



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO'
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOÃO VICTOR CORRÊA ARAÚJO
THIAGO PEARCE SOUSA BATISTA

**Telhado verde modular de baixo custo: a relevância e perspectiva deste
sistema construtivo para edificações residenciais em São Luís – MA**

São Luís – MA

2025

JOÃO VICTOR CORRÊA ARAÚJO
THIAGO PEARCE SOUSA BATISTA

**Telhado verde modular de baixo custo: a relevância e perspectiva deste
sistema construtivo para edificações residenciais em São Luís – MA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil, à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Maranhão.

Orientador(a): Prof^a. Dr^a. Alice Jadneiza
Guilherme de Albuquerque Almeida

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Corrêa Araújo, João Victor.

Telhado verde modular de baixo custo : a relevância e perspectiva deste sistema construtivo para edificações residenciais em São Luís MA / João Victor Corrêa Araújo, Thiago Pearce Sousa Batista. - 2025.

72 f.

Orientador(a): Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque Almeida.

Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - Ma, 2025.

1. Telhados Verdes. 2. Sustentabilidade. 3. Baixo Custo. 4. Resíduos da Construção Civil. 5. Gestão de Águas Pluviais. I. Albuquerque Almeida, Alice Jadneiza Guilherme de. II. Pearce Sousa Batista, Thiago. III. Título.

JOÃO VICTOR CORRÊA ARAÚJO
THIAGO PEARCE SOUSA BATISTA

**Telhado verde modular de baixo custo: a relevância e perspectiva deste
sistema construtivo para edificações residenciais em São Luís – MA**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso
de Bacharelado em Engenharia Civil,
apresentado como requisito para Graduação
em Bacharelado em Engenharia Civil, pela
Universidade Federal do Maranhão.

Aprovado em: ____ / ____ /2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Alice Jadneiza Guilherme Albuquerque Almeida
Universidade Federal do Maranhão – UFMA
Orientadora

Profa. Dra. Solange da Silva Nunes Nuni
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

Prof. Dr. Luttemberg Ferreira de Araújo
Universidade de Pernambuco - UPE

RESUMO

O rápido desenvolvimento urbano e a correspondente impermeabilização do solo têm provocado impactos ambientais significativos, como ilhas de calor, aumento da temperatura local e dificuldades na gestão das águas pluviais. Nesse cenário, os telhados verdes têm surgido como uma alternativa sustentável para mitigar esses impactos, principalmente em cidades como São Luís–MA, onde o clima quente e úmido intensifica os desafios urbanos. O objetivo principal deste estudo é analisar a viabilidade técnica e financeira de um telhado verde modular de baixo custo, utilizando materiais reciclados e resíduos da construção civil como material da camada drenante, com o intuito de diminuir os impactos no meio ambiente e promover a sustentabilidade em construções residenciais. O método implementado envolveu a criação de um protótipo de telhado verde modular, utilizando garrafas PET para a estrutura, RCC para a camada de drenagem e espécies de plantas adequadas ao clima local. O protótipo de telhado verde foi testado durante o período chuvoso da cidade de São Luís, avaliando a taxa de retenção de água e comparando-o com telhados tradicionais. Para o estudo quantitativo, foram captadas e analisadas a vazão de projeto e a eficiência do sistema, enquanto o estudo qualitativo levou em conta documentos técnicos e políticas públicas relacionadas. Os resultados indicaram que o telhado verde modular gerou uma taxa de retenção média de águas pluviais em chuvas de baixa a média intensidade no valor de 52,7%, mostrando bom potencial para diminuir o escoamento superficial e ajuda a reduzir as inundações em períodos chuvosos. Além disso, foi evidente a viabilidade da utilização de RCC como material de drenagem, em comparação aos outros materiais utilizados na camada drenante. O estudo da viabilidade econômica demonstrou que o custo por metro quadrado do protótipo era inferior ao dos sistemas de telhado verde tradicionais, realçando o seu potencial, particularmente em comunidades de baixos rendimentos. Por fim, o estudo verificou que a cobertura verde modular de baixo custo é uma opção eficiente e sustentável para edifícios residenciais em São Luís.

Palavras-chave: Telhados verdes, sustentabilidade, baixo custo, resíduos da construção civil, gestão de águas pluviais.

ABSTRACT

The rapid urban development and corresponding soil sealing have caused significant environmental impacts, such as heat islands, increased local temperatures and difficulties in managing rainwater. In this scenario, green roofs have emerged as a sustainable alternative to mitigate these impacts, especially in cities like São Luís-MA, where the hot and humid climate intensifies urban challenges. The main objective of this study is to analyze the technical and financial feasibility of a low-cost modular green roof, using recycled materials and construction waste as the drainage layer material, with the aim of reducing environmental impacts and promoting sustainability in residential buildings. The approach implemented involved creating a prototype modular green roof, using PET bottles for the structure, RCC for the drainage layer and plant species suitable for the local climate. The green roof prototype was tested during the rainy season in the city of São Luís, assessing the water retention rate and comparing it with traditional roofs. For the quantitative study, the design flow rate and efficiency of the system were captured and analyzed, while the qualitative study took into account technical documents and related public policies. The results indicated that the modular green roof generated an average rainwater retention rate in low to medium intensity rainfall of 52.7%, showing good potential for reducing surface runoff and helping to reduce flooding in rainy periods. In addition, the feasibility of using RCC as a drainage material was evident, compared to the other materials used in the drainage layer. The economic feasibility study showed that the cost per square meter of the prototype was lower than that of traditional systems, highlighting its potential, particularly in low-income communities. Finally, the study found that the low-cost modular green roof is an efficient and sustainable option for residential buildings in São Luís.

Keywords: Green roofs; sustainability; low-cost; civil construction waste; rainwater management.

AGRADECIMENTOS

Por João Victor

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais por sempre me ajudarem nos momentos mais difíceis durante todo o meu caminho universitário, contribuindo principalmente quando me encontro em episódios de estafa mental.

Agradeço também ao professor doutor Márcio José Celeri por ter me orientado como bolsista de iniciação científica em seus projetos de resíduos sólidos desenvolvidos juntamente aos discentes do Laboratório de Extensão, Pesquisa e Ensino em Geografia, local na qual consegui entender, compreender e também aplicar meus conhecimentos absorvidos sobre descarte irregular de resíduos da construção civil e também sobre seu potencial de reutilização e reciclagem.

Agradeço a professora doutora Alice Jadneiza por ter nos orientado durante todo o percurso de desenvolvimento desta pesquisa, sempre explicando e aconselhando com cautela e precisão itens que poderíamos escrever e desenvolver com melhor qualidade possível.

Ainda agradeço ao meu grupo de amigos mais próximos que formei durante o BICT, André, Racib, Elpídio e Charlene por sempre darem conselhos e me ajudarem nos meus momentos em que não conseguia desenvolver os textos desta pesquisa, e também por sempre me colocarem para cima quando estou em momentos ruins.

Por Thiago Pierce

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa não apenas o encerramento de uma importante etapa acadêmica, mas também a concretização de um sonho que só foi possível com o apoio de muitas pessoas especiais.

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, sabedoria e perseverança concedidas ao longo desta jornada.

À minha família, em especial aos meus pais, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos, pelo incentivo constante e por acreditarem em mim mesmo nos momentos mais difíceis. Sem vocês, nada disso teria sido possível.

A minha orientadora, Alice, pela dedicação, paciência, disponibilidade e pelas valiosas orientações que contribuíram imensamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do curso, por compartilharem seus conhecimentos com excelência e por contribuírem para minha formação acadêmica e profissional.

Aos colegas e amigos que estiveram presentes durante a graduação, pela parceria, troca de experiências e pelos momentos de descontração que tornaram essa caminhada mais leve e significativa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a construção deste trabalho e para o meu crescimento ao longo da graduação, o meu mais sincero muito obrigado.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	JUSTIFICATIVA.....	13
3	OBJETIVOS.....	16
	3.1 Objetivo geral	16
	3.2 Objetivos específicos	16
4	REFERENCIAL TEÓRICO	16
	4.1 Telhados verdes	16
	4.2 Contexto histórico.....	19
	4.3 Benefícios dos telhados verdes	24
	4.3.1 Redução de temperatura.....	24
	4.3.2 Produção de alimentos	24
	4.3.3 Eficiência energética.....	25
	4.3.4 Biodiversidade.....	26
	4.4 Composição dos telhados verdes	27
	4.4.1 Laje	27
	4.4.2 Membranas impermeabilizantes	27
	4.4.3 Barreira contra raízes	28
	4.4.4 Camada de drenagem	28
	4.4.5 Camada filtrante.....	28
	4.4.6 Camada vegetal	28
	4.5 Tipos de telhado verde	29
	4.5.1 Telhados verdes extensivos	29
	4.5.2 Telhados verdes intensivos	30
	4.5.3 Telhados verdes semi-intensivos.....	31
	4.6 Legislações e políticas públicas.....	32
	4.6.1 Legislações e políticas públicas a nível mundial	32
	4.6.2 Legislações e políticas públicas no Brasil	33
	4.7 Gerenciamento de águas pluviais	34
	4.8 Resíduos da construção civil	37
5	METODOLOGIA.....	40
	5.1 Análise granulométrica do RCC	42
	5.2 Cálculo de vazão de águas pluviais.....	44

5.2.1 Vazão de projeto	44
5.2.2 Coeficiente de escoamento superficial	45
5.3 Confeção de unidade experimental – realização do protótipo	47
5.4 Caracterização das camadas da unidade experimental.....	48
5.4.1 Camada drenante.....	48
5.4.2 Filtro	49
5.4.3 Substrato vegetal	49
5.4.4 Vegetação	49
6 RESULTADOS.....	52
6.1 Análise da faixa granulométrica da amostra de RCC.....	52
6.2 Análise da Eficiência do Telhado Verde Modular de Baixo Custo	54
6.2.1 Taxa de Retenção de Água Pluvial	54
6.2.2 Comparativo com Telhados Convencionais	59
6.3 Viabilidade Econômica: Comparativo de Custos.....	60
6.3.1 Custo por m ² do Protótipo Modular	60
6.3.2 Comparativo com Outros Sistemas de Telhado Verde	61
6.4 Contribuição para o Manejo de Águas Pluviais	62
6.4.1 Redução do Escoamento Superficial.....	63
7 CONCLUSÃO	65
8 REFERÊNCIAS	67

LISTA DE ABREVIATURAS

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

DMC - Dimensão Máxima Característica

EUA - Estados unidos da América

IPTU - Imposto Predial e Territorial Urbano

PNMA - Política Nacional do Meio Ambiente

RCC - Resíduos da Construção Civil

TCA - termo de compensação ambiental

UV - Ultra violeta

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de telhado verde	17
Figura 2 - Sod Houses.....	19
Figura 3 - Zigurate Etemenanki.....	20
Figura 4 - Jardins Suspensos da Babilônia, Mesopotâmia	21
Figura 5 - Terraço jardim da Villa Savoye	23
Figura 6 - Composição dos telhados verdes	27
Figura 7 - Sede do Sistema Fecomércio-RS	30
Figura 8 - Telhado verde intensivo em uma empresa privada em Chicago.	31
Figura 9 - Usina fixa de reciclagem de RCC em São Luís/MA.....	39
Figura 10 A - RCC triturado manualmente	42
Figura 10 B - Amostra de RCC triturado	42
Figura 11 A - Etapa de pesagem da amostra de RCC triturado	43
Figura 11 B - Etapa de peneiramento do RCC triturado	43
Figura 13 - Resultado após o peneiramento mecânico da amostra de RCC	43
Figura 14 - Superfície plana.....	45
Figura 15 - Pluviômetro construído por garrafa pet.	46
Figura 16 - Esquema de montagem dos módulos de telhado verde de baixo custo.	47
Figura 17 - Estrutura de bambu para o telhado verde.	48
Figura 18 A - Telhado verde modular de baixo custo.....	51
Figura 18 B - Telhado verde modular de baixo custo.....	51
Figura 19 - sistema de armazenamento da água da chuva	51

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Faixa granulométrica da amostra de RCC	53
Gráfico 2 - dados registrados pelo pluviômetro.....	54
Gráfico 3 - Escoamento de águas pluviais do telhado verde	55
Gráfico 4 - Comparativo de custo de telhados verdes.	62

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos RCC de acordo com a CONAMA nº 307	38
Tabela 2 - Composição da vegetação do telhado verde.....	46
Tabela 3 - Resultados da análise granulométrica.....	47
Tabela 4 - Valores da taxa de escoamento média apresentados pelos estudos selecionados em eventos de precipitação natural.....	55
Tabela 5 - Materiais utilizados para montagem do telhado verde.....	57
Tabela 6 - Custo necessário para implementar o protótipo.....	58

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população mundial tem imposto desafios significativos às áreas urbanas, especialmente no que tange à habitação e à preservação ambiental. A expansão das cidades, em muitos casos desordenada, tem promovido a substituição progressiva de zonas verdes — essenciais para o bem-estar humano e o equilíbrio ecológico — por superfícies impermeáveis, como as estruturas de concreto. Essa dinâmica tem levado à redução desses espaços naturais no cotidiano urbano, agravada por dificuldades financeiras e administrativas na manutenção e ampliação de infraestruturas verdes.

No contexto brasileiro, os impactos da urbanização são particularmente evidentes. O crescimento populacional tem resultado em problemas ambientais severos, como o desmatamento, a poluição do ar e da água, e o aumento de eventos climáticos extremos. Entre as consequências mais frequentes estão as enchentes, a intensificação das ilhas de calor e o agravamento do efeito estufa, todos com efeitos diretos sobre a qualidade de vida da população. As inundações, por exemplo, afetam não apenas a mobilidade urbana, mas também causam prejuízos materiais e perdas humanas, além de contribuírem para a contaminação da água com resíduos orgânicos e agentes patogênicos.

A eficiência dos sistemas de drenagem urbana também se mostra insuficiente diante desse cenário. Muitas cidades enfrentam limitações técnicas e estruturais para captar, separar e tratar adequadamente as águas pluviais antes de seu descarte em corpos hídricos. Segundo Reda e Daraia (2017), a drenagem urbana deve ser planejada para controlar o escoamento das chuvas e reduzir os riscos de alagamentos. No entanto, a impermeabilização do solo, típica das cidades modernas, intensifica efeitos colaterais como o aumento da temperatura ambiente, a redução da umidade e a elevação da demanda por climatização artificial, que, por sua vez, acentua a emissão de gases de efeito estufa.

Nesse contexto, os telhados verdes apresentam-se como uma alternativa promissora. Embora sua utilização remonte a séculos passados, no Brasil essa prática ainda é relativamente recente, mas vem se consolidando gradativamente. De acordo com Savi (2012), as coberturas verdes oferecem benefícios múltiplos, como a melhoria do microclima, o aumento do conforto térmico de edificações e a redução das ilhas de calor urbanas. Além disso, atuam como filtros naturais, contribuindo para

a purificação tanto da água da chuva quanto do ar, com reflexos positivos na qualidade ambiental.

A implementação de uma cobertura verde, no entanto, exige planejamento criterioso. Freitas (2013) ressalta que é necessário considerar as especificidades de cada edificação, selecionando adequadamente os materiais, a vegetação e avaliando a capacidade de carga da estrutura. Todas as etapas — da escolha dos insumos às técnicas construtivas — devem ser cuidadosamente avaliadas para que se garantam a eficiência, a segurança e os objetivos de sustentabilidade e estética previstos no projeto.

2 JUSTIFICATIVA

Em um cenário em que as preocupações com o clima e o ambiente se tornam cada vez mais graves, faz sentido realizar uma investigação aprofundada sobre técnicas de construção mais ecológicas. Neste contexto, os telhados verdes tornaram-se uma opção razoável, uma vez que podem reduzir as temperaturas no interior e no exterior dos edifícios ao atuar como um protetor biológico, absorvendo dióxido de carbono e liberando oxigênio, reduzindo a poluição do ar e ajudando os sistemas de drenagem urbana.

Aguiar e Fedrizzi (2010) destacam que os telhados verdes proporcionam diversos benefícios, como a redução no custo da energia, o prolongamento da vida útil do telhado e a melhoria estética, resultam em vantagens pessoais ou financeiras para os proprietários de edifícios e empreendedores individualmente.

