seu teor de umidade. Isso se deve à condutividade

térmica do ar ser muito inferior à da água ou da matéria sólida, conforme ilustrado na Tabela 4, resultando em uma baixa condutividade térmica em solos com alto teor de ar ou baixo teor de água (COSENZA; GUÉRIN; TABBAGH, 2003; DIMITRIJEVIC et al., 2016; FAROUKI, 1981; HILLEL, 2005; TARNAWSKI; LEONG, 2000)

Além disso, as diferenças mineralógicas entre areia, silte e argila também têm um impacto significativo na condutividade térmica. Isso ocorre devido à presença de quartzo nesses solos, especialmente na areia, um mineral com uma condutividade térmica consideravelmente alta, como mostrado na Tabela 4.

TABELA 4 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE CONSTITUINTES DO SOLO (AOS 10°C)

Material	Wm⁻¹K⁻¹
Quartzo	8,8
Outros minerais (média)	2,9
Matéria Orgânica	0,25
Água	0,57
Ar	0,025
Solos em Geral	0,15 - 4,0
Solos Saturados	0,6 - 4,0
Areia Seca	0,15 - 0,25
Areia Úmida	0,25 - 2,0
Areia Saturada	2,0 - 4,0
Argila de Seca a Úmida	0,15 - 1,8
Argila Saturada	0,6 - 2,5
Solo Orgânico	0,15 - 2,0

FONTE: Modificado de Hillel (2005, p. 159); modificado de Hamdhan e Clarke (2010).

É importante notar que, embora a areia saturada tenda a apresentar uma condutividade térmica maior do que a argila, essa saturação tende a não se manter por tanto tempo quanto em solos argilosos, devido à alta porosidade da areia e sua consequente baixa capacidade de retenção de água.

No que se refere às diferenças de condutividade térmica entre os solos, Abu-Hamdeh e Reeder (2000) observaram que, mantendo constante a umidade, a condutividade térmica do solo é diretamente proporcional à sua densidade. Os autores também notaram que, após alcançar uma certa densidade, o aumento do teor de água elevou a condutividade térmica mais lentamente na argila do que na areia. Isso pode ocorrer porque a água inicialmente preenche os vazios maiores entre as partículas de areia, aumentando a área de contato entre as partículas. Adicionalmente, eles

descobriram que a condutividade térmica tende a diminuir com a adição de matéria orgânica (como musgo de turfa) em solos franco argilosos. Vale ressaltar que os autores não analisaram a umidade do solo com adição de matéria orgânica. Considerando a alta capacidade de retenção de água que a matéria orgânica confere ao solo, são necessários mais estudos para confirmar a inter-relação entre matéria orgânica e condutividade térmica.

1.6.2.8 Atraso térmico

O atraso térmico, ou resposta térmica dinâmica, descreve a variação da temperatura de um corpo ao longo do tempo em função de sua massa térmica. Um corpo com alta massa térmica (alta capacidade de calor e baixa condutividade) apresentará um grande atraso térmico. O resfriamento lento de uma casa durante a noite, após a sua parede externa de tijolos ter sido aquecida pelo sol, é um exemplo de atraso térmico. Esse fenômeno também explica por que as temperaturas mais altas no verão continuam a aumentar após o solstício de verão (neste caso, é denominado atraso sazonal) e porque a temperatura mais alta do dia atinge seu pico à tarde, e não quando o sol está em seu ponto mais alto (ao meio-dia).

Portanto, tecnicamente, o atraso térmico não é uma característica física isolada, mas sim uma combinação de características que define um parâmetro importante na avaliação da eficiência energética de telhados verdes. Isso se deve à necessidade de levar em consideração as oscilações térmicas ao longo do dia, e não apenas a resposta do material a uma temperatura constante, como ocorreria em um ensaio de laboratório. Por essa razão, o atraso térmico é frequentemente avaliado em conjunto com a temperatura em si (BEVILACQUA et al., 2016; COSTA; PINHEIRO; CAPOBIANGO, 2018a; TIBÉRIO CARDOSO; VECCHIA, 2013).

1.7 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM TELHADOS VERDES

Observa-se uma tendência crescente na construção de telhados verdes em direção à utilização de materiais reciclados e reaproveitados, especialmente nas camadas de drenagem e substrato. Essa prática traz benefícios ambientais, técnicos, econômicos e estéticos, além de promover a reutilização de resíduos na indústria da

construção, como destacado por Naranjo et al. (2020). A Tabela 5 compila os estudos mais relevantes sobre a aplicação de materiais reciclados em telhados verdes.

TABELA 5 - RESUMO DE TRABALHOS RELACIONADOS AO USO DE MATERIAIS RECICLADOS EM TELHADOS VERDES.

Materiais	Âmbito	Resultados
¹ Vidro reciclado	Crescimento da vegetação	Bons resultados dependem da taxa de mistura entre o vidro reciclado e substâncias orgânicas.
² Porcelana reciclada moída	Crescimento da vegetação e retenção de água	Melhor retenção de água e crescimento das plantas ao reduzir o número de grandes partículas.
³ RCD	Crescimento da vegetação	Uso de tijolos triturados puros possibilitou crescimento de diversas plantas ruderais.
⁴ RCD	Crescimento da vegetação e drenagem	Boa resposta e propriedades em comparação com materiais convencionais.
⁵ Borracha reciclada	Desempenho térmico	Economia de energia para o clima mediterrâneo continental durante o verão.
⁶ Tijolo moído, bandeja de isopor e borracha de pneu reciclada	Propriedades hidráulicas e térmicas	Redução do peso total da estrutura, aumento da capacidade de drenagem e redução de até 10°C na temperatura.
⁷ RCD	Retenção e escoamento de água	Melhora na capacidade de drenagem.
⁸ Resíduos plásticos agrícolas	Desempenho térmico, peso saturado	Redução da condutividade térmica e peso total em condições saturadas
⁹ RCD	Captação de carbono	Captação de carbono quase dobrou no telhado verde com resíduos de construção
¹⁰ RCD e resíduos coletados pela prefeitura	Crescimento e estresse das plantas, propriedades químicas e físicas.	De forma geral, apresentou resultados melhores que o controle
¹¹ Tijolos reciclados	Emissão de carbono	Redução da emissão de carbono dos telhados verdes em 73%.
¹² Resíduos coletados pela prefeitura e concreto moído	Propriedades termo hidráulicas	Redução da condutividade térmica.
¹³ RCD	Propriedades hidráulicas e vegetativas	Melhora da drenagem, capacidade de retenção de água, e crescimento da vegetação

FONTE: ¹ Chen et al. (2018), ² Eksi and Rowe (2016), ³ Bates et al. (2015), ⁴ Mickovski et al. (2013), ⁵ Pérez et al. (2012), ⁶ Naranjo et al. (2020), ⁷ Bianchini e Hewage (2012), ⁸ Cascone e Gagliano (2022), ⁹ Fan et al. (2020), ¹⁰ Eksi et al. (2020), ¹¹ Tams, Nehls e Calheiros (2022), ¹² Kazemi, Courard e Attia (2023), ¹³ Petreje et al. (2023)

Nota-se que grande parte das pesquisas recentes sobre o uso de materiais reciclados em telhados verdes foca na avaliação de seu desempenho hidráulico, incluindo a capacidade de drenagem e retenção de água, bem como no crescimento da vegetação comparativamente aos sistemas tradicionais de telhados verdes, e que materiais como borracha, vidro e resíduos de construção têm sido extensivamente pesquisados na última década, revelando que substituir os materiais convencionais dos telhados verdes por opções recicladas é uma alternativa viável.

Entre os resíduos com alto potencial de aplicação em telhados verdes, destacam-se também os resíduos de construção e demolição (RCDs). Esses materiais podem contribuir significativamente para o desempenho térmico dos telhados verdes, particularmente quando se trata de materiais que originalmente foram projetados como isolantes térmicos. A Tabela 6 a seguir apresenta os parâmetros térmicos de alguns RCDs que demonstram potencial para reutilização em telhados verdes:

TABELA 6 – PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MATERIAIS ISOLANTES

Material	Densidade (kg/m³)	Condutividade térmica (W/mK)
Espuma rígida de PU	32	0,017
Poliestireno expandido	16	0,035
Lã de vidro	65-160	0,037
Lã de rocha	350-500	0,112

FONTE: Adaptado de Kipper et al. (2008).

No entanto, ao projetar a seleção de materiais, não se deve focar apenas em parâmetros físicos, como o isolamento térmico, mas também em aspectos químicos, como a potencial toxicidade dos materiais e a possibilidade de reutilização. Materiais como lã-de-vidro, espuma de poliuretano (PU) e resíduos que contêm amianto, por exemplo, não só apresentam dificuldades no processo de reciclagem, frequentemente inviabilizado pelos custos ou pela falta de tecnologias adequadas, mas também exigem um tratamento prévio extensivo para evitar a liberação de substâncias químicas nocivas ao meio ambiente e às pessoas (KIM et al., 2020; OBMIŃSKI, 2021).

1.7.1 Resíduos na Construção Civil

Entre as atividades conhecidas, a construção civil é uma das mais antigas, onde desde o princípio da humanidade foi uma atividade executada de forma artesanal, gerando como subproduto, grande quantidade de resíduos de diversas naturezas, onde é também uma atividade responsável pelo consumo excessivo de recursos naturais provenientes de fontes não-renováveis (LINTZ et al., 2012).

Para a construção civil chamamos de resíduos todos os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil. Além dos resultantes da preparação e da escavação de terrenos, como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., os quais são comumente chamados de entulhos de obras (BRASIL, 2002).

A indústria da construção civil é responsável por um grande consumo de materiais, colaborando significativamente para os impactos ambientais, estes impactos estão presentes desde a sua extração da matéria-prima, produção de materiais, execução da obra e demolição, gerando grande quantidade de resíduos, que muitas vezes são descartados indevidamente trazendo prejuízos ao meio ambiente (FREITAS; MEZECH, 2021). As atividades envolvendo a construção civil são reconhecidas como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social, mas por outro lado, comporta-se ainda como grande geradora de impactos ambientais, consumindo entre 20 e 50 % dos recursos naturais de todo o planeta (SANTOS et al., 2011).

As atividades envolvendo a construção civil demandam grande quantidade de materiais inertes, como a areia e o cascalho, que são adquiridos por meio da extração de sedimentos aluviais. A extração desses sedimentos modifica o perfil físico, químico e biológico dos rios causando o desequilíbrio. A extração de material inerte de formações rochosas em área acidentadas e montanhosas também são danosas ao meio ambiente, uma vez que altera a paisagem e provoca problemas de instabilidade (CABRAL et al., 2009).

Dentro da construção civil, podemos destacar que durante a execução da obra é onde ocorre maior desperdício de materiais, onde, no canteiro de obra, é onde a perda representa a diferença entre a quantidade de materiais prevista em projeto e a

quantidade efetivamente consumida (ALBUQUERQUE; SANTANA, 2018). Segundo Perina e Trannin, (2019) a quantidade de materiais desperdiçados em três obras é possível a construção de uma quarta, idêntica.

Por razões como as supracitadas, é previsto na resolução 307/2002 do CONAMA (BRASIL, 2002) o Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC), documento obrigatório durante a execução da construção civil no qual devem constar informações sobre o tipo de resíduo e quantidade por material a ser descartado, origem e quais formas de destinação serão empregadas para cada material, considerando as diretrizes e o manejo correto dos resíduos. Sua obrigatoriedade varia em função do código de obras municipal, porém em geral é obrigatório para construções acima de 600 m² e obras de demolição acima de 100 m².

1.7.2 Classificação dos resíduos

Existem algumas normas, resoluções e diretrizes que tratam do assunto, de forma a classificar e estabelecer critérios e procedimentos quanto a gestão dos RCC. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) ou Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), regulamenta o manejo ambientalmente correto dos resíduos e define metas de reutilização, redução e reaproveitamento contribuem para que o setor de construção civil busque alternativas ambientalmente correta para destinação do resíduo gerado.

A NBR 10004 (ABNT, 2004) por sua vez também trata dos resíduos de construção civil (RCC) e a Resolução nº 307 do CONAMA (BRASIL, 2002) foi elaborada com o objetivo de estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCC, disciplinando as ações necessárias para minimizar os impactos ambientais. A mesma entrou em vigor em 2 de janeiro de 2003, e considera que os geradores de resíduos da construção civil devem ser responsáveis pelos RCC, obrigando ainda os gestores municipais e construtores a adaptar seus processos de gestão, de modo a garantir a destinação ambientalmente correta desses resíduos.

De forma geral, destaca-se a divisão em classes que são descritas na Resolução do Conama nº 307/2002, onde a classificação dos resíduos é definida em quatro classes, classe A, classe B, classe C e classe D.

Para a classe A são classificados os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, como os resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de

terraplanagem, demolição, reformas e reparos de edificações como os componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, entre outros), argamassa e concreto, e os resíduos de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios, entre outros) produzidas nos canteiros de obras.

A classe B são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso.

Para a classe C são classificados todos os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação. Dentro da construção podemos citar a lã de vidro, espuma expandida, telas de proteção, entre outros.

A classe D são categorizados os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde (BRASIL, 2002).

Ainda, estes resíduos também são classificados segundo sua classe de risco, segundo a NBR 10004, onde classificam-se em classe I - resíduos perigosos e classe II – resíduos não perigosos. A classe I são os resíduos que apresentam periculosidade, ou seja, que representam risco à saúde pública e ao meio ambiente. A classe II divide-se em classe II A - não inertes e classe II B - inertes, sendo a classe II A materiais que reagem com a natureza com propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. E a classe II B são materiais que não reagem com a natureza e assim não liberam substâncias que prejudiquem o meio ambiente, tais como as pedras, areias, vidros, entre outros (ABNT, 2004). Segundo a normativa, os RCC são enquadrados na classe II B – Inertes.

1.7.3 Reciclagem dos RCD

A reciclagem é citada e descrita em diversos estudos (BOHNENBERGER et al., 2018; MIRANDA; ANGULO; CARELI, 2009; SANTOS; CABRAL, 2020; WHITTAKER et al., 2021) como a principal alternativa para a redução da quantidade

de resíduos dispostos em aterros, bem como uma proposta sustentável para a destinação dos RCC. Nesse contexto surge o conceito de logística ou fluxo reverso, que parte do ponto de consumo até o de origem. De acordo com Leite (2009), a Logística Reversa é definida como a área da logística empresarial que planeja, opera e controla o fluxo e as informações logísticas correspondentes do retorno dos bens de pós-venda e de pós-consumo ao ciclo de negócios ou ao ciclo produtivo, por meio dos canais de distribuição reversos, agregando-lhes valor de diversas naturezas: econômico, ecológico, legal, logístico, de imagem corporativa, entre outros.

Nesse contexto, enfatiza-se crescente urbanização e rápido crescimento das cidades causou também um crescimento no setor da construção civil, levando a uma grande exposição dos recursos naturais e a geração de resíduos da construção e demolição (RCD) alcançando índices preocupantes do desperdício de produtos nas construções, reformas e demolições (HALMEMAN; SOUZA; CASARIN, 2009).

Considerando ainda que os RCD apresentam elevado potencial de reaproveitamento, sendo uma alternativa para a economia (SOUSA, 2022b), percebe-se que há um elevado potencial de reciclagem a ser aplicado no contexto de logística reversa. De acordo com Pinto (1999), se todo RCD gerado nas cidades de médio e grande porte fossem reutilizados, seriam suficientes para atender a demanda de matéria prima para a construção de novas casas e vias. Nestes casos a reciclagem geralmente ocorre por meio de usinas, que são locais ambientalmente adequados para receber os resíduos da construção civil, e podem ser subdivididas em usinas fixas e móveis (OLIVEIRA; BONETTO, 2020).

As usinas fixas estão em terrenos que variam de acordo com a capacidade de processamento e atendem um mercado específico, que geram uma quantidade de resíduos pequena durante um longo período. Já as usinas móveis são compostas por caminhões para o transporte, uma britadeira e uma peneira rotativa, e é utilizada em demolições de obras de médio e grande porte, atendendo apenas o próprio mercado primário (OLIVEIRA; BONETTO, 2020). Em ambas as usinas os resíduos passam pelo processo de britagem que pode ser definido como conjunto de operações que tem como objetivo a fragmentação de grandes matérias, levando-os a granulometria compatíveis para utilização direta ou para posteriores processamento. (ABRECON, 2013).