Como resultado, o telhado verde pode ser uma alternativa para reduzir as variações de temperatura. Como camada de isolamento térmico, este tipo de cobertura cria um ambiente interior mais estável e confortável, tanto no verão como no inverno. As coberturas verdes oferecem outros benefícios para além do controle térmico:

1. Redução significativa do consumo de energia elétrica, especialmente relacionada ao uso de centrais de ar-condicionado.
2. Manter as temperaturas internas mais amenas, diminuindo a necessidade de refrigeração artificial, proporcionando economia de energia e redução das emissões de carbono associadas.

3. Minimizar as ilhas de calor urbanas, a vegetação dos telhados absorve a energia solar e evapora a água, resfriando assim a temperatura ambiente e reduzindo os efeitos das ilhas de calor.
4. Ajuda na gestão de águas pluviais, minimizando o risco de inundações ao absorver e reter parte da água da chuva.

A disseminação do sistema de telhado verde no Brasil tem sido observada há algum tempo, com um crescimento mais expressivo na região sul do país. Entretanto, na região Norte, sua utilização ainda é incipiente. Diante desse cenário, esta pesquisa ressalta a importância de se realizar um estudo sobre a implantação de um sistema de telhado verde no município de São Luís - MA, considerando um sistema construtivo que se adapte ao clima, às plantas e aos materiais disponíveis na região.

De acordo com Pinheiro e Santos (2025), estudos sobre as mudanças climáticas no estado do Maranhão mostram uma tendência forte e estável de aquecimento das temperaturas nas últimas décadas; na qual toda a área apresentou uma tendência significativa de aquecimento, que se destaca mais claramente na região leste, onde, nos últimos 60 anos, foi observado um aumento geral de +1,5 °C. O estado também apresentou um aumento geral da temperatura média anual de +0,9 °C nos últimos 60 anos de medições.

Os autores supracitados ainda explicam que os dados analisados demonstram uma tendência de aquecimento a longo prazo que vai além das oscilações climáticas naturais, indicando assim os efeitos das mudanças climáticas; o aumento da temperatura não tem apenas um efeito climático local, mas também uma profunda influência no modo de vida das sociedades e dos ecossistemas na área afetada. O aumento da temperatura do ar observado nos últimos sessenta anos é uma evidência clara do aumento dos efeitos climáticos no Maranhão, o que exige medidas de adaptação e mitigação para combater tais eventos (Pinheiros, Santos, 2025).

Um fator importante a considerar é a adequação do material utilizado na camada de drenagem, sendo o agregado reciclado uma alternativa aos RCC (Resíduos da Construção Civil). É importante ressaltar que o município apesar de possuir um aterro sanitário adequado e apropriado para esses resíduos de construção, o Centro Ambiental da Ribeira, ainda há a prática de descarte irregular desses resíduos na região. Logo, a utilização de agregados reciclados na camada de

drenagem da cobertura verde pode ser uma solução ambientalmente responsável e sustentável para a região.

O tema da pesquisa surgiu em decorrência do aumento significativo da temperatura no município de São Luís, Maranhão, ao longo dos anos. Esse fenômeno se deve ao processo de urbanização, que eliminou as áreas verdes das cidades com o concreto e o asfalto. Comparadas às áreas verdes, essas superfícies são mais capazes de absorver e reter o calor. O arrefecimento provocado pelo vento no município diminuiu como resultado dessas mudanças e da densificação da população. Neste contexto, a investigação visa responder aos desafios relacionados com a sustentabilidade, com o objetivo de reduzir o consumo de energia para proporcionar conforto ambiental e melhorar a qualidade de vida.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Apresentar e fomentar a adoção da técnica de telhados verdes como um método construtivo eficaz.

3.2 Objetivos específicos

- Criar um protótipo de telhado verde de baixo custo de 1m² utilizando garrafas pet como parte da estrutura;
- Analisar a viabilidade do RCC como material para a camada drenante do telhado verde, com objetivo de diminuir o descarte irregular desse material;
- Comparar a eficiência do telhado verde de baixo custo em relação aos telhados verdes convencionais em termos de retenção e escoamento de águas pluviais;
- Comparar o custo de implementação do protótipo;

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Telhados verdes

O telhado verde ecológico, também conhecido como telhado ecológico, cobertura vegetal, eco telhado, é um tipo de cobertura que permite o crescimento de vegetação sobre a estrutura de uma edificação, seja por meio do cultivo de plantas ornamentais ou de hortaliças, podendo ser instalados tanto em lajes inclinadas quanto em lajes planas impermeabilizadas. Além de oferecer benefícios arquitetônicos e estéticos, essa técnica proporciona vantagens ambientais significativas (Figura 1).

Figura 1 - Exemplo de telhado verde



Fonte: Brears (2023)

Apesar do telhado verde possuir algumas variações, este tipo cobertura é constituído por seis componentes: camada impermeabilizante, camada drenante, camada filtrante, solo e substrato, membrana de proteção contra raízes e vegetação (Araújo apud Silva, 2011).

Segundo Silva (2011) O telhado verde é um sistema construtivo que envolve a criação de uma cobertura vegetal composta por grama ou plantas. Essa técnica pode ser aplicada em lajes ou sobre telhados convencionais, proporcionando benefícios significativos de conforto térmico e acústico nos ambientes internos. O telhado verde desempenha o papel de ampliar as áreas verdes urbanas, contribuindo para a melhoria do meio ambiente e a redução do fenômeno conhecido como "ilha de calor" (Silva, 2011).

Esta técnica serve múltiplos objetivos, incluindo a melhoria dos ambientes térmicos interiores e exteriores, a retenção de águas pluviais para reduzir o risco de inundações na comunidade, a melhoria da qualidade do ar local, a redução do impacto das ilhas de calor em áreas com baixa densidade de vegetação, a viabilização da

agricultura urbana e a promoção da propagação da fauna e flora nativas, entre outros benefícios.

Em contrapartida, os benefícios de interesse público, como a redução e retenção do escoamento de águas pluviais, a mitigação dos efeitos das ilhas de calor e o estímulo à biodiversidade e aos habitats naturais, devem incentivar a adoção de políticas urbanas voltadas para a implementação de telhados verdes pelas autoridades locais. Isso, por sua vez, culmina em uma melhoria da qualidade de vida e do ambiente.

A Lei 6938, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), foi promulgada em 1981 e tem servido de base para o tratamento do planejamento e das políticas ambientais no direito ambiental brasileiro. Essa legislação é baseada em vários princípios, entre eles o direito à sadia qualidade de vida, a natureza como bem de uso comum, a proteção e prevenção ambiental e o desenvolvimento sustentável. Estes princípios orientam a criação e implementação de políticas de proteção e preservação do ambiente, assegurando o equilíbrio entre o desenvolvimento socioeconômico e a conservação dos recursos naturais.

De acordo com Fernandes (apud Rangel, 2015) a procura de novas técnicas de construção responsáveis e sustentáveis tornou-se uma prioridade. A cobertura verde surgiu como um contributo valioso neste domínio, oferecendo uma variedade de benefícios quando utilizada corretamente em ambientes urbanos. Esta prática pretende reduzir os efeitos ambientais prejudiciais causados pela urbanização, que alteram o microclima das cidades. As coberturas verdes ajudam a regular o ambiente, a melhorar a qualidade do ar, a aumentar a biodiversidade nas cidades e, em última análise, a valorizar os imóveis.

Segundo a ABNT NBR 15575-5:2013, norma que estabelece os requisitos e critérios de desempenho exigidos dos sistemas de coberturas para edificações habitacionais, os sistemas de cobertura de edifícios residenciais cumprem funções importantes que vão para além da proteção dos ocupantes contra a chuva e o sol. Asseguram um ambiente seguro e confortável, essencial para manter a saúde e o bem-estar dos utilizadores. Estes sistemas desempenham também um papel importante na proteção estrutural do edifício, evitando danos causados pelas intempéries e garantindo a integridade das estruturas subjacentes.

A referida norma ainda cita que os sistemas de cobertura têm o maior impacto na carga térmica transmitida aos compartimentos porque são a parte do edifício

residencial mais exposta à radiação solar direta. Isto é especialmente verdade para habitações de um só piso e para o último andar de casas ou edifícios geminados. Isto tem um impacto direto no conforto térmico dos utilizadores, bem como no consumo de energia necessário para o funcionamento dos sistemas de ventilação forçada, de ar condicionado artificial e de ventilação forçada. Além disso, os sistemas de cobertura interagem com outros sistemas que devem ser previstos no projeto, como as instalações hidrossanitárias, os sistemas de proteção contra o raio e os sistemas de isolamento térmico, uma vez que estão totalmente integrados nos edifícios de habitação.

4.2 Contexto histórico

Embora seja um tópico de grande relevância e discussão na atualidade, existem evidências na história da utilização de coberturas verdes por civilizações antigas. Os primeiros registros das coberturas verdes, as Sod houses, foram durante o período de 10.000 – 5.000 a.C. por povos do mesolítico; é um tipo de estrutura extremamente barato e acessível, na qual se tornou quase universal em toda Escandinávia no início do século XVIII e sendo gradualmente abandonado ao longo do século XIX. Devido à presença de camadas de substrato mais leves e ao cultivo de plantas que requerem menos rega e manutenção, as Sod houses (Figura 2) são as precursoras dos telhados verdes "extensivos".

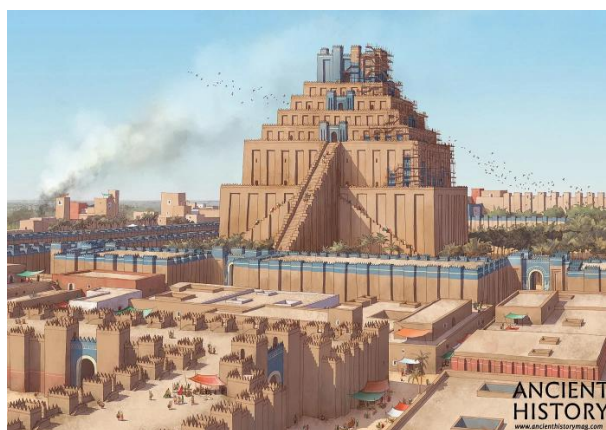
Figura 2 - Sod Houses



Fonte: Hoffart (2022).

A origem dos telhados verdes remonta a tempos antigos, especificamente por volta de 600 a.C., na antiga Mesopotâmia, localizada na região atual do Iraque. As estruturas que abrigavam esses jardins suspensos eram conhecidas como zigurates, sendo o mais famoso deles o Hoffart (Figura 3), localizado na Babilônia, que possuía 91 metros de altura e uma base de 91 por 91 metros. O zigurate mais bem preservado dos antigos é o de Nanna, na antiga cidade de Ur.

Figura 3 - Zigurate Etemenanki



Fonte: <https://www.worldhistory.org/image/11755/recreation-of-the-etemenanki-in-babylon/>

De acordo com Blanco (apud Osmundson 1999) os zigurates da antiga Mesopotâmia foram a primeira referência histórica ao uso de jardins acima do nível do solo, datando aproximadamente de 600 a.C. Os zigurates, descrito segundo o autor, seriam como imponentes estruturas piramidais escalonadas construídas em pedra, situadas nos pátios dos templos das principais cidades. Existem evidências arqueológicas que indicam a presença de árvores e arbustos plantados nos degraus das pirâmides, tendo como finalidade amenizar a ascensão pelas extensas escadarias em meio ao clima abrasador da planície babilônica (Blanco, 2011).

Durante o governo do rei Nabucodonosor II na Mesopotâmia, há 2.700 anos, foram desenvolvidas impressionantes obras de arquitetura paisagística, incluindo os "Jardins Suspensos da Babilônia". Acredita-se que este jardim é uma das Sete Maravilhas do Mundo Antigo e foi criado como uma impressionante demonstração de engenharia e design urbano. É também uma das primeiras aparições registradas de jardins suspensos.

Figura 4 - Jardins Suspensos da Babilônia, Mesopotâmia



Fonte: Fenollós (2023)

Estes jardins distinguiam-se pela preponderância dos elementos arquitetônicos sobre os naturais, e eram designados por telhados verdes porque os palácios tinham telhados planos decorados com plantas e flores. Os jardins seguiam o padrão ortogonal e retangular típico dos edifícios e cidades mesopotâmicas. Eram estruturados segundo princípios arquitetônicos que permitiam o seu escalonamento e a sua ligação por rampas e escadas.

É possível encontrar diversas referências ao uso de telhados verdes ao longo dos séculos em diferentes culturas. Na Roma Antiga, entre os anos 371 e 287 a.C., o botânico e filósofo greco-romano descreveu o cultivo da espécie *Sempervivum tectorum* sobre paredes e telhados ao longo da costa do Mediterrâneo. Destacam-se, ainda, o Castelo de Santo Ângelo, que possui um jardim suspenso e em Pompeia – Itália, na Vila dos Mistérios, construída no século II a.C, onde construções luxuosas foram erguidas e posteriormente destruídas pelas cinzas da erupção do vulcão Vesúvio em 79 d.C.

Os esquimós do grupo Okvick construíram suas casas com uma estrutura parcialmente subterrânea, empregando madeira ou ossos de baleia, juntamente com turfa, para a cobertura durante o século II. Também são encontradas referências históricas da utilização de cobertura verde pelos Vikings em suas edificações entre os anos 700 a 1000 d.C.; houve o florescimento e a evolução das antigas *Sod houses*, coberturas feitas a partir do pasto local (*Sod*) e da casca de bétula, proporcionando isolamento térmico e outras vantagens climáticas como proteção contra ventos e chuvas. Durante o período de 1015 d.C., na América do Norte, encontram-se as *Earth Lodges* (“Cabanas de terra”), são construções semi-subterrâneas cobertas parcialmente ou completamente com terra.

Na Alemanha do século 19, o uso de coberturas verdes em construções de casas rurais era amplamente difundido, uma vez que essas coberturas não apenas tornavam a construção mais econômica, mas também ofereciam proteção contra incêndios. A partir dos anos 1980, houve um significativo aumento no desenvolvimento de coberturas verdes no mercado alemão, experimentando uma taxa de crescimento anual entre 15% e 20%. Esse crescimento foi impulsionado por legislações municipais, estaduais e federais que subsidiaram entre 35 e 40 marcos por metro quadrado de área verde a ser implementada. De acordo com Pendiuk, Moisés e Pereira (apud Canero e Redondo, 2010), a Alemanha desempenhou um papel fundamental em elevar o telhado verde à visibilidade global e em reconhecer sua importância, principalmente durante as últimas décadas do século XX.

A paisagem urbana foi marcada pelo rápido crescimento urbano e pela industrialização no final do século XIX e início do século XX. A introdução do concreto e a utilização crescente de superfícies impermeabilizadas nas coberturas dos edifícios provocaram uma mudança nos materiais utilizados e nos conceitos arquitetônicos modernos. Estas mudanças refletiam os novos modos de vida que surgiam na sociedade (Filho, Alves, Schueler, Rola, 2015).

Os telhados verdes têm uma longa história na Europa, embora ainda sejam vistos como uma novidade no Brasil e estejam a tornar-se familiares nos Estados Unidos. Até meados do século XX, muitos acreditavam que os telhados verdes eram populares ou vernaculares na construção. No entanto, na década de 1960, a crescente preocupação com a degradação da qualidade do ambiente urbano e o rápido declínio das áreas verdes no espaço urbano renovaram o interesse pelos telhados verdes. Esta tendência começou no Norte da Europa e foi vista como uma solução ambientalmente sustentável.

De fato, os telhados verdes começaram a ser difundidos pela arquitetura moderna após o arquiteto francês Le Corbusier introduzir os 5 Pontos da Arquitetura Moderna. Ele enfatizou a importância dos terraços jardins como uma resposta à falta de áreas verdes nas cidades durante a década de 1920. Le Corbusier via os telhados verdes, ou "terraços jardins" (Figura 5) como ele os chamava, como uma maneira de compensar a área ocupada pelo edifício no ambiente urbano. Ele propunha que a área verde ocupada pelo edifício fosse transferida para o terraço, criando assim uma área de lazer que melhoraria a qualidade de vida dos moradores e reduziria o impacto ambiental.

Figura 5 - Terraço jardim da Villa Savoye



Fonte: Carvalho (2013).

Arquitetos de todo o mundo utilizam amplamente os cinco princípios fundamentais da arquitetura propostos por Le Corbusier na revista *L'Esprit Nouveau*, em 1926. No Brasil, muitos dos projetos de Le Corbusier foram influenciados por ícones da arquitetura brasileira, como Lúcio Costa e Oscar Niemeyer. Um exemplo proeminente é o Palácio Gustavo Capanema, no Rio de Janeiro, que hoje abriga o Ministério da Educação. O prédio possui um grande terraço ajardinado que segue os padrões da arquitetura moderna idealizada por Le Corbusier.

Nos anos 80, os telhados verdes registaram um rápido crescimento no mercado alemão, com uma taxa média de crescimento de 15-20% por ano. As leis municipais, estaduais e federais que subsidiam entre 35 e 40 DM por metro quadrado de telhado verde construído impulsionaram este progresso. Este significativo crescimento foi impulsionado por leis municipais, estaduais e federais que subsidiaram cada metro quadrado de cobertura verde a ser construída (Araújo apud Peck, 1999).

Durante a década de 1990, vários produtores europeus de veículos para telhados verdes começaram a registrar uma expansão significativa nos mercados dos EUA. No entanto, estes sistemas enfrentaram dificuldades de comercialização porque o público carecia de informação sobre o desempenho técnico do sistema e não tinha acesso a exemplos práticos, especialmente num ambiente cultural e político em que muitas pessoas não estavam interessadas em investir em tecnologias verdes.

4.3 Benefícios dos telhados verdes

Os telhados verdes oferecem contribuições substanciais tanto para a sociedade quanto para as edificações. Seus benefícios abrangem desde aprimoramentos nas condições termoacústicas até aspectos psicológicos que influenciam no bem-estar das pessoas.

4.3.1 Redução de temperatura

A implementação de coberturas verdes em edifícios urbanos proporciona uma redução das amplitudes térmicas, ou seja, a variação entre as temperaturas máxima e mínima no local onde estão localizados. A vegetação nesses telhados absorve uma parte significativa da radiação solar, resultando em uma diminuição da quantidade de calor que é emitida de volta para a atmosfera. Em resumo, os edifícios com telhados verdes tendem a se aquecer e a se resfriar gradualmente, o que ajuda a manter temperaturas internas mais baixas em comparação com os edifícios sem cobertura vegetal.

A redução das amplitudes térmicas, principalmente em centros urbanos, proporciona o favorecimento da diminuição do uso de ar condicionado e das ilhas de calor. Com a redução da temperatura do ambiente interno, é possível que haja uma diminuição no consumo energético, uma vez que a utilização de equipamentos de climatização, como condicionadores de ar e ventiladores, se torna menos necessária.

4.3.2 Produção de alimentos

O Hotel Fairmont Waterfront, localizado em Vancouver, na Colúmbia Britânica, é reconhecido por ser um dos primeiros estabelecimentos a implementar um telhado verde, possuindo uma área de aproximadamente de 2.100 metros quadrados de jardim. O cultivo de ervas aromáticas, legumes e flores em seu telhado é uma prática que não só acrescenta beleza e biodiversidade ao ambiente urbano, como também traz benefícios económicos significativos.

A cozinha do hotel pode poupar até 30.000 dólares por ano em custos de aquisição de alimentos se produzir os seus próprios produtos no local. Esta

abordagem ambientalmente consciente não só reduz os custos operacionais, como também promove a autossuficiência e a segurança alimentar, demonstrando o seu empenho em práticas ambientalmente responsáveis.

Segundo Silva (2011) a prática desse cultivo possui uma desvantagem significativa, as plantas são capazes de realizar com facilidade a absorção da poluição atmosférica e em localidades em que o índice de poluição é bastante elevado, sendo não recomendado fazer a utilização desses alimentos.

4.3.3 Eficiência energética

A instalação em larga escala de coberturas verdes e jardins suspensos em zonas urbanas pode contribuir significativamente para a eficiência energética dos espaços interiores, melhorando o conforto térmico e reduzindo a utilização e os custos gerados pelo ar-condicionado. De acordo com Ziglioli (2017), uma vez que a velocidade do ar desempenha um papel importante no arrefecimento do ambiente, a ventilação natural pode proporcionar conforto térmico. A presença de vegetação pode melhorar a ventilação natural, tornando os ambientes mais confortáveis.

Os telhados verdes reduzem os custos de energia elétrica de um edifício, aumentam o conforto térmico e reduzem os custos relacionados com o arrefecimento ambiental, como a utilização de ar-condicionado. A superfície exposta de uma cobertura convencional pode facilmente atingir temperaturas superiores a 70°C quando a temperatura ambiente é de 30°C. Por outro lado, nas coberturas verdes, a temperatura situa-se entre os 25°C e os 30°C (Rocha, 2011).

No final de agosto de 2023, o consumo de energia elétrica atingiu os 66.235 megawatts médios, registrando um aumento pelo quarto mês consecutivo. De acordo com dados preliminares divulgados pelo boletim quinzenal InfoMercado, da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), esse volume representa um aumento de 3,9% em relação ao mesmo período do ano passado. Ainda, as temperaturas elevadas determinaram um aumento no uso de equipamentos de refrigeração, sobretudo no segmento regulado. A procura de eletricidade livre aumentou devido ao aumento da produção em quase todos os setores econômicos controlados e à migração significativa de novos consumidores.

A utilização de equipamentos de refrigeração em excesso, como os ares-condicionados, para controlar a temperatura de um ambiente acarreta no gasto

desnecessário de dinheiro, energia e entre outros recursos. Em regiões de clima quente, os moradores destinam até 70% da sua conta de energia elétrica para despesas com a refrigeração. Os telhados verdes são sistemas de isolamento altamente eficazes e podem contribuir significativamente para a redução dos custos de resfriamento de um edifício.

Como refere Spangenberg (2004), este tipo de cobertura pode reduzir a temperatura até 15 °C, proporcionando aos residentes um conforto térmico significativo. Isto resulta numa diminuição da necessidade de ar-condicionado, o que reduz o consumo de energia elétrica, o que é benéfico tanto do ponto de vista económico como ambiental.

As coberturas verdes são uma opção eficaz de regeneração do ambiente devido ao conceito de reabilitação de edifícios e espaços, conferindo-lhes novas funções urbanas e ambientais. Como aponta Vilela (2005), essas áreas verdes se transformam em "pequenos pulmões", criando corredores verdes no meio das imponentes paredes de concreto das metrópoles.

Spangenberg (2004) destaca que os principais benefícios da vegetação em climas quentes incluem que essas coberturas verdes aumentam a qualidade do ar, controlam a poluição, retêm a água da chuva e previnem inundações. Além disso, impedem a emissão de raios UV, que podem causar danos, e prolongam a vida útil da impermeabilização das coberturas, o que torna a intervenção economicamente viável. A presença de temperaturas baixas é indispensável para melhorar as condições de conforto térmico e, conseqüentemente, para limitar o uso de energia para equipamentos de resfriamento.

4.3.4 Biodiversidade

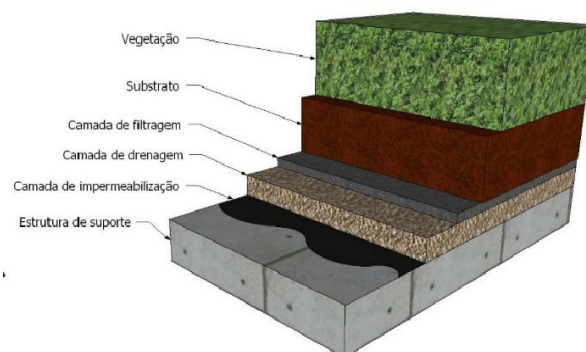
Os telhados verdes podem ser instalados em áreas urbanas para propiciar espaços para atividades recreativas, como caminhadas, ioga e leitura. Além disso, esta ação é um método de recuperação de áreas verdes e de promoção da biodiversidade, uma vez que vários insetos e aves frequentam estas áreas elevadas. A melhoria da qualidade do ar e o isolamento acústico são outros benefícios. A área verde filtra o ar, melhorando o bem-estar da população. As várias camadas de infraestruturas também atuam para diminuir o nível de ruído que entra no interior.

Conforme Braz e Braz (2020), O termo "telhados verdes" refere-se ao processo de cultivo de vegetação nos telhados dos edifícios, que transforma uma estrutura anteriormente inerte num ambiente vivo. Várias espécies, como artrópodes, aves e outras, encontram um novo habitat neste novo telhado feito de elementos orgânicos, contribuindo para a formação de novos ecossistemas.

4.4 Composição dos telhados verdes

As coberturas verdes são estruturas com várias camadas que proporcionam condições adequadas para o crescimento saudável da vegetação, ao mesmo tempo que evitam infiltrações que possam danificar a estrutura do edifício.

Figura 6 - Composição dos telhados verdes



Fonte: Neto et. al (2021).

4.4.1 Laje

A cobertura do edifício, responsável por suportar as suas cargas, é a primeira camada de uma cobertura verde. Esta camada deve permitir um fluxo suave, mantendo uma inclinação mínima de 2% para garantir uma drenagem eficaz e evitar a estagnação da água.

4.4.2 Membranas impermeabilizantes

As membranas impermeabilizantes são responsáveis por impedir que as águas das chuvas atravessem para a edificação. Para a instalação das membranas de impermeabilização é necessário que antes seja feita a aplicação de um primer na laje

da edificação; após esse processo, a primeira membrana deve ser posicionada, na qual a instalação deve iniciar na parte mais baixa e seguir na direção perpendicular à inclinação. A segunda camada de membrana é instalada sobre a primeira camada através de termofusão, desenrolando-as e garantindo a sobreposição adequada.

4.4.3 Barreira contra raízes

São responsáveis por controlar o crescimento das raízes da vegetação presente que possam ser danosas para o sistema.

4.4.4 Camada de drenagem

A camada drenante é um sistema que permite conduzir o excesso de água para as calhas sem que haja a passagem da terra. Para que se obtenha uma melhor eficiência do sistema, recomenda-se adicionar uma drenagem de espuma de polietileno sobre a qual é colocada uma manta geotêxtil permeável. Esta estrutura impede que as raízes entrem em contacto com a estrutura inferior, criando um ambiente ideal para o crescimento saudável da vegetação.

4.4.5 Camada filtrante

Essa camada, também chamada de geotêxtil, tem como funcionalidade separar as camadas de vegetais e substrato da camada drenante, ou seja, ela impede que partículas finas sejam transportadas para fora do substrato. Berndtsson (2010) afirma que essa camada é essencial para evitar que as partículas finas do substrato sejam arrastadas para o sistema de drenagem, o que evita bloqueios que poderiam comprometer a eficiência do escoamento da água. A camada filtrante não apenas protege o sistema de drenagem, mas também ajuda a arejar as raízes, o que faz com que as plantas cresçam de forma saudável.

4.4.6 Camada vegetal

Camada que apresenta uma faixa de terra juntamente com uma vegetação. Em casos que o seu meio de crescimento é de até 15 cm e possui presença de vegetação

pequena, chama-se de camada vegetal extensiva, sendo ideal para edifícios já existentes. Para aqueles que apresentam uma espessura maior que 15 cm e possui vegetação maiores, chama-se camada vegetal intrusiva, na qual é recomendada para edificações novas capazes de suportar cargas adicionais.

De acordo com a norma técnica brasileira NBR 16014, que trata dos requisitos e métodos de ensaio para substratos de plantas, os substratos devem ser leves para não sobrecarregar a estrutura do dossel e ter uma boa capacidade de retenção de água para permitir uma boa aeração das raízes das plantas. A composição dos substratos pode incluir uma combinação de materiais, como argila expandida, fibra de coco, vermiculita e perlita. Esses materiais podem ser adaptados às condições climáticas e às necessidades das espécies de plantas escolhidas para o telhado verde (ABNT, 2012).

4.5 Tipos de telhado verde

4.5.1 Telhados verdes extensivos

O modelo extensivo é um tipo de vegetação que tende a ser em grande parte auto suficiente e em constante evolução. É considerada a infraestrutura mais econômica e natural para reduzir o escoamento das águas pluviais dos edifícios de uma forma original. As coberturas verdes extensas provaram ser muito eficazes e naturais, embora reduzam apenas parcialmente a pegada ambiental de uma estrutura.

De acordo com a pesquisa de Willes (2014) os sistemas extensivos de coberturas verdes distinguem-se pela sua auto replicação, tolerância à seca e baixa manutenção. Isto significa que não requerem muitos cuidados, fertilização e irrigação. As espécies nativas, especialmente em áreas sujeitas a condições de seca, são as plantas mais adequadas para este tipo de sistema.

Segundo Getter e Rowe (2006) os telhados verdes extensivos geralmente não exigem muita manutenção. Na maioria dos casos, eles não estão disponíveis para o público em geral e podem não ser visíveis. As espécies de plantas são limitadas a ervas, gramíneas, musgos e suculentas resistentes à seca, como o *Sedum*, devido à sua profundidade menor (<15,2 cm). Devido a estas características, as coberturas verdes extensivas são uma opção econômica e sustentável para reduzir o impacto ambiental das estruturas e promover a biodiversidade urbana.

De acordo com Forte (2018, Apud Paula e Prado, 2019), o telhado verde extensivo, deve ser composto por uma vegetação simples e resistente, o que significa que não é necessária manutenção regular e sistemática, além de haver menos estresse sobre a estrutura, podendo ser usado em superfícies planas ou inclinadas com uma espessura máxima de camada de substrato de 8 cm.

4.5.1.1 Exemplo de telhado verde extensivo

Figura 7 - Sede do Sistema Fecomércio-RS



Fonte: Magalhães (2022).

O telhado verde da sede do Sistema Fecomércio-RS/Sesc/Senac, localizado em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, possui 10 mil m² de extensão e é considerado um dos maiores da América Latina. Inaugurado em fevereiro de 2022, o telhado foi projetado pelo Estúdio 41 e executado pela Ecotelhado. Feito com grama, atualmente, está sendo plantado boldo para dar maior resistência.

4.5.2 Telhados verdes intensivos

Há uma grande variedade de espécies vegetais e designs disponíveis no sistema de telhado verde intensivo. Esse modelo pode incluir arbustos, gramíneas, plantas perenes, bulbos, flores de verão e até mesmo árvores de grande porte. Os gramados são considerados um exemplo de cobertura verde intensiva devido aos altos requisitos de manutenção. No entanto, a maioria das pessoas acredita que os telhados verdes intensivos sem grama exigem mais manutenção. É claro que tudo depende das plantas selecionadas e do projeto geral do telhado verde.

Segundo Willes (2014) às coberturas verdes do tipo intensivo são estruturas que precisam de uma alta taxa de manutenção, devido a possibilidade de criação de jardins com terraços e espelhos d'água, e também podem suportar gramados e vegetação de médio e grande porte; porém em comparação com os extensivos, os intensivos são mais pesados e complexos, necessitando maiores investimentos e manutenções.

De acordo com Getter e Rowe (2006), o apelo visual geralmente é mais importante para telhados intensivos do que para telhados extensos e rasos, cujo objetivo principal é o gerenciamento da água da chuva. Alguns telhados extensos podem até passar despercebidos porque só podem ser vistos de cima.

4.5.2.1 Exemplo de telhado verde intensivo

Figura 8 - Telhado verde intensivo em uma empresa privada em Chicago.



Fonte: Nunes (2015).

Localizado no centro da cidade de Chicago (Figura 8), a empresa Morningstar Corporation, pertencente a uma empresa de investimentos, implantou um telhado verde extensivo com árvores para fomentação de um espaço de descanso para funcionários.

4.5.3 Telhados verdes semi-intensivos

Essa modalidade de cobertura verde corresponde a mistura de características dos telhados citados anteriormente, na qual nesse tipo de cobertura é utilizada plantas simples e mais ornamentais, porém sem a possibilidade de inclusão de grandes

arbustos e árvores, apresentando uma necessidade de manutenção moderada, assim como o peso da estrutura.