A adoção de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como agregados alternativos pode proporcionar benefícios ambientais significativos. Conforme

destacado por Brasileiro e Matos (2015), a etapa inicial para o desenvolvimento de estratégias eficientes de gestão do RCD envolve a realização de um diagnóstico local. Esse diagnóstico deve mapear aspectos cruciais relacionados a esses resíduos, como sua origem, taxa de geração, os agentes envolvidos na sua produção e coleta, destinação final e composição. Essas informações são fundamentais para o planejamento de medidas alinhadas com as resoluções vigentes, visando à gestão apropriada do RCD.

1.7.4 RCD no Brasil

No Brasil a utilização de resíduos da construção civil teve início na década de 80, no entanto foi a partir de 2002 que houve uma crescente reutilização destes resíduos com a publicação da resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), pois a partir desta norma, os geradores começaram a ser responsáveis pelos resíduos gerados. Com esta legislação em vigor, começaram a surgir empresas especializadas em reciclagem de RCD (OLIVEIRA; BONETTO, 2020; SOUSA, 2022a).

Na sequência, a Resolução nº 348 do CONAMA, que entrou em vigor em 16 de agosto de 2004, modificou o artigo 3º, item IV, da Resolução nº 307 (CONAMA, 2004). Essa mudança se alinha à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil, estabelecida pela Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010). Essa legislação define diretrizes para a disposição de resíduos no país, fomentando práticas de reciclagem e sustentabilidade. A lei adota o princípio da responsabilidade compartilhada, reconhecendo que as questões ambientais frequentemente se entrelaçam com desafios sociais e econômicos que afetam extensivamente a sociedade. Assim, determina que todos os agentes envolvidos nas etapas de fabricação, distribuição, venda e consumo sejam responsáveis pela gestão dos seus resíduos. Importante salientar que, como parte desta legislação, a lei também determinou o encerramento dos "lixões" – locais onde o lixo é depositado sem nenhum tratamento ou separação – até o ano de 2014, marcando um avanço significativo nas políticas de gestão de resíduos sólidos do país.

Entretanto, em nosso país, os resíduos de construção e demolição ainda representam uma carga significativa para os sistemas municipais de limpeza, constituindo de 50% a 70% do total de resíduos gerados (ABRELPE, 2022), onde o

destino inadequado destes resíduos causa prejuízos econômicos, sociais e ambientais (COSTA et al., 2007; PINTO, 1999). A destinação inadequada destes resíduos tem causado problemas para o Brasil, onde podemos citar enchentes, perda da infraestrutura de drenagem por entupimento de galerias e assoreamento de canais, além da proliferação de insetos e animais peçonhentos, causando um aumento desnecessário aos custos da administração pública (OLIVEIRA; BONETTO, 2020).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa possui um caráter experimental e teve como foco o telhado verde como objeto de estudo. Os diferentes tipos de substratos foram considerados como tratamentos, enquanto a temperatura interna sendo a variável de resposta. Fatores como a temperatura externa e a umidade do substrato, que são capazes de influenciar o telhado verde, foram monitorados. Os efeitos produzidos por estas variáveis na estrutura do telhado verde foram determinados e analisados ao longo do estudo.

O desenvolvimento experimental foi realizado uma propriedade privada em área rural no município de Cascavel-PR, localizada na Latitude de 24°50'25" Sul e Longitude 53°27'26" Oeste (Figura 3). Localizado na região oeste do Paraná, esta cidade apresenta clima predominantemente subtropical úmido – Cfa, tendendo ao clima temperado – Cfb . O verão é longo, morno e úmido; o inverno é curto e ameno. Ao longo do ano, em geral, a temperatura varia de 8 °C a 28 °C e raramente é inferior a 2 °C ou superior a 32 °C, A região está sujeita a geadas, embora não muito frequentes. A umidade relativa do ar gira em torno de 75% e os ventos sopram na direção nordeste/sudoeste e leste/oeste com velocidade média entre 33km/h e 46 km/h (ITCG, 2013).

FIGURA 3 - LOCALIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO DOS PROTÓTIPOS



FONTE: Google Maps (2022)

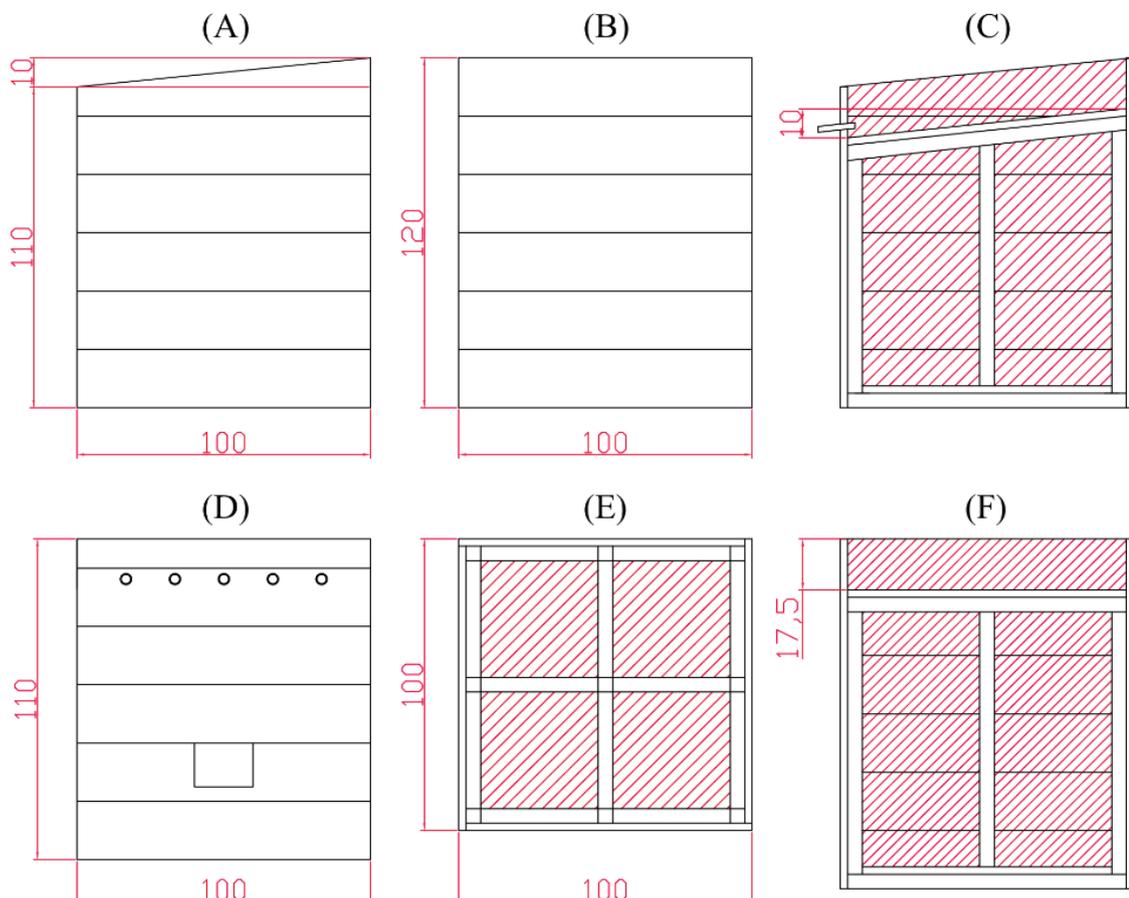
O estudo foi conduzido em duas fases distintas: a primeira etapa envolveu o dimensionamento e a montagem dos protótipos de telhado verde, com o objetivo de analisar a temperatura interna em função dos diferentes parâmetros do substrato e de seus componentes.

Já a segunda etapa focou no monitoramento e na análise de variáveis físicas tanto dos protótipos quanto do ambiente circundante. Essas variáveis incluíram a temperatura interna e externa, bem como a umidade dos substratos. Nesta etapa portanto foi realizado a instalação dos sensores necessários, bem como a análise estatística dos resultados obtidos.

2.1 MONTAGEM DOS PROTÓTIPOS

A Figura 4 a seguir ilustra o layout dos protótipos dos executados neste experimento.

FIGURA 4 – DIMENSÕES E DESENHO TÉCNICO DOS PROTÓTIPOS DE TELhado VERDE, INCLUINDO VISTA LATERAL (A), VISTA POSTERIOR (B), CORTE DA VISTA LATERAL (C), VISTA FRONTAL (D), VISTA SUPERIOR (E), E CORTE DA VISTA POSTERIOR (F).



FONTE: Imagem construída pelo autor utilizando o software AutoCAD 2018

A etapa construtiva dos protótipos se deu da seguinte maneira:

1. Levantamento da estrutura de madeira;
2. Inserção das telhas de barro (somente no protótipo de controle);
3. Aplicação de pintura externa na estrutura de madeira;
4. Aplicação da camada impermeabilizante sobre a cobertura do protótipo;
6. Instalação dos drenos de água na parte frontal do protótipo;
7. Colocação da camada drenante sobre a camada de impermeabilização;
8. Colocação da camada filtrante e anti-raíz sobre a camada drenante;
9. Colocação do substrato;
10. Inserção da cobertura Vegetal;

As estruturas dos protótipos foram construídas utilizando tábuas e caibros de pinus, pregos, e projetadas com um declive de 10% para facilitar o escoamento da água pluvial. Os protótipos foram posicionados com inclinação de forma perpendicular ao norte geográfico. Para proteção externa, aplicou-se um fundo preparador à base de tinta óleo e posteriormente tinta esmalte, com o objetivo de tornar a estrutura mais resistente aos efeitos do sol, chuva, vento, outras intempéries e fungos. Além disso, foi construído um protótipo adicional com cobertura de telhas de barro, servindo como referência comparativa aos demais protótipos.

Para a camada impermeabilizante dos protótipos de telhado verde, utilizou-se manta asfáltica autoadesiva, um material comum em lajes para essa finalidade. A camada drenante é composta por argila expandida, enquanto a camada filtrante é feita de filtro geotêxtil.

Adicionalmente, para facilitar o escoamento do excesso de água da chuva não absorvida pelo substrato, foram instalados drenos barbacã, que são dispositivos drenantes comumente usados em muros de contenção. Estes drenos são feitos de tubos PVC de 20 mm por 10 cm de comprimento, localizados na parte frontal dos protótipos e revestidos internamente com filtro geotêxtil para impedir a passagem do substrato.

A cobertura vegetal escolhida é a grama esmeralda (*Zoysia japonica*), selecionada por sua alta tolerância à seca e baixas temperaturas (CAI; YAMADA; KOLE, 2016; CHRISTIANS; PATTON; LAW, 2016), adequada ao clima de Cascavel-PR. A Figura 5 a seguir ilustra em forma de fluxograma as etapas construtivas para execução dos protótipos.

FIGURA 5 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS CONSTRUTIVAS



FONTE: O Autor (2023).

2.2 SUBSTRATOS

Em relação aos substratos, a variação de textura entre eles é crucial para avaliar a influência de cada tipo de solo no desempenho térmico dos telhados verdes, já que cada um possui características físicas e químicas distintas. Foram analisados 1 protótipo convencional (telhas de barro) e 5 protótipos de telhado verde, cuja composição dos substratos variou entre predominância de solo argiloso ou RCDs.

A esses substratos, foi também adicionada cerca de 5% em volume de matéria orgânica para fornecer os nutrientes necessários para a sobrevivência e manutenção da vegetação. A matéria orgânica utilizada é composta de podas de galhos, folhas e restos vegetais triturados já em decomposição formando um composto orgânico, o qual foi obtido em parceria com a Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Todos os substratos tiveram espessura de 10 cm.

O solo utilizado é predominantemente argiloso, classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico, com relevo levemente ondulado e textura muito argilosa (SANTOS, 2018), coletado na área rural de Cascavel-PR, e pode ser observado na Figura 6 a seguir.

FIGURA 6 – SUBSTRATO DE SOLO ARGILOSO



FONTE: O autor (2023).

O RCD utilizado no estudo foi obtido por meio de uma parceria com uma empresa local especializada na reciclagem de resíduos de construção (FUTURE Reciclagem Inteligente), e este resíduo é conhecido como areia (ou pó) reciclado de

construção. Este agregado miúdo é derivado da reciclagem de cerâmicas, concretos e argamassas, resultando em um material com aparência e características semelhantes às de uma areia grossa, contendo grânulos de concreto e cerâmica. A Figura 7 a seguir exibe o material utilizado.

FIGURA 7 – SUBSTRATO DE AREIA RECICLADA



FONTE: O autor (2023).

Segundo Biela (2024) em formulário de pesquisa (Apêndice I), este tipo de agregado reciclado tem alta aplicabilidade nas atividades primárias da construção civil, como em bases, sub-bases, preenchimentos e forrações. No entanto, existe um certo receio, por vezes infundado, quanto ao seu uso, especialmente em fins estruturais, o que limita parcialmente sua comercialização. Ainda conforme o autor, durante o processo de reciclagem, busca-se minimizar a contaminação por outras substâncias, orgânicas ou inorgânicas, preservando assim a maior parte das características mineralógicas do material extraído da natureza.

Uma vantagem notável é o reaproveitamento desses materiais, evitando a extração de novos recursos. Além disso, o custo da areia reciclada pode ser quase 50% menor do que o material extraído de jazidas naturais. Em Cascavel-PR, local do estudo, este material é comercializado por aproximadamente R\$55,00/m³, enquanto o preço médio da areia convencional para construção é de cerca de R\$95/m³, e o preço médio do solo para aterro é de R\$45,00/m³ (BIELA, 2024).

Conforme observado por Silva e Rocha (2022), o uso de areia reciclada na execução de componentes estruturais de concreto de fato exige maior cuidado, devido

à possibilidade de comportamento estrutural inadequado. Portanto, considerando a viabilidade e a praticidade de usar este resíduo reciclado em outros setores, como no substrato de telhados verdes, essa aplicação é altamente justificável e prática, especialmente levando em conta o benefício ambiental e o custo equiparado aos materiais alternativos.

Desta maneira, os substratos dos protótipos foram cuidadosamente planejados com variações de solo argiloso e areia reciclada. O primeiro protótipo foi integralmente composto por solo argiloso. Nos protótipos seguintes, ocorreu uma substituição progressiva do solo argiloso pela areia reciclada, de modo que o último protótipo foi totalmente constituído por areia reciclada. Esta graduação permitiu uma análise detalhada sobre a influência da proporção de areia reciclada no substrato e seu impacto nas variáveis monitoradas. A composição exata de cada um destes protótipos é apresentada de forma mais detalhada na Tabela 7, a seguir.

TABELA 7 - RESUMO DOS PROTÓTIPOS

Protótipo	Substrato
1 - Telhado convencional	Ausente (Telhas de barro)
2 – RCD0	Solo argiloso (100%)
3 – RCD25	Solo argiloso (75%) e areia reciclada (25%)
4 – RCD50	Solo argiloso (50%) e areia reciclada (50%)
5 – RCD75	Solo argiloso (25%) e areia reciclada (75%)
6 – RCD100	Areia reciclada (100%)

FONTE: O autor (2024).

A Figura 8 a seguir oferece uma representação clara dos 5 substratos utilizados nos protótipos de telhado verde.

FIGURA 8 – SUBSTRATOS UTILIZADOS



FONTE: O autor.

O objetivo com estes protótipos é criar uma estrutura que atenda simultaneamente às exigências nutricionais, hidráulicas e de aeração da vegetação, enquanto proporciona uma eficiente resiliência e isolamento térmico ao interior do ambiente. Para atingir esse objetivo, também foi implementado um regime de irrigação semanal para os protótipos, ajustando a frequência de acordo com o volume pluviométrico registrado durante o período de monitoramento.

2.3 MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICOS

A segunda etapa foi desenvolvida com o desenvolvimento e teste de hardware e software dos sensores de monitoramento, no qual diversos índices físicos foram monitorados desde o mês de maio até dezembro do ano de 2023, para o qual foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Sensores de temperatura DS18B20: termômetro digital com faixa de medição de -55°C a 125°C e precisão de $0,5^{\circ}\text{C}$, possui uma ponta de aço inoxidável e restante enclausurado para garantir impermeabilidade do componente eletrônico. Pode ser observado na Figura 9 abaixo:

FIGURA 9 – SENSOR DE TEMPERATURA



FONTE: O autor.