Um telhado verde semi-intensivo é um tipo de vegetação natural aprimorada, geralmente auto suficiente e em constante evolução. Ele continua sendo uma opção econômica e uma infraestrutura natural diversificada para reduzir o escoamento de águas pluviais dos edifícios. Como são ricos em biodiversidade e têm alta capacidade de retenção de água da chuva, os telhados verdes semi-intensivos também contribuem significativamente para reduzir a pegada ambiental de uma estrutura.

4.6 Legislações e políticas públicas

4.6.1 Legislações e políticas públicas a nível mundial

Diversos países, como o Canadá, a Áustria, a Alemanha, a Grã-Bretanha, a Hungria, os Países Baixos e a Suécia, já estão a promover e a regulamentar a instalação de telhados verdes através de iniciativas locais oficiais, muitas vezes em colaboração com entidades privadas (Aguiar, Fedrizzi, 2010).

Copenhague aprovou recentemente uma legislação sobre telhados verdes, seguindo os passos de Toronto (Canadá), a primeira cidade do mundo a fazer isso. Em Toronto, foi aprovada uma lei semelhante que permitiu a criação de 1,2 milhão de metros quadrados de áreas verdes em diferentes edifícios, permitindo que os proprietários de edifícios economizassem mais de 1,5 milhão de quilowatts-hora de energia por ano (Baratto, 2015).

Em 2015, o Parlamento francês aprovou uma lei que exige telhados verdes em novos edifícios em áreas comerciais em todo o país. A regulamentação original exigia que toda a área do telhado dos novos edifícios fosse dedicada a jardins. No entanto, para ser aprovada, a medida teve de ser modificada, permitindo que os proprietários ocupassem total ou parcialmente os telhados com áreas verdes, além de permitir a instalação de painéis solares no lugar da vegetação (Barbosa, 2015).

Nos EUA, a cidade de Nova York possui um programa que fornece a redução de impostos prediais para propriedades que possuírem telhados verdes, a redução é de \$5,23 por metro quadrado de espaço verde de telhado, porém o benefício não pode exceder US\$ 200.000 ou os impostos sobre a propriedade pagos sobre o edifício no ano fiscal em questão. Se o abatimento for maior do que a obrigação tributária de

qualquer ano fiscal, o saldo restante poderá ser aplicado aos impostos subsequentes dentro de cinco anos a partir do momento em que o abatimento foi usado pela primeira vez.

Recentemente, o governo da cidade de Buenos Aires aprovou a Lei dos Telhados e Terraços Verdes. Essa legislação permitirá que os proprietários de edifícios reduzam seus impostos sobre iluminação e limpeza, desde que instalem telhados verdes em seus edifícios. Dessa forma, aqueles que optarem por estabelecer e manter esses telhados verdes não só contribuirão para a redução das emissões de CO₂ na capital, mas também obterão vantagens, como a redução de impostos.

Em 2014, a cidade de Melbourne (Austrália) publicou o Growing Green Guide, o primeiro guia abrangente para telhados, paredes e fachadas verdes. Esse guia inclui estudos de caso e informações técnicas detalhadas sobre projeto, planejamento, construção, instalação e manutenção, além de instruções detalhadas sobre como criar e manter telhados, paredes e fachadas verdes bem-sucedidas. Destina-se a proprietários, incorporadores, autoridades governamentais e profissionais envolvidos no planejamento e na construção de telhados, fachadas e paredes verdes.

4.6.2 Legislações e políticas públicas no Brasil

O Brasil tem feito muito para proteger o meio ambiente, principalmente no quesito implantação de telhados verdes. Algumas iniciativas do setor público têm buscado soluções alternativas para reduzir os impactos negativos sobre a vegetação, especialmente no ambiente urbano, embora ainda seja necessária uma política mais abrangente e integrada.

Em Recife, Pernambuco, foi aprovada a lei municipal 18.112/2015, que exige que edifícios com mais de quatro andares incorporem telhados verdes. Essa medida é considerada uma das mais importantes do Brasil em termos de sustentabilidade urbana atualmente. A lei também exige a instalação de tanques de coleta de água da chuva em novos empreendimentos residenciais e comerciais com uma área de superfície superior a 500 metros quadrados e com 25% do solo impermeabilizado. A água coletada e armazenada no reservatório pode ser usada para regar plantas ou limpar o prédio. O reservatório também desempenha um papel importante na drenagem urbana, reduzindo as inundações nas vias públicas.

Enquanto isso, em Porto Alegre, capital do Rio Grande do Sul, foi incorporada no código de construção municipal uma medida para promover e enfatizar espaços abertos com vegetação, como telhados verdes. O objetivo da proposta é aprimorar a paisagem urbana, melhorar o clima do entorno e melhorar o gerenciamento da coleta de água. A porcentagem mínima de espaço aberto é de 7% em lotes de 151 a 300 metros quadrados. Em lotes de 301 a 1.500 metros quadrados, essa porcentagem chega a 70% da área total da taxa de ocupação.

O termo de compensação ambiental (TCA) foi instituído em São Paulo pelo Decreto 55.994, editado em março de 2015. Telhados verdes e jardins verticais podem ser utilizados como formas de compensação ambiental, conforme estabelecido pelo TCA. Em dezembro de 2016, o Conselho da Cidade emitiu o Decreto n.º 57.565, que estabelece as regras para a implementação da Taxa Ambiental. Esse decreto estabelece diretrizes para a proteção do meio ambiente em novas construções ou reformas que consideram fatores como drenagem, microclima e biodiversidade. Essas medidas são fundamentais para o conceito de arquitetura biofílica. É importante mencionar que os telhados verdes e os jardins verticais são opções aceitas para reduzir os efeitos e aumentar a presença de áreas verdes na cidade.

O Decreto 35.745, emitido em 2012 na capital Rio de Janeiro, estabelece padrões para a concessão do selo "Qualiverde" a edifícios e projetos que implementam tecnologias sustentáveis, como telhados verdes e jardins verticais. Esse selo prioriza os processos de licenciamento de edificações e reconhece o compromisso com o meio ambiente. O objetivo dessa iniciativa é promover práticas de construção mais sustentáveis e melhorar a qualidade ambiental da cidade.

Em 2015, o município de Salvador, Bahia, emitiu o Decreto 35.745, que foi substituído em 2017 pelo Decreto 29.100. Esse último decreto prevê a criação de uma certificação sustentável que concede descontos no Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) àqueles que implementarem tecnologias sustentáveis, como telhados verdes e reaproveitamento de águas pluviais.

4.7 Gerenciamento de águas pluviais

Como postula Neto et al. (2021) em seus estudos, a gestão da água urbana foi particularmente afetada pelo aumento significativo da população urbana nas últimas décadas, afetando principalmente os sistemas de água, esgoto e drenagem. A

urbanização altera o comportamento natural da água na bacia hidrográfica. Neto et al. (2021) ainda pontua que a temperatura, o tempo de concentração e o pico de fluxo do escoamento superficial sofrem aumento como resultado do crescimento das superfícies impermeáveis nos centros urbanos.

A água das chuvas é direcionada para drenos e condutos pluviais através de superfícies urbanas impermeáveis, como telhados e pavimentações. Conforme Policarpo (2024), evidencia-se que este problema ocorre quando o solo é coberto por materiais impermeabilizantes, como concreto, asfalto e áreas pavimentadas, que dificultam o processo natural de infiltração da água da chuva, resultando na impermeabilização do substrato terrestre, causando uma série de consequências ambientais prejudiciais, como inundações nas cidades, aceleração dos processos de erosão e diminuição da biodiversidade na área. Esse fenômeno demonstra a complexa interação entre o ambiente construído e o ciclo hidrológico, destacando a importância de abordagens integradas de gestão de águas urbanas para reduzir os impactos negativos da urbanização sobre o regime hídrico e a qualidade ambiental das bacias hidrográficas.

A expansão das cidades e o aumento das áreas impermeáveis representam um desafio significativo para o gerenciamento da drenagem urbana. De acordo com Neto et al. (2021), a compreensão e o desenvolvimento de estratégias eficazes para o gerenciamento adequado das águas pluviais urbanas estão se tornando uma das principais preocupações dos engenheiros civis e ambientais em todo o mundo. Por conseguinte, a redução dos efeitos negativos de inundações, erosão e poluição causados pelo escoamento de águas pluviais em áreas urbanas pode ser possível quando é realizada a implementação de abordagens inovadoras e integradas que levam em conta tanto a infraestrutura física quanto os aspectos socioeconômicos e ambientais.

Atualmente, a implementação de projetos de lei em cidades brasileiras tem como intuito reduzir o impacto das enchentes por meio da regulamentação de políticas públicas relacionadas à conservação, ao uso racional e à coleta de águas pluviais. Por meio dessas iniciativas, o volume de chuvas é direcionado de forma diferenciada para as galerias de águas pluviais antes do término do pico de vazão do escoamento superficial. Essas estratégias visam otimizar a drenagem urbana e disponibilizar as reservas de águas pluviais para uso posterior, seja para fins não potáveis ou outros. Esse processo é uma medida relevante no contexto das cidades, pois ajuda a

gerenciar os recursos hídricos de forma sustentável e reduz os impactos ambientais causados pelas chuvas intensas.

A coleta e o armazenamento da chuva para uso posterior em edificações residenciais, comerciais e/ou industriais, são conhecidos como coleta de água da chuva no contexto da gestão sustentável dos recursos hídricos. A água coletada pode ser usada para diversas atividades que não requerem água potável, como limpeza de automóveis e residências em geral, irrigação e descarga de bacias sanitárias para melhorar a qualidade do recurso captado, alguns sistemas de coleta de água da chuva incluem uma fase de purificação, de acordo com Silva (2014). Dispositivos instalados em todo o sistema, como telas e grades, são usados para remover partículas maiores (sólidos grosseiros).

Desde 2000, é obrigatória a implementação de reservatórios de retenção de águas pluviais em empreendimentos com área de 1 hectare pelo Código de Obras do Município de Guarulhos (Lei 5.617/1997). A lei também garante o reuso dessa água para irrigação de áreas verdes, limpeza de espaços públicos e aplicações industriais análogas (GUARULHOS, 2001).

O Decreto Municipal nº 23.940, em vigor na cidade do Rio de Janeiro, torna obrigatório o reservatório de retenção de águas pluviais como pré-requisito para a regularização do imóvel e posterior concessão da Carta de Habitação, na qual a regra é válida para edificações com área de superfície impermeabilizada superior a 500 m² ou condomínios residenciais com mais de 50 unidades habitacionais. Além disso, a legislação estabelece que 30% dos locais destinados a estacionamentos em empreendimentos comerciais devem ser equipados com revestimentos de piso permeáveis ou deixados com uma superfície naturalmente permeável, com o objetivo de mitigar o efeito hidrológico em zonas urbanas (SECOVI, 2004).

Atualmente, a implementação desses projetos de lei em cidades brasileiras tem como intuito reduzir o impacto das enchentes por meio da regulamentação de políticas públicas relacionadas à conservação, ao uso racional e à coleta de águas pluviais. Por meio dessas iniciativas, o volume de chuvas é direcionado de forma diferenciada para as galerias de águas pluviais antes do término do pico de vazão do escoamento superficial. Essas estratégias visam otimizar a drenagem urbana e disponibilizar as reservas de águas pluviais para uso posterior, seja para fins não potáveis ou outros. Esse processo é uma medida relevante no contexto das cidades, pois ajuda a

gerenciar os recursos hídricos de forma sustentável e reduz os impactos ambientais causados pelas chuvas intensas.

Os primeiros milímetros de chuva, definidos por Martinson e Thomas (2009) como o volume inicial de água responsável pela descarga da superfície de captação, são descartados para remover partículas menores, que não são retidas pelos dispositivos mencionados anteriormente. Para o caso dos telhados verdes, segundo Vijayaraghavan (2016, citado por Peixoto et al., 2021) as coberturas verdes podem funcionar como um filtro de partículas, mas também podem lixiviar nutrientes da água da chuva, aumentando o pH.

4.8 Resíduos da construção civil

De acordo com a resolução CONAMA nº 307, publicada dia 5 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCC, é definido como tudo qualquer material proveniente de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e, também, 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., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

A resolução CONAMA nº 307 também determina em seu Art. 3 que os geradores responsáveis pelo RCC deverão ter como objetivo prioritário a não geração desses resíduos, assim como a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação ambientalmente adequada desses materiais. Além disso, a resolução ainda classifica os RCC em classes A, B, C e D (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação dos RCC de acordo com a CONAMA nº 307

Classe	Descrição	Exemplo	Utilização
A	São materiais com possibilidade de serem reciclados ou reutilizados como agregados nas próprias obras.	Tijolos, telhas e revestimentos cerâmicos; blocos e tubos de concreto e argamassa.	Agregados reciclados na construção civil.
B	São materiais recicláveis destinados para outras finalidades.	Vidro, gesso, madeira, plástico, papelão e entre outros.	Reutilizados, reciclados ou encaminhados a aterros temporários.
C	São materiais para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação.	Produtos oriundos do gesso, desde que não tenham contato com substâncias que o classifique como D.	Armazenados, transportados e destinados conforme as normas técnicas específicas.
D	São materiais perigosos oriundos do processo de construção nocivos à saúde.	Tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.	Armazenados, transportados e destinados conforme as normas técnicas específicas.

Fonte: Adaptado de CONAMA nº 307, 2002.

No setor de construção, a reciclagem desses materiais provenientes de obras de construção e demolição tem várias vantagens, como a conservação de recursos naturais não renováveis, a diminuição do consumo de energia no processo de fabricação e a redução das emissões de dióxido de carbono (JOHN, 2000). Além disso, a reciclagem também ajuda a diminuir o volume de material descartado, reduzindo assim a demanda por aterros sanitários (PINTO, 1986).

A incorporação de materiais reciclados na construção civil passou a ser utilizada no período pós-Segunda Guerra Mundial, quando a Alemanha começou a usar resíduos de construção como substitutos de agregados em determinados estágios de novas construções (RAO; JHA; MISRA, 2017). De acordo com Oliveira e Júnior (2013) o processo de reciclagem tem muitas etapas que começam com a geração de resíduos, incluindo coleta, separação e tratamento; a operação, no caso específico da reciclagem de RCC, inclui mais etapas, como classificação de materiais, trituração ou moagem, peneiramento e identificação do tamanho adequado das partículas para reutilizar os resíduos como agregados reciclados.

Para garantir que os RCC atinjam os tamanhos corretos para utilização como agregados reciclados, o material deve passar por um processo de trituração (Figura 9), na qual isso pode ser feito por meio de sistemas de circuito aberto ou fechado. De acordo com Ballista (2023), em um sistema de circuito fechado, o material é reciclado de volta ao triturador várias vezes, quando necessário, até que o tamanho correto das partículas seja alcançado, já em um sistema de circuito aberto, o material é triturado uma vez sem nenhum processamento adicional.

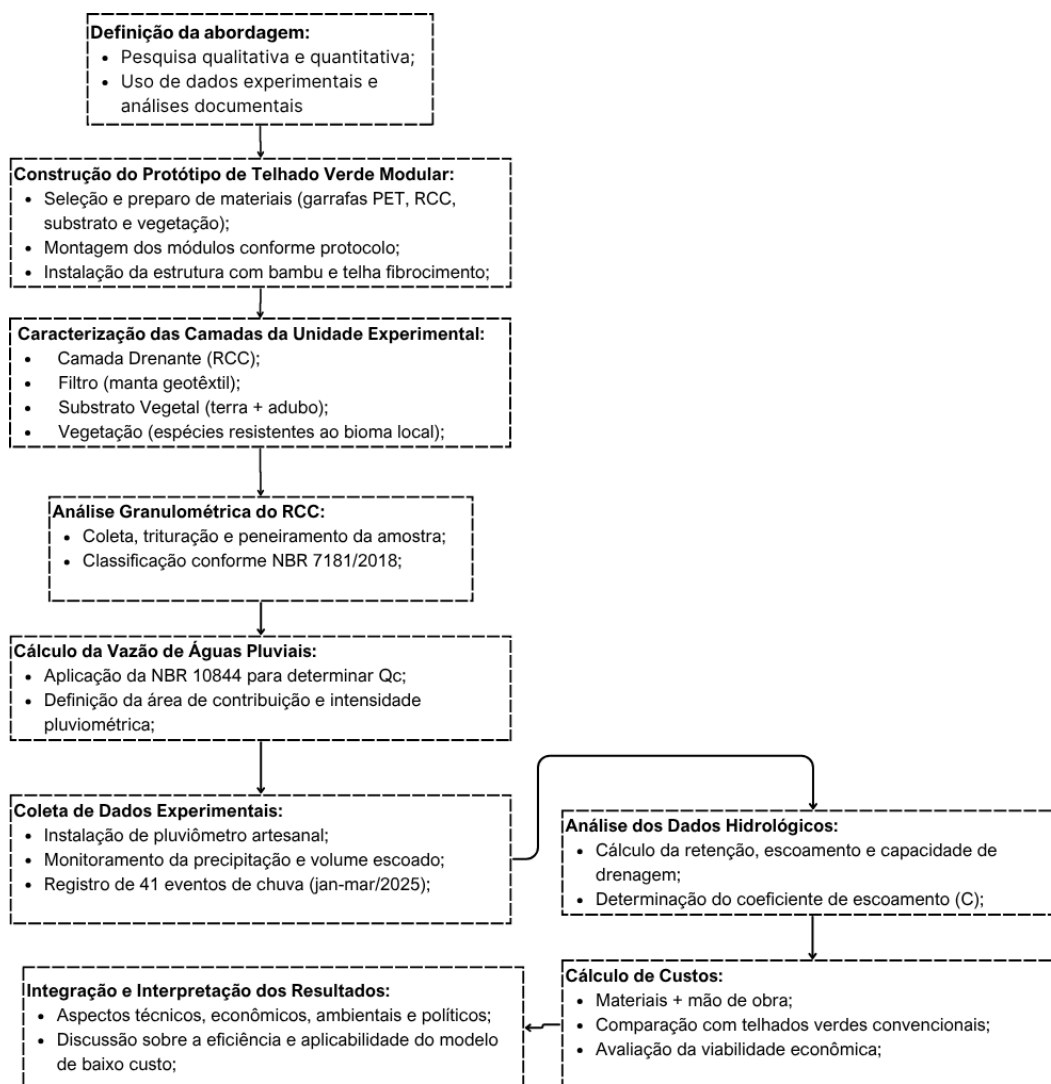
Figura 9 - Usina fixa de reciclagem de RCC em São Luís/MA



Fonte: Autores (2025).

Afonso (2005) realizou um estudo em que utilizou RCC em camadas de drenagem de aterros sanitários em substituição a materiais naturais, visto que os resultados obtidos pela pesquisa demonstraram que o material, em um ambiente sem restrições, é tecnicamente adequado para aplicação em sistemas de drenagem. Segundo o engenheiro Paulo Palha, gerente geral da empresa portuguesa Neoturf, instaladora exclusiva de telhados verdes, apontou os pontos fortes da empresa e os procedimentos aplicados nesse tipo específico de sistema. Entre as estratégias apresentadas estava a aplicação de RCC como material principal para formar o substrato técnico, em que o principal objetivo dessa prática é reduzir a compactação e evitar a erosão do solo, mas também dificultar a propagação de espécies de plantas invasoras, inclusive ervas daninhas.

5 METODOLOGIA



A metodologia dessa pesquisa é composta por uma sequência de etapas. Elas incluem a construção de um protótipo de telhado verde modular de baixo custo, realizado no período chuvoso, coleta e análise de dados e cálculo de custos. Com essa configuração, os processos são estruturados e apresentam eficiência nas informações produzidas sobre a eficácia do telhado verde de baixo custo. Dessa forma, esta pesquisa é caracterizada como qualitativa e quantitativa, combinando dados experimentais e análises documentais. Serão utilizados relatórios governamentais, datados de documentos de relevância local, regional, nacional ou internacional e que abordam políticas, regulamentações ou incentivos com relação a telhados verdes.

A construção do protótipo foi iniciada com a seleção e a preparação dos materiais, na qual primeiramente as garrafas PET foram coletadas, higienizadas e cortadas para uso na base estrutural do telhado verde. Em seguida os RCC, como pedaços de concreto, tijolos triturados e cascalho, foram tratados para compor uma camada de drenagem do sistema. E por último, plantas de baixa manutenção adequadas ao clima local foram selecionadas juntamente com um substrato orgânico para a camada vegetativa.

Os dados coletados na revisão quali-quantitativa da pesquisa serão analisados e também comparados com os sistemas de telhado cerâmicos em geral e com os telhados verdes tradicionais para verificar a eficiência desse protótipo em termos de retenção de água que é a capacidade do telhado verde de armazenar parte da água da chuva e a supressão do escoamento da chuva que é capacidade do telhado verde de reduzir ou eliminar o volume de água que efetivamente escoará para o sistema de drenagem durante um evento de chuva. A porcentagem de retenção, o volume de escoamento e a capacidade de drenagem são alguns dos parâmetros que serão usados. A taxa de retenção e a taxa de escoamento são inversamente proporcionais: quanto maior a retenção de água pelo telhado verde, menor o escoamento, e vice-versa. Em um evento de chuva, elas somam aproximadamente 100%, pois toda a água precipitada ou é retida no sistema ou escoar para a drenagem.

Além disso, esses dados serão agregados às informações qualitativas dos documentos analisados, o que pode apresentar uma perspectiva muito mais ampla dos impactos econômicos e potenciais dos telhados verdes de baixo custo.

Por fim, será calculado os custos detalhados para a fabricação do protótipo, definindo em termos de materiais e mão de obra. Serão feitas comparações desses valores com o custo dos telhados verdes convencionais para avaliar a viabilidade econômica dessa proposta. Os requisitos de durabilidade e manutenção também serão considerados para os telhados verdes de baixo custo. O método proposto visa a integrar determinados aspectos técnicos, econômicos, ambientais e políticos, fundamentando a avaliação da eficiência e da viabilidade dos telhados verdes de baixo custo como alternativas sustentáveis para o gerenciamento do escoamento urbano.

A compreensão e entendimento desses dados contribuirá para uma análise mais absoluta da temática, promovendo a distribuição de informações de grande

relevância para o ramo da construção civil sustentável e dos processos de implementação de telhados verdes de baixo custo para edificações residenciais.

5.1 Análise granulométrica do RCC

Procedeu-se à coleta de uma amostra de RCC proveniente de uma obra de reforma em uma edificação residencial situada no Residencial Pinheiros 1, no bairro Cohama. O material foi submetido a um processo de trituração manual, utilizando-se uma marreta para a fragmentação inicial (Figuras 10 A e 10 B).

Figura 10 A - RCC triturado manualmente Figura 10 B - Amostra de RCC triturado



Fonte: Autores, 2025.



Fonte: Autores, 2025.

Posteriormente, o material foi acondicionado e transportado ao laboratório de materiais do prédio do BICT, localizado na Universidade Federal do Maranhão (UFMA), onde foi pesado em uma balança digital de precisão (Figura 12). Desse total, selecionou-se uma amostra representativa de 2,5 kg, a qual foi submetida a um processo de peneiramento grosso por meio de uma peneira mecânica (Figura 13), visando à classificação granulométrica inicial do resíduo.

Figura 11 A - Etapa de pesagem da amostra de RCC triturado



Fonte: Autores, 2025

Figura 11 B - Etapa de peneiramento do RCC triturado



Fonte: Autores, 2025.

Em conformidade com a NBR 7181/2018, o peneiramento grosso foi realizado utilizando-se um agitador mecânico, com o material sendo submetido a uma série de peneiras de abertura nominal de 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,8 mm, 2,4 mm (Figura 14). Ressalta-se que, embora a norma recomenda a inclusão adicional de uma peneira de 50 mm, esta etapa foi suprimida devido à indisponibilidade do equipamento no momento da realização do ensaio.

Figura 13 - Resultado após o peneiramento mecânico da amostra de RCC



Fonte: Autores, 2025

5.2 Cálculo de vazão de águas pluviais

5.2.1 Vazão de projeto

Com relação ao dimensionamento do sistema de drenagem destinado a conduzir as águas pluviais para as áreas ajardinadas próximas à biblioteca, foram seguidas as diretrizes técnicas ditadas pela NBR 10844, norma técnica brasileira que estabelece as regras para o projeto, construção e manutenção de sistemas de drenagem pluvial, referente a instalações de águas pluviais em edificações. Essa norma estabelece os parâmetros necessários para determinar a vazão do projeto, que é calculada com base nas características pluviométricas locais e nas medições da área de captação, por meio da equação 1:

$$Q_c = \frac{I \times A_c}{60} \quad (1)$$

Onde:

Q = Vazão de projeto (L/min)

I = Intensidade pluviométrica (mm/h)

A = Área de contribuição (m²)

A área de contribuição em m² em superfície plana horizontal conforme a figura 15, que é calculada pela equação 2 a seguir:

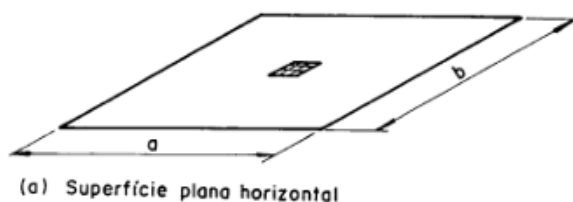
$$A_c = a \times b \quad (2)$$

Onde:

A = Largura do telhado (m)

B = Base (m)

Figura 14 - Superfície plana



Fonte: ABNT NBR 10.844 (1989)

De acordo com a tabela 5 da NBR 10844 a intensidade pluviométrica para a cidade de São Luís/MA é estabelecida, a tabela citada define os valores de acordo com o tempo de retorno, que normalmente é fixado em 5 anos para lajes e telhados. Portanto, a intensidade da chuva (I) na cidade de São Luís, levando em conta um período de retorno de 5 anos, é de 126 mm/h. Esse valor simboliza a precipitação média na área de cobertura durante um período de tempo específico, o que é crucial para a configuração adequada dos sistemas de drenagem. A área de concentração (A_c), por outro lado, refere-se a toda a área da laje onde as águas pluviais são depositadas.

5.2.2 Coeficiente de escoamento superficial

O experimento foi realizado no período chuvoso de São Luís, que ocorre entre janeiro e junho, com os meses mais chuvosos sendo março e abril. Esse período corresponde à estação chuvosa do clima equatorial e tropical presente na região. Entre os meses de janeiro a março de 2025 foram observados 41 eventos de precipitação durante os quais se registrou as alturas da precipitação e o volume escoado do protótipo em estudo. Para medir a precipitação, foi construído um pluviômetro (Figura 16) a partir de uma garrafa PET, na qual foi escolhido a contabilização de mm/24h.

Figura 15 - Pluviômetro construído por garrafa pet.



Fonte: Autores (2025).

Os pluviômetros são compostos por um funil com uma área de coleta identificada, conhecido como coletor de amostragem, que é ligado a um recipiente de armazenamento onde a água da chuva coletada é recolhida e seus dados registrados em uma planilha (WMO, 2010). Com os dados coletados, foi realizada a análise da porcentagem de retenção da água, o volume de escoamento gerado e a capacidade de drenagem do protótipo.

O escoamento superficial está relacionado com a fase do ciclo hidrológico em que, ao chegar à superfície terrestre, a precipitação é absorvida pelo solo até ser levada para os cursos de água (EFCT CURSOS, 2021). Para calcular o coeficiente de escoamento superficial (C), que é a proporção do volume de escoamento superficial real coletado em relação ao volume total de precipitação, considera-se que os valores variam de 0 a 1; portanto, foi usada a equação descrita na equação 3.

$$C = \frac{V_{esp}}{V_p} \quad (3)$$

Onde:

C= coeficiente de escoamento superficial;

Vesc = volume escoado coletado em cada cobertura modelo (L);

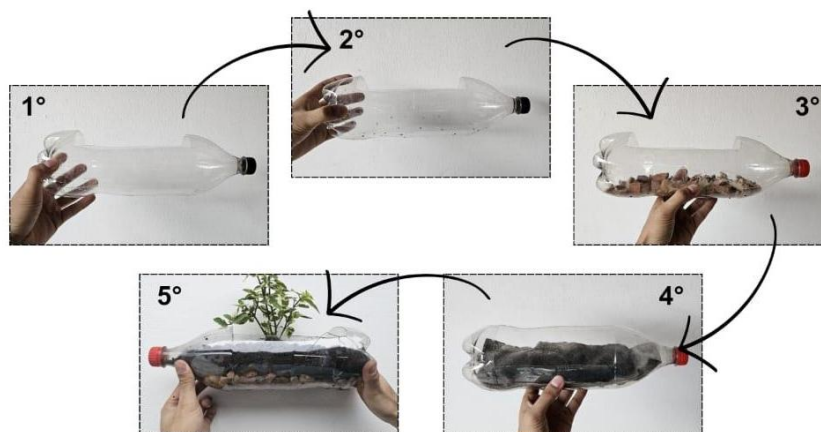
Vp= volume precipitado em cada cobertura modelo (L).

5.3 Confeção de unidade experimental – realização do protótipo

Para a construção dos módulos, foi estabelecida uma série de protocolos com base metodológica: as garrafas PET foram colocadas em uma posição horizontal, com uma ordem de montagem estabelecida para compor um arranjo estrutural firme que permitisse a eficácia do sistema de drenagem. Em seguida, foi colocada uma camada de drenagem construída com RCC dentro das garrafas, sobre a qual foram colocados o substrato em uma espessura de 4cm e a vegetação escolhida.

A identificação das espécies de plantas foi realizada em colaboração com a floricultura Vida Garden para determinar as espécies adequadas às condições ambientais específicas dos telhados verdes, especialmente aquelas com tolerância à exposição excessiva à luz solar. A sequência de montagem do módulo segue: 1° realiza-se um corte retangular na garrafa PET de aproximadamente (18cmx10cm); 2° efetuar furos com um prego quente no sentido oposto ao do corte; 3° coloca-se o agregado; 4° coloca-se a manta; 5° e por último insere-se o adubo e a muda (Figura 17).

Figura 16 - Esquema de montagem dos módulos de telhado verde de baixo custo



Fonte: Autores (2025).

O protótipo foi construído acima de uma telha de fibro cimento com uma inclinação de 5%, formando uma área 1m², utilizando uma estrutura feita com bambus (Figura 18) de modo a baratear o custo de produção para o estudo. Foram utilizados 21,7m de bambu, na qual foram cortadas 2 peças de 120 cm e 2 peças de 135 cm

para compor os pilares da estrutura, e para travar a estrutura foram cortadas 5 peças de 135 cm e 4 peças de 245 cm, e realizadas amarrações com arame nas juntas para fixar a estrutura.

Figura 17 - Estrutura de bambu para o telhado verde.



Fonte: Autores (2025).

5.4 Caracterização das camadas da unidade experimental

5.4.1 Camada drenante

Uma alternativa de material para formar a camada drenante adotada ao protótipo de telhado verde modular de baixo custo, de modo a diminuir os custos para a sua implementação, é a utilização dos RCC. Fernandes (2019) apontou que a utilização do RCC possui capacidade de ser implementado em sistemas de cobertura verde segundo os resultados dos ensaios de caracterização realizados pelo autor (Figura 15), podendo ser implementado como material da camada de drenagem da cobertura verde com um volume de vazios equivalente a 43,56%, uma absorção de 13,30% e um peso específico no seu pior cenário (saturado) de 2571 kg/m³. Estes dados mostram que o RCC tem as características necessárias para desempenhar a sua função neste contexto, o que contribui para a sustentabilidade e eficiência do sistema.

Segundo Araújo, Costa e Santos (2023), em relação à presença e à geração de RCC em São Luís/MA, por meio de pesquisas em Ecopontos, áreas destinadas a receber resíduos sólidos produzidos por pequenos produtores, foi registrada uma notável coleta de RCC. Isso porque, em 2020, os Ecopontos de São Luís receberam cerca de 79.928,76 toneladas de resíduos sólidos, dos quais 38.291,92 toneladas foram provenientes de RCC, esse volume mostra a alta produção de resíduos na cidade, fenômeno comum em pequenas obras, reformas e demolições realizadas sem a devida organização.