Os sensores de temperatura foram posicionados tanto no interior dos protótipos, suspensos a uma altura média, como no ambiente externo, para fins de comparação entre os mesmos.

- Sensor de umidade HD-38 Arduino: sensor resistivo resistente a corrosão, com leitura digital. Pode ser observado na Figura 10 a seguir:

FIGURA 10 – SENSOR DE UMIDADE



FONTE: O autor.

Para garantir a precisão na determinação da umidade do substrato nos protótipos de telhado verde, foi adotado um método cuidadoso de calibração e monitoramento. Os valores digitais fornecidos pelos sensores de umidade foram

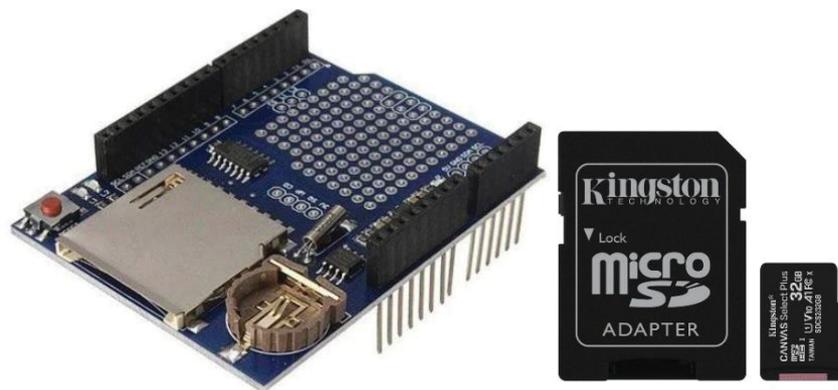
calibrados semanalmente com as umidades reais dos substratos. Esse processo de calibração envolveu a coleta regular de amostras dos substratos, que foram posteriormente enviadas para laboratório para a realização de ensaios de umidade, conforme estabelecido pela norma NBR 16097/2012 da ABNT (ABNT, 2012).

Esta calibração semanal foi realizada em conjunto com as regas dos substratos, garantindo não apenas a manutenção adequada da vegetação, mas também permitindo um controle efetivo da saturação dos substratos para as observações do experimento. Esse controle preciso da umidade foi fundamental para garantir que os substratos atingissem 100% de seu grau de saturação durante os períodos de observação.

O principal objetivo dessa abordagem meticulosa foi comparar o comportamento térmico dos diferentes substratos quando completamente saturados. Compreender como a umidade afeta a condutividade térmica e a eficiência isolante dos substratos em telhados verdes é crucial para avaliar o desempenho geral dessas estruturas sustentáveis. Assim, a combinação de calibração rigorosa dos sensores de umidade, rega adequada e monitoramento cuidadoso durante a saturação proporcionou dados valiosos e confiáveis sobre a dinâmica da umidade nos substratos e seu impacto no comportamento térmico dos telhados verdes.

- *Datalogger Shield ARDUINO RTC DS 1307*: Sistema de aquisição de dados para armazenamento dos dados, conforme Figura 11.

FIGURA 11 – DATALOGGER



FONTE: O autor.

Desta maneira, a Figura 12 abaixo ilustra o conjunto de protótipos, bem como sensor de temperatura do solo acoplado em sua cobertura.

FIGURA 12 - PROTÓTIPO DE TELHADO VERDE COM SENSORES DE UMIDADE DO SOLO ACOPLADOS EM SUA COBERTURA.



FONTE: O autor.

Além disso, foram ainda averiguados os teores químicos e nutricionais dos substratos, comparando-os com as recomendações presentes na literatura sobre gramíneas em telhados verdes, especialmente da *Joyzia japonica*. Essas análises foram conduzidas em parceria com um laboratório local especializado em análises (SBS Análises Agronômicas e Veterinárias).

Para as determinações da fertilidade do substrato, as determinações dos teores disponíveis, utilizou-se a metodologia descrita pela Embrapa em seu manual de análises químicas de solo, plantas e fertilizantes (EMBRAPA, 2009), utilizando o extrator KCl para a o cálcio (Ca) e magnésio (Mg), e o extrator Mehlich 1 para fósforo (P) e potássio (K). A determinação para o Ca e Mg foram determinados por de espectrometria de absorção atômica (modelo GBC, SavantAA), e o potássio determinado através de fotometria de chama (Benfer, BFC 150). Para o fósforo, a determinação se deu por espectroscopia Uv/Vis com a utilização do molibdato de amônia e ácido ascórbico para o desenvolvimento da cor azul. O pH solo, foi determinado a partir da solução de solo e solução de cloreto de cálcio 0,01M na proporção de 10 g de solo para 25 mL de solução, após 30 min, verificou-se o pH por potenciometria.

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Neste experimento, devido à presença de diversas variáveis influenciadoras (temperatura externa, irradiação solar, umidade do substrato), bem como da composição do substrato (tratamento) afetando a variável resposta (temperatura interna), a análise entre os fatores foi realizada em etapas. Isso se deve ao fato de que uma análise geral da temperatura interna de cada substrato ao longo de todo o período de coleta não fornece informações precisas sobre a eficiência térmica real dos protótipos.

A critério de exemplo, Schmidt (2020) demonstrou que, ao analisar a temperatura interna de diferentes substratos de telhado verde, o substrato arenoso exibiu temperaturas médias significativamente mais baixas que os outros tratamentos entre meio-dia e 14:00h, porém apresentou as maiores temperaturas internas durante a noite e madrugada em relação aos demais tratamentos. Entretanto, ao se fazer uma análise das médias de todas as temperaturas do dia, nenhum substrato diferiu significativamente. Isso ocorre porque a eficiência térmica, neste contexto, não se resume apenas à redução da temperatura, mas sim à redução da velocidade de propagação do calor, de forma que o ambiente interno tende a opor-se à temperatura externa.

2.4.1 Análise em função da Temperatura Externa

Para detalhar os resultados obtidos, primeiramente, comparou-se as temperaturas internas dos protótipos em função do tipo de substrato e em relação ao horário do dia simultaneamente. Utilizou-se para tal um delineamento casualizado em blocos (DBC) considerando o tipo de substrato e a hora como os dois fatores que compõem tratamentos diferentes, e os dias como blocos. As 24 horas do dia foram tratadas como fator qualitativo, permitindo realizar uma análise clara e diferenciada das médias por meio do Teste Tukey.

Como foram coletados dados do período de maio a dezembro, a análise das temperaturas em função do horário foi interpretada de mês a mês. Se as médias anuais diárias fossem usadas, haveria um efeito de suavização das temperaturas extremas, em função dos meses mais quentes e outros mais frios, que são precisamente as condições nas quais os telhados verdes tendem a demonstrar seus

resultados mais significativos. Essa abordagem, portanto, assegura que as variações mais críticas e reveladoras — aquelas que ocorrem em temperaturas muito altas ou muito baixas — sejam adequadamente capturadas e analisadas, proporcionando uma compreensão mais precisa do desempenho térmico dos telhados verdes em diferentes condições climáticas.

2.4.2 Análise em função da umidade

A temperatura interna dos protótipos também foi analisada em relação à umidade dos substratos. Neste caso, como a intenção do experimento foi observar o comportamento térmico dos telhados quando se encontravam saturados, a análise procedeu de maneira similar a temperatura interna, no qual os fatores envolvidos eram somente o horário e as temperaturas internas. Como havia somente um tratamento de umidade (100%), manteve-se o delineamento casualizado em blocos utilizado anteriormente.

Após a coleta dos dados, eles foram inseridos no software RStudio, uma ferramenta gratuita de análises estatísticas e planejamentos experimentais (R CORE TEAM, 2020). Após isso, os dados foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) para determinar a necessidade de um teste de comparação de médias. Optou-se pelo uso do teste Tukey com 5% de probabilidade. Este teste foi escolhido por ser adequado e rigoroso ao comparar tratamentos qualitativos (diferentes composições de substratos) com variáveis resposta quantitativas (temperaturas internas) (ANJOS, 2013). O teste Tukey é eficaz na identificação de diferenças significativas entre os grupos, proporcionando uma compreensão clara e confiável dos efeitos dos diferentes substratos sobre a eficiência térmica dos protótipos de telhado verde.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICAS

Inicialmente, a Tabela 8 a seguir resume os parâmetros analisados conformes recomendações da literatura científica, para fins primariamente em função do suporte e nutrição da vegetação. A capacidade de atender aos requisitos nutricionais essenciais é um fator crítico no sucesso de um telhado verde, pois influencia diretamente na saúde e no desenvolvimento da vegetação, que, por sua vez, afeta o desempenho geral do telhado verde em termos de benefícios térmicos, estéticos e ambientais.

TABELA 8 - TEORES NUTRICIONAIS DOS SUBSTRATOS

	RCD0	RCD25	RCD50	RCD75	RCD100	Referência*	Unidade
PROPRIEDADES							
pH em CaCl¹	5,15	5,74	6,5	7,52	8,47	< 8,5	-
Alumínio²	0	0	0	0	0	< 0,2	cmolc/dm ³
CTC pH 7,0²	15,17	14,63	13,73	13,02	12,14	> 9	cmolc/dm ³
Saturação de bases (V)³	70,4	76	83	91,4	99,01	> 60	%
Matéria orgânica (MO)²	52,26	51,93	51,59	51,53	50,59	> 40	g/kg
Carbono orgânico (CO)²	30,38	30,19	29,99	29,96	29,41	> 23	g/kg
MACRONUTRIENTE							
Cálcio (Ca)⁴	7,75	8,52	9,21	10,02	10,47	> 4	cmolc/dm ³
Magnésio (Mg)⁴	2,21	1,83	1,38	1	0,62	> 0,5	cmolc/dm ³
Potássio (K)⁵	0,72	0,71	0,7	0,69	0,68	> 0,45	cmolc/dm ³
Fósforo disponível (P)⁵	9,29	7,23	5,08	3,54	1,04	>15	mg/dm ³

* Referência para a cultura: ¹FLL (2018), ²Ribeiro et al. (1999), ³Villas Bôas et al. (2008), ⁴Raj et al. (1996), ⁵Godoy e Villas Bôas (2003).

É notável que, de acordo com a análise realizada, praticamente todos os parâmetros nutricionais foram atendidos em todos os substratos. Isso indica que os substratos escolhidos para os telhados verdes possuem a capacidade de fornecer as condições necessárias para o crescimento saudável das plantas. A única exceção observada foi no teor de fósforo disponível, que se apresentou abaixo do ideal em alguns substratos. No entanto, essa deficiência pode ser facilmente corrigida em aplicações práticas com a adição de fertilizantes específicos para aumentar a

disponibilidade deste elemento. Este resultado é consistente com as observações do experimento, onde a vegetação cresceu adequadamente em todos os substratos.

Independentemente do substrato escolhido, é imperativo enfatizar a necessidade de atenção à suplementação de fósforo em solos não fertilizados, especialmente no contexto de telhados verdes. A pesquisa conduzida por Kuwahara (2010) explorou as consequências da adição de fósforo na atenuação dos impactos do déficit hídrico em diversas espécies forrageiras. Os resultados elucidaram a relevância significativa da suplementação de fósforo, sobretudo no que tange à promoção do crescimento das plantas em situações de déficit hídrico.

Dado que a manutenção e a irrigação de telhados verdes são preocupações contínuas, essenciais não apenas para a estética, mas também para assegurar a eficácia térmica da edificação, a incorporação deste nutriente no substrato, que atenua e mitiga problemas consequentes da escassez de água, emerge como crucial nesse âmbito.

3.2 RESULTADOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA EXTERNA

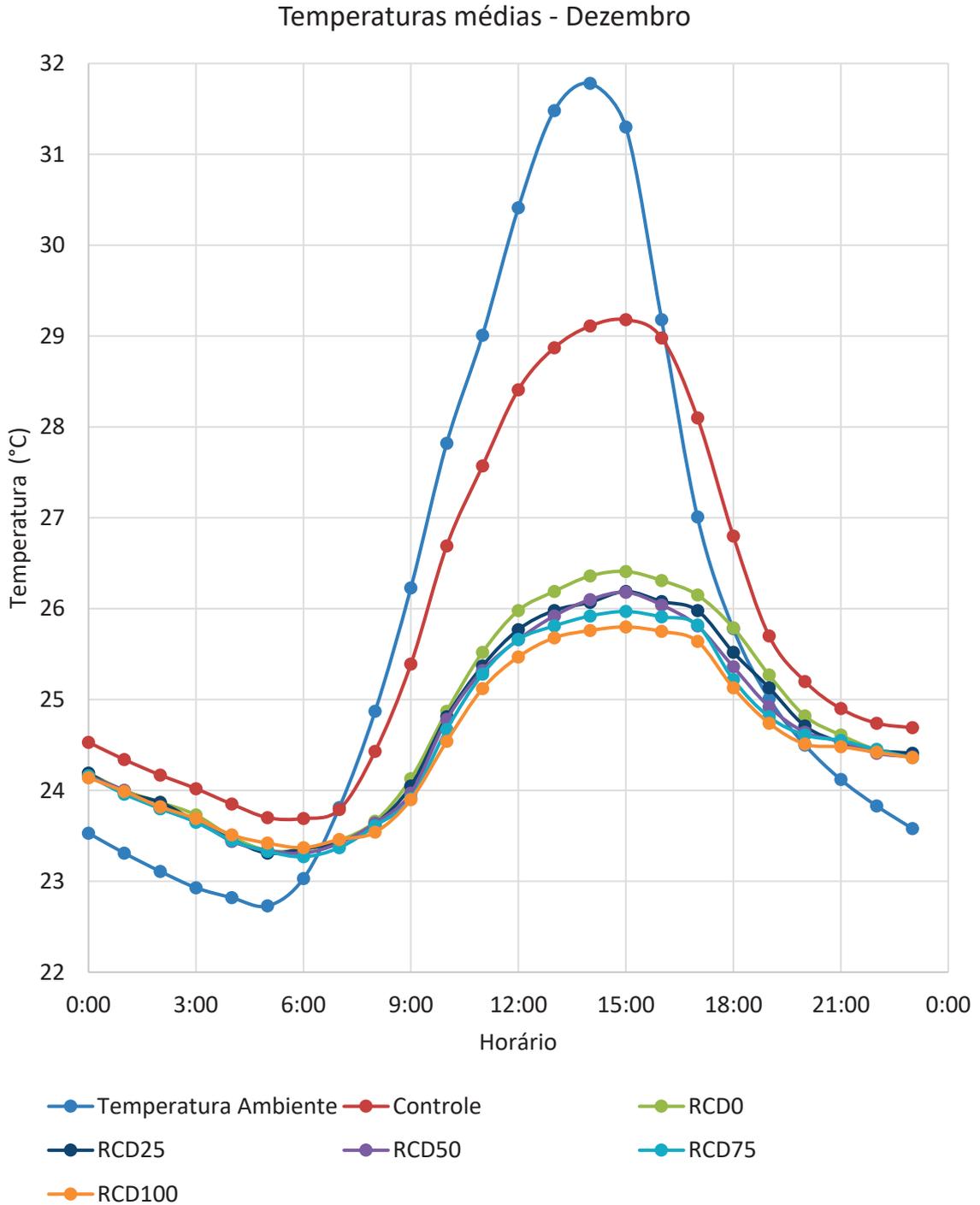
Inicialmente, é importante destacar que, embora os dados tenham sido coletados entre os meses de maio a dezembro, neste tópico serão discutidos e ilustrados principalmente os meses com extremos climáticos mais marcantes, sendo dezembro e junho representativos das temperaturas mais altas e mais baixas, respectivamente. A escolha desses meses para análise se deve à inviabilidade de realizar uma média geral do período completo, o que poderia anular ou mascarar as variações extremas de temperatura.

Desta maneira, a análise por períodos específicos, mais precisamente pelos meses de temperaturas mais acentuadas, não somente torna-se uma abordagem mais lógica e simplificada para compreender a presença ou ausência de diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos, como também torna os resultados mais nítidos. Pode-se razoavelmente supor que os meses não representados possuem temperaturas médias situadas entre esses dois extremos.