5.4.2 Filtro

Para garantir o funcionamento adequado e a durabilidade desses sistemas sustentáveis, é necessária uma camada de filtro nos telhados verdes (Figura 16). Para a camada filtrante do protótipo de telhado verde foi escolhida 1 m² da manta geotêxtil SkyGarden, também conhecida como Bidim RT 07, é um não tecido agulhado feito de filamentos contínuos de 100% poliéster.

5.4.3 Substrato vegetal

A ideia foi utilizar para o protótipo uma mistura de adubo e terra vegetal para melhorar o desempenho e a qualidade de vida do jardim e prolongar sua vida útil, com uma altura de 4cm. A combinação de composto e solo superficial fornece um equilíbrio ideal de nutrientes, estrutura e capacidade de retenção de água essenciais para o crescimento saudável das plantas, portanto, o solo superficial sozinho não é recomendado.

5.5.4 Vegetação

Segundo o site Weatherspark (2024), em São Luís/MA, durante a estação chuvosa, o céu fica nublado, enquanto durante a estação seca, o céu fica parcialmente nublado. O clima é quente e opressivo durante todo o ano. As temperaturas geralmente variam de 25 a 32 °C, e raramente ficam abaixo de 23 °C ou acima de 34 °C.

Santos (2009) descreve que a cobertura vegetal do município de São Luís é diversificada, na qual a forma e a altitude do terreno, o tipo de solo, o clima, a proximidade de cursos d'água e a interferência humana no meio ambiente são fatores que afetam a composição florística. As seguintes espécies vegetais são encontradas em São Luís: Floresta Tropical Úmida, Matas de Galeria, Matas de Cocais, Matas Secundárias de Terra Firme ou Capoeira, Matas de Várzea, Manguezais e Dunas e Restinga.

Seguindo os conceitos do autor supracitado, foram selecionadas espécies de plantas capazes de suportar o bioma Cerrado, a fim de atender às características pluviométricas e microclimáticas do município de São Luís/MA. Este bioma é predominante no Estado do Maranhão, cobrindo 64% do território estadual. Para ornamentação do telhado verde foram selecionadas plantas, juntamente com a “Vidal Garden”, que possam resistir ao clima da cidade e a luminosidade de sol pleno, sendo as seguintes espécies:

Tabela 2 - Composição da vegetação do telhado verde

Nome popular	Nome científico	Quantidade
Coromandel	<i>Asystasia gangetica</i>	15
Lutiela	<i>Alternanthera dentata</i>	15

Fonte: Autores (2025).

Os módulos feitos de garrafa pet foram dispostos em cima da telha de fibrocimento, com 6 fileiras de 5 garrafas pet (Figuras 19 e 20), totalizando 30 módulos montados, na qual ficou da seguinte forma:

Figura 18 A - Telhado verde modular de baixo custo



Fonte: Autores (2025).

Figura 18 B - Telhado verde modular de baixo custo



Fonte: Autores (2025).

Para a coleta de água de chuva foi instalado um tubo PVC de 75mm na estrutura, sendo realizado um corte longitudinal na tubulação para a confecção da calha, juntamente com a instalação de um joelho 90° de 75mm. Além disso, também foi utilizado um funil para auxiliar a coleta e o armazenamento da água em um galão de 20 litros (Figura 21).

Figura 19 - sistema de armazenamento da água da chuva



Fonte: Autores (2025).

6 RESULTADOS

6.1 Análise da faixa granulométrica da amostra de RCC

O processo de peneiramento foi conduzido por um período de 5 minutos com o auxílio de um agitador mecânico, conforme estabelecido pela norma. Após a conclusão do ensaio, procedeu-se à pesagem do material retido em cada peneira, permitindo a obtenção dos dados necessários para a construção da curva granulométrica do RCC em estudo (Tabela 3). A análise visual da amostra de RCC salientou que suas partículas são compostas predominantemente por material de tijolos cerâmicos com uma grande parcela de material cimentício de formas e rugosidades variadas.

Tabela 3 - Resultados da análise granulométrica.

Peneira (mm)	Amostra (g)	%Retida (%)	%Acumulada (%)
32	0	0	0
25	96,4	4	4
19	226,5	9,5	13,5
9,5	1521,4	63,7	77,2
4,8	262,4	11,1	88,3
2,4	88,4	3,7	92
Fundo	192	8	100
Total	2390	100	

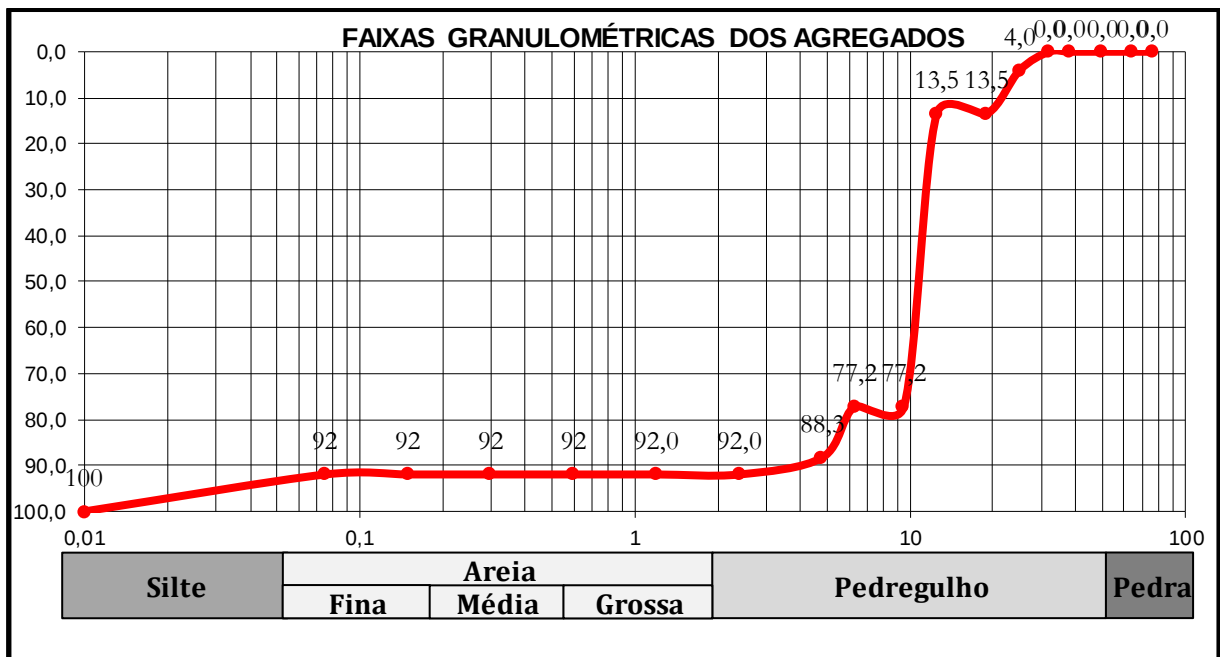
Fonte: Autores (2025).

Segundo o site AC Areia e Pedra (2019), a argila expandida apresenta múltiplas aplicações no âmbito da construção civil, podendo ser empregada em diferentes etapas construtivas, tais como enchimentos leves na composição de concreto e nata de cimento. Além disso, esse material é amplamente utilizado em paisagismo, jardinagem, hidroponia e na implementação de telhados verdes. Conforme destacado pela fonte supracitada, para a execução de telhados verdes, recomenda-se a

utilização de três tipos de argila expandida, classificados de acordo com suas dimensões granulométricas: tipo 1506 (6 a 15 mm), tipo 2215 (15 a 22 mm) e tipo 3222 (22 a 32 mm).

A análise dos dados granulométricos indica que a Dimensão Máxima Característica (DMC) do agregado está na malha de 25 mm, satisfazendo a condição reguladora de retenção cumulativa menor ou igual a 5% em massa. Essa é a dimensão que determina o diâmetro efetivo máximo do material, ilustrado na curva granulométrica do gráfico 1. Verificou-se ainda que essa granulometria apresenta compatibilidade com a argila expandida do tipo 1506, o que indica seu potencial viável para emprego como material constituinte no protótipo de telhado verde modular de baixo custo.

Gráfico 1 - Faixa granulométrica da amostra de RCC



Fonte: Autores (2025).

De acordo com o resultado do ensaio e a geração da faixa granulométrica, foi plausível analisar que a amostra demonstrou uma graduação descontínua, sendo

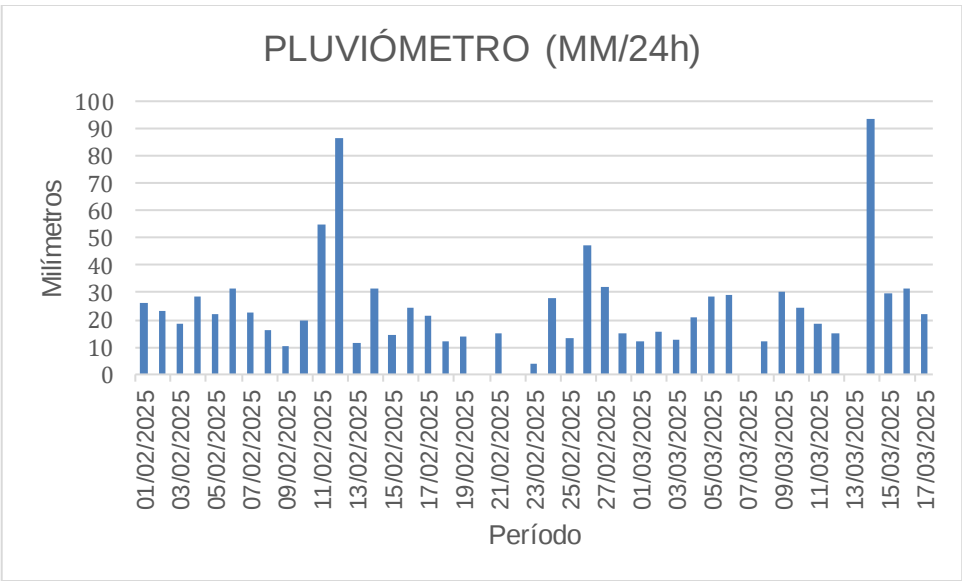
possível observar que houve uma maior concentração entre as peneiras de malha de 19 mm a 9,5 mm. Diante disso, devido a sua caracterização de tamanhos e formas variadas, e também de sua descontinuidade ter sido triturado manualmente, o de material de RCC se apresentou adequado para se utilizar como componente camada drenante como indicado na proposta da pesquisa.

6.2 Análise da Eficiência do Telhado Verde Modular de Baixo Custo

6.2.1 Taxa de Retenção de Água Pluvial

O monitoramento do escoamento pluvial do protótipo foi realizado por meio da medição direta da água armazenada no pluviômetro construído e acoplado à estrutura do telhado verde modular, durante os eventos pluviométricos. Para a correlação dos dados climáticos de precipitação, foram utilizadas informações de precipitação registradas pelo pluviômetro, na qual na análise dos dados se evidenciou a ocorrência de 41 eventos chuvosos no período de 45 dias durante o monitoramento, apresentando também um registro de precipitação máxima de 93,8 mm/24h (Gráfico 2).

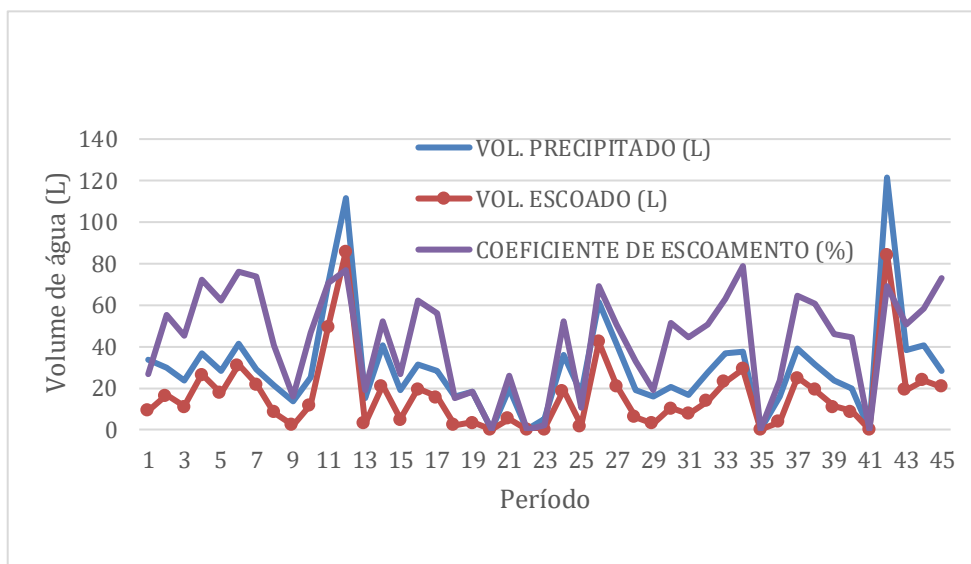
Gráfico 2 - dados registrados pelo pluviômetro



Fonte: Autores (2025).

Conforme ilustrado no gráfico 3, observa-se uma diferença significativa no desempenho hidrológico entre diferentes dias de estudo. O telhado verde demonstrou maior eficiência na retenção de águas pluviais quando ocorreram momentos de pluviosidade abaixo de 25mm/24h, registrando valores de coeficiente de escoamento, por exemplo, de 2,16% e 28,75%, respectivamente. Essa diferença quantitativa do coeficiente de escoamento foi causada pela saturação do solo do módulo de telhado verde, na qual houveram apenas 4 dias desse período de 45 dias do estudo em que não ocorreram episódios de chuva.

Gráfico 3 - Escoamento de águas pluviais do telhado verde



Fonte: Autores (2025).

De acordo com os dados adquiridos relativos ao coeficiente de escoamento superficial durante o período monitorado, foi demonstrado um comportamento variável do sistema do protótipo de telhado verde modular, apresentando variações notáveis em função da intensidade da precipitação. Diante a esse fator, o coeficiente de escoamento médio obtido foi de 47,3%, o que comprova a capacidade do sistema em

reter uma parte significativa das águas pluviais, ao contrário das coberturas tradicionais, que normalmente apresentam coeficientes próximos dos 90-95%. No entanto, perante a esses dados gerados foi possível notar que este desempenho varia consideravelmente consoante a intensidade da precipitação.

Stovin et al. (2012) testaram um protótipo de 3 m² em Sheffield, na Inglaterra, na qual vários eventos de chuva foram examinados pelos autores, na qual foi identificado que o desempenho da retenção foi aprimorado quando todos os eventos de chuva foram considerados, apresentando uma retenção média e mediana de 70% e 91% por evento, e 61% e 62% quando todos os eventos com chuva maior que 2 mm foram incluídos. Isso atingiu um ponto cumulativo de 50,2% quando retido pelo telhado, para a qual isso significaria que, muito possivelmente, os telhados verdes poderiam reduzir o escoamento de água atribuível a eventos de chuva de alta frequência.

Para precipitações mais brandas, com valores inferiores a 20 mm, o sistema apresentou excelente desempenho, com coeficientes de escoamento frequentemente abaixo de 30%. Por exemplo, em 09/02/2025, quando foi registrado uma intensidade pluviométrica de 10,3 mm, o coeficiente de escoamento foi de apenas 21%, mostrando que cerca de quase 80% da água estava sendo retida pelo sistema. Esse comportamento foi previsível porque, com chuvas menos intensas, a camada de drenagem e o substrato têm capacidade suficiente para reter a água antes da saturação. Para os eventos de chuva moderada, entre 20 e 50 mm, houve um aumento gradual do coeficiente de escoamento, que passou a variar entre 40% e 60%. Em 02/01/2025, com um registro pluviométrico de 26 mm, o coeficiente foi de 28,7%, mostrando que, mesmo em situações de chuva mais intensa, o sistema ainda mantinha uma excelente capacidade de retenção.

O desempenho de maior vulnerabilidade foi nos dias em que se registaram eventos de precipitação intensa, com níveis de precipitação superiores a 50 mm. Nestas situações, o coeficiente de escoamento superficial foi frequentemente superior a 70%, como se constatou no dia 14/03/2025, em que 93,8 mm de precipitação produziram um coeficiente de 73,7%. Esta situação evidencia que o sistema atingiu a sua capacidade máxima de retenção em situações de chuvas intensas, o que se repercutiu num elevado aumento do volume de escoamento superficial. Além disso, através de uma análise mais precisa, foi possível observar que no dia 02/11/2025 houve uma precipitação de 54,6 mm gerou um coeficiente de 74,6%, indicando que,

mesmo antes dos eventos mais severos, o sistema já começava a apresentar sinais de saturação.

Comparando com outros protótipos de telhado verde, analisando os estudos de Moura (2023) foi possível observar que dados coletados mostram que o protótipo desenvolvido reduziu efetivamente o escoamento superficial em diferentes cenários de chuva, na qual em eventos de alta precipitação, simulados ou naturais, houve uma redução registrada no pico de fluxo de 33% e 44% em julho e agosto, respectivamente, em comparação com o sistema convencional. O autor supracitado ainda enfatiza que durante a simulação de chuvas controladas nos meses de outubro e novembro, um período de seca natural, a eficiência da retenção de água melhorou significativamente, registrando um atraso no escoamento de 58% e 63%, respectivamente.

Em comparação com outros trabalhos (tabela 5) de investigação realizados em protótipos de telhados verdes tradicionais, que normalmente utilizam argila expandida ou gravilha como camada de drenagem, verifica-se que o protótipo de PET e RCC apresentou o mesmo comportamento relativamente ao coeficiente de escoamento superficial, que normalmente se situam entre 30% e 50% nestes protótipos desenvolvidos.

Tabela 4 - Valores da taxa de escoamento média apresentados pelos estudos selecionados em eventos de precipitação natural.

Autores (ano)	Inclinação	Tempo de monitoramento	Distinção do telhado	Taxa de escoamento média	Local do experimento
Baldessar (2012)	2%	nov. 2011 – fev. 2012	Telhado verde	69,30%	Curitiba - PR
Castro e Goldenfum (2010)	0%	mai./set. 2008 – 8 eventos	TV horizontal com vegetação	63%	Porto Alegre -RS
	15%		TV inclinado com vegetação	25%	
Ferreira (2015)	não informado	dez. 2014/ jan. 2015–5 eventos	Telhado verde	81,70%	Campo Mourão - PR
Martins e Pinto (2016)	1% a 2%	nov. 2015 – 7 eventos	TV garrafa PET-solo-leiva	65%	Santa Maria -RS
			TV brita-solo-leiva	86,59%	
			TV argila expandida-solo-leiva	80,22%	
			Telhado verde 1	58,50%	
			Telhado verde 2	47,30%	
Miller (2014)	3%	dez. 2013/mar. 2014	Telhado verde 3	51,80%	Curitiba -PR
Klein (2017)	2%	jun.2016/ jan. 2017– 35 eventos	Telhado verde 4	41,90%	
			Telhado verde 5	39%	
			Telhado convencional	8%	
			Telhado verde modular baixo	76%	
Vacari (2015)	4%	jan./abr. 2015–19 eventos	Telhado verde modular alto	84%	Florianópolis -SC
			Telhado verde contínuo	65%	
			TV de herbácea	61%	
Vacari (2015)	4%	jan./abr. 2015–19 eventos	TV de consórcio	59%	Cuiabá -MT
			TV de gramínea	46%	

Fonte: Baldessar (2012), Castro e Goldenfum (2010), Ferreira (2015), Martins e Pinto (2016), Miller (2014), Klein (2017), Vacari (2015).

A vantagem do protótipo de telhado verde modular testado é o preço consideravelmente reduzido do material com que é construído, sem diminuir o desempenho hidrológico durante a maioria dos eventos de chuva. No entanto, a informação diz que, para melhorar o desempenho durante condições de chuva intensa, seria necessário implementar modificações no projeto, por exemplo, aprofundando a camada de drenagem ou alterando a sua mistura.

6.2.2 Comparativo com Telhados Convencionais

Por limitações financeiras, não foi possível realizar a construção de um protótipo de telhado convencional para comparar os valores da taxa de escoamento para o estudo. Entretanto, com base em dados consolidados da literatura científica, foi realizada uma análise comparativa entre os resultados obtidos para o telhado verde e os valores típicos de sistemas convencionais.

Em análise dos dados registrados por Pedrosa (2021), quanto ao coeficiente de escoamento do sistema de telhado convencional, após a análise de 4 eventos de chuva forçada foi encontrado um coeficiente de escoamento médio de 98% para o protótipo de sistema convencional. Essa porcentagem de volume escoado pelo sistema ocorre devido a essa cobertura não ser capaz de absorver a água, sendo possível somente escoar toda a água precipitada.

Pedrosa (2021) ainda mostrou em seu estudo que o sistema de telhado verde apresentou uma redução média de 40,65% no volume de escoamento superficial em relação ao sistema de telhado convencional para uma parcela experimental de 0,16 m² e um período experimental de 4 horas. Os resultados também indicam uma relação diretamente proporcional entre os intervalos de tempo entre as incidências de chuva e o desempenho do sistema, com a implicação de que intervalos de tempo maiores entre essas incidências são sinônimos de um aumento na capacidade de retenção de água do telhado verde.

No estudo de Tassi et al. (2014), também foi observado que os telhados verdes extensivos tiveram uma redução no volume de escoamento superficial entre 56% e 75% em comparação com os sistemas de telhado tradicionais. No entanto, essa diferença pode ter sido devida às condições particulares em que a pesquisa foi realizada, já que os testes foram realizados em uma área superior de 6 m² sob

condições climáticas variáveis, pois a observação durou 17 meses, o que incluiu várias estações e flutuações nos parâmetros medidos.

6.3 Viabilidade Econômica: Comparativo de Custos

6.3.1 Custo por m² do Protótipo Modular

Realizou-se uma análise quantitativa dos materiais utilizados no projeto foi preparada considerando suas especificações técnicas e seu valor de mercado como um reflexo da realidade local. Isso é mostrado na Tabela 5, em que a composição exata dos materiais é fornecida juntamente com os custos relativos da construção de 1 m² do protótipo em escala experimental.

Tabela 5 - Materiais utilizados para montagem do telhado verde

Material	Unidade	Preço unitário	Quantidade	Preço total
Bambu	m	R\$ 0,00	21,7	R\$ 0,00
Agregado	L	R\$ 0,00	8	R\$ 0,00
Telha fibrocimento	und	R\$ 26,00	1	R\$ 26,00
Muda	und	R\$ 3,00	30	R\$ 90,00
Manta	m ²	R\$ 29,90	0,8	R\$ 23,92
Arame	m	R\$ 0,71	3	R\$ 2,13
Terra adubada	kg	R\$ 1,00	10	R\$ 10,00
Garrafa PET	und	R\$ 0,00	30	R\$ 0,00
Prego	und	R\$ 0,50	1	R\$ 0,50
vela	und	R\$ 0,50	1	R\$ 0,50
Tubo PVC 75 mm	m	R\$ 13,00	1	R\$ 13,00
Tampa PVC 75 mm	und	R\$ 6,00	1	R\$ 6,00
Galão 20 L	und	R\$ 20,00	1	R\$ 20,00
Funil	und	R\$ 6,00	1	R\$ 6,00
Preço final				R\$198,05

Fonte: Autores (2025).

O protótipo foi inicialmente montado no térreo para fins de estudo e validação do conceito. No entanto, em uma aplicação prática em residências, o sistema deverá

ser instalado sobre um telhado convencional já existente. Essa condição simplifica a execução do projeto, pois elimina a necessidade de incluir no orçamento itens como: estruturas adicionais de apoio ou ajustes de altura; telhas e tubulações para escoamento de água, uma vez que o sistema aproveitará a infraestrutura já presente no local; o garrafão de 20L e o funil, que foram utilizados exclusivamente para a coleta de água e realização de estudos pluviométricos durante a fase experimental.

Considerando essas premissas, o orçamento foi elaborado especificamente para os componentes essenciais do telhado verde, que são: Camada de dreno, Filtro geotêxtil; Substrato: Vegetação: Materiais complementares. Todos esses componentes estão devidamente especificados na Tabela 6, que apresenta suas quantidades e valores unitários.

Tabela 6 - Custo necessário para implementar o protótipo

Material	Unidade	Preço unitário	Quantidade	Preço total
Agregado	L	R\$ 0,00	8	R\$ 0,00
Muda	und	R\$ 3,00	30	R\$ 90,00
Manta	m ²	R\$ 29,90	0,8	R\$ 23,99
Terra adubada	kg	R\$ 1,00	10	R\$ 10,00
Garrafa PET	und	R\$ 0,00	30	R\$ 0,00
Preço final				R\$123,99

Fonte: Autores (2025).

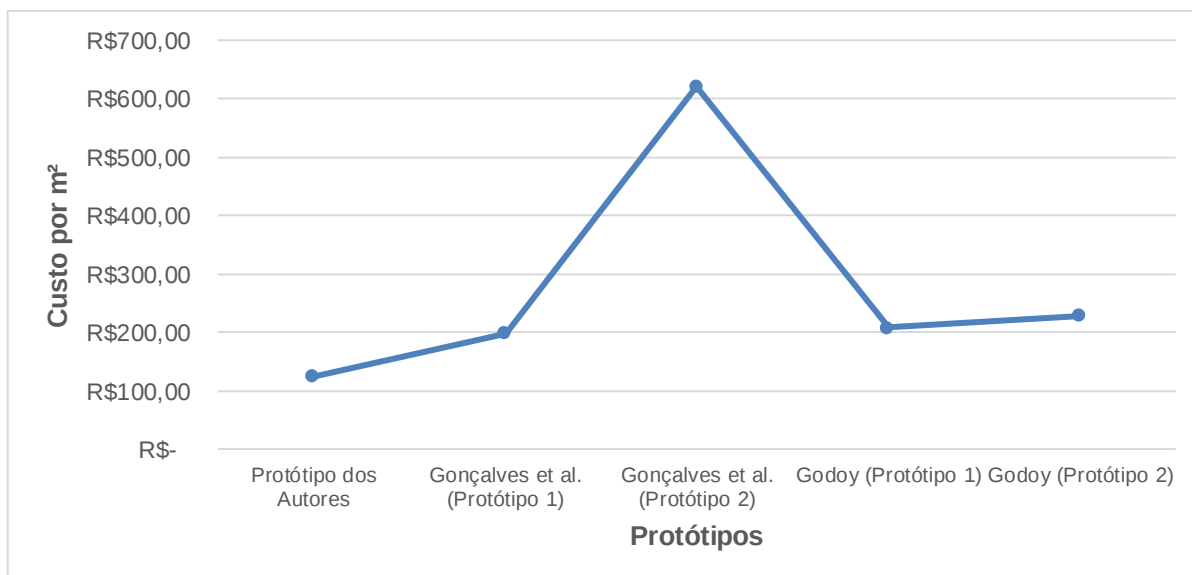
O presente levantamento proporciona uma análise quantitativa precisa dos custos associados à implantação do sistema de telhado verde, considerando exclusivamente os componentes essenciais para sua operacionalidade. Essa abordagem metodológica permite avaliar de forma estruturada e sistemática a viabilidade econômica da solução proposta, assegurando, paralelamente, sua eficiência técnica quando implementada em escala real.

6.3.2 Comparativo com Outros Sistemas de Telhado Verde

Na realização de um comparativo do custo por metro quadrado com estudos de outros autores, observa-se que as variações de valores se mantêm relativamente próximas como demonstrado no gráfico 4. Contudo, é importante considerar que

grande parte dessas pesquisas foi desenvolvida há aproximadamente cinco anos ou mais, período em que o custo de vida no Brasil era significativamente inferior ao atual.

Gráfico 4 - Comparativo de custo de telhados verdes.



Fonte: Organizado pelos autores (2025).

Nos últimos anos, o país enfrentou uma elevação considerável da inflação, impactando diretamente os preços de materiais, mão de obra e serviços, o que gerou aumentos expressivos nos custos gerais do mercado da construção civil. Nesse contexto, alternativas que promovam a redução de despesas tornam-se ainda mais relevantes.

Assim, o sistema de telhado verde modular, utilizando garrafas PET, destaca-se como uma solução não apenas economicamente mais viável, mas também de fácil execução, sendo de baixo custo. Sua adoção possibilita a democratização do uso de telhados verdes, viabilizando sua implementação em empreendimentos de pequeno porte e em comunidades de baixa renda, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental, por meio do reaproveitamento de materiais recicláveis.

6.4 Contribuição para o Manejo de Águas Pluviais

Nos centros urbanos, os telhados podem representar cerca de 50% das superfícies impermeáveis. Portanto, o manejo adequado das águas pluviais nesses

locais é essencial para melhorar a gestão das chuvas. De acordo com Baldessar (2012), a diminuição de áreas verdes reduz a qualidade do ar e a permeabilidade do solo, agravando as enchentes. Segundo o autor, como consequência do crescimento urbano, as cidades precisam expandir suas áreas verdes. Os telhados verdes surgem como uma estratégia eficaz para regiões com alta densidade populacional e urbanização, pois aumentam a superfície permeável, ajudando a controlar enchentes e reduzindo a sobrecarga nos sistemas de drenagem urbana.

O telhado verde modular de baixo custo demonstrou uma contribuição significativa para o manejo sustentável de águas pluviais em áreas urbanas. Durante o período monitorado, o sistema apresentou um coeficiente de escoamento médio de 47,3%, sendo especialmente eficaz em eventos de chuva leve (<25 mm/24h), onde reteve até 80% da água pluvial. Em comparação com telhados convencionais - que escoam em média 90-95% da água - o protótipo reduziu o volume direcionado à drenagem urbana em 40,65% a 75%, conforme estudos comparativos.

6.4.1 Redução do Escoamento Superficial

Apesar de apresentar maior escoamento (70-75%) durante chuvas intensas (>50 mm), ainda assim mitigou significativamente os picos de fluxo em 33-44%. Economicamente, a solução se mostrou viável, com custo de implantação baixo ao utilizar materiais recicláveis e resíduos de construção civil. Além dos benefícios hidrológicos, o sistema contribui para a redução de ilhas de calor urbano, melhoria da qualidade do ar e incremento da biodiversidade local. Os resultados indicam que esta tecnologia, quando implementada em escala, se apresenta como uma alternativa eficaz para complementar a infraestrutura de drenagem urbana, especialmente em cidades com restrições orçamentárias e alta impermeabilização do solo. Para otimizar seu desempenho em eventos extremos, recomenda-se o aprofundamento da camada drenante ou ajustes na composição do substrato.

O sistema funciona como uma espécie de esponja natural que absorve e armazena parte significativa da água da chuva. Dessa forma, há uma diminuição no volume total e na velocidade com que a água escoar para as redes de drenagem. Além disso, o telhado verde promove a evapotranspiração, processo pelo qual parte da água retida é devolvida à atmosfera, reduzindo ainda mais a quantidade de água que atinge o solo. Esse tipo de cobertura também melhora a qualidade da água ao filtrar

poluentes e partículas presentes na chuva. Assim, os telhados verdes representam uma solução sustentável e multifuncional, que alia benefícios ambientais, como a mitigação de enchentes, à promoção de um ambiente urbano mais saudável e equilibrado.

7 CONCLUSÃO

Por meio da construção e análise de um protótipo utilizando garrafas PET e RCC como elementos estruturais e de drenagem, a pesquisa demonstrou que é possível conciliar inovação técnica com baixo custo e responsabilidade ambiental em proposta acessível às comunidades urbanas.

A análise da faixa granulométrica da amostra do RCC indicou que os materiais escolhidos possuíam características adequadas para a formação da camada de drenagem do sistema, com volume de poros e captação de acordo com os requisitos hidráulicos exigidos pelos telhados vegetados. A construção do protótipo com área de superfície de 1 m², juntamente com o monitoramento da precipitação durante a estação chuvosa, permitiu a determinação da taxa média de retenção de água da chuva de 52,7% para eventos de chuva de intensidade baixa a moderada. O resultado indica seu alto potencial em termos de redução do escoamento superficial e controle de inundações urbanas.