Com base nesse princípio, observou-se que a temperatura interna de cada protótipo, juntamente com a temperatura externa, variou ao longo do dia, alcançando temperaturas máximas entre 13:00 e 15:00 horas, e temperaturas mínimas entre 05:00 e 06:00 horas. Essas variações podem ser visualizadas nos gráficos que

seguem a seguir, no qual inicialmente discutiremos as temperaturas médias registradas em função do horário da coleta no mês de dezembro (Figura 13) representando as temperaturas mais elevadas do período coletado.

FIGURA 13 - TEMPERATURAS INTERNAS E AMBIENTE MÉDIAS DE DEZEMBRO



A análise da Figura 11 revela que, durante os horários de temperatura mais elevada, há uma maior discrepância entre as temperaturas internas dos protótipos. Em contrapartida, em horários de temperaturas mais amenas, o desempenho térmico entre os diferentes protótipos parece ser bastante similar. Previsivelmente, o protótipo com telhas de barro (Controle) consistentemente apresentou temperaturas mais elevadas em comparação aos outros, um resultado esperado devido à conhecida eficácia térmica dos telhados verdes.

Quanto aos tratamentos com diferentes substratos, observa-se uma redução gradual da temperatura com o aumento do teor de areia reciclada (RCD) nos substratos. Nota-se que o substrato inteiramente composto de areia reciclada (RCD100) registrou as temperaturas mais baixas nos períodos mais quentes, sendo até 3,4°C mais frio que o protótipo com telhas de barro e 0,6°C mais frio que o protótipo de solo argiloso em dezembro. Esta diferença entre os protótipos com telhados verdes e o protótipo controle está realmente condizente com a de pesquisas de outros autores (COSTA; PINHEIRO; CAPOBIANGO, 2018b; DOUGLAS VACILIEV VACILIKIO; LUCIANO FLEISCHFRESSER, 2011; JAMEI et al., 2021; NIACHOU et al., 2001; PECK et al., 1999; SOUZA; FERREIRA; VASCONCELLOS, 2016; VIEIRA; FLEISCHFRESSER; PRUDENTE, 2016), no qual no geral há uma redução das temperaturas internas entre 2 a 5°C nos telhados verdes em comparação ao controle.

Curiosamente, às 05:00h, em que as temperaturas são mais frias, o substrato de areia reciclada apresentou um leve aumento de temperatura em comparação aos outros telhados verdes, uma tendência diferente do observado nos períodos mais quentes. Isso é consistente com as características de atraso térmico (ou inércia térmica), onde o calor é liberado ou absorvido ao longo do tempo, e não de maneira imediata, explicando também por que o pico de temperatura dos protótipos ocorre cerca de 1 a 2 horas após o pico de temperatura externa. Este efeito é desejável, uma vez que a aplicação de inércia térmica em construções contribui para o retardo e atenuação dos picos de temperatura externa. Fernandes et al. (2022) destaca que a acumulação de calor no interior da estrutura edilícia atua como um elemento moderador, mitigando flutuações e picos térmicos ao longo do dia e propiciando a liberação gradual do calor acumulado em momentos oportunos. Tal fenômeno, portanto, é notoriamente exemplificada pelo uso de telhados verdes, que demonstram essa característica ao evidenciar tal efeito termorregulador.

Além disso, a Figura 13 também exibiu a capacidade de todos os protótipos de reterem uma certa quantidade de calor durante períodos de temperaturas mais amenas, superando a temperatura externa entre 18:00 e 06:00. Isso é crucial para o desempenho térmico, cujo objetivo é atenuar as mudanças bruscas de temperatura do meio externo por meio da inércia térmica, reduzindo temperaturas elevadas e elevando temperaturas baixas. Essa inversão de comportamento é ainda mais acentuada em temperaturas mais baixas, conforme será exibido na análise do mês de junho.

Para uma avaliação precisa do desempenho térmico dos diferentes protótipos, a Tabela 9 na próxima página apresenta uma análise estatística detalhada das temperaturas médias registradas a cada hora do dia.

TABELA 9 - TEMPERATURAS MÉDIAS EM FUNÇÃO DO HORÁRIO NO MÊS DE DEZEMBRO

Hora	Controle	RCD0	RCD25	RCD50	RCD75	RCD100
0:00	24,53 b	24,19 a	24,19 a	24,16 a	24,16 a	24,14 a
1:00	24,34 b	24,00 a	23,98 a	24,00 a	23,96 a	23,99 a
2:00	24,17 b	23,87 a	23,87 a	23,8 a	23,8 a	23,82 a
3:00	24,02 b	23,73 a	23,66 a	23,67 a	23,65 a	23,69 a
4:00	23,85 b	23,49 a	23,46 a	23,44 a	23,45 a	23,51 a
5:00	23,7 b	23,34 a	23,31 a	23,34 a	23,33 a	23,42 a
6:00	23,69 b	23,35 a	23,36 a	23,31 a	23,27 a	23,37 a
7:00	23,79 b	23,45 a	23,43 a	23,42 a	23,37 a	23,46 a
8:00	24,43 b	23,66 a	23,63 a	23,64 a	23,61 a	23,54 a
9:00	25,39 c	24,13 b	24,05 ab	23,97 ab	23,91 a	23,9 a
10:00	26,69 c	24,87 b	24,81 ab	24,78 ab	24,67 ab	24,54 a
11:00	27,57 c	25,52 b	25,37 ab	25,32 ab	25,28 ab	25,12 a
12:00	28,41 d	25,98 c	25,77 bc	25,66 ab	25,66 ab	25,47 a
13:00	28,87 e	26,19 d	25,98 cd	25,92 bc	25,81 ab	25,68 a
14:00	29,11 d	26,36 c	26,07 b	26,1 b	25,92 ab	25,76 a
15:00	29,18 e	26,41 cd	26,19 bc	26,18 bc	25,97 ab	25,8 a
16:00	28,98 d	26,31 c	26,08 bc	26,04 b	25,91 ab	25,75 a
17:00	28,1 d	26,15 c	25,98 bc	25,81 ab	25,82 ab	25,64 a
18:00	26,8 e	25,79 d	25,52 c	25,36 bc	25,22 ab	25,13 a
19:00	25,7 d	25,27 c	25,13 bc	24,92 ab	24,81 ab	24,74 a
20:00	25,2 c	24,82 b	24,71 ab	24,64 ab	24,61 ab	24,51 a
21:00	24,9 b	24,61 a	24,53 a	24,54 a	24,55 a	24,48 a
22:00	24,74 b	24,45 a	24,44 a	24,41 a	24,45 a	24,42 a
23:00	24,69 b	24,4 a	24,41 a	24,37 a	24,36 a	24,36 a

FONTE: O autor (2024).

Médias seguidas de letras iguais na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Esta análise fornece não apenas uma perspectiva visual das variações de temperatura, mas também confirma a significância estatística das diferenças observadas. Isso assegura que as variações entre os protótipos são não apenas perceptíveis, mas também estatisticamente relevantes, fornecendo uma base sólida para conclusões e interpretações confiáveis dos resultados do estudo.

A análise da Tabela 9 permite confirmar a ineficiência térmica do protótipo testemunha (Controle) em comparação com os demais, enquanto destaca a eficácia do protótipo com substrato de areia reciclada em maiores quantidades (RCD75 e RCD100). Este último consistentemente demonstrou ser eficiente em reduzir as temperaturas externas nos momentos de maior calor, de maneira basicamente similar ao substrato RCD75. Os demais substratos, apesar de consideravelmente mais eficientes que o protótipo controle, tendem a apresentar temperaturas ligeiramente maiores que os demais, de forma que o RCD50 apresentou resultados essencialmente equiparados ao RCD25, enquanto o RCD0 mostrou-se como o substrato de pior desempenho térmico entre os telhados verdes analisados. Todos os substratos também demonstraram capacidade de reter calor durante os períodos mais frios do dia, comportamento explicado pela inércia térmica, que requer um tempo para que ocorram trocas de energia térmica entre o interior e o exterior, fazendo com que o calor absorvido durante o dia seja liberado ao longo da noite.

Após a coleta dos dados, foi verificado ainda que no dia de temperatura máxima registrada, atingindo 35,6°C, observou-se uma diferença de 4,1°C na temperatura interna entre o protótipo de controle e o protótipo RCD 100. Adicionalmente, a variação entre o RCD 100 e o RCD 0 foi de 0,9°C. Esses dados evidenciam que, com o aumento da temperatura externa, torna-se mais acentuada a diferença de desempenho térmico entre os protótipos que utilizam diferentes tipos de substratos. Isso sublinha a eficiência da areia reciclada em ampliar o conforto térmico em edificações que empregam telhados verdes.

A diferença no desempenho térmico entre os substratos utilizados nos telhados verdes pode ser atribuída, em grande parte, à condutividade térmica desses materiais. Embora a areia reciclada nos substratos contenha resíduos de construção como agregado miúdo, suas características físicas ainda são bastante semelhantes às da areia comum, que possui uma condutividade térmica variando entre 0,15 e 0,25 W/m·K. Em contraste, o solo argiloso pode apresentar uma condutividade térmica de até 1,8 W/m·K (HILLEL, 2005). A condutividade térmica é um indicador de quão

rapidamente o calor pode ser transferido de um material para outro, portanto, materiais com valores menores deste índice são geralmente mais eficazes como isolantes térmicos.

Em uma pesquisa realizada por Callejas, Durante e Oliveira (2017), foi realizada uma caracterização das propriedades térmicas, incluindo a condutividade térmica, de materiais reciclados provenientes da trituração de blocos e tijolos, onde foram observados valores que variaram de 0,6 a 0,78 W/m.K. As propriedades de materiais reciclados da construção civil são notoriamente específicas, influenciadas não apenas pela composição dos materiais reciclados, como tijolos, cerâmicas e argamassas, mas também pela granulometria e pelo tamanho dos agregados resultantes do processo de reciclagem. Ainda assim, presume-se que, devido à origem comum dos materiais, os resultados encontrados podem ser modestamente extrapolados para a areia reciclada de construção e demolição examinada neste estudo. Portanto, esses valores de condutividade térmica dão suporte aos achados que sugerem que o substrato de areia reciclada oferece um desempenho térmico superior em comparação ao solo argiloso, atribuído à sua menor condutividade térmica.

Os resultados também são compatíveis com os encontrados por Schmidt (2020), em que telhados verdes com substratos arenosos apresentaram um desempenho térmico marginalmente superior em comparação aos demais tipos avaliados (solo argiloso e substrato puramente composto por matéria orgânica). Isso sugere que substratos com essas características específicas podem atuar como isolantes térmicos mais eficientes.

Conforme explicado por Farouki (1981) em seu livro sobre propriedades térmicas dos solos, este comportamento é explicado em boa parte pela porosidade e estrutura dos grãos desses substratos. A areia, composta principalmente por grãos de sílica (dióxido de silício), tem uma estrutura granular mais solta e porosa em comparação com a argila. A argila, por outro lado, tem partículas muito menores e uma estrutura mais compacta. A maior porosidade da areia resulta em maior presença de ar nos espaços entre os grãos. Como o ar é um mau condutor de calor, a presença de mais ar nos espaços intergranulares da areia reduz sua condutividade térmica em comparação com a argila.

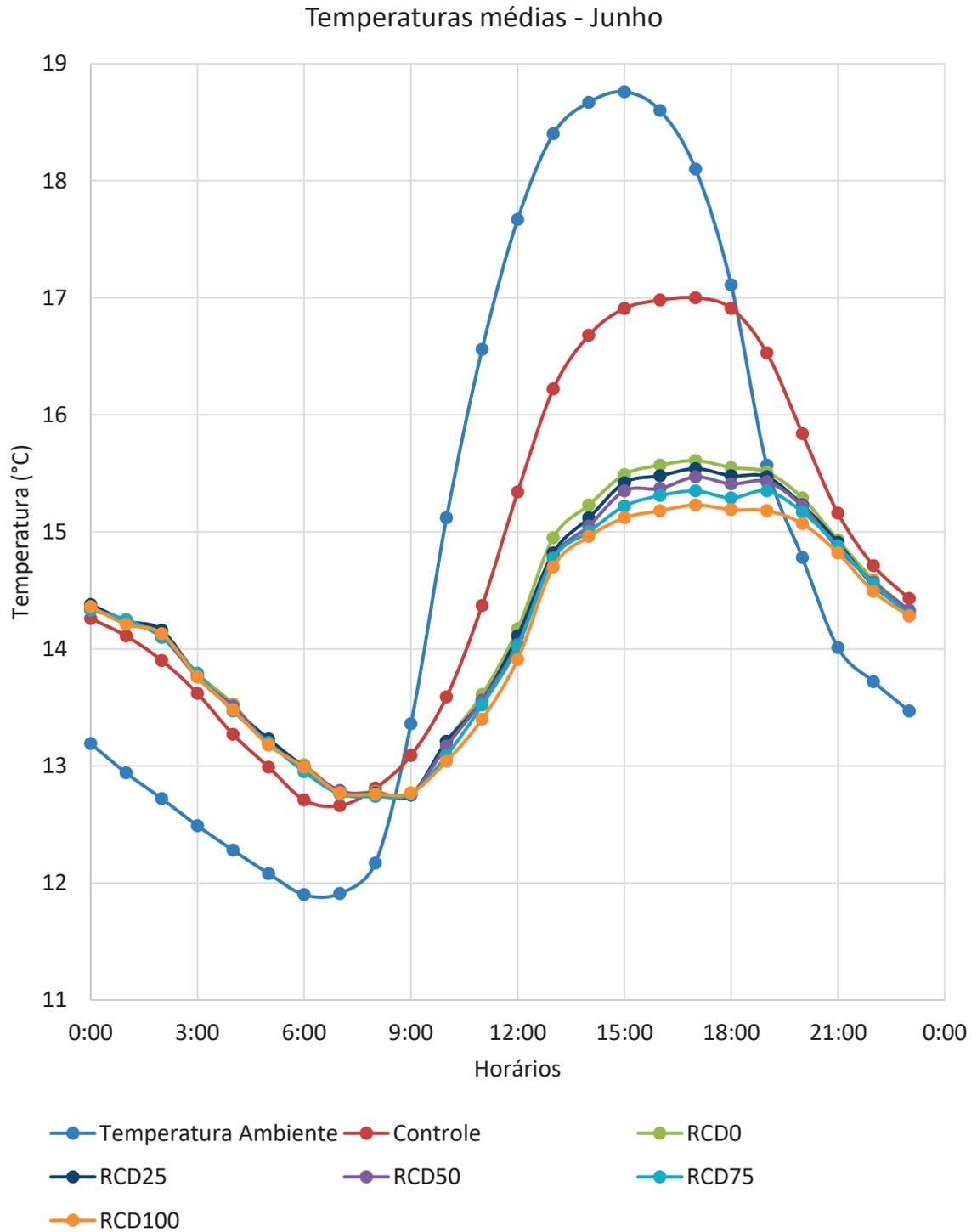
O autor ainda comenta sobre o tamanho das partículas sendo outro fator preponderante, no qual as partículas de argila são significativamente menores do que

as partículas de areia. Isso significa que, em um volume dado, a argila terá mais pontos de contato entre as partículas do que a areia. Mais pontos de contato facilitam a transferência de calor entre as partículas, aumentando a condutividade térmica da argila em comparação com a areia. Estes argumentos estão em linha com estudos como de Ouldboukhitine, Belarbi e Djedig (2012) no qual ao analisar a influência de características físicas dos substratos de telhados verdes, também observam efeitos semelhantes na condutividade térmica do material.

Conforme explorado nas pesquisas de Haigh (2012) e Chen (2008), a condutividade térmica de qualquer tipo de solo pode ser influenciada tanto pela razão de vazios do solo quanto pela sua razão de saturação. Isso implica que em areias com uma composição granulométrica mais grossa, caracterizadas por um volume de vazios maior, existe uma tendência à diminuição da condutividade térmica do material. Desta forma, a incorporação de fragmentos de resíduos de construção na composição da areia reciclada pode intensificar sua capacidade de retenção térmica, em razão da característica granulométrica e à dimensão dos agregados presentes nesse tipo de areia, que são maiores em comparação com os encontrados na areia natural comum. Essa particularidade faz com que a areia reciclada se assemelhe à areia grossa em termos de estrutura, destacando-se pela presença acentuada de macroporos. Estes, por sua vez, contribuem para a formação de uma estrutura que favorece a retenção de calor, uma vez que espaços maiores entre as partículas podem reduzir a condutividade térmica do material, retendo mais eficientemente o calor no interior da areia reciclada. Assim, a combinação dessas propriedades físicas na areia reciclada contribui para o seu desempenho superior como substrato em telhados verdes, especialmente em termos de eficiência no isolamento térmico.

Em relação aos dados coletados no período de menor temperatura, ou seja, no mês de junho, os resultados podem ser examinados na Figura 14 a seguir. Esta figura ilustra como os diferentes protótipos de telhado verde reagiram às condições climáticas mais frias, permitindo uma comparação direta do desempenho térmico dos substratos sob temperaturas mais baixas. Ao analisar esses dados, é possível entender melhor como cada tipo de substrato e sua composição influenciam a retenção e a dissipação de calor durante os períodos mais frios do ano.

FIGURA 14 - TEMPERATURAS INTERNAS E AMBIENTE MÉDIAS DE JUNHO



FONTE: O autor (2024).

É interessante observar que o comportamento das temperaturas em junho, um período mais frio, segue um padrão bastante similar ao observado em dezembro, quando as temperaturas eram mais elevadas. Contudo, uma suavização geral nos

resultados é notável, com as discrepâncias de temperatura entre os diferentes substratos tornando-se menos acentuadas, embora ainda exista uma diferença considerável em relação ao protótipo controle. Novamente, como no mês mais quente, observa-se a tendência de temperaturas mais baixas nos substratos com maior teor de RCD (areia reciclada). Durante os períodos mais quentes do dia, o substrato composto inteiramente por areia reciclada (RCD100) apresentou uma temperatura interna 1,8°C mais baixa que o protótipo controle e cerca de 0,3°C mais baixa que o substrato argiloso.

Assim como observado em dezembro, as diferenças entre os substratos nos telhados verdes se suavizam nos períodos mais frios do dia. Contudo, uma particularidade interessante ocorre nos resultados de junho: não apenas as temperaturas internas dos telhados verdes se aproximam do controle nos horários mais frios, mas também ocorre uma inversão. Entre 00:00 e 07:00h, quando a temperatura externa varia entre 13,2 e 11,9°C, os protótipos de telhado verde apresentam temperaturas ligeiramente superiores ao controle (0,2°C). Este fenômeno reflete a dinâmica de inércia e atraso térmico, na qual os telhados verdes retêm calor em ambientes mais frios.

Vale comentar que, na ocorrência da menor temperatura externa registrada pelos sensores durante a coleta de dados, de 4,9 °C, os protótipos de telhado verde apresentaram, em média, temperatura 1,6°C superior ao controle, indicando que tal desempenho térmico pode ser ainda mais evidenciado conforme ocorre a diminuição da temperatura.

Este resultado está alinhado com as descobertas de outros autores, como Evangelisti et al. (2020), Andenæs et al. (2018) e Tang e Qu (2016). Estes estudos investigaram a utilidade de telhados verdes não especificamente para reduzir as temperaturas em climas quentes, mas sim para reter o calor em climas frios. Este efeito de retenção de calor tende a ser mais proeminente em temperaturas médias abaixo de 15°C. Essa capacidade dos telhados verdes de modular temperaturas tanto em climas quentes quanto frios é um indicativo importante de sua eficácia como solução de construção sustentável e eficiente energeticamente.

Os motivos, conforme discutidos anteriormente, devem-se principalmente em razão das condutividades térmicas dos substratos, em função de características granulométricas dos materiais que os compõem.

A Tabela 9 fornece uma visão clara das temperaturas internas médias em função do horário durante o mês de junho, destacando as diferenças estatísticas significativas observadas nesse período.

TABELA 10 - TEMPERATURAS MÉDIAS EM FUNÇÃO DO HORÁRIO NO MÊS DE JUNHO

Hora	Controle	RCD0	RCD25	RCD50	RCD75	RCD100
0:00	14,26 a	14,35 a	14,38 a	14,35 a	14,33 a	14,36 b
1:00	14,11 a	14,23 a	14,24 a	14,24 a	14,25 a	14,21 a
2:00	13,9 a	14,14 b	14,16 b	14,1 b	14,1 b	14,13 a
3:00	13,62 a	13,79 b	13,76 b	13,76 b	13,79 b	13,76 a
4:00	13,27 a	13,53 b	13,49 b	13,51 b	13,47 b	13,48 a
5:00	12,99 a	13,18 b	13,23 b	13,19 b	13,2 b	13,18 a
6:00	12,71 a	13,01 b	12,99 b	12,99 b	12,95 b	12,99 a
7:00	12,66 a	12,78 a	12,77 a	12,79 a	12,76 a	12,77 a
8:00	12,81 b	12,78 a	12,77 a	12,76 a	12,74 a	12,76 a
9:00	13,09 b	12,76 a	12,75 a	12,76 a	12,76 a	12,77 a
10:00	13,59 c	13,21 b	13,21 b	13,17 ab	13,09 ab	13,04 a
11:00	14,37 c	13,61 b	13,56 b	13,56 b	13,52 ab	13,4 a
12:00	15,34 d	14,17 c	14,11 bc	14,04 ab	14,02 ab	13,91 a
13:00	16,22 d	14,95 c	14,82 abc	14,78 ab	14,77 ab	14,7 a
14:00	16,68 d	15,23 c	15,12 bc	15,05 ab	15 ab	14,96 a
15:00	16,91 d	15,49 c	15,42 c	15,35 bc	15,22 ab	15,12 a
16:00	16,98 d	15,57 c	15,48 bc	15,37 b	15,31 ab	15,18 a
17:00	17,0 d	15,61 c	15,54 c	15,47 bc	15,35 ab	15,23 a
18:00	16,91 d	15,55 c	15,48 c	15,41 bc	15,29 ab	15,19 a
19:00	16,53 d	15,51 c	15,47 c	15,43 bc	15,35 b	15,18 a
20:00	15,84 c	15,29 b	15,23 ab	15,22 ab	15,17 ab	15,07 a
21:00	15,16 b	14,93 a	14,91 a	14,86 a	14,88 a	14,82 a
22:00	14,71 b	14,59 ab	14,54 ab	14,57 ab	14,55 a	14,49 a
23:00	14,43 a	14,33 a	14,32 a	14,33 a	14,29 a	14,28 a

Fonte O autor (2020).

Médias seguidas de letras iguais na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Por meio desta, é possível constatar que apesar de haver grande suavização das discrepâncias, ainda se nota tendência de haver reduções de temperatura (nos horários mais quentes) para os substratos com maiores teor de areia reciclada. Os substratos RCD75 e RCD100 apresentaram os melhores resultados neste sentido. Já nas temperaturas ambientes mais baixas, ocorre uma aproximação das temperaturas entre telhados verdes e protótipo controle, até o momento que os substratos invertam e apresentem temperatura superior ao protótipo com telhas de barro.

Salienta-se que os resultados das análises térmicas devem ser considerados à luz da escala do experimento realizado. Os protótipos, com dimensões de 1x1x1m, recebem insolação significativa em suas laterais em relação à cobertura, uma condição que difere consideravelmente de uma residência real. Em edificações maiores, a insolação no telhado é mais preponderante, e as paredes laterais desempenham um papel menos significativo na influência térmica geral.

Adicionalmente, a proximidade do sensor de temperatura às paredes e cobertura nos protótipos pode ter afetado as medições. Em uma edificação real, com um pé direito significativamente mais alto do que 1 metro, a temperatura tende a ser mais baixa quanto mais distante se está da fonte de calor, como as paredes e cobertura. Nos protótipos, a localização do sensor próximo às fontes de calor pode ter influenciado na captação de temperaturas mais elevadas.

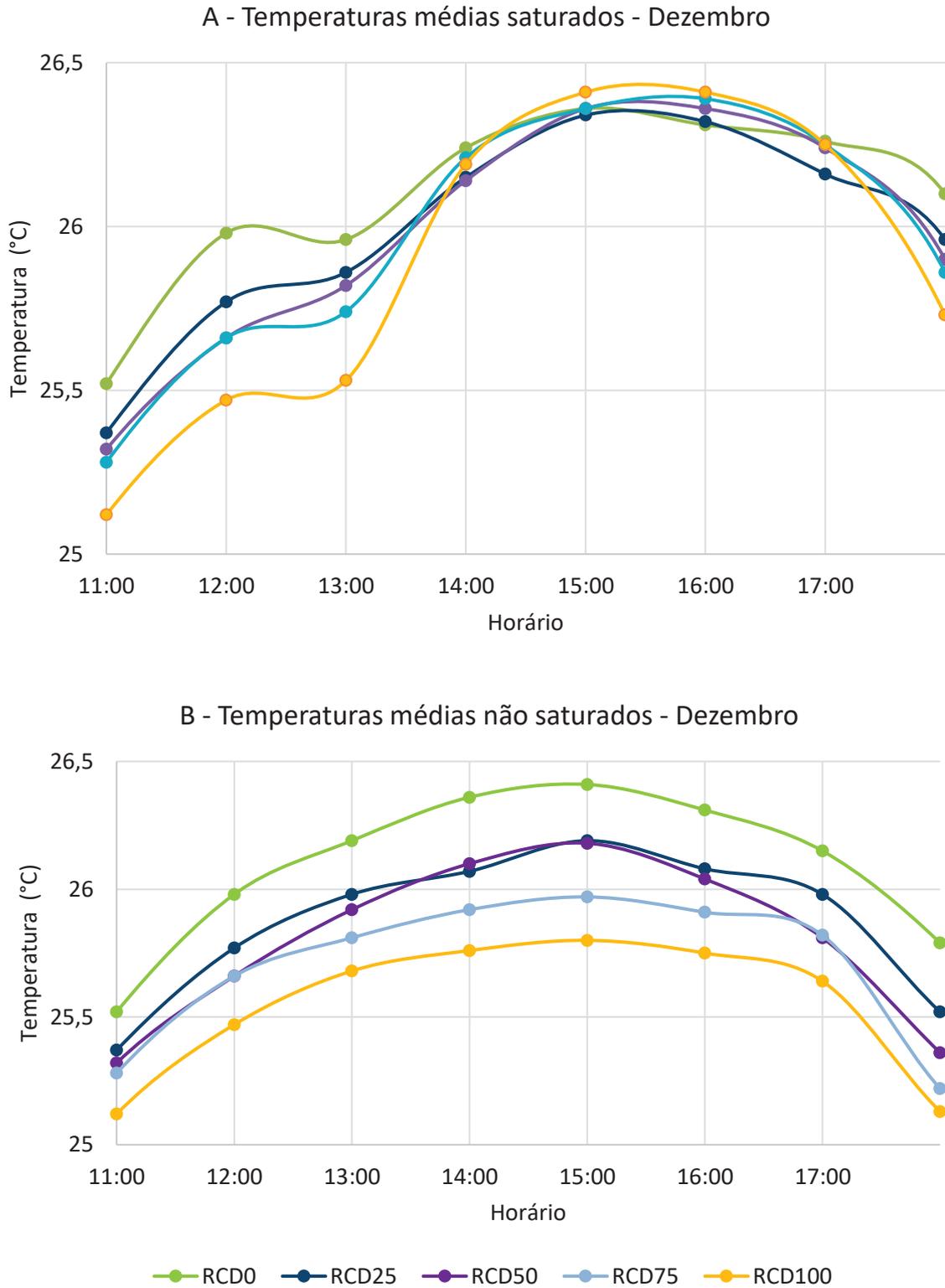
Portanto, é razoável supor que os efeitos observados nos protótipos seriam ainda mais pronunciados em uma edificação de tamanho real. A magnitude dos resultados observados nos protótipos já é notável, mas em uma aplicação em escala real, as diferenças no desempenho térmico entre os tratamentos e as vantagens dos telhados verdes em relação aos telhados convencionais logicamente seriam ainda mais evidentes. Isso reforça a importância e a validade dos telhados verdes como uma solução eficiente para a melhoria do desempenho térmico em edificações.

3.3 RESULTADOS EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO SUBSTRATO

Conforme verificado por diversos autores (ABU-HAMDEH; REEDER, 2000; CASCONI; GAGLIANO, 2022; HAMDHAN; CLARKE, 2010; KAZEMI; COURARD; ATTIA, 2023; NARANJO et al., 2020; PENG; GARNER; STOVIN, 2022; PENG; SMITH; STOVIN, 2020; SHAO et al., 2021), a umidade e o grau de saturação desempenham um papel significativo no desempenho térmico de telhados verdes. Isso ocorre porque a condutividade térmica do material varia em função de suas características hidráulicas. Desta maneira, observa-se na Figura 15a a seguir indica o comportamento térmico dos substratos nas primeiras horas pós rega no mês dezembro, de forma a exibir as variações de temperatura quando estes encontram-se saturados no período de maiores temperaturas médias. A critério de comparação e para fins de facilitar a visualização das diferenças, logo abaixo (Figura 15b) encontra-

se o gráfico das temperaturas médias nestes mesmos horários em dezembro, porém sob condições normais (não saturadas).

FIGURA 15 - TEMPERATURAS DOS SUBSTRATOS APÓS (A) E ANTES (B) DA SATURAÇÃO



FONTE: O autor (2024).

Percebe-se que após a saturação dos substratos às 12:00, ocorre um ligeiro arrefecimento da temperatura interna, o que é esperado ao encharcar a superfície acima de um ambiente. No entanto, é interessante observar que, em contraste com as temperaturas médias observadas ao longo do mês, onde os substratos tendem a estar em um estado de menor umidade, os substratos com maior teor de areia reciclada apresentam um aumento considerável de temperatura. Nos horários mais quentes do dia, o substrato RCD100 (100% areia reciclada) registra temperaturas quase $0,1^{\circ}\text{C}$ mais elevadas que o substrato de solo argiloso. Embora esta diferença seja pequena e estatisticamente não significativa entre os tratamentos, é notável como o comportamento dos substratos se inverte na presença de umidade, uma vez que, conforme visto anteriormente, para o mesmo horário em condições secas, o substrato arenoso apresentou temperaturas quase $0,6^{\circ}\text{C}$ inferior ao RCD0, indicando uma diferença total de $0,7^{\circ}\text{C}$ de variação térmica entre as situações.

Este fenômeno pode ser explicado principalmente pela condutividade térmica associada à capacidade de retenção de água do solo. Quando a água ocupa os poros do solo, substitui o ar, que é um isolante térmico mais eficiente, aumentando assim a condutividade térmica média do solo e diminuindo os benefícios da inércia térmica. Conforme observado por Sailor, Hutchinson e Bokovoy (2008), em solos saturados, a capacidade térmica e a condutividade térmica aumentam em 40% e 100%, respectivamente, em comparação com o solo seco. Isso sugere que solos com alta capacidade de retenção de água não são ideais para isolamento térmico, pois o aumento da umidade eleva a condutividade térmica em uma taxa muito mais rápida do que a inércia térmica. Portanto, a alta porosidade do solo arenoso, que não retém água por longos períodos, é um fator-chave para seu bom desempenho térmico.

Estudos como de Alrtimi, Rouainia e Haigh (2016), Haigh (2012) e Chen (2008) também demonstram o significativo aumento de condutividade térmica de solos arenosos em função de seu grau de saturação, o que também corrobora com índices tabelados de Hillel (2005) e Hamdhan e Clarke (2010). De acordo com esses estudos, a condutividade térmica da areia e da argila saturadas é de $4,0$ e $2,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, respectivamente, enquanto os valores para os estados secos variam entre $0,15$ a $0,25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ para areia e $0,15$ a $1,8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ para argila. Ao analisar os valores mínimos, nota-se que, embora a areia possua uma condutividade térmica menor do que a argila em estado seco, essa relação se inverte quando os solos estão saturados, com a areia apresentando uma condutividade térmica consideravelmente maior. Este fenômeno é

crucial ao considerar o uso de substratos em telhados verdes, especialmente em regiões com diferentes padrões de precipitação.