Além disso, as comparações com os sistemas convencionais do novo telhado verde revelaram uma redução significativa nos custos por metro quadrado, com custos inferiores aos dos sistemas comerciais. Isso valida o uso do modelo em regiões economicamente desfavorecidas, onde a acessibilidade dificulta a implementação de tecnologias sustentáveis. O sistema modular sugerido pesa menos do que os telhados verdes intensivos, já que o peso menor minimiza a pressão sobre a estrutura do edifício e permite maior flexibilidade para reformar edifícios existentes.

Do ponto de vista funcional, o protótipo atendeu plenamente às expectativas de desempenho e durabilidade da drenagem, considerando a baixa pegada ambiental dos materiais empregados localmente. A eficácia técnica da solução, aliada à sua relação custo-benefício, indica que a replicabilidade desse conceito pode ser incentivada por políticas públicas para a promoção de construções sustentáveis, principalmente em cidades tropicais com chuvas intensas, como São Luís.

Esta pesquisa também indicou como é fundamental integrar políticas públicas, regulamentações ambientais e práticas de construção aprimoradas para abordar os problemas da cidade. Considerar a legislação e os regulamentos de sustentabilidade urbana também indica a necessidade de promover projetos que integrem engenharia civil, gerenciamento de resíduos e adaptação às mudanças climáticas. Com base na Resolução CONAMA 307/2002, o uso de RCC como agregado reciclado é uma forma

eficaz de recuperar esses resíduos sólidos, visto que ele segue os princípios de minimização, reutilização e reciclagem na construção.

8 REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 16014: Substrato para plantas: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ANVERSA, G. B. **Telhado Verde – Vantagens e desvantagens**. 3 jan. 2020. Disponível em: <https://www.sienge.com.br/blog/telhado-verde/>. Acesso em: 4 fev. 2024.

ARAÚJO, J. V. C.; COSTA, D. A.; SANTOS, M. L. L. O. Ecopontos: uma análise da gestão de resíduos da construção civil na cidade de São Luís - MA. **Recima21**, v. 4, n. 6, p. 24, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i6.3466>. Acesso em: 19 out. 2024.

ARAÚJO, S. R. **As Funções dos Telhados Verdes no Meio Urbano, na Gestão e no Planejamento de Recursos Hídricos**. 2007. 28 p. Dissertação de graduação — Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007.
BERNDTSSON, J. C. **Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review**. *Ecological Engineering*, v. 36, n. 4, p. 351-360, 2010.

BALDESSAR, Sílvia Maria Nogueira. **Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BLANCO, K. C. **Coberturas verdes: aplicação como estratégia de mitigação de impacto ambiental em Brasília**. 2012. 70 p. Dissertação de pós-graduação — Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2012.

BALLISTA, L.P. **Avaliação de algumas propriedades de concretos estruturais com agregados graúdos reciclados modificados com látex estireno-butadieno**. 152p. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BREARS, R. C. **Green Roofs: A Sustainable Solution for Urban Development**. 8 nov. 2023. Imagem. Disponível em: <https://medium.com/mark-and-focus/green-roofs-a-sustainable-solution-for-urban-development-f639a1a39dc1>. Acesso em: 12 fev. 2025.

CASTRO, Andréa Souza; GOLDENFUM; Joel Avruch. **Uso de telhados verdes no controle quantitativo do escoamento superficial urbano**. *Revista Atitude*. 2010, Porto Alegre, Ano IV, n. 7, p. 75 –81, jan./ jun. 2010.

CARVALHO, E. S. **O telhado verde de Le Corbusier**. 10 jul. 2013. Imagem. Disponível em: <https://historiaearquitetura.blogspot.com/2013/10/o-telhado-verde-de-le-corbusier.html>.

CLIMA, condições meteorológicas e temperatura média por mês de São Luís (Maranhão, Brasil) - Weatherspark. Disponível em:

<https://pt.weatherspark.com/y/30549/Clima-característico-em-São-Luís-Maranhão-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 14 jul. 2024.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO CONAMA nº 307, de 5 de julho. 2002.** Publicada no DOU no 136, de 17 de julho de 2002, Seção 1, páginas 95-96. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/36_09102008030504.pdf. Acesso em: 20 dez. 2018.

CONHEÇA os benefícios do telhado verde | Pensamento Verde. 21 jul. 2014. Disponível em: <https://www.pensamentoverde.com.br/arquitetura-verde/conheca-os-beneficios-telhado-verde/>. Acesso em: 5 fev. 2024.

CONHEÇA as leis sobre Telhado Verde em vigor no Brasil. 9 abr. 2019. Disponível em: <https://www.verticalgarden.com.br/post/conheca-as-leis-sobre-telhado-verde-em-vigor-no-brasil>. Acesso em: 7 abr. 2024.

CORRENT, L.; LEHMANN, P. Telhado verde: da babilônia aos dias atuais. **Revista Científica Semana Acadêmica**, p. 20. Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_telhado_verde.pdf. Acesso em: 4 fev. 2024.

DARKON. **MANTA GEOTÊXTIL – Hidroasfalto, Impermeabilizantes, Fibras para Concreto – Porto Alegre.** Imagem. Disponível em: <https://akronrs.com.br/produto/manta-geotextil/>. Acesso em: 19 maio 2025.

ECOTELHADO. **O que é manta geotêxtil e qual sua funcionalidade.** 7 abr. 2023. Disponível em: <https://ecotelhado.com/blog/o-que-e-manta-geotextil-e-qual-sua-funcionalidade/#:~:text=Por%20terem%20elevada%20capacidade%20de,oferecidos%20pela%20Ecotelhado%20é%20importante>. Acesso em: 13 jul. 2024.

EFCT CURSOS. **Como calcular o coeficiente de escoamento superficial?** 3 fev. 2021. Disponível em: <https://www.efct-cursos.com.br/post/coeficiente-de-escoamento-superficial#:~:text=C%20=%20Volume%20total%20escoado/Volume,será%20sempre%20abaixo%20de%201>. Acesso em: 7 jul. 2025.

FENOLLÓS, J. L. M. **Os jardins suspensos de Babilônia.** 3 abr. 2023. Imagem. Disponível em: https://www.nationalgeographic.pt/historia/os-jardins-suspensos-babilonia_3665. Acesso em: 19 maio 2025.

FERNANDES, M. M. A. **Análise de um protótipo de telhado verde extensivo no sistema inclinado.** 2019. 84 p. Dissertação de graduação — Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.

FERREIRA, Lucas Augusto Prudente. **Análise comparativa do atraso no escoamento, e da quantidade e qualidade de água pluvial escoada em telhado verde extensivo e de fibrocimento.** 2015. 44 f. Trabalho de conclusão de curso — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

FILHO, W. M. M. **Estudo comparativo de composições de preço unitário dos sistemas sinapi-caixa econômica federal e tupo-pini**. 2016. 56 p. Dissertação de graduação — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

FREITAS, M. F. M. **Telhado verde**: Uma análise comparativa de custos e vantagens em relação aos telhados convencionais. 2013. 57f. Diplomação Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17364/2/CT_CECONS_II_2012_01.pdf Acesso em: 11 fev 2024.

GODOY, A. C. L. **Avaliação dos métodos construtivos de telhado verde e verificação da viabilidade técnica na utilização em edificações de baixa renda construídas em mutirão**. 2017. 78 p. Dissertação de graduação — Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2017.

GONÇALVES, E. D. *et al.* ANÁLISE EXPERIMENTAL E CUSTOS DE TELHADOS VERDES COMERCIAIS E FABRICADOS COM GARRAFAS PET PARA REDUÇÃO DE CHEIAS URBANAS NA AMAZÔNIA. **MIX Sustentável**, v. 7, n. 2, p. 57-66, 19 abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.mix2021.v7.n2.57-66>. Acesso em: 7 ago. 2025.

GUARULHOS. Lei municipal nº 5617, de 9 de novembro de 2000. **Código de Obras do Município de Guarulhos**. Apêndice B: detenção em lotes: método não convencional. Guarulhos, 29 jul. 2001.

HOFFART, L. **Little sod house on the prairie**. 16 nov. 2019. Imagem. Disponível em: <https://nuscimagazine.com/little-sod-house-on-the-prairie-1980d23acea1/>. Acesso em: 19 maio 2025.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Dissertação (Livre Docência) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KLEIN, Lais de Bortoli. **Controle qualitativo e quantitativo do escoamento pluvial em diferentes tipos de coberturas**. 2017. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

MAGALHÃES, G. **Os maiores telhados verdes do Brasil e os benefícios que promovem**. 3 jun. 2022. Imagem. Disponível em: <https://revistacasaedjardim.globo.com/Casa-e-Jardim/Sustentabilidade/noticia/2022/06/os-maiores-telhados-verdes-do-brasil-e-os-beneficios-que-promovem.html>. Acesso em: 19 maio 2025.

MARTINS, Larissa Schwengber; PINTO, Juliane dos Santos. Avaliação qualitativa de telhado verde extensivo em escala piloto. **Disciplinarum Scientia**. Série: Naturais e Tecnológicas, Santa Maria, v. 17, n. 2, p. 245-257, 2016.

MARTINSON, D. B.; THOMAS, T. Quantifying the first-flush phenomenon: effects of first-flush on water yield and quality. **14th International Rainwater Catchment Systems Conference**, p. 10, ago. 2009.

MOURA, A. Q. L. **HIDROLOGIA E HIDRÁULICA DO ESCOAMENTO DE UM TELHADO VERDE EM AMBIENTE TROPICAL SOB CHUVA NATURAL E SIMULADA**. 2023. 60 p. Dissertação de mestrado — Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2023.

MOTTA, L. A. **Análise de viabilidade econômica da adoção de soluções energéticas de menor impacto**: estudo de caso em um condomínio horizontal na cidade de Londrina. 2014. 57 p. Dissertação de graduação — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

MOURA, C. A. **Análise térmica de coberturas verdes aplicadas em contêineres**. 2019. 191 p. Dissertação de mestrado — Centro Universitário Fei, São Bernardo do Campo, 2019.

MILLER, Ana Priscilla Romero Rodrigues. **Análise do comportamento de substrato para retenção de água pluvial para coberturas verdes extensivas em Curitiba –PR**. 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

NETO, E. G. C. *et al.* TELHADO VERDE: ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA A DRENAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL. **MIX Sustentável**, v. 7, n. 2, p. 125-136, 19 abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.mix2021.v7.n2.125-136>. Acesso em: 29 maio 2025.

NUNES, C. **6 exemplos de telhados verdes em Chicago**. 22 ago. 2015. Imagem. Disponível em: <https://sustentarqui.com.br/6-exemplos-de-telhados-verdes-em-chicago/>. Acesso em: 19 maio 2025.

OLIVEIRA, P. T.; JÚNIOR, R. F. S. **Aspectos ambientais da usina de reciclagem de resíduos de construção civil e demolição: avaliação empírica dos impactos ambientais negativos no solo da usina de reciclagem de resíduos de construção civil e demolição**. 2013. 60 p. Dissertação de graduação — Universidade Federal Da Grande Dourados, Dourados, 2013.

OLSEN, N. **Telhados verdes podem captar água da chuva e evitar enchentes - CicloVivo**. 12 fev. 2020. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/arq-urb/arquitetura/telhados-verdes-podem-captar-agua-da-chuva-e-evitar-enchentes/>. Acesso em: 11 fev. 2024.

PAZ, E.; NUH, G. S. **Telhado verde: 5 vantagens e curiosidades**. 4 abr. 2022. Disponível em: <https://www.ufsm.br/midias/arco/telhado-verde-vantagens-curiosidades>. Acesso em: 4 fev. 2024.

PALHA, P. Neoturf, Empresa portuguesa especializada na instalação de coberturas verdes, 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ob63HAZTHI4>. Acesso em 01 mai. 2025.

PBMC, 2016: Mudanças Climáticas e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Ribeiro, S.K., Santos, A.S. (Eds.)]. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 116p. ISBN: 978-85-285-0344-9.

PEDROSA, I. S. **Comparativo entre os coeficientes de escoamento de um telhado convencional e um telhado verde**. 2021. 36 p. Dissertação de graduação — Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde, Rio Verde, 2021.

PINHEIRO, J. M.; SANTOS, I. P. F. Mudanças climáticas no Maranhão: evolução, tendências e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 37, p. 21-47, 3 jul. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.55761/abclima.v37i21.19596>. Acesso em: 5 ago. 2025.

PINTO, T.P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1986.

QUINTELLA, M. T. A Origem dos Telhados Verdes. *In*: TELHADOS Criativos. 14 mar. 2012. Disponível em: <https://telhadosciativos.blogspot.com/2012/03/origem-dos-telhados-verdes.html>. Acesso em: 5 fev. 2024.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources Conservation & Recycling**, v. 50, p. 71-81, 2017.

REDA, A. L. L.; DARAIA, P. S. Telhados verdes: estudo quantitativo de eficácia técnica e econômica. **XVII Safety, Health and Environment World Congress**, p. 5, 2017. Disponível em: <https://doi.org/http10.14684/SHEWC.17.2017.35-39>. Acesso em: 11 fev. 2024.

ROCHA, Sérgio. **Eficiência energética e telhados verdes**. 28 fev. 2011. Disponível em: <https://institutocidadejardim.wordpress.com/2011/02/28/eficiencia-energetica-e-telhados-verdes/>. Acesso em: 18 fev. 2024.

SANTOS, L. E. N. **CARACTERIZAÇÃO SÓCIO-AMBIENTAL DE SÃO LUÍS-MA**. 2009. Disponível em: https://saoluis.ma.gov.br/midias/anexos/2241_2228_caracterizacao_socioambiental_de_sao_luis.pdf. Acesso em: 7 set. 2024.

SAVI, A. D. **Telhados verdes**: análise comparativa de custo com sistemas tradicionais de cobertura. 2012. 128 p. Dissertação de graduação — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SECOVI. **Água de chuva: econômica e ecológica**. SECOVI – Sindicato da Habitação do RJ. Rio de Janeiro, 18 fev. 2004. Disponível em: < <http://www.secovirio.com.br/> >. Acesso em: 25 mai. 2007.

SILVA, N. C. **"telhado verde: sistema construtivo de maior eficiência e menor impacto ambiental"**. 2011. 63 p. Dissertação de graduação — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

TELHADOS Verdes. Disponível em: <https://www.arquidicas.com.br/telhados-verdes/>. Acesso em: 4 fev. 2024.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. da S.; PICCILLI, D. G. A.; PERSCH, C. G. **Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 139-154, jan./mar. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

TELHADOS verdes na habitação de interesse social. **Congresso Internacional Sustentabilidade e Habitação de Interesse Social**, p. 6, maio 2010.

TISAKA, M. **Orçamento na construção civil: consultoria, projeto e execução**. São Paulo: Pini, 2007. 367 p.

VACARI, Thaisa Camila. **Caracterização da qualidade da água pluvial retida em módulos experimentais de telhados verdes e o seu estudo como alternativa tecnológica para redução do volume da água pluvial escoada**. 2015. 66 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) —Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2015

VILELA, S. **"Telhados verdes": pequenos pulmões para grandes cidades – DW – 12/11/2005**. 12 nov. 2005. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/telhados-verdes-pequenos-pulmões-para-grandes-cidades/a-1772334>. Acesso em: 21 out. 2024.

ZIGLIOLI, E. **Influência da utilização de telhados verdes na eficiência energética de residências unifamiliares a partir do método graus-dia no município de foz do iguaçu/pr**. 2017. 55 p. Trabalho de conclusão de curso — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/12608>. Acesso em: 18 fev. 2024.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B. The role of extensive green roofs in sustainable development. **Hort Science**, v. 41, n. 5, p. 1276-1285, 2006.

WILLES, Jorge Alex. **tecnologias em telhados verdes extensivos: meios de cultura, caracterização hidrológica e sustentabilidade do sistema**. 2014. 70 p. Dissertação de doutorado — Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

PAULA, M. M.; PRADO, F. L. S. Comparação da Estrutura Necessária para a Implantação de um Telhado Verde em alternativa ao Convencional. p. 16, 2019. <https://www.canalagricola.com.br/mangueira-santeno-1>