Sandoval et al. (2015) também observaram que substratos argilosos com tijolos moídos apresentaram não apenas a menor capacidade de retenção de água, mas também o menor aumento de condutividade térmica quando saturados. Isso indica que, embora a capacidade térmica do substrato aumente com a saturação, o ganho em condutividade térmica, especialmente em substratos arenosos, reduz sua eficácia térmica ao torná-lo mais condutor de calor, o que foi literalmente observado neste experimento.

Deve-se ressaltar, porém, que estes efeitos foram observados em magnitudes muito pequenas para serem considerados significativos. Não somente a variação foi pequena e estatisticamente insignificativa, mas algumas horas após a saturação, no final da tarde, o substrato arenoso já apresentou tendência de retornar à menor das temperaturas. Devido à sua alta porosidade, esse tipo de substrato tem baixa capacidade de retenção de água, e o indesejável efeito de aumento da condutividade térmica não se mantém, a menos que a saturação do substrato seja constante, como em casos de chuvas contínuas. Assim, para que esse efeito seja considerado um ponto negativo dos substratos arenosos, o clima e a sazonalidade da região devem proporcionar precipitação quase constante, situação na qual a eficiência térmica deste substrato seria de fato prejudicada.

Em resumo, a eficácia térmica de substratos arenosos em infraestruturas de telhados verdes é significativamente determinada pela gestão da umidade dentro do substrato. Sob condições meteorológicas variáveis, que alternam entre períodos secos e pluviosos, substratos com uma composição predominantemente arenosa têm a tendência de apresentar uma performance térmica otimizada. Isso se deve, em parte, à sua inerente baixa capacidade de retenção hídrica e uma condutividade térmica relativamente reduzida, que minimiza a transferência de calor. No entanto, em situações de precipitação contínua e abundante, a eficácia térmica desses substratos pode ser afetada negativamente.

Assim, a avaliação do desempenho térmico de um telhado verde equipado com um substrato arenoso, composto por resíduos de construção e demolição, exige não somente um cuidado no que tange a nutrição específica da cultura em que planeja-se cultivar como vegetação desta estrutura, mas também uma consideração cuidadosa das condições climáticas prevalentes na área em que o telhado está

situado, pois estas irão influenciar diretamente a regulação térmica proporcionada pelo telhado.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos protótipos demonstram que, em termos de desempenho térmico e potencial econômico-energético, a eficiência varia de acordo com a composição do substrato. Os mais eficientes, em ordem decrescente, foram:

1. Substrato 100% areia reciclada (RCD100);
2. Substrato 75% areia reciclada e 25% solo argiloso (RCD75);
3. Substrato 50% areia reciclada e 50% solo argiloso (RCD50);
4. Substrato 25% areia reciclada e 75% solo argiloso (RCD25);
5. Substrato 100% solo argiloso (RCD0);
6. Protótipo testemunha com telhas de barro (Controle).

Todos os substratos exibiram bons parâmetros nutricionais e suporte adequado para o desenvolvimento da vegetação. Além disso, observou-se que:

- A condutividade térmica é um fator mais relevante do que a capacidade térmica volumétrica (inércia térmica) para as trocas de calor em substratos de telhado verde. Substratos porosos, que possuem baixa condutividade térmica, tendem a apresentar temperaturas mais baixas em períodos quentes e menor perda de calor em períodos frios.
- Em condições climáticas ou sazonalidades com chuvas frequentes e intensas, onde o substrato permanece frequentemente saturado, a situação se inverte: substratos arenosos apresentam um aumento significativo na condutividade térmica, resultando em uma redução na eficácia energética. Este efeito também é observado, embora em menor magnitude, em substratos de solo argiloso.
- A areia reciclada de construção mostrou-se uma alternativa excelente para substratos de telhados verdes, especialmente em regiões e/ou climas não muito chuvosos. Este material se destacou em termos de eficiência térmica, além de oferecer benefícios ambientais sustentáveis, sendo um produto reciclado da construção civil. Adicionalmente, apresenta custos comparáveis aos substratos tradicionais, tornando-se uma opção viável e ambientalmente responsável para aplicação em telhados verdes.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. 2004. Disponível em: <<https://analiticaqmcresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2024
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16097 NBR16097 Solo — Determinação do teor de umidade —**. Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/42792/nbr16097-solo-determinacao-do-teor-de-umidade-metodos-expeditos-de-ensaio>>. Acesso em: 16 jan. 2024.
- ABRECON, A. B. DE R. DA C. **História do Entulho**. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/entulho>>. Acesso em: 17 jan. 2024.
- ABRECON, A. B. PARA R. DE R. DE C. C. E D. **Brasileiro produz por ano meia tonelada de resíduos de construção civil - Abrecon**. , 3 nov. 2011. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/artigos/brasileiro-produz-por-ano-meia-tonelada-de-residuos-de-construcao-civil>>. Acesso em: 14 jan. 2024
- ABRELPE, A. B. DE E. DE L. P. E R. E. **Panorama DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2022**. ABRELPE, , dez. 2022. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 10 jan. 2024
- ABU-HAMDEH, N. H.; REEDER, R. C. Soil Thermal Conductivity Effects of Density, Moisture, Salt Concentration, and Organic Matter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 4, p. 1285–1290, 2000.
- AKBARI, H. et al. LOCAL CLIMATE CHANGE AND URBAN HEAT ISLAND MITIGATION TECHNIQUES – THE STATE OF THE ART. **JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT**, v. 22, n. 1, p. 1–16, 18 dez. 2015.
- ALBUQUERQUE, T. L.; SANTANA, D. C. G. Desperdício de material no canteiro de obras de médio porte em São Luís-MA na atualidade. **Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável - UNDB**, 2018.
- ALFONSO, S.; GESTO, M.; SADOUL, B. Temperature increase and its effects on fish stress physiology in the context of global warming. **Journal of Fish Biology**, v. 98, n. 6, p. 1496–1508, 2021.
- AL-KAYSSI, A. W. et al. Influence of soil moisture content on soil temperature and heat storage under greenhouse conditions. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 45, p. 241–252, 1 jan. 1990.
- ALMAAITAH, T.; DRAKE, J.; JOKSIMOVIC, D. Impact of design variables on hydrologic and thermal performance of green, blue-green and blue roofs. **Blue-Green Systems**, v. 4, n. 2, p. 135–155, 28 set. 2022.
- ALRTIMI, A.; ROUAINIA, M.; HAIGH, S. Thermal conductivity of a sandy soil. **Applied Thermal Engineering**, v. 106, 1 jun. 2016.

AMPIM, P. A. et al. Green roof growing substrates: types, ingredients, composition and properties. **Journal of Environmental Horticulture**, v. 28, n. 4, p. 244–252, 2010.

ANDENÆS, E. et al. Performance of Blue-Green Roofs in Cold Climates: A Scoping Review. **Buildings**, v. 8, n. 4, p. 55, abr. 2018.

ANJOS, U. U. DOS. **Modelos de Probabilidade e Inferencia Estatística**. Notas de aula. Disponível em: <http://www.de.ufpb.br/~ulisses/disciplinas/notas_de_aula-2013-1.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2024.

BASS, B. et al. The impact of green roofs on Toronto's urban heat island. 1 jul. 2003.

BATES, A. J. et al. Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: A six year experiment. **Landscape and Urban Planning**, v. 135, p. 22–31, 1 mar. 2015.

BEATTIE, D.; BERGHAGE, R. Design criteria for a green roof medium. 1 jul. 2004.

BERRETTA, C.; POË, S.; STOVIN, V. Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 511, p. 374–386, 2014.

BEVILACQUA, P. et al. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. **Energy and Buildings**, v. 122, p. 63–79, 15 jun. 2016.

BIANCHINI, F.; HEWAGE, K. **Green Roofs with Construction and Demolition (C&D) Waste in Urban Stormwater Retention**. Engineering and Applied Science. **Anais...** Em: ENGINEERING AND APPLIED SCIENCE. Colombo, Sri Lanka: ACTAPRESS, 2012. Disponível em: <<http://www.actapress.com/PaperInfo.aspx?paperId=454857>>. Acesso em: 10 jan. 2024

BIANCHINI, M.; EMAR, F. **Influence of construction and demolition (C&D) waste on green roof performance**. [s.l.] University of British Columbia, 2012.

BIELA, R. **Formulário de pesquisa**. , jan. 2024.

BOHNENBERGER, J. C. et al. Identificação de áreas para implantação de usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição com uso de análise multicritério. **Ambiente Construído**, v. 18, p. 299–311, mar. 2018.

BRASIL. 12.305. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. . 2010.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, p. 178–189, jun. 2015.

BROWN, P. Basics of evaporation and evapotranspiration. 2014.

- BUNT, A. C. Mix formulation and preparation. Em: BUNT, A. C. (Ed.). **Media and Mixes for Container-Grown Plants**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988. p. 174–200.
- CABRAL, A. E. B. et al. Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 55, n. 336, p. 448–460, 2009.
- CAI, H.; YAMADA, T.; KOLE, C. (EDS.). **Genetics, Genomics and Breeding of Forage Crops**. 0. ed. [s.l.] CRC Press, 2016.
- CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; OLIVEIRA, A. S. DE. Thermal resistance and conductivity of recycled construction and demolition waste (RCDW) concrete blocks. **REM - International Engineering Journal**, v. 70, p. 167–173, jun. 2017.
- CANTOR, S. L. **Green roofs in sustainable landscape design**. [s.l.] WW Norton & Company, 2008.
- CARRILLO, L.; JAUCH, M.; MEINKEN, E. Determination of substrate quality for extensive green roof according to FLL guideline. **Acta Horticulturae**, n. No.938, p. 431–436, 2012.
- CASCONE, S.; GAGLIANO, A. Recycled agricultural plastic waste as green roof drainage layer within the perspective of ecological transition for the built environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, p. 135032, 20 dez. 2022.
- CASTELLS-QUINTANA, D.; KRAUSE, M.; MCDERMOTT, T. K. J. The urbanising force of global warming: the role of climate change in the spatial distribution of population. **Journal of Economic Geography**, v. 21, n. 4, p. 531–556, 8 out. 2021.
- CCEE, C. DE C. DE E. E. **Consumo de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN)**. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/dados-e-analises/consumo>>. Acesso em: 14 jan. 2024.
- CHEN, C.-F.; KANG, S.-F.; LIN, J.-H. Effects of recycled glass and different substrate materials on the leachate quality and plant growth of green roofs. **Ecological Engineering**, v. 112, p. 10–20, 1 mar. 2018.
- CHEN, K. et al. Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125071, 10 mar. 2021.
- CHEN, S. X. Thermal conductivity of sands. **Heat and Mass Transfer**, v. 44, n. 10, p. 1241–1246, ago. 2008.
- CHENANI, S. B.; LEHVÄVIRTA, S.; HÄKKINEN, T. Life cycle assessment of layers of green roofs. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 153–162, 2015.
- CHENG, K.; CHEUNG, K. Roof collapses at City University sports centre, three injured. **Hong Kong Free Express (HKFE)**, 2016.
- CHRISTIANS, N. E.; PATTON, A. J.; LAW, Q. D. **Fundamentals of Turfgrass Management, Fifth Edition**. 1. ed. [s.l.] Wiley, 2016.

CONAMA, C. N. DO M. A. Resolução 307, de 05 de julho de 2002. . 2002.

CONAMA, C. N. DO M. A. Resolução CONAMA nº 348 de 16/08/2004. . 2004.

CONN, R. et al. Green roof substrate physical properties differ between standard laboratory tests due to differences in compaction. **Journal of Environmental Management**, v. 261, p. 110206, 1 maio 2020.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. **Global Climate Highlights 2023. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts**, jan. 2024. Disponível em: <<https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2023>>. Acesso em: 9 jan. 2024

COSENZA, P.; GUÉRIN, R.; TABBAGH, A. Relationship between thermal conductivity and water content of soils using numerical modelling. **European Journal of Soil Science**, v. 54, n. 3, p. 581–588, set. 2003.

COSTA, N. D. et al. Planejamento de programas de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: uma análise multivariada. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 446–456, dez. 2007.

COSTA, S. P.; PINHEIRO, S. C.; CAPOBIANGO, L. C. **Análise de variação de temperatura e umidade em protótipos de telhado verde e telha cerâmica em Manaus**. . Em: VI ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO. Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2018a.

COSTA, S. P.; PINHEIRO, S. C.; CAPOBIANGO, L. C. **Analysis of temperature and humidity variation in green roof and ceramic tile prototypes in Manaus**. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/249446>>.

COUTTS, A. M. et al. Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. **Building and Environment**, v. 70, p. 266–276, 2013.

CURRIE, B. A.; BASS, B. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. **Urban Ecosystems**, v. 11, n. 4, p. 409–422, dez. 2008.

DA COSTA, J.; COSTA, A.; POLETO, C. Telhado Verde: redução e retardo do escoamento superficial. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 14, n. 2, p. 49–55, 2012.

DEL BARRIO, E. P. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. **Energy and buildings**, v. 27, n. 2, p. 179–193, 1998.

DIMITRIJEVIC, D. et al. Green living roof implementation and influences of the soil layer on its properties. **Thermal Science**, v. 20, n. suppl. 5, p. 1511–1520, 2016.

DORNELLES, K.; RORIZ, M. Thermal Inertia, Comfort and Energy Consumption in Buildings: A Case Study in São Paulo State -Brazil. **International Journal for Housing Science and Its Applications**, v. 28, p. 153–162, 1 jan. 2004.

DOUGLAS VACILIEV VACILIKIO; LUCIANO FLEISCHFRESSER. **Comparação entre Telhado Verde Convencional nas Temperaturas Internas de Ambientes**. . Em: II SIMPÓSIO AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Campo Mourão, jun. 2011. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/53263540/RNComparacaoentretelhadoverdeeconvencional-libre.pdf?1495643326=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DComparacao_entre_Telhado_Verde_e_Conven c.pdf&Expires=1705364087&Signature=FaLyjQwCqJVF5wVcBfFMZv3N2ShHLZ9Dz2sUnkeRN1~KpCimm~4uTe2NvfFA1zgtstjz5L9C~eq~U117VOX8ar19G0OsfFsFOFBYslbWC72ewtD4tg~kuu0tUXeaw9xQJn0pFloXna~H3mg582y87wrGFjO20DsP9uRV2LYJLe3wdAnOWTrH1KPHmA5xQI93cQ7rj~VOJfk4NxlxHQKP6dg-uie17bJ~E8r7aTQxokTRvZJpnMPUhBuuembLDqrNgYPwwnalC2VxeJiNPA4ILp~~C6TyOCwp-Dlcr5wAxyaC1mDRggkLUpt-n37cm4EWwHIVc-h2JC5S7AnyuY18erA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA>. Acesso em: 15 jan. 2024

DUARTE, A. P. L. **AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMO-HIDRÁULICAS DE SOLOS REQUERIDAS NA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE DESSORÇÃO TÉRMICA**. DOUTOR EM CIÊNCIAS DE ENGENHARIA CIVIL—Rio de Janeiro, Brazil: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 13 fev. 2004.

DUNNETT, N.; KINGSBURY, N. **Planting Green Roofs and Living Walls**. Portland, Or: Timber Press, 2004.

DVORAK, B. Comparative Analysis of Green Roof Guidelines and Standards In Europe and North America. **Journal of Green Building**, v. 6, n. 2, p. 170–191, 1 maio 2011.

EKSI, M. et al. Assessment of recycled or locally available materials as green roof substrates. **Ecological Engineering**, v. 156, p. 105966, 1 set. 2020.

EKSI, M.; ROWE, D. B. Green roof substrates: Effect of recycled crushed porcelain and foamed glass on plant growth and water retention. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 20, p. 81–88, 1 dez. 2016.

EMBRAPA. **Bosque em Curitiba reduz a temperatura em até 4°C**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/85763717/bosque-em-curitiba-reduz-a-temperatura-em-ate-4c>>. Acesso em: 9 jan. 2024.

EMILSSON, T.; ROLF, K. Comparison of establishment methods for extensive green roofs in southern Sweden. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 3, n. 2, p. 103–111, 12 jan. 2005.

EPA, U. S. E. P. A. **Heat Island Effect**. Collections and Lists. Disponível em: <<https://www.epa.gov/heatislands>>. Acesso em: 14 jan. 2024.

ESTADO DA PARAÍBA. 10047 2013. Lei Ordinária 10047 2013 de Paraíba. . 2013.

EVANGELISTI, L. et al. Influence of the Thermal Inertia in the European Simplified Procedures for the Assessment of Buildings' Energy Performance. **Sustainability**, v. 6, n. 7, p. 4514–4524, jul. 2014.

EVANGELISTI, L. et al. On the Energy Performance of an Innovative Green Roof in the Mediterranean Climate. **Energies**, v. 13, p. 5163, 3 out. 2020.

FAN, L. et al. Whether the carbon emission from green roofs can be effectively mitigated by recycling waste building material as green roof substrate during five-year operation? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 32, p. 40893–40906, 1 nov. 2020.

FAROUKI, O. **Thermal properties of soils**. 1. ed. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H: U.S. Army Corps of Engineers, 1981.

FERNANDES, L. C. et al. Amplitudes térmicas diárias no estado de Santa Catarina e níveis de inércia térmica para habitações. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 30, p. 463–487, 6 mar. 2022.

FERNÁNDEZ, J. L.; PORTA-GÁNDARA, M. A.; CHARGOY, N. Rapid on-site evaluation of thermal comfort through heat capacity in buildings. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 12, p. 1205–1211, 1 dez. 2005.

FIORETTI, R. et al. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. **Building and environment**, v. 45, n. 8, p. 1890–1904, 2010.

FLL, F. L. L. **Green Roof Guidelines**. 6. ed. Bonn, Alemanha: Landscape, Research, Development & Construction Society e.V., 2018.

FREITAS, A. P. M. D.; MEZECH, R. C. C. Aproveitamento de resíduos de construção e demolição com foco na sustentabilidade. **Disciplinarum Scientia - Ciências Naturais e Tecnológicas**, v. 22, n. 2, p. 169–185, 2021.

FRIEDRICH, C. R. Principles for selecting the proper components for a green roof growing media. 2005.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. **HortScience**, v. 41, n. 5, p. 1276–1285, ago. 2006.

GIACOMELLO, E.; GASPARI, J. Hydrologic Performance of an Extensive Green Roof under Intense Rain Events: Results from a Rain-Chamber Simulation. **Sustainability**, v. 13, n. 6, p. 3078, jan. 2021.

GODOY, L. J. G. DE; VILLAS BOAS, R. L. **NUTRIÇÃO DE GRAMADOS**. . Em: 1º SIMPÓSIO SOBRE GRAMADOS - FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS DA UNIVERIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP). Botucatu - SP, 2003.

Disponível em:

<https://www.nutricaodeplantas.agr.br/site/downloads/nutricaogramados_godoy_villa_sboas.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024

HAIGH, S. K. Thermal conductivity of sands. **Géotechnique**, v. 62, n. 7, p. 617–625, jul. 2012.

HALMEMAN, M. C. R.; SOUZA, P. C. DE; CASARIN, A. N. Caracterização dos resíduos de construção e demolição na unidade de recebimento de resíduos sólidos no município de Campo Mourão-PR. **Revista Tecnológica**, p. 203–209, 2009.

HAMDHAN, I. N.; CLARKE, B. G. **Determination of Thermal Conductivity of Coarse and Fine Sand Soils**. . Proceedings apresentado em World Geothermal Congress. Bali, Indonesia, abr. 2010.

HANDRECK, K. A.; BLACK, N. D. **Growing media for ornamental plants and turf**. [s.l.] UNSW press, 2002.

HILLEL, D. THERMAL PROPERTIES AND PROCESSES. Em: **Encyclopedia of Soils in the Environment**. [s.l.] Elsevier, 2005. p. 156–163.

ITCG, I. DE T., Cartografia e Geologia do Paraná. **GeoPortal ITCG - Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná**. Disponível em: <<http://www.geo.pr.gov.br/ms4/itcg/geo.html>>. Acesso em: 4 mar. 2024.

JAMEI, E. et al. Review on the cooling potential of green roofs in different climates. **Science of The Total Environment**, v. 791, p. 148407, 15 out. 2021.

JIM, C. Y.; TSANG, S. W. Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. **Building and environment**, v. 46, n. 6, p. 1263–1274, 2011.

KADER, S. et al. Green roof substrates—A literature review. **Frontiers in Built Environment**, v. 8, 2022.

KAZEMI, M.; COURARD, L.; ATTIA, S. Water permeability, water retention capacity, and thermal resistance of green roof layers made with recycled and artificial aggregates. **Building and Environment**, v. 227, p. 109776, 1 jan. 2023.

KIM, S. W.; BROWN, R. D. Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. **Science of The Total Environment**, v. 779, p. 146389, 20 jul. 2021.

KIM, T.-H. et al. A Study on the Recycling of Detoxified Waste Asbestos. **Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute**, v. 8, n. 2, p. 161–166, 2020.

KIPPER, L. M.; CROSSETTI, G. L.; BECKER, R. C. **ESTUDO DO APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE ESPUMA RÍGIDA DE POLIURETANO NO ISOLAMENTO TÉRMICO DE PRODUTOS DE REFRIGERAÇÃO - NA BUSCA DA MANUFATURA SUSTENTÁVEL**. . Em: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Rio de Janeiro, RJ, 2008. Disponível em: <https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_tn_sto_077_543_11220.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2024

KLEPA, R. B. et al. Reuse of construction waste to produce thermoluminescent sensor for use in highway traffic control. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 250–258, 1 fev. 2019.

KUWAHARA, F. A. **FÓSFORO COMO ATENUADOR DOS EFEITOS DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA EM DIFERENTES ESPÉCIES DE GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS**. Mestrado em Agronomia—Presidente Prudente - SP: Universidade do Oeste Paulista - UNIOESTE, 2010.

LA ROCHE, P.; BERARDI, U. Comfort and energy savings with active green roofs. **Energy and buildings**, v. 82, p. 492–504, 2014.

LEITE, P. R. **Logística Reversa: Meio Ambiente E Competitividade**. [s.l.] Prentice Hall/Sp, 2009.

LI, D.; BOU-ZEID, E.; OPPENHEIMER, M. The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 5, p. 055002, maio 2014.

LIBERALESSO, T. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA CENTRO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**. Dissertação—Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

LINDSEY, R.; DAHLMAN, L. **Climate Change: Global Temperature**. National Oceanic and Atmospheric Administration, , 18 jan. 2023. Disponível em: <<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>>. Acesso em: 10 jan. 2024

LINTZ, R. C. C. et al. Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, p. 166–181, abr. 2012.

LIU, H. et al. Impacts of green roofs on water, temperature, and air quality: A bibliometric review. **Building and Environment**, v. 196, p. 107794, 1 jun. 2021.

LIU, K.; BASKARAN, B. Thermal performance of green roofs through field evaluation. 2003.

LOPES, D. A. R. **Análise do comportamento térmico de uma cobertura verde leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura**. Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental—São Carlos: Universidade de São Paulo, 10 set. 2007.

LÓPEZ-UCEDA, A. et al. Risk assessment by percolation leaching tests of extensive green roofs with fine fraction of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 36, p. 36024–36034, 1 dez. 2018.

LUBER, G.; MCGEEHIN, M. Climate Change and Extreme Heat Events. **American Journal of Preventive Medicine**, v. 35, n. 5, p. 429–435, 1 nov. 2008.

MACIVOR, J. S.; LUNDHOLM, J. Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 3, p. 407–417, mar. 2011.

MICKOVSKI, S. B. et al. Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs. **Ecological Engineering**, Soil Bio- and Eco-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability. v. 61, p. 706–714, 1 dez. 2013.

MILLER, A. P. R. R. **Análise do comportamento de substrato para retenção de água pluvial para coberturas verdes extensivas em Curitiba - PR**. Dissertação—Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, 28 out. 2014.

MILLER, C. Moisture management in green roofs. 2003.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 39–47, jan. 2018.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, É. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 57–71, 6 abr. 2009.

MOLINEUX, C. J.; FENTIMAN, C. H.; GANGE, A. C. Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K. **Ecological Engineering**, v. 35, n. 10, p. 1507–1513, 1 out. 2009.

MUNICÍPIO DE BLUMENAU. 1174. Lei Complementar 1174 2018 de Blumenau SC. . 2018.

MUNICÍPIO DE CANOAS. 5840. Lei Ordinária 5840 2014 de Canoas RS. . 2014.

MUNICÍPIO DE GOIÂNIA. 235. LC Nº 235, DE 28 DE DEZEMBRO DE 2012. . 2012.

MUNICÍPIO DE GUARULHOS. 6793. Lei Ordinária 6793 2010 de Guarulhos SP. . 2010.

MUNICÍPIO DE GUARULHOS. 7031. Lei Ordinária 7031 2012 de Guarulhos SP. . 2012.

MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE. 434. Lei Complementar 434/1999. . 1999.

MUNICÍPIO DE RIO DE JANEIRO. 35745. DECRETO Nº 35745 DE 6 DE JUNHO DE 2012. . 2012.

MUNICÍPIO DE SALVADOR. Decreto 25899 2015 de Salvador BA. . 2015.

MUNICÍPIO DE SALVADOR. 29100. Decreto 29100 2017 de Salvador BA. . 2017.

MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. 53889. Decreto 53889 2013 de São Paulo SP. . 2013.

MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. 55.994. DECRETO Nº 55.994 DE 10 DE MARÇO DE 2015. . 2015.

NARANJO, A. et al. Evaluation of Semi-Intensive Green Roofs with Drainage Layers Made Out of Recycled and Reused Materials. **Coatings**, v. 10, n. 6, p. 525, 29 maio 2020.

NASA. **Global Warming from 1880 to 2022**. National Aeronautics and Space Administration, , 12 jan. 2023. Disponível em:

<https://climate.nasa.gov/climate_resources/139/video-global-warming-from-1880-to-2022/>. Acesso em: 10 jan. 2024

NIACHOU, A. et al. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 7, p. 719–729, 1 set. 2001.

OBMIŃSKI, A. Asbestos waste recycling using the microwave technique – Benefits and risks. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 16, p. 100577, 1 dez. 2021.

OLIVEIRA, D. F. et al. DURABILIDADE DE COMPÓSITOS DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **REVISTA ELETRÔNICA DE MATERIAIS E PROCESSOS**, v. 1, n. 2, 2006.

OLIVEIRA, M. R. DE; BONETTO, N. C. F. REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Pesquisa E Extensão Oswaldo Cruz**, 2020.

OLIVIERI, F. et al. Experimental measurements and numerical model for the summer performance assessment of extensive green roofs in a Mediterranean coastal climate. **Energy and Buildings**, v. 63, p. 1–14, 2013.

OULDBOUKHITINE, S.-E.; BELARBI, R.; DJEDJIG, R. Characterization of green roof components: Measurements of thermal and hydrological properties. **Building and Environment**, v. 56, p. 78–85, 1 out. 2012.

PECK, S. W. et al. **GREENBACKS FROM GREEN ROOFS: FORGING A NEW INDUSTRY IN CANADA**. [s.l.] Canada Mortgage and Housing Corporation, 1999.

PENG, Z.; GARNER, B.; STOVIN, V. Two Green Roof Detention Models Applied in Two Green Roof Systems. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 27, n. 2, p. 04021049, 1 fev. 2022.

PENG, Z.; SMITH, C.; STOVIN, V. The importance of unsaturated hydraulic conductivity measurements for green roof detention modelling. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125273, 1 nov. 2020.

PÉREZ, G. et al. Use of rubber crumbs as drainage layer in green roofs as potential energy improvement material. **Applied Energy**, Energy Solutions for a Sustainable World - Proceedings of the Third International Conference on Applied Energy, May 16-18, 2011 - Perugia, Italy. v. 97, p. 347–354, 1 set. 2012.

PERINA, J. M.; TRANNIN, I. C. DE B. PROPOSTA PARA APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL GERADOS EM CANTEIROS DE OBRAS. **Revista SODEBRAS**, v. 14, n. 159, p. 192–197, mar. 2019.

PERUSSI, R.; VECCHIA, F. A. DA S. Análise do comportamento térmico de um sistema de cobertura verde utilizando plataformas de teste. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 7, n. 4, p. 225–236, 31 dez. 2016.

PESSOA, T. O. A. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA, ÍNDICE DE VAZIOS E TEOR DE UMIDADE EM PROPRIEDADES TÉRMICAS DE SOLOS**.

MESTRE EM CIÊNCIAS DE ENGENHARIA CIVIL—Rio de Janeiro, Brazil: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 15 set. 2006.

PETREJE, M. et al. Performance study of an innovative concept of hybrid constructed wetland-extensive green roof with growing media amended with recycled materials. **Journal of Environmental Management**, v. 331, p. 117151, 1 abr. 2023.

PIANELLA, A. et al. **Green roofs in Australia: review of thermal performance and associated policy development**. Proceedings of the Architectural Science Association Conference, Adelaide, Australia. **Anais...2016**. Disponível em: <<https://anzasca.net/wp-content/uploads/2016/12/81-1108-795-804.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2024

PINTO, T. D. P. **METODOLOGIA PARA A GESTÃO DIFERENCIADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO URBANA**. Tese—São Paulo: Universidade de São Paulo, 1999.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2020. Disponível em: <<https://www.R-project.org>>. Acesso em: 12 jan. 2024

RAIJ, B. VAN et al. **Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. , 1996. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8014593/mod_resource/content/1/Boletim_tecnico_100_pdf.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024

RIBEIRO, K. G. **Rendimento forrageiro e valor nutritivo do capim-tifton 85, sob diferentes doses de nitrogênio e idades de rebrota, e na forma de feno, com bovinos**. Tese (Doutorado em Zootecnia)—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 30 nov. 1999.

ROSENZWEIG, C.; GAFFIN, S.; PARSHALL, L. **Green Roofs in the New York Metropolitan Region Research Report**. Columbia University Center for Climate Systems Research: NASA Goddard Institute for Space Studies, 1 jan. 2006. Disponível em: <<https://pubs.giss.nasa.gov/abs/ro05800e.html>>.

ROWE, D. B.; MONTERUSSO, M. A.; RUGH, C. L. Assessment of Heat-expanded Slate and Fertility Requirements in Green Roof Substrates. **HortTechnology**, v. 16, n. 3, p. 471–477, 1 jan. 2006.

SAADATIAN, O. et al. A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 23, p. 155–168, 2013.

SAILOR, D. J.; HUTCHINSON, D.; BOKOVOY, L. Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 7, p. 1246–1251, 1 jan. 2008.

SANDOVAL, V. et al. Impact of the Properties of a Green Roof Substrate on its Hydraulic and Thermal Behavior. **Energy Procedia**, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015. v. 78, p. 1177–1182, 1 nov. 2015.

SANTAMOURIS, M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, v. 103, p. 682–703, 1 maio 2014a.

SANTAMOURIS, M. On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 100–113, 1 out. 2014b.

SANTAMOURIS, M. et al. On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. **Energy and Buildings**, Renewable Energy Sources and Healthy Buildings. v. 98, p. 119–124, 1 jul. 2015.

SANTAMOURIS, M. **Minimizing energy consumption, energy poverty and global and local climate change in the built environment: innovating to zero: casualties and impacts in a zero concept world**. Amsterdam: Elsevier, 2019.

SANTOS, D. V.; CABRAL, A. E. B. Análise técnica da reciclagem de resíduos de construção em canteiro de obras. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 363, 3 jul. 2020.

SANTOS, H. G. DOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5ª edição revista e ampliada ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, M. F. N. DOS et al. Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, n. 2, p. 57–57, 2011.

SANTOS, P. T. DA S. et al. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, v. 13, p. 161–174, mar. 2013.

SAVI, A. C.; TAVARES, S. F. Telhados verdes: uma análise da influência das espécies vegetais na retenção de água de chuva. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 7, n. 1, p. 50–67, 11 out. 2018.

SCHÄRER, L. A. et al. Limitations in using runoff coefficients for green and gray roof design. **Hydrology Research**, v. 51, n. 2, p. 339–350, 30 mar. 2020.

SCHMIDT, M. **INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO SUBSTRATO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADOS VERDES**. Dissertação—Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2020.

SCHWEITZER, O.; ERELL, E. Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 25–32, 2014.

SETTA, B. R. S. TELHADOS VERDES COMO POLÍTICAS PÚBLICAS AMBIENTAIS PARA O MUNICÍPIO DE VOLTA REDONDA – RJ. **Revista LABVERDE**, v. 8, n. 1, p. 13–35, 11 jul. 2017.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; KYUNG-HO, K. Green Roof for Stormwater Management in a Highly Urbanized Area: The Case of Seoul, Korea. **Sustainability**, v. 10, n. 3, p. 584, mar. 2018.

SHAO, B. et al. Influence of Temperature and Moisture Content on Thermal Performance of Green Roof Media. **Energies**, v. 14, n. 9, p. 2421, jan. 2021.

SILVA, F. J. DA; ROCHA, R. R. DA. Areia de reciclagem: Análise de viabilidade técnica. **Environmental Science & Technology Innovation - ISSN 2965-1158**, v. 1, n. 1, 21 set. 2022.

SOARES, R. G.; DE OLIVEIRA, P. L.; 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.

SOUSA, C. A. L. DE. REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA PRESERVAÇÃO DO MEIO AMBIENTE E REDUÇÃO DE CUSTOS. **Revista FT**, 30 nov. 2022a.

SOUSA, P. H. DE. O gerenciamento de resíduos de construção e demolição à luz da PNRS e legislações correlatas. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n. 12, 30 nov. 2022b.

SOUZA, H. A. DE; AMPARO, L. R.; GOMES, A. P. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em light steel framing. **Ambiente Construído**, v. 11, p. 113–128, dez. 2011.

SOUZA, R. O. L. D.; FERREIRA, M. L. S. S.; VASCONCELLOS, C. A. B. D. **TELHADO VERDE DE BAIXO INVESTIMENTO COMPOSTO POR PLANTAS MEDICINAIS E AROMÁTICAS**. Semioses. **Anais...** 6 abr. 2016. Disponível em: <<http://apl.unisuam.edu.br/revistas/index.php/Semioses/article/view/1017>>. Acesso em: 15 jan. 2024

STONE, B. et al. Climate Change Adaptation Through Urban Heat Management in Atlanta, Georgia. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 14, p. 7780–7786, 16 jul. 2013.

TAKEBAYASHI, H.; MORIYAMA, M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. **Building and Environment**, v. 42, n. 8, p. 2971–2979, 1 ago. 2007.

TAM, B. Y.; GOUGH, W. A.; MOHSIN, T. The impact of urbanization and the urban heat island effect on day to day temperature variation. **Urban Climate**, v. 12, p. 1–10, 1 jun. 2015.

TAMS, L.; NEHLS, T.; CALHEIROS, C. S. C. Rethinking green roofs- natural and recycled materials improve their carbon footprint. **Building and Environment**, v. 219, p. 109122, 1 jul. 2022.

TANG, X.; QU, M. Phase change and thermal performance analysis for green roofs in cold climates. **Energy and Buildings**, v. 121, p. 165–175, 1 jun. 2016.

TARNAWSKI, V.-R.; LEONG, W. H. THERMAL CONDUCTIVITY OF SOILS AT VERY LOW MOISTURE CONTENT AND MODERATE TEMPERATURES. **Transport in Porous Media**, v. 41, n. 2, p. 137–147, 2000.

THEODOSIOU, T. G. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. **Energy and buildings**, v. 35, n. 9, p. 909–917, 2003.

TIBÉRIO CARDOSO, G.; VECCHIA, F. Thermal Behavior of Green Roofs Applied to Tropical Climate. **Journal of Construction Engineering**, v. 2013, p. 1–7, 10 jan. 2013.

TORONTO. 492 Art. III. TORONTO MUNICIPAL CODE CH. 492: GREEN ROOFS. . 2017.

TSANG, E. Chinese University of Hong Kong to remove green roofs. Buildings Department Issues New Guidelines to Schools for Immediate Safety Checks. **South China Morning Post**, 2016.

VENIOS, X. et al. Grapevine Responses to Heat Stress and Global Warming. **Plants**, v. 9, n. 12, p. 1754, dez. 2020.

VICENTE-SERRANO, S. M. et al. A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? **Earth-Science Reviews**, v. 201, p. 102953, 1 fev. 2020.

VIEIRA, T. J.; FLEISCHFRESSER, L.; PRUDENTE, L. A. **COMPARAÇÃO DA VARIÇÃO DE TEMPERATURA INTERNA DE UM AMBIENTE REVESTIDO COM TELHADO VERDE E UM COM TELHADO CONVENCIONAL**. Anais do XIV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental. **Anais...** Em: XIV ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA AMBIENTAL. Brasília, Brasil: Editora Edgard Blücher, out. 2016. Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/24024>>. Acesso em: 15 jan. 2024

VILLAS BOAS, R. L. et al. **Tópicos atuais em Gramados**. . Em: 4° SIMPÓSIO SOBRE GRAMADOS - FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS DA UNIVERIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP). Botucatu - SP, 2008. Disponível em: <<https://infograma.com.br/wp-content/uploads/2015/11/topico1.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2024

WADZUK, B. M. et al. Evapotranspiration from a Green-Roof Storm-Water Control Measure. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 12, p. 995–1003, dez. 2013.

WANG, J. et al. Combining life cycle assessment and Building Information Modelling to account for carbon emission of building demolition waste: A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 3154–3166, 20 jan. 2018.

WANG, X.; LI, H.; SODOUDI, S. The effectiveness of cool and green roofs in mitigating urban heat island and improving human thermal comfort. **Building and Environment**, v. 217, p. 109082, 1 jun. 2022.

WHITTAKER, M. J. et al. Novel construction and demolition waste (CDW) treatment and uses to maximize reuse and recycling. **Advances in Building Energy Research**, v. 15, n. 2, p. 253–269, 4 mar. 2021.

WONG, J. K. W.; LAU, L. S.-K. From the 'urban heat island' to the 'green island'? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong. **Habitat International**, v. 39, p. 25–35, 1 jul. 2013.

WU, H. et al. Environmental impacts of cross-regional mobility of construction and demolition waste: An Australia Study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 174, p. 105805, 1 nov. 2021.

YAGHOUBIAN, N.; SREBRIC, J. Influence of plant coverage on the total green roof energy balance and building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 103, p. 1–13, 2015.

YANG, R. L. et al. ESTIMATIVA DA TAXA DE DESEMPENHO A PARTIR DA POTÊNCIA DE SAÍDA PARA UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM CURITIBA. **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**, 2020.

ZAKI, D. H.; AL-MUSAED, A.; KHALIL, A. **THERMAL EARTH INERTIA SUCH A SOURCE OF ENERGY FOR BIO-SUSTAINABLE HOUSE**. . Em: THE 2005 WORLD SUSTAINABLE BUILDING CONFERENCE. Tokyo, 2005. Disponível em: <<https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB3201.pdf>>

ZANDALINAS, S. I.; FRITSCHI, F. B.; MITTLER, R. Global Warming, Climate Change, and Environmental Pollution: Recipe for a Multifactorial Stress Combination Disaster. **Trends in Plant Science**, v. 26, n. 6, p. 588–599, 1 jun. 2021.

ZHANG, K. et al. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai, China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 169, n. 1–4, p. 101–112, out. 2010.

ZHAO, X. et al. Construction and demolition waste management in Australia: A mini-review. **Waste Management & Research**, v. 40, n. 1, p. 34–46, 1 jan. 2022.

ZHENG, X. et al. Green roof cooling and carbon mitigation benefits in a subtropical city. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 86, p. 128018, 1 ago. 2023.

APÊNDICE 1 – FORMULÁRIO DE PESQUISA (PÁGINA 1/3)



FORMULÁRIO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM TELHADOS VERDES COM ÊNFASE EM DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO

Pesquisador: Matheus Schmidt

Programa: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGETA)

Instituição: Universidade Federal do Paraná - UFPR em parceria com a Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE.

Introdução: Este formulário faz parte de uma pesquisa acadêmica e tem como objetivo coletar informações relevantes para a tese de doutorado acima mencionada. As informações fornecidas terão uso estritamente acadêmico e científico, sem quaisquer fins comerciais.

Destinatário: Robson Bieta, Sócio administrador da FUTURE RECICLAGEM INTELIGENTE, CNPJ: 18.633.812/0001-30. Localizada no Município de Cascavel - PR.

Perguntas:

1. Perfil da Empresa:

Por favor, descreva brevemente a história, missão, principais atividades e destaques da FUTURE RECICLAGEM INTELIGENTE.

A IDEIA DA FUTURE NASCEU MEDIANTE A IMPLANTAÇÃO DA POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS 12.305/2010), NESTE MOMENTO ESTAVA TERMINANDO DE CURSAR ENGENHARIA CIVIL NA UNIOESTE, E FRENTE AS DISPOSIÇÕES DA LEI, APROFUNDAMOS O ESTUDO DE VIABILIDADE DESSE TIPO DE EMPRENDIMENTO NA REGIAO.

MAIS TARDE NO ANO DE 2013 INICIAMOS O LICENCIAMENTO DA EMPRESA E EM 2015 INICIAMOS NOSSAS ATIVIDADES COMO SENDO A PRIMEIRA USINA DE RECICLAGEM DE RCD DEVIDAMENTE LICENCIADA NO OESTE DO PARANA (NAQUELE MOMENTO APENAS CURITIBA E LONDRINA POSSUAM EMPRESAS SEMELHANTES). COM FOCO PRINCIPAL NA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO, ESPECIALMENTE OS DA CLASSE A (CONAMA 307), PARA TRANSFORMAÇÃO EM AGREGADOS RECICLADOS (AREIA, PEDRISCO, BRITAS etc.), GANHOU FORÇA TAMBEM, AO LONGO DOS ANOS NO TRANSPORTE DE RESÍDUOS (LOCAÇÃO DE CACAMBAS) E DEMOLIÇÕES DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO



APÊNDICE 1 – FORMULÁRIO DE PESQUISA (PÁGINA 2/3)



(RESIDENCIAL, COMERCIAL E INDUSTRIAL), FORMANDO O LEQUE DE ATIVIDADES DA EMPRESA (RECICLAGEM, TRANSPORTE E DEMOLIÇÃO).

DURANTE OS PRIMEIROS ANOS DE OPERAÇÃO, VERIFICAMOS AS DIFICULDADES INERENTES A RECICLAGEM, COMO, SEPARAÇÃO DE RESÍDUOS, TRIAGEM E QUALIDADE DO PRODUTO FINAL, QUE SE DEVE DIRETAMENTE AOS PROCESSOS QUE O RESÍDUO ESTÁ SENDO SUBMETIDO. BASICAMENTE 90% DAS USINAS DO PAÍS REALIZAM A TRIAGEM DOS RESÍDUOS DE FORMA MANUAL (CATAÇÃO MANUAL – PESQUISAS SETORIAL ABRECON) NO CASO, ESTA ERA NOSSA REALIDADE NOS PRIMEIROS ANOS, NO ENTANTO PASSAMOS A DESENVOLVER UM MÉTODO, QUE RESULTOU NA CRIAÇÃO DE UMA PLANTA DE TRIAGEM (EQUIPAMENTOS QUE EM CONJUNTO REALIZAM O PENEIRAMENTO E A SELEÇÃO DE RESÍDUOS DE MANEIRA AUTOMATIZADA) PROPORCIONANDO ASSIM, UM ENORME GANHO DE PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DO PRODUTO FINAL.

TODOS OS PROCESSOS DA EMPRESA PASSARAM POR UM APERFEIÇOAMENTO E NO ANO DE 2022 INSCREVEMOS NOSSA EMPRESA NO ÚNICO PROGRAMA DE QUALIDADE NACIONAL, PROMOVIDO PELA ASSOCIAÇÃO QUE REPRESENTA O SETOR NACIONALMENTE (ABRECON.ORG.BR) E OBTIVEMOS A MAIOR NOTA DE TODAS AS USINAS DO PAÍS, OU SEJA, DESDE ENTÃO A FUTURE RECICLAGEM INTELIGENTE, FIGURA COMO SENDO A MELHOR USINA DE RECICLAGEM DO PAÍS (PRIMEIRA COLOCADA NO RANKING DAS USINAS) O QUE MUITO NOS ORGULHA. ATUALMENTE RECEBEMOS DIVERSAS UNIVERSIDADES DA REGIÃO PARA VISITAS TÉCNICAS, PREFEITURAS, SECRETARIAS DE ESTADO, ENFIM, MUITOS BUSCAM NOSSA EMPRESA COMO REFERÊNCIA PARA MODELOS EM OUTRAS CIDADES. DISPOMOS DE UMA GRANDE EXPERIÊNCIA NA ÁREA, ENFRENTANDO DESAFIOS TÉCNICOS E MERCADOLÓGICOS, POSSUIMOS MAIS DE 6 MIL CLIENTES ATENDIDOS, DEMOLIMOS MAIS DE 100 MIL M2 E RECICLAMOS MAIS DE 350 MIL TONELADAS DE RESÍDUOS DE OBRA. MITIGANDO IMPACTOS, POUPIANDO EMISSÕES E EVITANDO A PROLIFERAÇÃO DE ZOONOSES COM O COMBATE DO DESCARTE IRREGULAR.

2. Potencial de Resíduos de Construção:

Entre os diversos resíduos de construção gerenciados pela sua empresa, qual você identifica como tendo um maior potencial de reaproveitamento, especialmente como componente para substratos em telhados verdes? Por favor, detalhe aspectos relacionados à obtenção, composição e valor comercial desse resíduo.

O MAIS APLICÁVEL DEVE SER O PÓ RECICLADO (AREIA RECICLADA), COMUMENTE SE UTILIZAM OS DOIS NOMES POR CONTA DA GRANULOMETRIA,

**APÊNDICE 1 – FORMULÁRIO DE PESQUISA
(PÁGINA 3/3)**



ALGUMAS USINAS PRODUZEM BEM FINO E OUTRAS PRODUZEM MAIS ESPESSE, COMO NOSSO CASO. TODOS OS AGREGADO RECICLADOS POSSUEM ALTA APLICABILIDADE PRINCIPALMENTE NAS ATIVIDADES PRIMARIAS DA CONSTRUÇÃO CIVIL, BASES, SUBBASES, PREENCHIMENTOS, FORRAÇÕES, ENTRE OUTROS, EMBORA EXISTA UM CERTO RECEIO, POR VEZES INCOERENTE, EM RELAÇÃO AO USO DA AREIA RECICLADA PARA FINS ESTRUTURAIS, O QUE PARCIALMENTE LIMITA SUA COMERCIALIZAÇÃO. PRA NÓS ESTA APLICACAO EM SUBSTRATOS DE TELHADOS VERDES FOI UMA NOVIDADE PARA A EMPRESA.

NOSSO AGREGADO MIUDO E PROVENIENTE DA RECICLAGEM DE CERAMICAS, CONCRETOS, E ARGAMASSAS, EVITANDO-SE AO MAXIMO A CONTAMINAÇÃO POR OUTRAS SUBSTÂNCIAS (ORGANICAS OU INORGANICAS). DESTA FORMA CONSEGUIMOS MANTER MUITAS CARACTERISTICAS MINERALOGICAS DO MATERIAL EXTRAIDO DA NATUREZA. UMA DAS VANTAGENS JÁ SE DA PELO REAPROVEITAMENTO E NÃO EXTRACAO DOS MESMOS OUTRA VANTAGEM SIGNIFICATIVA SE DA PELO CUSTO, QUE CHEGA A SER 50% MENOR DO QUE O MATERIAL EXTRAIDO DE JAZIDAS NATURAIS. NO CASO EM CASCAVEL ESSE MATERIAL E COMERCIALIZADO POR 55,00/M³.

Declaração de Consentimento:

Eu, Robson Biela, na qualidade de Sócio administrador da FUTURE RECICLAGEM INTELIGENTE, concordo e autorizo a utilização das informações fornecidas neste formulário para fins de pesquisa acadêmica. Estou ciente de que este formulário pode ser anexado aos apêndices da tese de Matheus Schmidt, que estará disponível para consulta pública. Reconheço que as informações aqui prestadas são verdadeiras e concordo com sua divulgação no contexto acadêmico.

Cascavel, 11/01/2024

Robson Biela

Sócio Administrador

FUTURE RECICLAGEM INTELIGENTE